

# Le changement de paradigme de l'évolution biologique: du darwinisme a une nouvelle synthèse conceptuelle élargie

David L. Espeset

Recibido 24/10/2022

[david\\_espeset@yahoo.fr](mailto:david_espeset@yahoo.fr)

## Resumen

El darwinismo, especialmente en la forma de la síntesis moderna, es una de las teorías más influyentes en la comunidad científica internacional. Sin embargo, esta interpretación del mecanismo evolutivo, presentado a la manera de una doctrina intangible e indiscutible, le da un estatus de ortodoxia, incluso de ideología. Además, durante muchos años, un número creciente de investigadores piden un camino más allá del darwinismo mediante la adopción de un enfoque sistémico y una visión menos enfocada, más abierta y realista, que conduzca a una profunda redefinición de los conceptos evolutivos fundamentales. De hecho, el descubrimiento de mecanismos naturales de ingeniería genética muestra que las células vivas tienen la capacidad de insertar y reestructurar información dentro de su propio material genético, a diferentes escalas, incluso a nivel genómico, y así producir innovaciones que son significativas desde un punto de vista evolutivo (cooperatividad, redundancia, rehabilitación). El cambio de paradigma provocado por esta perspectiva teleológica sobre el funcionamiento de los organismos vivos podría tomar la escala de una revolución científica.

**Palabras clave:** darwinismo, síntesis moderna, ingeniería genética natural, innovaciones evolutivas, post-darwinismo, teleología.

## Abstract

### The Paradigm Shift in Biological Evolution

Darwinism, especially in the form of the Modern Synthesis, has become one of the most influential theories in the worldwide scientific community. However, due to its often dogmatic interpretation, it is more and more orthodoxical. An increasing number of scientists have come to criticise Darwinism and go beyond it with a systemic approach and an expanded vision of the evolutionary process. As a matter of fact, the discovery of natural genetic engineering mechanisms shows that living cells are able to rewrite their own genetic material at the genomic level, thus leading to evolutionary innovations. This teleological standpoint triggers a paradigm shift that could turn out to be a genuine scientific revolution.

**Key words:** Darwinism, Modern Synthesis, Natural genetic engineering, Evolutionary innovations, Post-Darwinism, Teleology.



# Le changement de paradigme de l'évolution biologique: du darwinisme a une nouvelle synthèse conceptuelle élargie

David L. Espeset

Recibido 24/10/2022

[david\\_espeset@yahoo.fr](mailto:david_espeset@yahoo.fr)

## § 1. Prologue: paradigmes et révolutions scientifiques

### 1. 1. La notion de paradigme scientifique

Patrick Juignet<sup>1</sup> rappelle que Thomas Kuhn introduisit la notion de «paradigme» scientifique, défini comme « des résultats scientifiques universellement reconnus et qui, pendant un certain laps de temps, ont fourni des questions types et des solutions types à une communauté de chercheurs »<sup>23</sup>. « Les paradigmes donnent forme à la recherche scientifique [...] informant les scientifiques sur les objets présents, ou non, dans la nature, et sur leur façon de se comporter. [...] Par les théories qu'ils représentent, les paradigmes s'avèrent être constitutifs de l'investigation scientifique. [...] Ainsi, en assimilant un paradigme, les scientifiques acquièrent simultanément une théorie, une méthode et des valeurs, qui forment habituellement un ensemble cohérent [...] qui régit les critères de validité à la fois des problématiques posées et des solutions proposées »<sup>4</sup>.

157

eikasía  
N.º 112  
Enero, 2023

<sup>1</sup> Juignet, *Les paradigmes scientifiques selon Thomas Kuhn* (2015).

<sup>2</sup> « These I take to be universally recognized scientific achievements that for a time provide model problems and solutions to a community of practitioners » (Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 1970, p. viii).

<sup>3</sup> Lorsque la traduction française des textes en anglais n'est pas disponible, la traduction et parfois l'adaptation proposées sont personnelles.

<sup>4</sup> « [...] paradigms give form to the scientific life [...] by telling the scientist about the entities that nature does and does not contain and about the ways in which those entities behave. [...] Through the theories they embody, paradigms prove to be constitutive of the research activity. [...] In learning a paradigm the scientist acquires theory, methods, and standards together, usually in an inextricable mixture [...] determining the legitimacy both of problems and of proposed solutions » (*ibid.*, p. 109).

Juignet précise que « [l]orsqu'un paradigme est établi, on entre dans un régime de “science normale”, selon le terme de Thomas Kuhn. La communauté scientifique adhère au paradigme et les recherches et l'enseignement se meuvent à l'intérieur du cadre épistémologique formé par ce paradigme. [...] Le travail scientifique devient, dans ce cadre d'une science normalisée, un travail d'ajustement, de mise au point et de précision du paradigme »<sup>5</sup>. « Dans toutes les disciplines, l'histoire montre une volonté de poursuivre et de répéter le paradigme qui a été jugé valide à un moment donné. C'est légitime et utile, car il se produit ainsi une synthèse intégrative [...]. Mais, cela a pour inconvénient une dogmatisation<sup>6</sup> qui, à un certain moment, devient préjudiciable à l'avancée des recherches »<sup>7</sup>.

## 1. 2. Résistance au changement et néophobie intellectuelle

C'est un aspect fondamental de la psychologie humaine : nous avons, à divers degrés, du mal à accepter de changer nos habitudes, en particulier s'il s'agit de notre façon de penser, car cela oblige à «sortir de sa zone de confort» mentale ou intellectuelle – et cet aspect est tout aussi valable même pour les esprits scientifiques les plus brillants. A ce sujet, Kuhn parle de «résistance au changement de paradigme» (*resistance to paradigm change*<sup>8</sup>), et il insiste : « En sciences, les nouveautés ne se révèlent que difficilement, ce qui se traduit par une certaine réticence, dans un contexte d'expectative »<sup>9</sup> – ce qui selon lui permet de « commencer à comprendre pourquoi la science “normale”, vue comme une activité qui ne porte pas sur la recherche de découvertes innovantes et aurait même tendance à les faire disparaître d'entrée de jeu, pourrait néanmoins s'avérer très efficace pour susciter l'apparition de telles nouveautés »<sup>10</sup>. Au

<sup>5</sup> Juignet, *Les paradigmes scientifiques selon Thomas Kuhn* (op. cit.).

<sup>6</sup> Je développerai plus loin l'idée qu'une telle dogmatisation du savoir représente l'un des points centraux des critiques envers le darwinisme.

<sup>7</sup> Juignet, *Les paradigmes scientifiques selon Thomas Kuhn* (op. cit.).

<sup>8</sup> Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* (op. cit., p. 64).

<sup>9</sup> « In science, [...] novelty emerges only with difficulty, manifested by resistance, against a background provided by expectation » (ibid., p. 64).

<sup>10</sup> « [...] we can at last begin to see why normal science, a pursuit not directed to novelties and tending at first to suppress them, should nevertheless be so effective in causing them to arise » (ibid., p. 64).

sujet de cette attitude, Werner Callebaut parle de « néophobie intellectuelle » (*intellectual neophobia*<sup>11</sup>).

### 1. 3. D'un changement de paradigme à une révolution scientifique

Lorsqu'un ancien paradigme est abandonné au profit d'un autre, on a affaire à une révolution scientifique. Comme l'indique Kühn, « les révolutions scientifiques se présentent sous la forme d'étapes de changement non-cumulatif, au cours desquelles un ancien paradigme est remplacé, en partie ou en totalité, par un nouveau paradigme incompatible avec le premier »<sup>12</sup>. Plus précisément, « les révolutions scientifiques sont déclenchées par la prise de conscience grandissante qu'un paradigme en vigueur, qui auparavant avait ouvert la voie pour expliquer de façon efficace une facette particulière de la nature, s'avère n'être plus fonctionnel dans cette perspective »<sup>13</sup>. De mon point de vue, c'est exactement ce qui est en train de se passer par rapport au paradigme darwinien.

## § 2. Introduction: de la pensée évolutionniste au darwinisme

### 2. 1. Émergence de la pensée scientifique

On peut penser que l'une des caractéristiques fondamentales de l'être humain est une forte propension à s'interroger sur l'origine et le fonctionnement du monde. Une étape importante dans le développement de la pensée humaine fut de limiter la recherche de l'explication des phénomènes naturels à l'intérieur même de la nature : ainsi est apparue la méthode scientifique, grâce à des philosophes grecs tels que Thalès

<sup>11</sup> Callebaut, *The dialectics of dis/unity in the evolutionary synthesis and its extensions* (2010, p. 458).

<sup>12</sup> « [...] scientific revolutions are here taken to be those non-cumulative developmental episodes in which an older paradigm is replaced in whole or in part by an incompatible new one » (Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, op. cit., p. 92).

<sup>13</sup> « [...] scientific revolutions are inaugurated by a growing sense [...] that an existing paradigm has ceased to function adequately in the exploration of an aspect of nature to which that paradigm itself had previously led the way » (*ibid.*, p. 92).

de Milet (env. 624-547 av. J.-C.), Anaxagore (env 500-428 av. J.-C.) ou encore Anaximandre de Milet (610-546 av. J.-C.)<sup>14</sup>.

La compréhension du fonctionnement du monde est passée, comme le précise Arturo Quirantes<sup>15</sup>, par l'observation de phénomènes naturels récurrents et réguliers : cycles nycthémeraux, cycles saisonniers, etc. – d'où l'idée que la nature doit être régie par des règles. Ainsi, la reconstitution progressive de l'histoire du Cosmos est rendue possible par le fait que, dans l'Univers, les choses évoluent en suivant des lois qui peuvent être mises en évidence<sup>16</sup>.

## 2. 2. Une brève histoire de la pensée évolutionniste

### 2. 2. 1. De l'Antiquité au Siècle des Lumières

L'idée d'un changement biologique au cours du temps (par opposition au fixisme) remonte à l'Antiquité : en Grèce, chez Anaximandre de Milet et Empédocle (490-435 av. J.-C.) ; en Chine, chez Zhuāng Zhōu (4e siècle av. J.-C.) ; en Italie, chez Lucrèce (1er siècle av. J.-C.) et, plus tard, Augustin d'Hippone (354-430). Au Moyen-Âge, ces idées sont développées en Mésopotamie, chez Al-Jahiz (776-868), en Perse chez Masoudi (930-994) et Nasir ad-Din at-Tusi (1201-1274). Masoudi peut être considéré comme le premier "sélectionniste", car il propose la toute première explication faisant intervenir la sélection naturelle – neuf siècles avant Darwin. Quant à Nasir ad-Din at-Tusi, peut-être le premier «adaptationniste», on lui attribue le lien entre sélection naturelle, conditions environnementales et adaptation, six siècles avant Darwin. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, en France, Maupertuis (1698-1759) peut-être considéré comme le premier évolutionniste, tant son explication de l'accumulation de modifications fortuites menant à des formes nouvelles, dont seules celles qui sont ordonnées et qui satisfont aux besoins des organismes se maintiennent, et menant à terme à la formation de nouvelles espèces, semble, dès 1754, anticiper la théorie de Darwin (sans faire intervenir la sélection naturelle, toutefois ; *Wikipédia*)<sup>17</sup>.

<sup>14</sup> Arturo Quirantes, *L'espace-temps quantique* (2016 ; introduction par Hubert Reeves, p. 5).

<sup>15</sup> *Ibid.*, p. 15.

<sup>16</sup> *Ibid.*, p. 9.

<sup>17</sup> *Histoire de la pensée évolutionniste* (Wikipédia).

### 2. 2. 2. La pensée évolutionniste moderne

C'est donc au XVIII<sup>e</sup> siècle que la pensée évolutionniste moderne prend son essor:

- Benoit de Maillet (1656-1738) propose, dès 1720, l'une des premières visions transformistes de l'époque moderne. Notamment, Maillet parle d'une «sortie des eaux» d'animaux aquatiques s'étant alors «métamorphosés» en formes terrestres;
- Chez Buffon (1707-1788), précurseur du transformisme, les facteurs environnementaux peuvent être à l'origine de l'apparition de variétés au sein des espèces ; il fait intervenir les notions d'ancêtre commun et de relations de parenté;
- Chez James Burnett (1714-1799), les espèces sont capables de s'adapter pour survivre;
- Erasmus Darwin (1731-1802) s'intéresse à l'évolution de la vie;
- William Charles Wells (1757-1817) reconnaît le principe de sélection naturelle;
- Pierre-Jean-Georges Cabanis (1757-1808) propose en 1802 un transformisme du genre de celui de Lamarck, faisant intervenir l'action conjointe des conditions environnementales et de modifications fortuites menant à des changements transmissibles à la descendance;
- Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) est un des premiers naturalistes à avoir supposé la nécessité théorique<sup>18</sup> de l'évolution des êtres vivants, leur diversification ou spécialisation s'opérant par adaptation de leur comportement ou de leur forme ou de leur organisation aux circonstances de leur milieu de vie ; il développe aussi la notion d'ascendance commune;
- Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844), défenseur du transformisme, envisage une action lente et longue du milieu sur la modification des espèces, dans la lignée des idées de Lamarck, mais sans y adhérer complètement toutefois.

### 2. 2. 3. Le lamarckisme

L'hérédité ou transmission des caractères acquis, souvent appelée «lamarckisme»<sup>19</sup>, remonte en fait à Aristote. Toutefois, et contrairement à la «légende», Lamarck n'a

<sup>18</sup> Cette nécessité théorique sera ensuite perdue de vue par le darwinisme.

<sup>19</sup> Le terme «lamarckisme», trop souvent réduit à une vision simpliste de l'hérédité de caractères acquis, peut en fait recouvrir des concepts différents. Insistant sur le fait qu'une hérédité de type lamarckien

jamais formulé d'hypothèse, ni proposé de mécanisme, ni même développé de théorie à ce sujet; par contre, Darwin, lui, fut l'un des rares chercheurs à travailler sur cette idée, qui apparaît dès *L'Origine des Espèces* en 1859. On peut penser que c'est le recours à une pensée dichotomique simplificatrice qui est à l'origine de la séparation, finalement artificielle, entre «caractères acquis lamarckiens» et «sélection naturelle darwinienne»<sup>20</sup>, qui pourraient être rapprochés, respectivement, de Baldwin et de Maupertuis. Néanmoins, l'expression *hérédité des caractères acquis* ne peut être attribuée ni à Lamarck, ni à Darwin, car la notion d'hérédité n'existait pas telle quelle à cette époque.

#### 2. 2. 4. Le darwinisme

Comme le précisent Massimo Pigliucci et Gerd Müller, l'événement fondateur du darwinisme peut être considéré comme étant la publication de l'article de Charles Darwin et Alfred Russell Wallace, adressé à la Société linnéenne en 1858<sup>21</sup>. Le concept fondamental reposait sur deux idées de base : l'ascendance commune de tous les organismes vivants, et l'affirmation, assez péremptoire, que la sélection naturelle, conçue comme la seule force évolutive de type loi naturelle, était le principal agent du changement évolutif, ainsi que le seul qui puisse mener à l'adaptation<sup>22</sup>. Ces deux notions, pas du tout nouvelles, sont alors rendues extrêmement populaires par l'œuvre de Darwin – aux dépens d'autres idées concurrentes<sup>23</sup>.

L'idée de l'ascendance commune fut rapidement acceptée, car de nombreux auteurs avant Darwin l'avaient déjà étudiée – y compris Lamarck ; en revanche, et dès le départ, la sélection naturelle, au sujet de laquelle Darwin n'apporta aucun argument empirique<sup>24</sup>, fut controversée, ce qui mena à une «éclipse» du darwinisme au sein de la

---

pourrait être importante dans l'évolution (« [...] mechanisms that [...] meet the criteria of Lamarckian inheritance could be important contributors to the evolutionary process » ; Koonin, *The logic of chance*, 2012, p. 258), Eugene Koonin distingue des mécanismes «lamarckiens» et «quasi-lamarckiens» (*ibid.*, p. 263).

<sup>20</sup> Eugene Koonin présente la notion d'un continuum entre les mécanismes darwiniens et les mécanismes lamarckiens (*ibid.*, p. 271).

<sup>21</sup> « Modern evolutionary thought [...] began with Charles Darwin and Alfred Russel Wallace's paper to the Linnean Society [...] » (Pigliucci & Müller, *Elements of an Extended Evolutionary Synthesis*, 2010, p. 5).

<sup>22</sup> « The original Darwinism [...] was based on two fundamental ideas: the common descent of all living organisms, and the claim that natural selection is the major agent of evolutionary change, as well as the only one that can bring about adaptation » (*ibid.*, p. 5).

<sup>23</sup> Je développerai plus loin la théorie structuraliste, véritablement éradiquée par le darwinisme.

<sup>24</sup> Jean-François Moreel, *Le darwinisme, envers d'une théorie* (2007, p. 75).



communauté scientifique à la fin du XIXe siècle : par exemple, parmi ces contestations, Francis Galton, en 1865, pense que seules les modifications importantes peuvent donner prise à la sélection naturelle<sup>25</sup>; Fleeming Jenkin, en 1867, nie notamment que la sélection naturelle, en laquelle il voit une action normalisante, puisse modifier les espèces<sup>26</sup>. Ainsi, plusieurs mécanismes évolutifs alternatifs furent proposés dès cette époque, en particulier le retour à une hérédité de type «lamarckien» (une idée que Darwin lui-même caressa, notamment dans l'édition de 1872 de *On the Origin of Species*, comme le précise Eugene Koonin<sup>27</sup>), ce que l'on appelle l'orthogénèse (des tendances évolutives dirigées par des forces internes) et le saltationnisme (l'idée que le changement évolutif n'est pas graduel, comme le pensait Darwin, mais se ferait par sauts)<sup>28</sup>. Un autre mécanisme évolutif, radicalement différent car basé sur des propriétés intrinsèques de la matière vivante, et appelé théorie structuraliste, fut proposé, également en 1859, par Richard Owen – mais rapidement écarté<sup>29</sup>.

Durant la même période, au contraire, Wallace et Weismann proposèrent une vision de l'évolution basée sur la sélection naturelle, mais débarrassée de tout vestige de lamarckisme : le Néo-darwinisme (à ne pas confondre avec la Synthèse moderne – *Modern Synthesis*). Toutefois, en ce début de 20<sup>e</sup> siècle, la redécouverte des lois dites de Mendel (en fait révélées dès les années 1810 par Augustin Pyrame de Candolle, puis par Augustin Sageret en 1826) et les débuts de la génétique semblèrent porter un coup fatal à la théorie darwinienne : en effet, les lois de Mendel<sup>30</sup>, ainsi que les mutations (variations discontinues) tout nouvellement découvertes par Hugo de Vries, impliquaient qu'il ne pouvait exister de «mélange de l'hérédité»<sup>31</sup>. En effet, on considérait à

---

<sup>25</sup> *Ibid.*, p. 92.

<sup>26</sup> *Ibid.*, p. 79 ; voir aussi Patrick Tort, *Darwin et le darwinisme* (2011, chapitre VII).

<sup>27</sup> « *Darwin assigned increasingly greater weight to the Lamarckian mechanism of evolution [...]* » (*The Logic of Chance*, *op. cit.*, p. 258).

<sup>28</sup> Voir le très important article de Niles Eldredge et Stephen Jay Gould, «Punctuated Equilibria: an Alternative to Phyletic Gradualism» (1972).

<sup>29</sup> Voir par exemple les articles par Michael Denton : «Physical law not natural selection as the major determinant of biological complexity in the subcellular realm: new support for the pre-Darwinian conception of evolution by natural law» (2003), et «The Types: A Persistent Structuralist Challenge to Darwinian Pan-Selectionism» (2013).

<sup>30</sup> Au nombre de trois : (i) association : pureté des gamètes ou uniformité des caractères des hybrides de première génération ; (ii) dominance ou disjonction des allèles ; (iii) indépendance de la ségrégation des caractères.

<sup>31</sup> Pigliucci & Müller, *Elements of an Extended Evolutionary Synthesis* (*op. cit.*, p. 5).

l'époque que les caractères individuels étaient forcément intermédiaires entre les caractères parentaux, alors que la loi d'indépendance des caractères postule que les parents transmettent des unités héréditaires discrètes (plus tard appelées «gènes»<sup>32</sup>) qui demeurent telles chez la descendance, d'où l'impossibilité d'un changement évolutif graduel – par contre, cela semble renforcer l'idée d'une évolution saltatoire. Toutefois, l'avènement du néo-darwinisme ne mena pas, comme on le lit parfois, à l'abandon de l'idée de Lamarck d'une «évolution dictée par les circonstances», ni même celle d'une hérédité «lamarckienne»<sup>33</sup>.

C'est ce contraste apparent entre mendélisme et néo-darwinisme qui fut à la base de la *Synthèse moderne*. En fait, Ronald Aylmer Fisher<sup>34</sup>, John Burdon Sanderson Haldane<sup>35</sup> et Sewall Wright<sup>36</sup> (parmi d'autres) montrèrent qu'il n'y avait aucune contradiction entre la génétique mendélienne, les mutations et la variation continue des caractères dits quantitatifs. Puis, dans les années 1930, ce fut le début de la génétique des populations<sup>37</sup>. Toutefois, ce travail ne constitue pas la Synthèse moderne proprement dite, qui inclut des données de l'histoire naturelle, de la systématique, de la paléontologie, de la zoologie et de la botanique. La synthèse fut ainsi faite entre le néo-darwinisme, le mendélisme et la génétique des populations.

### 2. 2. 5. La Synthèse moderne

On peut alors résumer la Synthèse moderne comme suit : les populations présentent une variabilité génétique qui a pour origine des mutations au hasard ainsi que des événements de recombinaison aléatoires ; ces populations évoluent par des changements de la fréquence des gènes qui surviennent par dérive génétique, flux génique et tout spécialement par sélection naturelle ; la plupart des variants génétiques adaptatifs mènent à des effets phénotypiques faibles, ce qui produit des changements phénotypiques graduels (bien que certains allèles dont les effets sont discrets puissent être

---

<sup>32</sup> La notion de gène représente l'une des plus importantes difficultés de la biologie moderne, la littérature scientifique mondiale en proposant plusieurs dizaines de définitions différentes.

<sup>33</sup> Koonin, *The Logic of Chance* (op. cit., chapitre 9).

<sup>34</sup> Fisher, *The genetical theory of natural selection* (1930).

<sup>35</sup> Haldane, *The time of action of genes, and its bearing on some evolutionary problems* (1932).

<sup>36</sup> Wright, *The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution* (1932).

<sup>37</sup> A l'origine de la pensée dite populationnelle, l'un des piliers du darwinisme.

avantageux) ; la diversification se fait par spéciation, qui normalement entraîne un isolement reproductif graduel entre populations ; et l'ensemble de ces processus, envisagés sur des périodes de temps suffisamment longues, mènent à des changements tels que de nouveaux grands groupes taxonomiques peuvent être définis (genres, familles, etc.)<sup>38</sup>.

Comme nous le verrons par la suite, plusieurs de ces préceptes sont remis en question comme étant imprécis ou incomplets. Cependant, il est important de noter que, si certains principes de base de la Synthèse moderne doivent être largement modifiés —ou même rejetés—, en revanche, cela ne remet pas en cause la structure de la Théorie de l'évolution. Il sera ainsi possible de proposer une synthèse évolutive élargie, qui peut être d'ores-et-déjà considérée comme un véritable changement de paradigme.

### § 3. Digression: un parallèle entre sciences physiques et sciences évolutionnistes

#### 3. 1. De la fin de la physique... à la fin de l'évolution ?

Introduire les sciences physiques dans un essai sur l'évolution peut paraître surprenant. Toutefois, cette digression me permettra d'établir un éventuel parallèle avec les sciences évolutives.

Au 19<sup>e</sup> siècle, toute la physique pouvait être expliquée grâce à deux grandes forces : l'interaction gravitationnelle et l'interaction électro-magnétique – à tel point qu'en 1900 William Thomson, dit Lord Kelvin, annonça la fin imminente de la physique, car elle avait pu rendre compte de tous les phénomènes (ou presque). L'histoire lui a donné tort, puisqu'il a fallu depuis introduire deux autres forces fondamentales : la force nucléaire forte et la force nucléaire faible ; de plus, la Théorie quantique et la Théorie de la Relativité générale ont bien prouvé que la Physique était loin d'être terminée.

De façon analogue, au début du 21<sup>e</sup> siècle, Alexandre Meinesz semble avoir prédit la fin des sciences évolutives, en affirmant que « [l']aphorisme de Lamarck "Les espèces se transforment dans le temps" devenu "évolution" grâce à Darwin n'est plus

---

<sup>38</sup> On remarquera que cette rétrospective historique bibliographique est essentiellement centrée sur les idées de base du darwinisme que sont la sélection naturelle, le gradualisme et l'adaptation.

une *théorie*, ni une thèse avec incertitudes : c'est un fait avéré, un fait prouvé : c'est une loi biologique, un *théorème* »<sup>39</sup>. Au-delà de la confusion entre fait (observation scientifique) et théorie (modèle pour expliquer cette observation), cette assertion peut être considérée comme fausse dès le départ, tant les mécanismes darwiniens de base (mutations ponctuelles aléatoires, brassage génétique, sélection naturelle) apparaissent de plus en plus comme insuffisants pour expliquer l'intégralité du processus évolutif, notamment en ce qui concerne la macro-évolution. Je reviendrai sur ces différents points, tant ils font polémique au sein de la communauté scientifique.

Le parallèle entre physique et biologie repose sur le nombre de facteurs explicatifs à faire intervenir pour construire une théorie. En physique, il est fréquent qu'un seul facteur soit nécessaire : on parle alors de «monisme de processus»<sup>40</sup>. Par exemple, pour expliquer le mouvement des planètes autour du Soleil<sup>41</sup>, il suffit d'impliquer l'interaction gravitationnelle : il n'y a besoin de rien d'autre<sup>42</sup>. C'est par une sorte d'analogie épistémologique que les biologistes ont tenté d'importer ce monisme explicatif dans leur discipline ; toutefois, ils auraient dû se rendre compte d'un point fondamental : la différence de complexité entre les objets physiques que sont les corps célestes, relativement simples<sup>43</sup>, et les organismes vivants, à l'opposé incroyablement complexes<sup>44</sup>, en relation avec l'idée que, pour expliquer le vivant et son évolution, il est très vraisemblable qu'un seul facteur se révèle insuffisant – d'où un pluralisme explicatif indispensable dès qu'on s'intéresse aux êtres vivants<sup>45</sup>. Ainsi, le monisme explicatif du

<sup>39</sup> Meinesz, *Comment la vie a commencé* (2011), p. 201 ; en italique dans le texte original.

<sup>40</sup> Voir von Sydow, *From Darwinian metaphysics towards understanding the evolution of evolutionary mechanisms* (2012, p. VIII, p.10, p. 12, p. 23, notamment). Von Sydow parle également de «métaphysique darwinienne à mécanisme unique» («*Darwinian mono-mechanistic metaphysic*» ; *ibid.*, p. 336).

<sup>41</sup> Mais aussi les mouvements de la Lune autour de la Terre, ainsi que de la Voie Lactée autour du gigantesque trou noir qui trône en son centre.

<sup>42</sup> A tel point qu'il est possible de prédire ces mouvements, et donc les éclipses lunaires et solaires, avec une très grande précision, des décennies, voire des siècles, à l'avance.

<sup>43</sup> Il ne s'agit nullement d'un jugement visant à dévaloriser les sciences physiques, déjà suffisamment complexes en elles-mêmes (notamment par les équations mathématiques qu'elles font intervenir), mais d'un simple constat.

<sup>44</sup> Michael Denton parle de «l'infiniment complexe» des organismes (Denton, *L'évolution a-t-elle un sens ?*, 1997, p. 396).

<sup>45</sup> Cette notion est bien sûr discutable ; notamment, des lois relativement simples sont capables de rendre compte de la complexité de l'Univers (ce qui met en évidence la relativité des concepts de simplicité et de complexité).

darwinisme, basé presque exclusivement sur la sélection naturelle, est très certainement insuffisant pour rendre compte de la complexité du vivant et de son évolution.

### 3. 2. Des théories incompatibles mais indispensables

Poursuivons notre parallèle entre physique et évolution. En physique, pour décrire la structure et le fonctionnement de l'Univers, la science a produit les deux grandes théories déjà mentionnées : la Physique quantique et la Théorie de la Relativité. L'une explique l'infiniment petit, l'autre l'infiniment grand : plus précisément, la Physique quantique décrit par le comportement des objets physiques constituant la matière au niveau microscopique (atomes et particules subatomiques) ; dans la Relativité générale, la gravitation est vue comme une déformation, une courbure de l'espace-temps flexible qui se plie, s'étire sous l'influence de la répartition des masses, donc de l'énergie. La première est basée sur la discrétisation de l'espace-temps (l'existence d'« [...] une taille minimale, appelée *longueur de Planck*, en-dessous de laquelle des concepts comme l'espace et le temps n'ont sans doute plus de sens »<sup>46</sup>) et de l'énergie, la seconde, au contraire, sur la continuité du même espace-temps (« [...] aussi proches que se trouvent deux points dans l'espace-temps, on peut toujours insérer un autre point entre eux »<sup>47</sup>). D'autre part, en mécanique quantique, le temps est symétrique, réversible, ce qui n'est pas le cas pour la relativité générale. D'autres aspects encore opposent les deux théories<sup>48</sup>.

Comme l'explique Arturo Quirantes<sup>49</sup>, malgré leur valeur incontestable, la théorie de la relativité et la théorie quantique souffrent d'un sérieux problème de fond : proposant deux visions très différentes du monde, elles ne sont pas compatibles, dans des domaines où pourtant elles se croisent. Isolées, chacune présente une grande utilité, mais elles ne peuvent se combiner, car elles semblent ne pas tenir compte l'une de l'autre. Il leur faut donc coexister, en dépit de leur caractère essentiellement différent.

Il est sans doute possible de réaliser une comparaison similaire entre la micro-évolution et la macro-évolution. Mais, tout d'abord, de quoi s'agit-il ? La micro-évolution,

---

<sup>46</sup> Quirantes, *L'espace-temps quantique* (op. cit., p. 98 ; en italique dans le texte original).

<sup>47</sup> *Ibid.*, p. 98.

<sup>48</sup> *Ibid.*, pp. 98-99.

<sup>49</sup> *Ibid.*, p. 12 & p. 99.

ou évolution séquentielle, concerne le changement évolutif graduel au-dessous du niveau de l'espèce, menant à l'apparition, au sein de populations, de sous-espèces, variétés ou types géographiques : il s'agit d'une évolution « locale », essentiellement due à une sélection naturelle normalisante ou stabilisante en relation avec des conditions environnementales stationnaires, sur de courtes périodes de temps. Les exemples classiquement cités de ce type d'évolution sont les variations de forme du bec chez les Pinsons<sup>50</sup>, le changement de couleur chez la Phalène du Bouleau<sup>51</sup>, l'apparition de résistances aux antibiotiques chez certaines Bactéries ou au DDT chez certains Moustiques.

La macro-évolution, ou radiation adaptative, concerne le changement évolutif majeur situé au-dessus du niveau de l'espèce, menant à l'apparition de changements majeurs à l'origine de nouvelles espèces, genres, familles ou ordres, par l'intervention de macro-mutations ou de divergences génétiques : il s'agit d'une évolution plus « générale ». On considère que la macro-évolution s'opère chez des êtres vivants au sein de nouvelles zones d'habitation dans lesquelles ils ne rencontrent pas de compétition. L'évolution des oiseaux à partir des dinosaures aviaires, des amphibiens à partir des sarcoptérygiens, ou encore l'évolution des équidés, sont des exemples de macro-évolution.

Il est toutefois possible d'envisager un niveau supplémentaire d'évolution : la méga-évolution, une évolution « à grande échelle », extrêmement rare, n'ayant eu lieu qu'à quelques reprises au cours de l'histoire du vivant, au niveau des classes ou des taxa, et faisant intervenir soit un type de sélection naturelle disruptive ou divergente, soit un mécanisme inconnu. Ce type d'évolution aurait lieu lors de la conquête de nouveaux territoires, menant à des types d'organisation biologique nouveaux et originaux, comme les eucaryotes, les mycètes, les végétaux et les métazoaires. L'apparition des oiseaux et des mammifères à partir des « reptiles » (sauropsidés non aviaires) serait un exemple de méga-évolution.

La micro-évolution est d'une certaine façon quantique : elle fait intervenir de petites étapes discrètes et incompressibles, sorte de quanta évolutifs en-deçà desquels la

---

<sup>50</sup> Grant & Grant, *Unpredictable evolution in a 30-year study of Darwin's finches* (2002).

<sup>51</sup> Kettlewell, *Darwin's missing evidence* (1959 ; cité par M. Denton dans *Evolution, une théorie en crise*, 1985, ch. 4).

notion d'évolution n'a pas de sens. La macro- et la méga-évolution pourraient, elles, correspondre à des modifications, des déformations de paysages adaptatifs dynamiques en relation avec la dynamique des populations dans le cadre d'une dynamique écologique. De plus la micro-évolution peut-être envisagée comme réversible, à l'inverse de la macro- et de la méga-évolution, trop importantes et radicales, donc irréversibles.

De la même façon que théorie quantique et relativité générale sont tout à la fois incompatibles et indispensables pour décrire l'Univers, on peut envisager la micro-évolution d'une part, la macro- et la méga-évolution d'autre part, à la fois comme incompatibles et indispensables : incompatibles car proposant deux visions de l'évolution divergentes, voire opposées, faisant intervenir des mécanismes évolutifs extrêmement différents, et indispensables pour décrire l'intégralité du processus évolutif. Dans ce cadre, on est loin de la vision darwinienne orthodoxe selon laquelle la macro-évolution ne serait qu'une extrapolation de ma micro-évolution, et que les deux feraient donc intervenir les mêmes mécanismes fondamentaux.

De cette digression vers les sciences physiques, je tirerai quelques conclusions concernant l'évolution:

- L'histoire des sciences évolutives est très loin d'être achevée;
- Le darwinisme ne fournit qu'une explication très limitée du processus évolutif;
- La complexité du vivant et de son évolution ne peuvent être réduites aux lois de la physique et de la chimie<sup>52</sup>;
- Le processus évolutif doit faire intervenir un grand nombre de mécanismes différents et complémentaires;
- Il est possible qu'une redéfinition de la notion même d'évolution biologique soit nécessaire.

## § 4. Les bases du problème: pourquoi et comment un changement de paradigme pour l'évolution biologique

### 4. 1. L'évolution biologique: un fait scientifiquement avéré, une théorie controversée

---

<sup>52</sup> Voir Dupré, «It is not possible to reduce biological explanations to explanations in chemistry and/or physics» (2010).

#### 4. 1. 1. La distinction entre fait et théorie

Il importe à ce stade d'insister brièvement sur une distinction des plus importantes dans le fonctionnement de la science : la distinction entre fait et théorie<sup>53</sup>.

Un fait est un phénomène, un événement observable, qu'il s'agisse d'un fait naturel (qui a lieu spontanément dans la nature) ou d'un fait expérimental (un fait artificiellement provoqué à des fins d'étude). Fondamentalement, un tel fait est considéré comme objectif : il est sensé être observé tel qu'il est, que ce soit par exemple le comportement d'un être vivant dans son milieu de vie ou une mesure réalisée avec un appareil.

A partir d'un ensemble de faits présentant une certaine cohérence entre eux, les scientifiques élaborent alors des théories, c'est-à-dire des modèles, des constructions intellectuelles permettant d'expliquer ces faits de la façon la plus complète possible, de produire des représentations du monde et, parfois, de réaliser des prédictions. Par exemple, la Tectonique des plaques, le Big-Bang, sont des théories scientifiques<sup>54</sup>.

En fait, les choses sont sensiblement plus compliquées. Tout fait d'observation est forcément influencé par une théorie préalable et sous-jacente : il n'est donc en fait ni neutre ni objectif, mais fortement teinté de subjectivité et d'intentionnalité ; en retour, si des faits semblent contredire une théorie, cette dernière est supposée être soit modifiée, soit, plus radicalement, abandonnée – pour une nouvelle théorie plus explicative et plus cohérente.

---

<sup>53</sup> Il existe trois sens très différents du mot théorie ; brièvement : (1) Au sens familier, le plus courant, le mot «théorie» s'oppose à celui de «pratique» ; (2) Dans un sens plus élaboré, utilisé notamment dans les investigations policières, une «théorie» est une explication possible des faits, lesquels, une fois les preuves concrètes apportées, correspondent à la «vérité incontestable», car reconstituée point par point, de ce qui s'est passé sur une scène de crime ; (3) Au sens scientifique du terme, une théorie est un modèle, un ensemble d'hypothèses permettant d'expliquer un certain nombre de faits ; point extrêmement important, une théorie scientifique ne peut prétendre décrire la «vérité», seulement fournir une interprétation cohérente de faits «scientifiques» (pour éviter toutes sortes de confusions, le mot théorie aurait dû être évité dans ce troisième sens).

<sup>54</sup> Une difficulté supplémentaire émerge ici, selon les «preuves» qu'on a en faveur d'une théorie. Par exemple, si la tectonique des plaques a pu être observée en temps réel depuis des satellites géostationnaires, en revanche personne n'a jamais pu observer directement le Big Bang. Rappelons toutefois que, selon Popper, aucune théorie ne peut être vérifiée, seulement corroborée (« *Theories are not verifiable, but they can be 'corroborated'* » ; Popper, *The logic of scientific discovery*, 2005, p. 248).



#### 4. 1. 2. *Le fait d'évolution*

Les nombreuses observations réalisées depuis le 19<sup>e</sup> siècle mènent à une conclusion incontestable : en tant que fait, l'évolution est scientifiquement avérée<sup>55</sup>. Par exemple, l'apparition d'une nouvelle espèce de moustique dans le métro londonien est un fait d'évolution ; l'apparition d'espèces de Bactéries résistantes à certains antibiotiques, ou de Moustiques résistants au DDT, sont également des faits d'évolution. Par définition, on considère même que tout changement populationnel, si minime soit-il, correspond à un fait d'évolution<sup>56</sup>. On peut parfois observer ces faits «en temps réel», sur des périodes de temps de quelques années ou décennies<sup>57</sup>.

#### 4. 1. 3. *La théorie de l'évolution*

Si l'évolution comme fait scientifique est indiscutable, en revanche, la théorie de l'évolution, c'est-à-dire le darwinisme (seule théorie évolutive considérée comme valable par l'immense majorité de la communauté scientifique), comme toute théorie, peut être remise en question. La raison en est qu'une théorie est, je l'ai déjà mentionné, une construction intellectuelle explicative qui «appartient» aux scientifiques mais n'existe pas en tant que telle dans la nature : il est donc parfaitement légitime d'être en désaccord avec les explications et les représentations défendues par une théorie. Si, pour un motif quelconque, une théorie ne peut être remise en cause, elle perd son statut de théorie pour devenir un dogme (un terme éminemment antiscientifique, ce mot étant plutôt réservé aux préceptes religieux).

---

<sup>55</sup> Le fait qu'il existe un certain nombre d'exemples évidents d'évolution ne signifie toutefois pas, de mon point de vue, que l'évolution soit constamment en marche, dans l'intégralité du monde vivant ; au contraire, il me semble réellement possible d'envisager l'évolution non comme la règle, mais comme l'exception (notamment quand les conditions environnementales sont durablement stables).

<sup>56</sup> Inclure dans le fait d'évolution de simples changements populationnels, qui peuvent être vus comme n'étant que des «ajustements fins», est toutefois très discutable (d'autant plus que cet aspect étant inclus dans la définition même de l'évolution lui confère une dimension incontestable) ; de la même façon, on peut se demander si une espèce qui acquiert un nouveau caractère tel qu'une résistance a véritablement évolué (surtout que cette acquisition peut être réversible).

<sup>57</sup> Ces exemples d'évolution «rapide» représentent toutefois une contradiction flagrante avec l'idée d'une évolution graduelle, par petites touches successives, donc lente – l'une des bases du darwinisme étant que, précisément, l'évolution nécessite de longues périodes de temps, qui s'expriment en millions d'années.

## 4. 2. La confusion entre évolution et darwinisme

Dans de nombreux discours scientifiques sur l'évolution, ce dernier terme est très souvent remplacé par «darwinisme», ce qui aboutit parfois à des affirmations absurdes. Par exemple, Jean-Marie Pelt a proposé une vision originale de l'évolution sous l'angle du «principe d'associativité»<sup>58</sup>, qui s'exprime dans le monde végétal par un mécanisme récurrent qui permet de protéger toujours davantage le gamète femelle, ou oosphère, par l'addition de tuniques protectrices successives, celles-ci s'emboîtant autour de lui comme des poupées russes ; seule, la sélection naturelle ne semble pouvoir expliquer cette forte tendance évolutive, tout comme la miniaturisation convergente des fleurs regroupées en inflorescences. Toutefois, selon Guillaume Lecointre « Jean-Marie Pelt n'a rien compris au darwinisme »<sup>59</sup>; cette phrase n'a aucun sens, pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord, elle montre la confusion entre «évolution» et «darwinisme»<sup>60</sup>: seule la phrase «Pelt n'a rien compris à l'évolution» aurait pu contester que Pelt soit compétent pour expliquer le processus évolutif;
- Ensuite, cette phrase est basée sur l'idée que toute évolution doit obligatoirement se faire par la voie de la sélection naturelle, alors que, précisément, Pelt expose le principe d'associativité qui s'oppose, justement, à la sélection naturelle; il est clair que Pelt a, au contraire, parfaitement compris le darwinisme, et propose un mécanisme alternatif pour expliquer l'évolution végétale: c'est d'ailleurs là toute l'originalité de son ouvrage;
- Enfin, cette phrase met en évidence l'enfermement intellectuel typique des ultra-darwinistes: il est formellement interdit de sortir de «[...] l'autoroute savamment balisée par le néodarwinisme [...]»<sup>61</sup> ; toute autre explication, même pleinement scientifique, doit être rejetée.

---

<sup>58</sup> Pelt, *L'évolution vue par un botaniste* (op. cit.).

<sup>59</sup> Lecointre, *La complexité en évolution, une notion inutile* (2013).

<sup>60</sup> Michael Denton dénonce également cette confusion, reconnaissant d'ailleurs avoir lui-même commis cette erreur (Denton, *Evolution: still a theory in crisis*, 2016, p. 111).

<sup>61</sup> Pelt, *L'évolution vue par un botaniste* (op. cit., p. 22).

### 4. 3. Une critique du darwinisme et de la Synthèse moderne

#### 4. 3. 1. Origines philosophiques et idéologiques du darwinisme

Selon Charles Darwin lui-même, le fait de démontrer que les textes sacrés de la genèse biblique sont faux, donc que la Théorie créationniste de la Genèse est erronée, justifie la certitude qu'on peut avoir concernant l'évolution par sélection naturelle. De façon nettement plus surprenante, ce type d'argumentation est encore repris à notre époque, notamment par Stephen Jay Gould; voici deux citations révélatrices:

- 1) «[...] [o]n ne peut pas prouver l'évolution par la perfection parce que celle-ci n'a pas besoin d'histoire»<sup>62</sup> : la Création, parfaite, ne peut s'inscrire dans la durée du processus évolutif, qui, lui, est historique: c'est donc l'évolution darwinienne qui est vraie (ceci rappelle le raisonnement par l'absurde utilisé en Mathématiques);
- 2) «[...] [l]'imperfection témoign[e] en faveur de l'évolution»<sup>63</sup> : comme la perfection témoigne en faveur de la Création et que les êtres vivants sont imparfaits, c'est forcément l'évolution darwinienne qui est vraie (argumentation tautologique).

Pourtant, il est évident que perfection ou imperfection relèvent de la subjectivité ; en outre, ce n'est pas parce qu'entre deux propositions l'une est fausse qu'alors l'autre est forcément vraie. En réalité, le problème vient du fait que, pour la majorité des scientifiques, le darwinisme est la seule théorie matérialiste valable pour contrer le Créationnisme – et aucune alternative n'est envisagée.

Dans une perspective analogue, Bertrand Louart présente le darwinisme comme un exemple frappant montrant à quel point « [...] science et idéologie sont étroitement mêlées »<sup>64</sup>. En effet, et contrairement au discours habituel, ce qui intéresse Darwin au premier plan n'est pas la diversité du vivant ou son évolution, ni la compréhension des phénomènes de la nature, mais le combat contre une idéologie : l'idée d'une intervention divine dans la création des espèces. Même si, comme le précise Louart, cette motivation est légitime d'un point de vue scientifique, il n'en reste pas moins que le

<sup>62</sup> Gould, *Le pouce du panda* (1982), p. 30.

<sup>63</sup> *Ibid.*, p. 41.

<sup>64</sup> Louart, *Aux origines idéologiques du darwinisme* (2010), p. 1.

but de Darwin est d'abord et avant tout anti-théologique, ce qui introduit un certain nombre de biais dans ses idées, son argumentation et, en fin de compte, sa théorie<sup>65</sup>. Par exemple, comme le souligne Jean-François Moreel<sup>66</sup>, en avançant que l'explication biblique créationniste présentée dans la Genèse est fautive, Darwin pense apporter un argument décisif pour démontrer que sa théorie est vraie. De plus, selon Louart, Darwin ne fait qu'inverser l'explication de l'origine des espèces proposée par William Paley en 1803 : à la Providence divine (Dieu comme puissance créatrice), il substitue une providence laïque : le hasard des variations et le mécanisme aveugle et impersonnel de la sélection naturelle – tout en conservant la rhétorique de la Théologie naturelle, comme l'idée d'adaptation des organismes à leur condition d'existence<sup>67</sup>. A cela, Darwin ajoute la «lutte pour l'existence» de Malthus, due à une surpopulation permanente, d'où la précarité des ressources alimentaires<sup>68</sup>. Mais ces dernières notions n'existent qu'en théorie : il s'agit en fait d'une modélisation, une construction intellectuelle montée de toutes pièces, « [...] une fiction qui n'a à peu près aucune réalité dans la nature »<sup>69</sup>.

Mais l'idéologie darwinienne n'est pas seulement anti-théologique, elle a aussi une origine économique. En effet, Bertrand Louart cite Stephen Jay Gould, qui remarque que la sélection naturelle ressemble à la «main invisible» d'Adam Smith (1723-1790), symbole de la capacité du marché libre à s'autoréguler. Néanmoins, une fois encore, il ne s'agit que d'une fiction du fonctionnement de l'économie de l'époque, ayant pour but de promouvoir l'idéologie libérale basée sur la recherche du profit – qui deviendra réalité au cours du 19<sup>e</sup> siècle<sup>70</sup>. D'après Louart, Gould considère que la sélection naturelle n'est rien d'autre que la vision économique de Smith transposée dans la nature, dans « [...] une vision des êtres vivants et de la nature dominée par un utilitarisme étroit où seuls les mieux adaptés survivent [...] »<sup>71</sup>. En outre, en prenant en compte le prétendu avantage qu'apporte quelque organe considéré séparément (au lieu de voir

---

<sup>65</sup> *Ibid.*, p. 6

<sup>66</sup> Moreel, *Le darwinisme, envers d'une théorie* (*op. cit.*, p. 57).

<sup>67</sup> Louart, *Aux origines idéologiques du darwinisme* (*op. cit.*, p. 9).

<sup>68</sup> *Ibid.*, p. 10.

<sup>69</sup> *Ibid.*, p. 13.

<sup>70</sup> *Ibid.*, p. 14.

<sup>71</sup> *Ibid.*, p. 15.

chaque organisme comme un tout indissociable), il est possible d'imaginer n'importe quelle explication adaptative acceptable<sup>72</sup>.

On remarquera avec Louart à quel point le mécanisme de la sélection naturelle doit très peu à l'observation de la nature et bien plus aux spéculations idéologiques de théologiens et de moralistes sur les fondements de l'économie capitaliste et industrielle<sup>73</sup>. C'est ainsi qu'on réalise que la sélection naturelle, bien loin de l'observation de la réalité du fonctionnement du vivant, est en fait une pure construction intellectuelle qui n'a pour but que d'évincer la toute-puissance divine. Le problème est que, pour faire entrer la réalité dans ce système, il faut bien souvent l'y forcer, quitte à la déformer : cette façon de procéder est un bel exemple de la rhétorique darwinienne, où les faits servent à justifier le système qui devrait au contraire servir à les expliquer<sup>74</sup>.

L'idéologie darwinienne va toutefois encore plus loin, en imposant la conception des êtres vivants considérés comme des machines totalement sous l'emprise de forces extérieures qui lui sont complètement étrangères – les conditions environnementales<sup>75</sup>. Cette perspective ignore malheureusement la question de la spécificité du vivant<sup>76</sup>, tout comme celle d'une définition précise de la notion d'espèce vivante<sup>77</sup>. Il en résulte la production d'une théorie qui prétend expliquer l'évolution des organismes sans en reconnaître l'originalité ni même en connaître le véritable fonctionnement. Selon Louart, Darwin se montre fortement influencé idéologiquement et d'une extrême confusion, dans une démarche qui, à l'opposé des critères d'une investigation scientifique digne de ce nom, relève de la fraude – même si elle reste inconsciente<sup>78</sup>. Quant aux successeurs de Darwin, en faisant de l'ouvrage *De l'Origine des Espèces* une nouvelle Bible, et de son auteur un nouveau prophète, on peut considérer qu'ils ont propulsé le darwinisme, véritable dogme intouchable et inattaquable, au niveau d'une religion de substitution<sup>79</sup>.

---

<sup>72</sup> *Ibid.*, p. 21.

<sup>73</sup> *Ibid.*, p. 16.

<sup>74</sup> *Ibid.*, p. 17.

<sup>75</sup> *Ibid.*, p. 18 ; on parle parfois d'externalisme.

<sup>76</sup> *Ibid.*, p. 19.

<sup>77</sup> Après la notion de gène, le concept d'espèce vivante représente une autre importante difficulté de la biologie moderne, la littérature scientifique mondiale en proposant, ici aussi, plusieurs dizaines de définitions différentes.

<sup>78</sup> *Ibid.*, p. 23.

<sup>79</sup> *Ibid.*, p. 24 ; voir aussi Moreel, *Le darwinisme, envers d'une théorie* (op. cit., p. 251).

En se focalisant sur l'utilité et l'avantage de tous les attributs des êtres vivants, pour lesquels il est toujours possible de trouver une justification a posteriori en termes de lutte pour la survie, en proposant des reconstitutions plausibles obligeant les faits à entrer dans un cadre rigide prédéfini et ne servant qu'à justifier un système entièrement clos sur lui-même<sup>80</sup>, et finalement en abandonnant la nature profonde du vivant, le darwinisme, basé sur une logique circulaire<sup>81</sup>, est à l'origine d'une véritable déconstruction de l'évolution<sup>82</sup> focalisée sur l'adaptation et dans laquelle la vie n'est rien d'autre qu'une force physique comme une autre<sup>83</sup>. Dans ce cadre, l'adaptationnisme darwinien est tout au plus un transformisme et non un évolutionnisme<sup>84</sup>.

Selon Bertrand Louart, le succès du darwinisme serait dû à cette confusion des idées et au manque de précision de la définition des notions impliquées. Ainsi, et pour synthétiser ses propos, en simplifiant à outrance le fonctionnement du vivant vu sous l'angle d'une machine normalisable et exploitable à outrance, en réduisant le développement et l'évolution aux seuls jeux du hasard et de la sélection naturelle, en écartant la continuité du processus évolutif au cours des temps géologiques et en faisant de l'histoire du vivant une gigantesque accumulation d'anecdotes contingentes et de coïncidences, le darwinisme évacue les problèmes qu'il est incapable d'étudier tout en conservant l'apparence d'une théorie authentiquement scientifique<sup>85</sup>.

Il est donc grand temps, dans cette perspective, de s'éloigner de la notion d'adaptation, d'inverser le raisonnement darwinien et d'élaborer une théorie biologique qui soit à même de décrypter le langage et la logique de la nature, loin de la technoscience et de toute idéologie et dans le respect du vivant et de sa spécificité presque toujours ignorée : son autonomie, au sein d'une relation contradictoire, dialectique, avec son environnement, faite à la fois de dépendance (la nécessité) et surtout d'une indépendance croissante, laissant une place grandissante à la liberté et à la maîtrise de l'existence au fur et à mesure que la complexité des organismes augmente – véritable

---

<sup>80</sup> Louart, *Aux origines idéologiques du darwinisme* (op. cit., p. 27).

<sup>81</sup> *Ibid.*, p. 28.

<sup>82</sup> *Ibid.*, p. 26.

<sup>83</sup> *Ibid.*, p. 30.

<sup>84</sup> Étrange retour des choses : habituellement, c'est la théorie de Lamarck qui est qualifiée de simple «transformisme» – quand le darwinisme est vu comme accédant au rang «supérieur» de théorie évolutionniste.

<sup>85</sup> Louart, *Aux origines idéologiques du darwinisme* (op. cit., pp. 36-37).

déploiement de la logique du vivant. Dans cette optique, l'évolution devient une nécessité théorique permettant d'expliquer la tendance vers la complexification des organismes, produit de la dynamique interne propre au vivant – et non de la sélection naturelle.

Mais, selon Louart, la critique du darwinisme ne doit pas être circonscrite au domaine scientifique, car « [...] la conception de la nature qu'il véhicule, le rapport au vivant qu'il induit est d'ordre avant tout social et politique »<sup>86</sup>, dans un rapport au vivant gangrené par des considérations utilitaristes, techniciennes et marchandes.

Dans une optique similaire, Werner Callebaut<sup>87</sup> formule trois mises en garde au sujet de la Synthèse moderne:

- 1) Un certain nombre d'intellectuels se refusent à la reconnaître comme «théorie», car de nombreux facteurs —conceptuels, théoriques, sociaux et politiques— ont été impliqués dans son élaboration<sup>88</sup>;
- 2) La Synthèse moderne ne fut pas une «révolution scientifique» (au sens de Kuhn): aucune information manquante ne dut être mise au jour, ni aucune expérience ingénieuse, élégante et déterminante qui pût régler la polémique ne fut réalisée<sup>89</sup>; Bill Provine abonde dans le même sens: «La Synthèse n'est caractérisée par aucune découverte, aucun concept ou aucune théorie surprenante ni extraordinaire»<sup>90</sup>;
- 3) Les concepts concernant l'évolution biologique, tels que l'adaptation, ont la capacité de se consolider en détournant, voire en démantelant d'autres concepts qui devraient avoir leur place dans le système explicatif global. Et cette singularité

<sup>86</sup> *Ibid.*, p. 41.

<sup>87</sup> Werner Callebaut, *The dialectics of disunity in the evolutionary synthesis and its extensions* (2010).

<sup>88</sup> «[...] scholars do not define the Synthesis as a "theory" [...] [because] many factors –conceptual, theoretical, social, and political–were involved [...]» (*ibid.*, p. 447).

<sup>89</sup> «[...] [T]he synthesis was not a scientific revolution in the Kuhnian sense. [...] "[T]here was no missing piece of information that needed to be found, nor was there a neat, elegant, critical experiment that settled the controversy"» (*ibid.*, pp. 447-448 ; en italique dans le texte original).

<sup>90</sup> «The Synthesis is not characterized by startling or extraordinary new discoveries, concepts, or theories» (*ibid.*, 448).

de la biologie, parmi les sciences naturelles, exige une vigilance philosophique toute particulière.<sup>9192</sup>

Enfin, je passerai rapidement sur les relations troubles entre darwinisme et eugénisme, car il semble bien que le darwinisme social et l'eugénisme aient fait le succès du darwinisme biologique<sup>93</sup>: en effet, le darwinisme est tiré directement de l'idée fondamentaliste du monde capitaliste, de la concurrence économique, notions basées sur l'eugénisme.

#### 4. 3. 2. Limites et faiblesses de la Synthèse Moderne

Certains nouveaux concepts apportés à l'édifice néo-darwinien dépassent le cadre de la Synthèse et se révèlent en contradiction avec le darwinisme original<sup>94</sup>, comme la définition de l'espèce biologique<sup>95</sup>, certains aspects de la spéciation et l'idée d'une macro-évolution de type saltatoire qui ne saurait être une simple extrapolation de la micro-évolution —des notions encore très controversées<sup>96</sup>. Par exemple, non seulement il n'existe pas de consensus autour de la définition de l'espèce, mais encore on ne sait toujours pas comment les espèces s'élaborent<sup>97</sup>. De même, beaucoup d'aspects de

<sup>91</sup> «[...] [E]volutionary concepts such as adaptation [...] "have a way of expanding by cannibalizing other concepts that ought to also have a role in the whole explanatory framework" [...]. This peculiarity of biology among the natural sciences commands particular philosophical attention» (ibid., 448).

<sup>92</sup> Il est difficile de sous-estimer l'importance de cette remarque.

<sup>93</sup> Le darwinisme social étant prétendument apparu après le darwinisme biologique (alors que, sans en porter le nom, il le précéda largement), Guillaume Lecointre *et coll.* considèrent que, comme «[...] Darwin n'a proposé ni système philosophique, ni système social à partir de son œuvre scientifique», (*Guide critique de l'évolution*, p. 130), il ne saurait être tenu pour responsable de telles dérives. S'il est difficile d'accuser Darwin lui-même (souvent qualifié de génie et parfois même sanctifié), le lien entre ces différentes idées reste néanmoins évident.

<sup>94</sup> A tel point que Momme von Sydow considère que « Darwin n'était pas un darwiniste au sens moderne du mot » (« [...] Darwin was not a Darwinist according to today's sense of the word » (von Sydow, *From Darwinian Metaphysics [...]*, *op. cit.*, p. 108).

<sup>95</sup> Il subsiste un flou considérable autour de la notion d'espèce vivante, aucun consensus n'existant dans la littérature scientifique pour la définir. Le problème, dont Darwin était conscient, vient au moins en partie du fait que la distinction entre «espèces» est extrêmement vague et subjective, d'autant plus que la ligne de démarcation entre elles est elle-même floue et arbitraire : en conséquence, le concept d'espèce apparaît comme une abstraction fondée sur un ensemble de caractères qui est loin d'être aussi distinctif qu'on le pense habituellement.

<sup>96</sup> Pigliucci & Müller : *Elements of an Extended Evolutionary Synthesis* (*op. cit.*, p. 7).

<sup>97</sup> Thierry Lodé (communication personnelle).



l'évolution sont centrés sur les animaux, mais le monde végétal impose une vision radicalement différente, que ce soit au niveau de la définition de l'espèce ou de la spéciation. Notamment, Jean-Marie Pelt introduit le «principe d'associativité»<sup>98</sup>, véritable loi évolutive universelle basée sur la coopération, allant des particules subatomiques jusqu'aux sociétés d'êtres vivants et aux écosystèmes, et grâce à laquelle le monde tel que nous le connaissons s'est construit. Toutefois, de telles contributions sont simplement considérées comme rien de plus qu'un ensemble d'«exceptions» bizarres – et non des faits significatifs.

De plus, cela fait maintenant plusieurs décennies que presque tous les principes de la Synthèse moderne ont été, à un moment ou à un autre, contestés<sup>99</sup>, comme la sélection de parentèle (au profit de la sélection de groupe)<sup>100</sup>, ou le fait que la macro-évolution ne soit qu'une extrapolation de la micro-évolution<sup>101</sup> ; de la même façon, l'application de concepts de la physique et de la biochimie à des questions biologiques a été discréditée en faveur d'une vision «organiciste» de l'étude du vivant<sup>102</sup>.

Mais les critiques de la Synthèse moderne ne s'arrêtent pas là, car c'est une véritable «transformation intellectuelle» (*intellectual transformation*<sup>103</sup>) que certains auteurs préconisent : ils vont jusqu'à proposer de retirer un certain nombre de «parties mortes» (*dead parts*<sup>104</sup>) de la Synthèse, parmi lesquelles :

- 1) « Le génome se présente toujours comme un ensemble de gènes bien organisé »<sup>105</sup> ;
- 2) « Les gènes ont généralement des fonctions simples qui ont été spécifiquement adaptées par la puissance de la sélection naturelle »<sup>106</sup> ;

<sup>98</sup> Pelt, *L'évolution vue par un botaniste* (2011).

<sup>99</sup> « *Hardly any tenet of the Synthesis has remained unchallenged [...]* » (Callebaut, *The dialectics of dis/unity [...]*, *op. cit.*, p. 454).

<sup>100</sup> « [...] *downplaying collateral kin selection and upgrading group selection [...]* » (*idem*).

<sup>101</sup> « [...] *some paleontologists challenged [the] assumption that macroevolution is but microevolution writ large [...]* » (*idem*).

<sup>102</sup> « [...] *studies aimed at discrediting physics-oriented history and philosophy of science and fostering a rival 'organicist' view of science and nature* » (*ibid.*, p. 455).

<sup>103</sup> Expression citée par Callebaut (*idem*).

<sup>104</sup> Expression citée par Callebaut (*idem*).

<sup>105</sup> « *The genome is always a well-organized library of genes* » (cité par Callebaut, *idem*).

<sup>106</sup> « *Genes usually have simple functions that have been specifically honed by powerful natural selection* » (cité par Callebaut, *ibid.*, pp. 455-456).

- 3) « Les espèces sont étroitement adaptées à leur contexte environnemental grâce à leurs fonctions biochimiques adéquatement réglées »<sup>107</sup> ;
- 4) « Les unités pérennes d'évolution sont les espèces et, pour chacune d'elles, les organismes, les organes, les cellules et les molécules qui lui sont propres »<sup>108</sup> ;
- 5) « Étant donné que chaque organisme, chaque cellule, possèdent la capacité naturelle à s'adapter, les mécanismes qui sous-tendent cette aptitude peuvent être modélisés sur la base de principes fondés sur une conception performante »<sup>109</sup> .

Callebaut en conclut que « la Synthèse finira par disparaître et au bout du compte par tomber dans l'oubli, sauf pour la petite minorité de biologistes qui travaillent sur l'évolution »<sup>110</sup> (que l'on qualifie parfois d'ultra-darwinistes<sup>111</sup>) ; Daniel Brooks, lui, parle de « la théorie de l'évolution que nous sommes sur le point d'abandonner »<sup>112</sup> ; Donn Rosen renchérit : « Inutile d'amadouer le fantôme du néodarwinisme ; il ne tourmentera plus la théorie de l'évolution pour bien longtemps »<sup>113</sup>. Quant à la taxonomie phylogénétique de Hennig, elle a fini par se retourner contre l'évolution elle-même<sup>114</sup>.

Cela n'empêche pas la Synthèse moderne de faire preuve d'une remarquable résilience<sup>115</sup>, se révélant extrêmement adaptable aux changements et aux défis<sup>116</sup>. Ceci semble conforter l'idée qu'il s'agissait plutôt d'un ensemble de concepts et de modèles flexible et faiblement structuré que d'une «théorie» conforme à l'hypothético-

<sup>107</sup> « *Species are finely adjusted to their ecological circumstances due to efficient adaptive adjustment of biochemical functions* » (cité par Callebaut, *ibid.*, p. 456).

<sup>108</sup> « *The durable units of evolution are species, and within them the organisms, organs, cells, and molecules, which are characteristic of the species* » (cité par Callebaut, *idem*).

<sup>109</sup> « *Given the adaptive nature of each organism and cell, their machinery can be modeled using principles of efficient design* » (cité par Callebaut, *idem*).

<sup>110</sup> « [...] *the Synthesis will fade away and eventually vanish into oblivion, except for some minority of biologists working in evolution* » (*idem*).

<sup>111</sup> Stephen Jay Gould introduisit le terme d'hyper-darwinisme, notamment pour critiquer la position extrême de Richard Dawkins selon laquelle la sélection naturelle est toute-puissante et n'agit qu'au niveau des gènes. Toutefois, Erik I. Svensson affirme que l'ultra-darwinisme n'existe pas.

<sup>112</sup> « [...] *the theory of evolution we are about to discard* » (cité par Callebaut, *The dialectics of dis/unity* [...], *op. cit.*, p. 456).

<sup>113</sup> « *There is no need to placate the ghost of neo-Darwinism; it will not haunt evolutionary theory much longer* » (cité par Callebaut, *idem*).

<sup>114</sup> « *What began, with Hennig, as phylogenetic taxonomy [...] has turned, in its pattern-cladistic form, against evolution itself* » (*idem*).

<sup>115</sup> « *A Remarkable Resilience* » (*ibid.*, p. 457).

<sup>116</sup> « [...] [*The Synthesis*] *has been remarkably adaptable to new challenges* » (*idem*).

déductivisme à l'ancienne<sup>117</sup>. Cette résistance fit notamment face à la profonde remise en cause du fameux «dogme central» de la biologie moléculaire, en particulier la notion selon laquelle l'ADN ne s'auto-réplique pas<sup>118</sup>. De façon plus générale, l'idée que la Synthèse doive être étendue se révèle extrêmement subjective, et s'apparente au fait de savoir si un verre est à moitié plein ou à moitié vide<sup>119</sup>. En outre, tout comme la révolution darwinienne, la Synthèse moderne fut construite avec d'énormes lacunes<sup>120</sup>, comme l'idée que des considérations sur le développement sont hors sujet pour comprendre l'évolution<sup>121</sup>, et certains auteurs, tels Michael Lynch ou Guillaume Lecointre, s'accrochent à l'idée que la génétique des populations reste la base essentielle pour comprendre les mécanismes évolutifs<sup>122</sup>, ne se laissant aucunement impressionner par tous les résultats récents concernant la complexité (idée formellement catégorisée par Lecointre comme étant «inutile en biologie»<sup>123</sup>), l'épigénétique, l'évolvabilité, la modularité, la robustesse et autres sujets de l'Évo-Dévo, de la biologie cellulaire et de la génomique<sup>124</sup>. Cette attitude porte un nom, déjà mentionné : la «néophobie intellectuelle»<sup>125</sup>.

La résistance de la Synthèse moderne est liée à un autre aspect fréquent en science : le réductionnisme. Par exemple, le phénoménisme, ou phénoménalisme (*phenomenalism*<sup>126</sup>), prétend que la réalité se limite aux phénomènes, et que tout ce qui existe est phénomène (par opposition aux idées de l'idéalisme), et que la connaissance se limite

<sup>117</sup> « *This seems to support the view that it is first and foremost a loosely and flexibly structured network of concepts and models rather than a "theory" according to old-style hypothetico-deductivism* » (*idem*).

<sup>118</sup> « *Today, the insight that DNA (or anything else) is self-replicating is increasingly rejected [and] the "central dogma" is contested [...]* » (*idem*).

<sup>119</sup> « *Debates on the need (or not) to extend the Synthesis somewhat resemble the question of whether the glass is half full or half empty* » (*idem*).

<sup>120</sup> « *Both the Darwinian revolution and the Modern Synthesis were built on huge black boxes* » (*idem*).

<sup>121</sup> « [...] *many proponents of the "hardened" Synthesis held that developmental considerations are irrelevant to our understanding of evolution* » (*ibid.*, p. 458).

<sup>122</sup> « *For Lynch [...], population genetics is the "essential framework for understanding how evolution occurs [...]"* » (*ibid.*, p. 458) ; Lecointre précise que «l'individu s'efface devant la population» (*Guide critique de l'évolution*, p. 15). Lynch et Lecointre sont clairement des "ultra-darwinistes".

<sup>123</sup> Lecointre, La complexité en évolution : une notion inutile (*op. cit.*) ; au sujet de l'importance du concept de complexité biologique, voir mon article La notion de complexité en Biologie évolutive : une revue synthétique (2021).

<sup>124</sup> « *Today, someone like Michael Lynch remains unimpressed by much of the recent work on complexity [...], epigenetic innovation [...], evolvability [...], modularity [...], robustness, and other topics in EvoDevo, cell biology [...], and genomics [...]* » (Callebaut, *The dialectics of dis/unity [...]*, *op. cit.*, p. 458).

<sup>125</sup> « *Here a presumed essence is rhetorically invoked to justify intellectual neophobia* » (*idem*).

<sup>126</sup> *Ibid.*, p. 460.

à ces phénomènes. Plus poussé, le physicalisme (*physicalism*<sup>127</sup>) affirme que tout ce qui existe est réductible aux entités et propriétés fondamentales postulées par les sciences de la nature et, primordialement, par la physique : ainsi, toutes les connaissances seraient réductibles aux énoncés de la physique, donc aux objets physiques, observables et accessibles. Toutefois, ce réductionnisme doit faire face à un certain nombre de difficultés, menant en fin de compte à un «consensus anti-réductionniste» (*anti-reductionist consensus*)<sup>128</sup>.

En conclusion, dès son instauration, la Synthèse moderne s'est caractérisée par un certain nombre d'extension «latérales» et «verticales» et, simultanément, par des tendances opposées à toute unification, dans un processus sans fin<sup>129</sup>. Le résultat : la suprématie de la Synthèse semble remise en question, ce qui la rend de plus en plus déconnectée par les préoccupations quotidiennes de la plupart des biologistes<sup>130</sup> – en fait, il s'agit plutôt de compléter les concepts de la Synthèse que de les rejeter. Malgré cette tendance forte, une version renforcée de la Synthèse s'est développée depuis les années 1970, strictement sélectionniste et adaptationniste, en relation avec les sciences sociales et mêmes les sciences humaines<sup>131</sup>. Entre ces deux extrêmes, nous verrons les disciplines que sont l'Évo-Dévo, l'épigénétique, la macroévolution et la construction de niche très certainement jouer le rôle d'extensions à la Théorie de l'évolution pour y être finalement incluses<sup>132</sup>.

<sup>127</sup> *Idem.*

<sup>128</sup> *Ibid.*, pp. 460-461 ; au sujet de la réduction de la biologie à la physique, voir Dupré, *It Is Not Possible to Reduce Biological Explanations* [...] (*op. cit.*).

<sup>129</sup> « *Let me conclude. Ever since its inception, the Synthesis has been characterized by "lateral" and "vertical" extensions and by simultaneous disunifying tendencies, with no end in sight* » (Callebaut, *The dialectics of dis/unity* [...], *op. cit.*, p. 472 ; en italique dans le texte original).

<sup>130</sup> « *The [...] expansion of molecular biology [...] may seem to threaten the Synthesis's dominance by making it more ad more irrelevant to the real concerns of practicing biologists [...]* » (*ibid.*, p. 472).

<sup>131</sup> « [...] [S]tarting [...] in the mid-70s, a highly successful, narrowly selectionist and adaptationist "horizontal" expansion toward the social sciences and even the humanities reinvigorated a "hardened" version of the Synthesis » (*ibid.*, p. 472) ; Momme von Sydow parle d'une «radicalisation» (von Sydow, *From Darwinian metaphysics* [...], *op. cit.*, p. 140 & p. 144).

<sup>132</sup> « *Located between these poles, EvoDevo (broadly conceived so as to include epigenetics, innovation studies, and macroevolution) and niche construction theory will most likely be accommodated by the Synthesis as further extensions [...]* » (Callebaut, *The dialectics of dis/unity* [...], *op. cit.*, p. 472).

#### 4. 3. 3. Une critique de l'orthodoxie

Tout mouvement de pensée est basé sur une forme normale d'orthodoxie, qui exprime la conformité des idées vis-à-vis, en religion, des croyances et, en sciences, d'un paradigme ou d'une théorie. Fondamentalement, adhérer à une démarche orthodoxe ne pose pas de problème particulier, l'orthodoxie n'ayant a priori aucune raison d'être moins proche de la «vérité» que l'hétérodoxie. Toutefois, toute orthodoxie mène inévitablement à un certain conformisme qui, s'il est susceptible de procurer une sensation de confort et de sécurité, risque d'aboutir à un enfermement qui peut confiner à un aveuglement empêchant toute réflexion critique ; d'autre part, le modèle dominant étant partagé par le plus grand nombre, on tombe souvent dans les travers de l'argument d'autorité. Ainsi, toute idée un tant soit peu différente est au mieux considérée comme étrange, et au pire rejetée comme inacceptable, excentrique, presque hérétique.

Ainsi, le consensus sur l'évolution biologique, exposé dans la Synthèse moderne, devint le bastion d'une forme d'orthodoxie à la fin des années 1950, basé principalement sur quatre livres écrits par Dobzhansky<sup>133</sup>, Mayr<sup>134</sup>, Simpson<sup>135</sup> et Stebbins<sup>136</sup>, et qui ont rapidement façonné l'évolution darwinienne par sélection naturelle dans le cadre des connaissances sur la génétique, alors en pleine expansion. La sélection naturelle et la génétique des populations, piliers fondamentaux, constituent le cœur de cette Synthèse. Pour G. C. Williams<sup>137</sup>, « Toute explication biologique ne devrait faire intervenir aucun facteur autre que les lois de la physique, la sélection naturelle et la contingence liée à l'histoire. L'idée qu'un organisme présente une histoire complexe, dans laquelle la sélection naturelle a constamment opéré, impose des contraintes toutes particulières sur l'élaboration de théories évolutionnistes »<sup>138</sup>.

Souhaitant s'éloigner de cette orthodoxie, certains auteurs proposent des solutions alternatives au darwinisme. Ainsi, James Shapiro<sup>139</sup> s'emploie à détruire certains

---

<sup>133</sup> Dobzhansky, *Genetics and the origin of species* (1937).

<sup>134</sup> Mayr, *Systematics and the origin of species* (1942).

<sup>135</sup> Simpson, *Tempo and mode of evolution* (1944).

<sup>136</sup> Stebbins, *Variation and evolution in plants* (1950).

<sup>137</sup> Williams, *A defense of reductionism in evolutionary biology* (1985).

<sup>138</sup> « A biological explanation should invoke no factors other than the laws of physics, natural selection, and the contingencies of history. The idea that an organism has a complex history through which natural selection has been in constant operation imposes a special constraint on evolutionary theorizing » (*ibid.*).

<sup>139</sup> Shapiro, *Evolution: a view from the 21st century* (2010).

mythes de la science conventionnelle, comme la prétendue variation au hasard<sup>140</sup>. Dans cette perspective, les concepts de l'évolution biologique, perçue de façon non dogmatique et anti-conventionnelle (*nondogmatic and nonconventional vistas*<sup>141</sup>), peuvent être redéfinis et repensés en profondeur<sup>142</sup>. C'est une façon de penser libérée et élargie que propose cet auteur, une nouvelle manière de penser la science en général et l'évolution en particulier<sup>143</sup>. Les sciences évolutives sont ainsi loin de constituer une œuvre achevée et on peut s'attendre à de nombreuses découvertes.

Didier Raoult incite les scientifiques à « Dépasser Darwin »<sup>144</sup>, affirmant que « [...] la plupart des idées de Darwin sont dépassées »<sup>145</sup>, « obsolètes »<sup>146</sup> et doivent être revues et corrigées. Il prône l'action qui consiste à « [c]hanger nos définitions pour changer notre manière de penser »<sup>147</sup> afin de rendre les concepts compatibles avec l'observation<sup>148</sup>, d'où « [...] la nécessité de déboulonner les idoles modernes »<sup>149</sup> pour éviter d'en arriver à « [...] une espèce de religion darwinienne [...] »<sup>150</sup> : il dénonce les « [...] scientifiques qui croient que tout ce que dit Darwin est vrai et qui, finalement, font de *L'Origine des espèces* le nouvel Évangile »<sup>151</sup>.

De façon beaucoup plus polémique et incisive, Jean-François Moreel<sup>152</sup> attaque frontalement le darwinisme, qui n'est pas selon lui une hypothèse scientifiquement recevable<sup>153</sup> car aucune preuve de la sélection darwinienne n'aurait jamais été apportée par ses nombreux partisans. Moreel guide le lecteur vers des connaissances scientifiques très éloignées du « mythe », du « dogme »<sup>154</sup> officiels. Le darwinisme ne serait qu'une

<sup>140</sup> « [...] *random changes would overwhelmingly tend to degrade intricately organized systems* [...] » (*ibid.*, p. 134).

<sup>141</sup> *Ibid.*, p. ii (*Praise for Evolution: a view from the 21st century*, critique d'Eviatar Nevo).

<sup>142</sup> « [...] *a deep rethinking of basic evolutionary concepts* » (*ibid.*, p. xv).

<sup>143</sup> « [...] *a freer way of thinking about science in general and evolution in particular* » (*ibid.*, p. xi).

<sup>144</sup> Raoult, *Dépasser Darwin* (2010).

<sup>145</sup> *Ibid.*, p. 158.

<sup>146</sup> *Ibid.*, p. 13.

<sup>147</sup> *Ibid.*, p. 143.

<sup>148</sup> *Ibid.*, p. 145.

<sup>149</sup> *Ibid.*, p. 147.

<sup>150</sup> *Ibid.*, p. 158.

<sup>151</sup> *Ibid.*, pp. 148-149 (en italique dans le texte original).

<sup>152</sup> Moreel, *Le darwinisme, envers d'une théorie* (op. cit.).

<sup>153</sup> *Ibid.*, p. 9.

<sup>154</sup> *Ibid.*, pp. 67, 252, 254 & 269.

vaste «mystification»<sup>155</sup> de nature totalement idéologique<sup>156</sup>, un comble pour une théorie prétendument scientifique, qu'il qualifie de finaliste<sup>157</sup> et de tautologique<sup>158</sup> :

- Le finalisme du darwinisme réside dans le mode d'action de la sélection naturelle : l'explication sélectionniste représenterait une cause finale, équivalente à l'objectif, au but final pour lequel une adaptation existe ; Darwin lui-même envisagea ce type d'explication en lien avec la notion de sélection naturelle<sup>159</sup>;
- L'aspect tautologique du darwinisme est lié à la définition même de la sélection naturelle, que l'on peut reformuler comme «la survie de ceux qui ont survécu». En effet, la sélection naturelle permet la survie des plus adaptés (*survival of the fittest*) ; or, les plus adaptés sont, précisément, ceux qui survivent<sup>160</sup>. De plus, dans la nature, les êtres vivants que l'on peut observer sont les «survivants» de l'action de la sélection naturelle ; dans la plupart des cas, les autres, les «perdants», ne sont plus là pour témoigner de quoi que ce soit – et, d'une certaine façon, on ne possède aucune preuve qu'ils aient jamais existé, puisqu'ils ont, justement, disparu. Ainsi, c'est l'intégralité du darwinisme, au sein duquel la sélection naturelle est centrale, qui peut être considéré comme tautologique – donc, il faut bien le réaliser, relativement vide de sens<sup>161</sup>.

<sup>155</sup> *Ibid.*, p. 8.

<sup>156</sup> *Ibid.*, pp. 7, 258, 269.

<sup>157</sup> *Ibid.*, pp. 238, 252, 258.

<sup>158</sup> *Ibid.*, pp. 7, 251, 252 & 258.

<sup>159</sup> Voir Lennox, *Darwin was a teleologist* (1993).

<sup>160</sup> Momme von Sydow propose un développement détaillé des aspects tautologiques du darwinisme (von Sydow, *From Darwinian metaphysics [...], op. cit.*, pp. 339-357).

<sup>161</sup> Toutes les critiques à l'encontre du darwinisme ne sont pas dirigées contre la sélection naturelle elle-même, dont l'existence dans la nature est quasiment une lapalissade. En effet, les populations d'organismes présentant toutes un certain polymorphisme, il est évident que les différents individus font l'objet d'un tri en fonction d'un certain nombre de critères, notamment leur adaptation à leur environnement ; par contre, l'idée que la sélection naturelle soit une force *créatrice* doit être considérablement réévaluée afin de lui redonner une dimension plus «réaliste», car la sélection s'avère limitée et grossière dans son action : limitée quantitativement et qualitativement, spatialement et temporellement, car, dans bien des cas, elle n'intervient tout simplement pas ; grossière, car elle n'est capable d'éliminer que les formes les plus «extrêmes», les moins viables, les plus «anormales» que présentent les organismes. Ainsi, la sélection naturelle pourrait être plus simplement vue comme un agent intervenant dans un mécanisme de «purification» et de «stabilisation» phénotypiques.

#### 4. 3. 4. Erreurs et idées fausses

Didier Raoult a relevé, dans l'œuvre de Darwin, des «idées fausses» qu'il qualifie d'« [...] erreurs aboutissant à une vision pour partie faussée de l'évolution »<sup>162</sup>:

*Première idée fausse* : les espèces auraient divergé très tôt<sup>163</sup>.

En effet, « [p]our Darwin, [...] les espèces divergent depuis des embranchements survenus dès la création. [...] Cette idée, cueillie sur l'arbre de vie, qu'il y a eu très tôt des divergences irréversibles entre les espèces, est entièrement fausse »<sup>164</sup>. En effet, « [...] [c]e qui diverge de manière stable, ce qui est incapable de se recombinaison génétiquement finit [...] par disparaître »<sup>165</sup>. « La recombinaison n'est possible qu'à un stade où l'espèce ne s'est pas encore spécialisée, quand elle ne s'est pas encore séparée mécaniquement des autres êtres vivants. Au-delà, c'est l'impasse évolutive »<sup>166</sup>. Dans cette optique, la spéciation correspond à l'« [...] incapacité à se recombinaison avec d'autres espèces et sur adaptation à un écosystème précis [...] »<sup>167</sup> et mène, inévitablement, à la disparition<sup>168</sup>. Cette issue fatale est due au « [...] non-mélange de ce que l'on appelle le patrimoine génétique [...] »<sup>169</sup>, qui induit une dégénérescence souvent irréversible et qui se manifeste, notamment, chez les espèces en voie de disparition, pour lesquelles les faibles effectifs populationnels mènent à une augmentation de la consanguinité. Ainsi, « [...] [l]a spéciation, autrement dit la création des espèces, se fait quand il n'existe plus de recombinaison possible »<sup>170</sup>. En fait, « les espèces continuent de se mélanger » car « [...] tout ce qui a de l'ADN ou de l'ARN est capable d'échanges »<sup>171</sup>. Il en résulte que tous les êtres vivants sont des chimères, ce qui se manifeste, en particulier, par le fait que les cellules sont composites : les gènes des Eucaryotes proviennent pour une bonne partie de gènes de virus et de bactéries qui se sont insérés, et

<sup>162</sup> Raoult, *Dépasser Darwin* (op. cit., p. 17).

<sup>163</sup> *Ibid.*, pp. 19-24.

<sup>164</sup> *Ibid.*, p. 20.

<sup>165</sup> *Ibid.*, p. 20.

<sup>166</sup> *Ibid.*, p. 36.

<sup>167</sup> *Ibid.*, p. 20.

<sup>168</sup> *Ibid.*, p. 20.

<sup>169</sup> *Ibid.*, p. 20.

<sup>170</sup> *Ibid.*, p. 22.

<sup>171</sup> *Ibid.*, p. 33.



vraisemblablement continuent de s'insérer, à l'intérieur du génome<sup>172</sup>. Mais cette idée va encore plus loin, car les gènes, eux-mêmes, sont composites. En conclusion : « [...] on ne diverge pas inéluctablement, on n'arrête pas de se mélanger. [...] Tout change et tout se mélange, tout le temps »<sup>173</sup>.

Je reviendrai plus loin sur l'importance de ces transferts dits horizontaux d'information génétique dans l'explication du processus évolutif.

*Deuxième idée fausse* : les espèces dériveraient les unes des autres<sup>174</sup> et la confusion entre évolution et gradualisme.

Le darwinisme affirme effectivement qu'à partir d'un ancêtre commun unique, les espèces vivantes se seraient diversifiées et auraient ensuite évolué indépendamment les unes des autres, selon un processus lent, graduel, étalé dans le temps : on parle de descendance avec modification. C'est une confusion fondamentale, dénoncée notamment par Gould<sup>175</sup> : l'amalgame entre évolution et gradualisme. L'idée de base est que les mutations ponctuelles représentent le mécanisme de base de l'évolution : par une accumulation quantitative et graduelle de changements nucléotidiques individuels, le changement évolutif finit par se manifester qualitativement, par l'apparition d'une nouveauté ou d'une innovation<sup>176</sup>.

Cette vision de l'évolution est critiquée par James Shapiro<sup>177</sup>, qui indique que « parmi les aspects fondamentaux de la Synthèse moderne figure par exemple l'hypothèse *ad hoc* selon laquelle la variation héréditaire serait de nature aléatoire, ainsi que la croyance dans l'idée que les temps géologiques seraient suffisants pour permettre l'apparition de nouvelles formes de vie grâce à l'accumulation de petits changements adaptatifs triés par la sélection naturelle »<sup>178</sup> (dans cette optique, la sélection naturelle

<sup>172</sup> *Ibid.*, pp. 29 & 30.

<sup>173</sup> *Ibid.*, pp. 33-34.

<sup>174</sup> *Ibid.*, pp. 35-42.

<sup>175</sup> « [...] *traditional researchers* [...] *equate evolution with gradualism* » (« pour les chercheurs conventionnels, l'évolution est l'équivalent du gradualisme » ; Gould, *The structure of evolutionary theory*, p. 77).

<sup>176</sup> A. C. Love insiste sur la distinction entre nouveauté (*novelty*) comme origine de nouvelles entités, et innovation (*innovation*) comme origine de nouvelles activités (Love, *Explaining evolutionary innovation and novelty: a historical and philosophical study of biological concepts*, p. 15, note 10).

<sup>177</sup> Shapiro, *Evolution: a view from the 21st Century* (*op. cit.*).

<sup>178</sup> « *The basic elements of the Modern Evolutionary Synthesis included an ad hoc assumption about the random nature of hereditary variation [...] and a belief that geological time was sufficient for the selection-guided accumulation of small adaptive changes to produce new life-forms* » (*ibid.*, p. 142 ; en italique dans le texte original).

aurait une action positive, créatrice, alors qu'en fait elle se cantonnerait, par l'élimination des innovations non fonctionnelles, seulement à une dimension purifiante et stabilisante<sup>179</sup>. Shapiro insiste également sur le fait que « croire qu'un processus de modification génomique aléatoire et accidentel pourrait remplir la fonction du système d'ingénierie génétique naturelle nécessaire à la duplication et la réécriture de génomes de complexité croissante relève d'une foi considérable. En réalité, des modifications aléatoires auraient fortement tendance à endommager des systèmes complexes, plutôt qu'à en améliorer l'adaptation fonctionnelle, selon les affirmations de nombreux biologistes depuis le 19<sup>e</sup> siècle »<sup>180</sup>.

Darwin lui-même considéra le gradualisme comme indispensable à sa théorie<sup>181</sup>, alors que des auteurs contemporains, comme Alfred Russel Wallace, lui firent remarquer qu'il pouvait au contraire fort bien s'en passer. Si l'erreur peut être considérée comme acceptable pour l'époque, continuer d'affirmer au 21<sup>e</sup> siècle que l'évolution est graduelle semble pour le moins essentiellement obsolète. En effet, si on peut envisager certains processus micro-évolutifs comme graduels (cela semble applicable au mimétisme, par exemple, ou à la mise en place de certaines voies métaboliques), il paraît aujourd'hui évident que l'apparition de nombre d'attributs ne peut être progressive.

Marcel-Paul Schutzenberger en arrive ainsi à l'idée que le gradualisme est forcément «terriblement orienté», effaçant artificiellement toute «discontinuité qualitative» au cours de l'évolution. L'auteur prend pour exemple la «*tuyauterie*» des animaux (voies respiratoires chez les Vertébrés aériens, comparant la «*tuyère*» des Oiseaux, avec un point d'entrée et un point de sortie de l'air distincts, et le «*soufflet*» des Mammifères, avec un seul point d'entrée et de sortie), expliquant que « personne n'a fait l'exercice

---

<sup>179</sup> « *The role of selection is to eliminate evolutionary novelties that prove to be non-functional and interfere with adaptive needs. Selection operates as a purifying but not creative force* » (*ibid.*, p. 144).

<sup>180</sup> « *It requires great faith to believe that a process of random, accidental genome change could serve [the] function [of] [...] natural genetic engineering systems needed to duplicate and modify increasingly complex genomic constructs. [...] Indeed, as many biologists have argued since the 19th Century, random changes would overwhelmingly tend to degrade intricately organized systems rather than adapt them to new functions* » (*ibid.*, p. 134).

<sup>181</sup> Idée aristotélicienne axiomatisée en principe de continuité exprimé par Leibniz par la célèbre phrase « *Natura non facit saltus* ».

de concevoir une modification graduelle de [cette] tuyauterie », qui présente pourtant une complète «inversion» entre les deux clades<sup>182</sup><sup>183</sup>.

Ainsi, selon Raoult, la création ne se serait jamais figée et serait donc permanente<sup>184</sup> : non seulement de nouvelles espèces apparaissent en permanence, mais aussi de nouveaux gènes qui ne s'apparentent à rien du tout de connu et ne peuvent être rattachés à aucun ancêtre : impossible de retracer leur arbre généalogique<sup>185</sup>. On découvre également un certain nombre de gènes «inconnus», dont on ne sait pas à quoi ils servent et qui n'ont jamais été rencontrés chez d'autres êtres vivants : ils apparaissent comme totalement nouveaux<sup>186</sup>.

La conclusion qu'apporte Raoult à ce stade est presque choquante tant elle est contraire au discours scientifique standard : « Nous ne sommes pas là devant un

<sup>182</sup> Schutzenberger, *Une cellule est bien plus complexe qu'un Boeing 747. Le soleil, lui, est simplement compliqué* (2017).

<sup>183</sup> De telles discontinuités de «tuyauterie» sont encore plus apparentes en ce qui concerne l'appareil cardio-vasculaire au cours de l'évolution des Vertébrés ; comme le précise Jean Bailenger :

i) Chez les Téléostéens, « [...] l'appareil respiratoire et le cœur [...] sont disposés en série dans un circuit unique [...] », ce qui fait que le cœur ne renferme que du sang vicié ;  
ii) Par opposition, chez tous les Vertébrés terrestres, on observe une double circulation, le cœur se retrouvant « [...] au carrefour des deux circulations [...] », « [...] la circulation pulmonaire ou circulation de régénération, dite encore petite circulation, distincte de la circulation générale ou circulation d'utilisation, encore dénommée grande circulation ». Ainsi, « [c]ontrairement au cœur des animaux aquatiques celui des vertébrés terrestres [...] reçoit à la fois du sang vicié et du sang régénéré [...] » qui ne se mélangent pas grâce à un « [...] cloisonnement longitudinal du cœur qui s'établit progressivement » :

a) Chez les Amphibiens, seules les oreillettes sont cloisonnées, « [...] de sorte que le sang vicié et le sang régénéré se mélangent dans l'unique ventricule » ;

b) « La séparation ventriculaire s'édifie progressivement chez les Reptiles mais elle n'est complète que chez les Crocodiliens ; malgré cela, le sang vicié et le sang régénéré ont encore la possibilité de se mélanger [...]. La séparation entre les circulations d'utilisation et de régénération n'est complète que chez les Oiseaux et les Mammifères » (Bailenger, *L'aventure animale*, 1995, pp. 100-102).

Ces évolutions de la structure cardiaque s'accompagnent forcément de remaniements importants de l'intégralité du système cardiovasculaire. Bien que ces changements de dimension phylogénétique puissent être mis en relation avec le développement cardiovasculaire de l'embryon humain (changements ontogénétiques), il paraît difficile d'envisager une évolution graduelle d'un système cardiovasculaire donné au suivant au cours des temps géologiques : en effet, à chaque étape au cours de laquelle une cavité cardiaque supplémentaire apparaît, c'est l'intégralité du système cardio-vasculaire qui doit être remaniée, sans aucune forme intermédiaire possible (on ne peut passer progressivement d'un cœur à deux cavités à un cœur à trois cavités ni, surtout, d'un système «simple boucle» à un système «double boucle»), en flagrante contradiction avec le gradualisme darwinien. Ainsi, l'augmentation de la complexité ferait intervenir des «sauts monstrueux» ou, pour rester plus modéré, des «sauts qualitatifs» (expressions employées par Schutzenberger).

<sup>184</sup> Raoult, *Dépasser Darwin* (op. cit., p. 37).

<sup>185</sup> *Ibid.*, p. 38.

<sup>186</sup> On les appelle les gènes «orphelins» (*ibid.*, 38).

phénomène d'évolution mais de création. Contrairement à ce que pensait Darwin, le monde du vivant ne se contente pas d'évoluer : il est en permanence en train de créer des choses totalement nouvelles et de recréer des fonctions disparues »<sup>187</sup>. « Ainsi, impossible non seulement d'identifier un ancêtre commun (qui n'existe pas), mais encore de prétendre de façon certaine remonter aux débuts de "la vie" »<sup>188</sup>. En fin de compte, « [n]ous avons donc des ancêtres divers et non pas un ancêtre commun »<sup>189</sup>.

*Troisième idée fausse* : seuls les caractères utiles à l'espèce seraient transmis, et les attributs sélectionnés seraient toujours favorables à la survie de l'espèce.

Darwin ne pouvait avoir aucune connaissance du processus d'infection virale. Un virus est un parasite cellulaire : une fois entré dans une cellule, il intègre son génome à l'intérieur de l'ADN de cette cellule ; ainsi, un gène viral, un fois inséré dans un chromosome, peut ensuite être transmis de génération en génération, sans qu'il soit nullement favorable à la survie de l'hôte<sup>190</sup>. Il en va de même pour certaines bactéries qui sont capables de se rendre indispensables à leur hôte, qui devient alors dépendant d'elles sans qu'elles lui apportent quoi que ce soit de bénéfique. Ce processus se retrouve au niveau génétique moléculaire : certains gènes (par exemple codant pour une toxine et son antidote) ont su se rendre indispensables à des bactéries, là non plus sans apporter le moindre bénéfice<sup>191</sup>. Pour conclure, « [o]n est loin de la vision darwinienne de la transmission sélective des caractères utiles à l'espèce »<sup>192</sup>. Il est alors réellement possible, dans cette perspective, qu'un certain nombre d'attributs n'aient pas du tout été sélectionnés, mais se retrouvent au sein d'un organisme pour des raisons

---

<sup>187</sup> *Ibid.*, p. 39.

<sup>188</sup> *Ibid.*, p. 40. Comme le précise Raoult, la notion même de vie est « irréductible à une définition scientifique » (*idem*). Pour une discussion approfondie des difficultés à définir la vie, voir Alberto Molina Perez, *Téléologie et fonctions en biologie* (2017, chapitre V : « La vie existe-t-elle? »).

<sup>189</sup> Raoult, *Dépasser Darwin* (*op. cit.*, p. 42). Ce résultat remet complètement en cause la classification phylogénétique.

<sup>190</sup> C'est même parfois tout le contraire, puisque certains cancers d'origine virale (comme les cancers du col de l'utérus, dus aux papillomavirus humains) peuvent se manifester des années, voire des décennies après l'infection originelle et l'insertion des gènes viraux dans les cellules humaines.

<sup>191</sup> *Ibid.*, p. 53.

<sup>192</sup> *Ibid.*, p. 48.

complètement différentes<sup>193</sup> – comme les processus liés à la convergence évolutive, sur lesquels je m'étendrai plus loin.

#### 4. 3. 5. *Le darwinisme : finaliste, idéologique, doctrinaire, sectaire, tautologique*

Jean-François Moreel considère que le darwinisme n'est pas une théorie scientifique<sup>194</sup>. Dénonçant «une illusion de puissance explicative», «une rupture entre science et réalité» voire une «fraude rédactionnelle» faisant «obstacle au développement des sciences biologiques»<sup>195</sup>, l'auteur révèle des «théories qui dictent leurs lois aux faits»<sup>196</sup> d'observation et aux faits expérimentaux. Il en résulte une orientation «métaphysique», «non scientifique», des interprétations darwiniennes<sup>197</sup>.

En effet, la «rhétorique tautologique»<sup>198</sup> de la science darwinienne « [...] part d'une conclusion définie *a priori* puis tente de lui apporter des arguments en manipulant des données empiriques. Elle recherche quelques faits illustrant la doctrine et occulte les autres. S'enfermant dans une forme hermétique de déductivisme, elle ignore toute hypothèse issue des réalités observées pour ne valider que celles qui sont tirées directement de la théorie. Ce faisant, le darwinisme impose l'abandon du "principe de primauté des faits" qui est caractéristique de la pensée expérimentale et de toutes démarches scientifiques basées sur l'empirisme inductif<sup>199</sup>. De plus, au travers de la démarche hypothético-déductive, le darwinisme réintroduit la recherche fondée sur une

---

<sup>193</sup> On pense évidemment ici à la dérive génétique, ce qui appelle deux remarques : d'une part, se référer au hasard pour expliquer la fixation d'un allèle n'explique pour ainsi dire rien ; d'autre part, il se pourrait que la dérive génétique ne soit rien d'autre qu'une forme de sélection naturelle dont le déterminisme serait inconnu.

<sup>194</sup> Moreel, *Le darwinisme, envers d'une théorie* (op. cit., p. 9).

<sup>195</sup> *Ibid.*, p. 10.

<sup>196</sup> *Idem.*

<sup>197</sup> *Ibid.*, p. 11.

<sup>198</sup> *Ibid.*, p. 7.

<sup>199</sup> Il est important de noter que le raisonnement inductif (par le biais des inférences inductives) pose un certain nombre de problèmes, car, si le déductivisme peut mener à des certitudes (pour peu que les prémisses soient justes), l'inductivisme ne peut conduire qu'à des généralisations parfois abusives. Je ne suis donc pas certain que la position inductiviste défendue par Moreel soit la bonne – mais ses critiques du déductivisme sont certainement questionnantes.

finalité<sup>200</sup> des choses définie arbitrairement [...] »<sup>201</sup>. La nature métaphysique, idéologique, voire sectaire du darwinisme est dénoncée par de nombreux auteurs, tel Karl Popper, qui a écrit : « J'ai l'intention de soutenir que la théorie de la sélection naturelle n'est pas une théorie scientifique que l'on peut mettre à l'épreuve, mais plutôt un programme de recherche métaphysique »<sup>202</sup>.

Le darwinisme pose, dès le départ, « [...] une certaine omniprésence de la sélection [naturelle] qui agit indépendamment aux différents niveaux selon des modes plus ou moins distincts »<sup>203</sup>. Toutefois, « [l]es résultats des expériences [...] confirment l'action conservatrice de la sélection [...] et aboutissent à la réfutation de son rôle dans l'évolution des espèces. Seules les interprétations fondées sur la finalité des adaptations apportent des arguments à la sélection naturelle [...]. Très rapidement, c'est en s'éloignant des données empiriques que les partisans du darwinisme soutiennent leur modèle [...] en déformant la réalité des faits »<sup>204</sup>.

Ainsi, le darwinisme « [...] ignore tout du problème que pose la finalité en science »<sup>205</sup> et est présenté comme un truisme. « Le débat se tourne alors, définitivement semble-t-il, vers l'hypothèse de la "sélection du plus apte" [érigée] en un véritable dogme [...]. [L]'évolution est [considérée comme] un fait prouvé par la biodiversité dont elle est censée rendre compte et [...] seuls les rôles respectifs de la mutation et de la sélection sont discutés »<sup>206</sup>. « [...] Alors qu'elle est présentée comme conforme à l'empirisme et issue d'une recherche d'explication du "comment" de l'évolution, l'hypothèse de la sélection naturelle s'avère infirmée par les résultats expérimentaux [...]. C'est en partant d'un but hypothétique qu'ils accordent à telle ou telle adaptation que

<sup>200</sup> Il semble que Moreel confondre ici *finalité* et *finalisme*. Brièvement, en sciences on reconnaît des finalités «apparentes» dans les processus physico-chimiques dits *téléomatiques* et dans les processus dits *téléonomiques* correspondant à la réalisation d'un programme (menant à la réalisation de systèmes adaptés et fonctionnels) – mais on rejette tout *finalisme*, qui fait intervenir des causes finales *téléologiques* (qui relèvent d'une «finalité cosmique» ; voir *Guide critique de l'évolution, op. cit.*, pp. 104-107). Toutefois, cette distinction s'avère arbitraire et fondamentalement discutable (un certain nombre d'auteurs défendent différentes visions authentiquement et scientifiquement téléologiques du vivant, et je prépare un manuscrit à ce sujet).

<sup>201</sup> Moreel, *Le darwinisme, envers d'une théorie (op. cit., p. 241 ; en italique dans le texte original)*.

<sup>202</sup> Cité par Moreel (*ibid.*, p. 242, note n.º 4).

<sup>203</sup> *Ibid.*, p. 242 ; pour une critique du «pan-sélectionnisme», voir von Sydow, *From Darwinian metaphysics towards understanding the evolution of evolutionary mechanisms (op. cit., pp. 350-357)*.

<sup>204</sup> *Ibid.*, p. 243.

<sup>205</sup> *Ibid.*, p. 245.

<sup>206</sup> *Idem.*

les auteurs vont expliquer l'apparition d'une structure ou décider de la supériorité adaptative d'un organisme sur un autre. [...] La biologie darwinienne va s'orienter vers l'élaboration a priori d'hypothèses issues de la théorie et reposant sur la finalité des choses pour rendre compte des faits constatés. [...] Il y a alors rupture entre biologie empirique et histoire naturelle [...] l'évolution sort du champ des sciences expérimentales »<sup>207</sup>. « Aucune hypothèse darwinienne ne pouvant plus être écartée, toutes celles imaginables dans ce cadre ont pu voir le jour. A l'inverse, toutes celles ne provenant pas de cette théorie – la seule officiellement en vigueur – sont arbitrairement rejetées *a priori*. [...] Sans présenter aucune explication des mécanismes impliqués, la nouvelle "science" fait de la théorie darwinienne une réalité indéniable bien que totalement fictive. La sélection du plus apte, cœur du "dogme", se trouve à l'abri de toute mise à l'épreuve [...] les hypothèses darwiniennes deviennent irréfutables »<sup>208</sup>. « [...] Aux yeux des partisans du darwinisme, les arguments empiriques sont irrecevables. [...] [L]'antériorité et le caractère confus de leur théorie permettent aux darwiniens de l'ériger en principe absolu aux détriments des faits »<sup>209</sup>. Ainsi, « [c]oupé de tout empirisme, [...] le darwinisme s'est entièrement désolidarisé du tangible [...] [et] a envahi l'ensemble du tissu scientifique [...]. Il a mis en place un ensemble de garde-fous qui lui assure le contrôle de l'opinion publique et la main-mise sur l'activité des intellectuels »<sup>210</sup>.

Selon Moreel, la tautologie darwinienne apparaît à plusieurs reprises : par exemple, affirmer que la macro-évolution rend compte de la biodiversité, qui, elle-même, constitue la preuve de la macro-évolution, est bel et bien un exemple de tautologie ; dans la même veine, énoncer que la survivance du plus apte explique sa survie. De façon plus subtile, le darwinisme soutient que la concurrence et la sélection ne s'exercent qu'entre individus d'une même espèce puisque ce n'est qu'entre individus occupant une même niche écologique et formant une communauté reproductive que la concurrence et la sélection peuvent s'exercer<sup>211</sup>. D'autre part, le darwinisme a permis l'accumulation de données empiriques contradictoires qui ont néanmoins été incorporées à

---

<sup>207</sup> *Idem*.

<sup>208</sup> *Ibid.*, pp. 248-249 (en italique dans le texte original).

<sup>209</sup> *Ibid.*, p. 249.

<sup>210</sup> *Ibid.*, p. 250.

<sup>211</sup> *Ibid.*, p. 251.

la théorie. Aussi, il s'avère que la sélection naturelle n'est qu'une hypothèse accessoire, voire inutile, qui n'explique ni la micro-évolution, ni l'équilibre écologique des populations par rapport à la disponibilité alimentaire des milieux<sup>212</sup>. En prenant pour principe ultime de tirer ses hypothèses de la théorie et de réfuter celles qui sont induites par les faits d'observation, la démarche darwinienne est devenue circulaire : de la théorie sont déduites des hypothèses dont la vérification des conséquences mène à une confirmation de la théorie. Même lorsque les résultats obtenus ne sont pas en accord avec la théorie, tout est mis en œuvre pour conserver cette dernière, et toute autre méthode, hypothèse ou théorie est d'emblée rejetée<sup>213</sup>. Ainsi, les modèles explicatifs de l'évolution doivent, à tout prix, être déduits de la théorie elle-même. Étant donné que cette pratique est corroborée par de nombreuses publications scientifiques internationales, elle conduit à une authentique fraude rédactionnelle de la part de nombreux auteurs, qui doivent absolument présenter leurs hypothèses comme étant des conséquences de la théorie, alors même qu'elles ont été induites de résultats empiriques. Il en résulte l'impossibilité d'exploiter les données empiriques non-incorporables dans le darwinisme. De cette façon, seuls les mécanismes permettant la «lutte pour la survie» sont étudiés, car ils corroborent la théorie darwinienne ; par contre, d'autres hypothèses ne sont l'objet que de recherches plus ou moins anecdotiques dont les publications associées restent malheureusement rares<sup>214</sup>. Tous ces aspects cumulés entretiennent l'illusion de puissance explicative du darwinisme. En outre, et pour finir, l'explosion des biotechnologies a pour effet de reléguer les lois du vivant<sup>215</sup> complètement à l'arrière-plan. De plus, la confusion entre science et technologie<sup>216</sup> est à l'origine d'une très grave confusion : comme la technologie semble pouvoir gouverner le réel, on en arrive à croire que la science le peut également – alors même que cela devrait être tout le contraire : c'est le réel qui doit gouverner la science<sup>217218</sup>.

---

<sup>212</sup> *Ibid.*, p. 252.

<sup>213</sup> *Idem.*

<sup>214</sup> *Ibid.*, p. 253. Cette mise à l'écart pour cause de prétendue obsolescence est par exemple le cas de la théorie structuraliste.

<sup>215</sup> Ces lois du vivant restent totalement inconnues car, ignorées par les chercheurs, elles ne sont l'objet d'aucun projet scientifique.

<sup>216</sup> On parle parfois de «techno-science» (voir Habermas, *La technique et la science comme idéologie*, 1973).

<sup>217</sup> *Ibid.*, p. 254.

<sup>218</sup> Cette dérive se retrouve jusque dans les documentaires prétendument scientifiques qui se doivent, pour mieux être vendus – et sous le contrôle des institutions scientifiques –, d'adhérer intégralement au



## § 5. Vers une nouvelle vision du vivant et de son évolution

Un profond remaniement, un nouveau mode de pensée évolutionnistes sont aujourd'hui plus que nécessaires, et sont d'ailleurs en train de se mettre progressivement en place, grâce à diverses contributions qui se complètent les unes les autres dans une approche multifactorielle et pluridisciplinaire du vivant et de son évolution. Un certain nombre de solutions ont été précédemment abordées : j'y reviens dans cette partie afin de les préciser et de les compléter.

### 5. 1. Laisser le vivant se définir lui-même : de la matière vivante à l'évolution en passant par l'individu biologique

#### 5. 1. 1. De la spécificité distinctive du milieu intérieur à l'autonomie biologique individuelle

Le déterminisme génétique, partie intégrante du Dogme central de la biologie moléculaire, est lié à la vision du vivant réduit à la matière vivante, inerte par définition. L'objet même de la biologie a ainsi été complètement écarté : l'individu biologique<sup>219</sup> dans toute sa spécificité, sa richesse et sa complexité.

Pour sortir de cette impasse et revenir à une science authentiquement biologique, André Pichot<sup>220</sup> propose plusieurs pistes des plus intéressantes :

- « Devant l'impossibilité de donner une définition objective du vivant, [Pichot] préf[è]r[e] le définir comme ce qui se définit soi-même et s'érige en entité par rapport à ce qui devient son milieu extérieur »;

---

dogme darwinien, qui en profite, au passage, pour asseoir son quasi-monopole médiatique, grâce au surcroît d'intérêt d'une population totalement sous l'emprise fascinante des images : ainsi, abusé par l'imagerie artificielle truffée d'effets spéciaux numériques (certes souvent très réussis et donc d'une crédibilité absolue), associés à un discours souvent incompréhensible pour lui, mais tous deux présentés comme scientifiques, le grand public acquiert, très tôt, la certitude de l'évolution darwinienne, puisqu'il l'a vue de ses propres yeux (*ibid.*, pp. 254-255 ; au sujet du contrôle par les institutions scientifiques, voir Sniadecki, *Guillaume Lecointre, guide critique*, 2005). De la même façon, les commentaires sont souvent tout aussi creux que tautologiques, comme par exemple la phrase suivante, entendue dans de très nombreux documentaires : « Dans cet environnement particulier, les êtres vivants se sont adaptés ».

<sup>219</sup> Comme nous l'avons vu, le darwinisme est axé sur une pensée populationnelle dans laquelle « l'individu s'efface ». Cette façon de penser le vivant a clairement eu un impact majeur sur les représentations, prétendument « biologiques », du vivant.

<sup>220</sup> Pichot, *Éléments pour une théorie de la biologie* (1980).

- « La vie est alors définie comme un dialogue dans lequel le vivant et son milieu extérieur se définissent l'un par rapport à l'autre » ;
- Ainsi, « [...] l'individu biologique identifie le bipôle vivant-milieu extérieur [...] »<sup>221</sup> ;
- Il en résulte que « [l]'émergence de l'individu biologique est liée de manière étroite à la capacité du vivant à s'établir en entité distincte de son milieu [...] »<sup>222</sup> ;
- Et, conséquence extrêmement importante, « [...] le moindre élément du vivant, structure ou réaction, est nécessaire [...], une occurrence inévitable [...] », d'où le fait que, « [...] chacun des éléments du vivant [étant] déterminé par l'ensemble des éléments réalisés de ce vivant [...] », « [...] le moindre élément du vivant se trouve ainsi soustrait à la contingence [...] » ;
- Pichot en arrive alors à une notion fondamentale, la « [...] prise d'autonomie [du vivant] vis-à-vis du milieu extérieur [...] », en fait une « autonomie dépendante »<sup>223</sup> qui s'inscrit dans une véritable dialectique entre l'organisme et son environnement propre, subjectif<sup>224</sup>.

### 5. 1. 2. De la prise en compte des contradictions dialectiques du vivant à la détermination de son évolution

Dans une optique analogue, Guillaume Suing et Damien Aubert<sup>225</sup> développent l'idée que « [...] les systèmes vivants [...] peuvent être compris de manière naturelle par une approche *dialectique* »<sup>226</sup> (dans laquelle « [...] le mécanisme darwinien [...] apparaît comme l'exception [...] » et qui « [...] permet de lever un des principaux hiatus philosophiques de l'évolutionnisme : la transformation de la quantité en qualité (et réciproquement) »). En effet, « [s]uivant le principe dialectique de l'accumulation quantitative induisant un bond qualitatif, on évite l'idée d'un processus graduel et abstrait [...] ».

<sup>221</sup> *Ibid.*, p. 30.

<sup>222</sup> *Ibid.*, p. 31.

<sup>223</sup> *Ibid.*, p. 33.

<sup>224</sup> Dans sa conclusion, Pichot exprime même l'idée que « [l]'autodéfinition du vivant, tant dans le développement que dans l'évolution, ressemble fort à un processus cognitif [...] » (*ibid.*, p. 230).

<sup>225</sup> Suing & Aubert, *Evolution : vers une approche dialectique* (2017).

<sup>226</sup> *Ibid.* (en italique dans le texte original).

Ainsi, dans l'optique de dialectiques impliquant variation et sélection ou génotype et phénotype, et d'une évolution « [...] intimement liée à la définition de la vie elle-même », « [...] le mouvement autoconservateur de la vie a pour conséquence, de par sa lutte contre les fluctuations du milieu, d'aboutir à une transformation du vivant, c'est-à-dire à sa non-conservation tel qu'il était. [...] La contradiction dynamique fondamentale du vivant déterminerait donc celle du moteur de son évolution [...] ». Suing et Aubert précisent que « [c]ette évolution s'est elle-même complexifiée/perfectionnée suivant une tendance à l'émancipation progressive des contraintes environnementales » (grâce au développement de formes pluricellulaires coloniales, de la reproduction sexuée et des sociétés organisées, par exemple). « On a donc affaire à des systèmes ayant des propriétés autoconservatrices de plus en plus efficaces, mais qui paradoxalement, du fait de cette efficacité, semblent mettre en péril la conservation du système sur le long terme ».

Dans cette perspective, « [...] nous apprenons que des mécanismes hautement élaborés se sont superposés au cours de l'histoire du vivant, en suivant une tendance autoconservatrice fondamentale, dont la seule finalité est de faire conserver/compliquer<sup>227</sup> la propriété autorépllicative/autoconservatrice de ses origines moléculaires. En somme, non seulement le vivant ne se conserve relativement que parce qu'il évolue, mais il évolue parce que des tendances conservatrices ont mis en œuvre des stratégies de plus en plus efficaces et opportunes, "domptant" ou détournant les tendances à la désorganisation naturelle (mutations, vieillissement, hybridation, extinction de clones, etc.) ». Toutefois, Suing et Aubert constatent que « [m]alheureusement, cette dynamique [...] est souvent complètement absente de nos diagrammes phylogénétiques, mais aussi de nos classifications ». En conclusion, il apparaît que « [l]es fameux principes de la dialectique sont [...] de plus en plus évidents en biologie pour peu qu'on identifie la "conservation" du vivant [...] comme un contre-mouvement perpétuel aux fluctuations incessantes du milieu [...] ».

Il me semble possible de voir ici se profiler une notion des plus essentielles, selon laquelle le vivant serait capable de piloter lui-même son propre processus évolutif – notion qui sera amplement développée plus loin.

---

<sup>227</sup> Le terme «complexifier» me semble plus adéquat.

## 5. 2. Le structuralisme biologique

La plupart des publications sur la pensée évolutionniste ne font référence, de façon résumée, qu'aux théories lamarckienne et darwinienne. Il en existe toutefois d'autres (dont certaines sont présentées par Richard Dawkins dans le dernier chapitre de *l'Horloger aveugle*<sup>228</sup>). Je m'intéresserai uniquement ici au structuralisme, qui m'apparaît comme une alternative sérieuse au fonctionnalisme darwinien.

Le structuralisme repose sur les notions suivantes<sup>229</sup> :

- Un certain nombre d'aspects présents chez les êtres vivants ne présentent aucune dimension adaptative (comme, par exemple, les grands «plans d'organisation») ;
- En particulier, de nombreuses innovations évolutives, qui permettent de définir les grands groupes phylogénétiques, font penser à des «schémas primordiaux» (*primal patterns*) qui ne sont absolument pas des adaptations ;
- La forme et la structure des organismes vivants seraient la conséquence de propriétés physico-chimiques fondamentales de la matière vivante<sup>230</sup>, n'ayant aucun rapport premier avec le modèle d'évolution darwinienne (seules les adaptations ultérieures de ces formes et structures seraient dues à la sélection naturelle, menant à des «masques adaptatifs» trompeurs quant à l'origine ultime des formes et structures originelles) : ainsi, le vivant peut être considérée comme un système présentant un état particulier d'organisation physico-chimique ;
- Contrairement à une idée reçue, le structuralisme n'est pas une forme déguisée de créationnisme, ni même une théorie anti-évolutionniste ; au-delà de la mise en œuvre de lois fondamentales de la matière vivante, cette théorie postule que le fonctionnalisme darwinien, par lui-même, n'est pas suffisant pour expliquer l'histoire et l'évolution du vivant ;

---

<sup>228</sup> Dawkins, *The Blind Watchmaker* (1987 ; voir le chapitre intitulé 11, intitulé «*Doomed Rivals*» – qu'on peut traduire par «Des concurrents voués à l'échec»).

<sup>229</sup> Le structuralisme est présenté en détail par Michael Denton dans *Evolution: Still a Theory in Crisis* (*op. cit.* ; voir pp. 12-20, 66-68, 100, 114-117, 222, et tout spécialement le Chapitre 13).

<sup>230</sup> Denis Noble défend une optique similaire : « [...] les fonctions des systèmes biologiques reposent sur d'importantes propriétés de la matière qui ne sont pas déterminées par les gènes » (Noble, *La musique de la vie*, 2007, p. 32).

- Dans cette perspective, les formes fondamentales présentes chez les organismes vivants, appelés «Types»<sup>231</sup>, sont considérés comme immanents et déterminés par un ensemble de lois biologiques naturelles spécifiques, dites «lois de forme».

Deux remarques importantes : (i) le fait que le fonctionnalisme darwinien semble suffisant<sup>232</sup> pour expliquer l'histoire de la vie ne signifie absolument pas que le darwinisme fournisse effectivement une théorie complète sur l'origine et l'évolution du vivant ; (ii) l'objection selon laquelle il n'existerait aucune preuve de la validité du structuralisme repose d'une part sur une forme d'aveuglement intellectuel<sup>233</sup> et, d'autre part, sur le fait que le structuralisme n'ayant jamais rencontré la faveur des scientifiques, très peu d'études y ont été rattachées<sup>234</sup>.

### 5. 3. La biologie évolutive développementale, ou Évo-Dévo : expliquer la phylogenèse par l'ontogenèse

L'embryologie et la biologie du développement ayant été entièrement exclues du domaine de la Synthèse moderne, l'Évo-Dévo permet maintenant de corriger efficacement cette mise à l'écart, en étudiant l'évolution phénotypique que la Synthèse moderne ne semble pouvoir expliquer de façon satisfaisante<sup>235</sup>. Plus précisément, la biologie évolutive développementale cherche à relier l'histoire évolutive des espèces animales (phylogenèse des métazoaires) au développement embryonnaire de ces

<sup>231</sup> Comme le précise Jean-François Moreel, « [L]a vision typologique, dans laquelle existent de très nombreuses formes de vie correspondant à différentes combinaisons possibles mais ne représentant pas un continuum, semble aujourd'hui plus que jamais s'imposer » (Moreel, *Le darwinisme, envers d'une théorie*, op. cit., p. 120 ; voir aussi p. 186).

<sup>232</sup> De nombreuses propositions scientifiques, certes nécessaires pour tenter de comprendre le réel, sont abusivement considérées comme également suffisantes – ce qui notamment génère un certain nombre de confusions quant à la nature de ce réel et, plus encore, la notion de «vérité scientifique». Cette problématique, extrêmement sous-estimée, mériterait, à elle seule, un développement indépendant.

<sup>233</sup> L'expression peut sembler exagérée, voire caricaturale ; toutefois, en sciences comme dans bien d'autres domaines de la pensée, il est bien connu qu'en général on trouve ce qu'on cherche (et, en conséquence, qu'on ne trouve pas ce qu'on ne cherche pas).

<sup>234</sup> L'investigation scientifique étant limitée de façon critique par le financement de la recherche (fonctionnement des laboratoires, salaire des chercheurs), les projets s'en retrouvent forcément orientés vers les sujets «porteurs», susceptibles, précisément, de favoriser le déblocage des fonds nécessaires (et il en résulte que les programmes de recherche «hors des sentiers battus» sont extrêmement rares).

<sup>235</sup> Pigliucci & Müller, *Elements of an Extended Evolutionary Synthesis* (op. cit., p. 4).

organismes (ontogenèse des métazoaires), en considérant que l'évolution de la forme animale trouve son origine dans des changements embryologiques : l'apparition d'une nouvelle forme adulte résulte de la mise en place d'une innovation au cours du développement embryonnaire. Ainsi, l'Évo-Dévo, résultant du rapprochement entre l'embryologie et la génétique, permet d'établir un lien entre la biologie du développement et la biologie évolutive, autour de la notion centrale d'innovation évolutive. L'Évo-Dévo tente de ce fait de retracer l'histoire des modifications de l'information génétique ayant mené à des modifications du développement embryonnaire significatives d'un point de vue évolutif. En conséquence, il est possible de considérer que l'Évo-Dévo étudie l'évolvabilité (ou évoluabilité), c'est-à-dire capacité des organismes à produire des innovations<sup>236</sup>.

#### 5. 4. La dimension écologique de l'évolution : construction de niche et écologie évolutive

Une autre discipline grandement passée sous silence est l'écologie. Ce fait n'est pas très étonnant, car les pionniers de l'écologie, au XIXe siècle, ne connaissaient que Lamarck, et ce n'est qu'à partir des travaux de Karl Möbius (1825-1908) et de Johannes Eugenius Bülow Warming (1841-1924) que la notion d'équilibre écologique s'est véritablement développée. Cette grave lacune est maintenant en bonne voie d'être comblée, notamment grâce à la Théorie de la construction de niche (*Niche Construction Theory*), qui remonte à Conrad Hal Waddington (1905-1975), qui proposa le concept de «système d'exploitation» par lequel des animaux, en modifiant leur environnement, sont à l'origine de modifications de l'action de la sélection naturelle, que ce soit pour eux-mêmes ou pour leur descendance. Richard Lewontin (1929-2021), développa l'idée que les organismes ne s'adaptent pas à leur environnement, car ils sont capables de le construire eux-mêmes de toutes pièces. Plus récemment, la construction de niche a été définie comme étant le processus par lequel le fonctionnement des organismes vivants, leurs activités et leurs choix modifient ou stabilisent certains états environnementaux, et, ainsi, modifient la sélection naturelle qui agit sur eux-mêmes et sur

---

<sup>236</sup> Danciu, *Explications mécanistes et téléologiques de l'évolution de la forme* (2019, p. 7).

d'autres espèces<sup>237</sup>. En effet, les êtres vivants peuvent modifier leur environnement, par exemple en construisant des nids, des terriers et autres abris ; en sélectionnant leur habitat ainsi que leurs ressources alimentaires primordiales ; en changeant de localisation (comme lors des migrations) ; en laissant des «héritages écologiques» à «destination» des générations futures<sup>238</sup>. La construction de niche influence également le développement, notamment embryonnaire, et constitue un moyen important par lequel des facteurs environnementaux peuvent laisser une empreinte durable sur ce développement<sup>239</sup>.

Thierry Lodé développe, quant à lui, une vision de l'évolution essentiellement centrée sur l'écologie – d'où l'idée d'une écologie évolutive. Notamment, et de façon très originale, Lodé propose la théorie dite des «bulles libertines», « [...] qui énonce que les relations, dont les relations sexuelles, se sont élaborées à partir d'interactions archaïques dérivées du métabolisme cellulaire primitif et que la sexualité est indépendante de la reproduction »<sup>240</sup>. Tout d'abord, « [l]a vie commence dans des bulles parce que les premières molécules génétiques ne pouvaient résister sans la protection d'une membrane [...] ». Ensuite, « [...] [à] partir des échanges génétiques pratiqués par quelques bulles libertines primitives [...], un mécanisme complexe de maintien des gènes s'est mis en place. La promiscuité a obligé aux transferts de gènes, mais il en a découlé un avantage inattendu : les gènes transférés ont changé les enzymes des bulles qui les obtenaient. [...] Conséquence secondaire de réactions métaboliques primitives, le sexe provient de cette sensibilité élémentaire qui a conduit à accroître le succès reproducteur des individus les plus sensibles, ceux qui interagissent ensemble »<sup>241</sup>. « Le fait que nombre de modalités de la facilitation se retrouvent aussi bien chez les eucaryotes les plus primitifs [...] montre combien le mécanisme est ancien, qui construit

<sup>237</sup> « 'Niche construction' refers to the process whereby the metabolism, activities and choices of organisms modify or stabilize environmental states, and thereby affect selection acting on themselves and other species » (Laland, Odling-Smee & Turner, *The role of internal and external constructive processes in evolution*, 2014).

<sup>238</sup> « Organisms can modify selective environments externally, for instance, through constructing nests, burrows, mounds, selecting habitat and essential resources, relocating in space (e.g. migration), and leaving ecological legacies for future generations » (*ibid.*).

<sup>239</sup> « Niche construction also influences development, and constitutes an important way in which environmental factors imprint upon normal development » (*ibid.*).

<sup>240</sup> Lodé, *Pourquoi les animaux trichent et se trompent* (2013, p. 310).

<sup>241</sup> *Ibid.*, p. 89.

l'un des premiers mutualismes écologiques »<sup>242</sup>. « Les cellules révèlent ainsi qu'elles sont sensibles à la lumière, aux odeurs et même aux autres. L'étanchéité primitive devient sélective et attise une sensibilité qui se spécialise, induisant un comportement élémentaire »<sup>243</sup>. Bref, « [d]es bulles primitives s'approchent, et c'est le début des comportements [...]. La relation d'échanges de gènes qui s'établit [...] se stabilise progressivement [...] dans [...] une situation évolutivement stable »<sup>244</sup>. « Alors les gènes passent, apportant une rénovation des protéines, un changement du métabolisme. La proto-sexualité fait office d'accélérateur d'évolution dans un processus en cascade, redoublant les échanges d'ADN, mélangeant les êtres les uns aux autres, multipliant les métissages. [...] L'évolution en spirale commence. Une incroyable biodiversité s'échappe de ce tourbillon du vivant »<sup>245</sup>.

Puis, grâce à la coopération entre cellules et à un comportement d'agrégation, se construit la première spécialisation cellulaire : « Un "corps" s'organise à partir de ces relations primitives. [...] La formation de cet assemblage hétéroclite entraîne des milliers d'interactions qui produisent une efficacité de la relation. [...] Il se forme un emboîtement entre niveaux spécialisés, [...] un ensemble d'interactions à plusieurs rangées [...], une intégration organique »<sup>246</sup>, « [...] permettant de fabriquer [...] l'emboîtement des cellules spécialisées, les organes, les individus, les sociétés »<sup>247</sup>.

Dans cette optique dynamique, « [e]n assurant l'importance des autres, la chimie des attractions s'implique dans la coévolution écologique »<sup>248</sup>. « Entre les cellules, un équilibre des échanges s'est réalisé, une gestion du contact [...] »<sup>249</sup>. « Depuis le rendez-vous des bulles libertines, [...] tous ces assemblages révèlent que la nature est faite de mutualismes »<sup>250</sup>. En conséquence, « [l]'évolution comporte une part largement *non darwinienne* dont le sens peut révéler la nature de l'établissement des relations »<sup>251</sup>. « Ensuite, l'évolution n'affecte jamais un trait isolé, car la corrélation des traits entraîne

---

<sup>242</sup> *Ibid.*, p. 149.

<sup>243</sup> *Idem.*

<sup>244</sup> *Ibid.*, p. 150.

<sup>245</sup> *Ibid.*, p. 151.

<sup>246</sup> *Ibid.*, p. 152.

<sup>247</sup> *Ibid.*, p. 267.

<sup>248</sup> *Ibid.*, p. 153.

<sup>249</sup> *Ibid.*, p. 266.

<sup>250</sup> *Ibid.*, p. 276.

<sup>251</sup> *Ibid.*, pp. 276-277 (en italique dans le texte original).



que l'efficacité d'un caractère agit aussi sur un autre, produisant d'incessantes cascades évolutives »<sup>252</sup>. Enfin, « [s]i la cible évolutive reste l'individu, la relation constitue la force de la dynamique évolutive »<sup>253</sup>.

En outre, il s'avère que le mystère reste entier sur le passage d'une variation phénotypique, au sein d'une population, à l'apparition d'une nouvelle espèce, car, comme l'indique Thierry Lodé<sup>254</sup>, « les modifications phénotypiques précèdent toujours la spéciation ». En effet, selon le darwinisme, les caractères sont d'abord modifiés par hasard puis transmis, par sélection naturelle, à des individus qui constituent une nouvelle espèce : on retrouve ici le rôle central de la sélection naturelle ; or, selon Thierry Lodé, un autre mécanisme interviendrait au cours de la spéciation, au niveau de la reproduction des organismes, notamment par le choix de partenaires sexuels présentant, précisément, ces modifications phénotypiques : dans cette perspective, un individu ne peut être à l'origine, à lui tout seul, d'une nouvelle espèce : une interaction avec d'autres individus doit intervenir, d'où l'apparition de comportements particuliers, comme les parades nuptiales ou toute autre forme de langage, qui se mettent en place et mènent, en fin de compte, à l'apparition d'une espèce nouvelle. Dans cette vision de la spéciation, le rôle central n'est plus assuré par la sélection naturelle mais par les interactions entre individus, révélant, une fois encore, la dimension écologique de l'évolution.

## ***5. 5. Auto-organisation, auto-détermination, causalité circulaire, autonomie et clôture organisationnelle téléologique du vivant***

### ***5. 5. 1. Circularité, semi-fluidité, assimilation et autonomie du vivant***

Un grand nombre de processus liés au fonctionnement du vivant, qu'ils soient internes ou externes, font appel à une logique circulaire, d'où une succession inévitable de réactions en chaîne auto-entretenu, susceptible de se poursuivre indéfiniment. Par

---

<sup>252</sup> *Ibid.*, p. 278.

<sup>253</sup> *Ibid.*, p. 277.

<sup>254</sup> Lodé, *Convergences morphologiques du putois (Mustela putorius) et du vison américain (M. vison) avec le vison d'Europe (M. lutreola)* (1995) ; Lodé, *Genetic divergence without spatial isolation in polecat Mustela putorius populations* (2001).

exemple, tous les organismes inscrivent leur existence dans un cycle de vie, qui se retrouve également au niveau du cycle cellulaire ; de nombreuses voies métaboliques sont cycliques, en relation, à une bien plus grande échelle, à l'intégration des organismes dans de nombreux cycles de la matière ; le fonctionnement des organismes est basé sur la mise en œuvre de boucles cybernétiques de rétroaction ; il existe même une circulation cyclique de l'information entre l'ADN et les protéines<sup>255</sup>, qui se retrouve dans les relations de contrôle du phénotype sur le génotype<sup>256</sup>. De façon ultime, comme l'avait déjà remarqué Lamarck, la principale caractéristique d'un être vivant est qu'il est «un corps qui forme lui-même sa propre substance» – processus éminemment circulaire entre l'apport de substances prélevées dans le milieu et le rejet de déchets dans ce même milieu.

Le processus d'assimilation, cette capacité de transformer les éléments basiques des nutriments en matière vivante, permet d'ailleurs de distinguer radicalement et irréductiblement les organismes des objets inanimés, en particulier des machines auxquelles ils sont abusivement et trop souvent comparés : ces dernières, comparables à des solides articulés dont l'organisation et le fonctionnement compliqués sont fixes et déterminés, n'ont en effet rien à voir avec l'infinie complexité et la semi-fluidité dynamique du vivant<sup>257</sup> – qui semblent dès lors découler de la circularité fonctionnelle des organismes.

Je reviens à la notion si fondamentale d'autonomie du vivant. On ne peut comprendre l'évolution si on ne comprend pas d'abord ce que sont les êtres vivants, en particulier la notion d'autonomie, à savoir que si l'être vivant est dépendant de certains éléments du milieu pour son existence (nutrition, respiration ou fermentation, etc.), il devient néanmoins, par les réserves qu'il constitue, relativement indépendant des autres aspects du milieu<sup>258</sup>. Ces concepts se retrouvent illustrés dans des structures comme l'œuf (notamment l'œuf amniotique), chez les animaux, et la graine, chez les végétaux.

---

<sup>255</sup> Voir « Reviewing what cells can do to rewrite their genomes over time » (Shapiro, *Evolution* [...], *op. cit.*, pp. 87-88).

<sup>256</sup> Voir von Sydow, *From Darwinian Metaphysics* [...], *op. cit.*, en particulier p. 320 (fig. 9) ; Denis Noble défend une idée analogue : « Le génome doit être lu à partir du phénotype, et non l'inverse » (Noble, *La musique de la vie*, *op. cit.*, p. 41).

<sup>257</sup> Bertrand Louart, communication personnelle datée du 01/12/2019.

<sup>258</sup> *Idem.*

Lamarck avait bien remarqué que l'évolution était dominée par une tendance globale à la complexification des organismes, qui doit être mise en parallèle avec une montée vers toujours plus d'autonomie : grâce à l'optimisation de leurs organes, tout particulièrement sensoriels, les êtres vivants deviennent capables de maîtriser de plus en plus d'éléments de leur environnement, d'où une émancipation de plus en plus marquée vis-à-vis des aléas écologiques<sup>259</sup> – d'où cette dialectique environnementale abordée plus haut.

### 5. 5. 2. Circularité des contraintes et dimension téléologique du vivant

Étienne Roux<sup>260</sup> mentionne les limites de l'explication adaptationniste et la faiblesse fondamentale des théories sélectionnistes, qui définissent les fonctions présentes sur la base d'une sélection opérée dans le passé<sup>261</sup>, faisant exclusivement référence à une causalité externe (le processus de sélection lui-même), sans aucun égard par rapport à une causalité interne (faisant intervenir des propriétés liées à l'organisation du vivant)<sup>262</sup>. Concluant quant à la pauvreté du fonctionnalisme en tant que doctrine explicative<sup>263</sup>, il en arrive à l'idée qu'il n'existe pas de conflit entre la dimension téléologique d'un système et une explication mécaniste de son fonctionnement<sup>264</sup>, notion scientifiquement acceptable et féconde<sup>265</sup>. Dans cette perspective, Roux insiste sur le fait que les fonctions physiologiques semblent bien «dirigées vers un but», aspect qui peut être généralisé aux systèmes organiques<sup>266</sup>. Ainsi, les fonctions biologiques peuvent être définies sur la base de cette causalité circulaire des contraintes<sup>267</sup>, et donc être considérées comme téléologiques.

<sup>259</sup> *Idem.*

<sup>260</sup> Etienne Roux, *The concept of function in modern physiology* (2014).

<sup>261</sup> « This is a major limitation to the aetiological selectionist theories of function, which defines current function from past selection » (*ibid.*).

<sup>262</sup> « [...] the selectionist theories define what a function is in exclusive reference to external causation (selective process) with no attention paid to internal causation in relation with organizational properties » (*ibid.*).

<sup>263</sup> « [...] the poverty of functionalism as an explicative doctrine [...] » (*ibid.*).

<sup>264</sup> « [...] there is no conflict between the teleological dimension of the system studied and the mechanistic explanation of its functioning » (*ibid.*).

<sup>265</sup> « [...] postulating a teleological dimension of biological systems [...] is scientifically acceptable and fruitful » (*ibid.*).

<sup>266</sup> « [...] the 'goal-directed' character of organic systems » (*ibid.*).

<sup>267</sup> « [...] constraints subject to closure correspond to biological functions » (*ibid.*).

Développant une vision similaire des choses, Matteo Mossio et Leonardo Bich<sup>268</sup> considèrent que la notion d'organisation biologique peut-être basée sur le concept d'auto-détermination, qui permet d'établir que l'organisation biologique se détermine elle-même car ce sont les effets de sa propre activité qui déterminent les conditions mêmes de son existence<sup>269</sup>. En effet, ces dernières, sur lesquelles l'organisation exerce une influence causale, peuvent être considérées comme le but de cette organisation biologique<sup>270</sup>. Ainsi, les buts et les conditions d'existence des systèmes vivants ne sont qu'une seule et même chose<sup>271</sup>. Cette auto-détermination fait intervenir un réseau de contraintes constitutives mutuellement dépendantes dans le cadre d'une causalité circulaire formant une clôture organisationnelle<sup>272</sup>. Cette circularité de la clôture organisationnelle permet de réhabiliter la notion de cause finale et établit la base de la téléologie<sup>273</sup>. « C'est parce qu'ils sont capables d'autodétermination [...] que les organismes biologiques [...] réalisent une organisation téléologique [...] »<sup>274</sup>. Les êtres vivants sont ainsi vus comme des entités téléologiquement organisées dont les parties se produisent et se maintiennent les unes les autres, permettant de la sorte la production et le maintien de l'organisme en tant que tout<sup>275</sup>. On peut dire que l'organisation globale d'une certaine manière s'«auto-contraint», et donc s'autodétermine<sup>276</sup>, cette clôture des contraintes constituant le régime de causalité spécifique des systèmes biologiques<sup>277</sup>.

---

<sup>268</sup> Mossio & Bich, *What makes biological organisation teleological?* (2017).

<sup>269</sup> « *The core argument consists in establishing a connection between organisation and teleology through the concept of self-determination: biological organisation determines itself in the sense that the effects of its activity contribute to determine its own conditions of existence* » (*ibid.*).

<sup>270</sup> « [...] *the conditions of existence on which the organisation exerts a causal influence can be interpreted as the goal [...] of biological organisation* [...] » (*ibid.*).

<sup>271</sup> « [...] *in the case of biological systems their goal and their own existence are one and the same thing* [...] » (*ibid.*).

<sup>272</sup> « [...] *self-determination [...] should be specifically understood as self-constraint [...] [which] takes the form of closure, i. e. a network of mutually dependent constitutive constraints* » (*ibid.*).

<sup>273</sup> « [...] *the circularity of organisational closure rehabilitates the notion of final cause, and grounds teleology* [...] » (*ibid.*).

<sup>274</sup> Mossio & Bich, Chapitre 5. *La circularité biologique : concepts et modèles* (2014).

<sup>275</sup> « [...] *living systems are teleologically organised entities whose components produce and maintain each others as well as the whole* » (Mossio & Bich, *What makes biological organisation teleological?*, *op. cit.*).

<sup>276</sup> « [...] *the whole organisation can be said to [...] self-constrain, and therefore to self-determine* [...] » (*ibid.*).

<sup>277</sup> « [...] *closure of constraints constitutes the causal regime that is distinctively at work in biological systems* » (*ibid.*).

Dans cette perspective, les symbioses et les écosystèmes, également capables de réaliser une telle clôture, sont aussi de nature téléologique<sup>278</sup>.

Une telle approche fondée sur l'organisation, à l'inverse de l'approche évolutive, met bien plus l'accent sur la dimension interne, physiologique, des systèmes vivants, plutôt que sur les influences externes environnementales<sup>279</sup>. En effet, en se focalisant sur les aspects temporels et populationnels, le darwinisme passe complètement à côté de la vraie nature des organismes individuels<sup>280</sup>. Bernd Rosslénbroich<sup>281</sup>, lui, relie la notion de clôture opérationnelle à celle, plus générale, d'autonomie du vivant, dans le cadre d'une théorie permettant d'expliquer l'augmentation de cette autonomie au cours de l'évolution en lien avec l'apparition des innovations macro-évolutives.

## 5. 6. De l'ingénierie génétique naturelle à une approche systémique

### 5. 6. 1. L'ingénierie génétique naturelle comme mécanisme fondamental

En contradiction avec le paradigme darwinien, Shapiro affirme que c'est l'innovation, et non la sélection, qui est l'aspect central du changement évolutif<sup>282</sup>. En outre, l'étude des mutations, considérées comme aléatoires, a en fait permis de découvrir des motifs, des tendances, ainsi que des activités biologiques spécifiques qui sont à la base de l'apparition de nouvelles structures génétiques et de la modification des séquences d'ADN<sup>283</sup>. En outre, la capacité à évoluer est, elle-même, adaptative<sup>284</sup>, «évoluable» (*evolvable*) : la capacité des organismes vivants à modifier leur propre hérédité est

---

<sup>278</sup> « [...] *supra-organismal biological systems (as symbioses or ecosystems) could realise closure, and hence be teleological* » (*ibid.*).

<sup>279</sup> « *Unlike the evolutionary approach, the organisational one puts more emphasis on the internal dimension of living systems rather than on external influences, by focusing mainly on physiology* » (*ibid.*).

<sup>280</sup> « [...] *the temporal scale of the evolutionary approach [...] has no explanatory significance in analysing individual organisms* » (*ibid.*).

<sup>281</sup> Rosslénbroich, *The theory of increasing autonomy in evolution: a proposal for understanding macroevolutionary innovations* (2009).

<sup>282</sup> « *Innovation, not selection, is the critical issue in evolutionary change* » (Shapiro, *Evolution [...], op. cit.*, p. 1).

<sup>283</sup> « [...] *empirical studies of the mutational process have inevitably discovered patterns, environmental influences, and specific biological activities at the roots of novel genetic structures and altered DNA sequences* » (*ibid.*, p. 2).

<sup>284</sup> « [...] *the capacity to change is itself adaptive* » (*idem*).

indéniable<sup>285</sup>. En particulier, le «génie génétique naturel» représente la faculté des êtres vivants à manipuler et à restructurer les molécules d'ADN qui constituent leur génome<sup>286</sup>.

Il ne faut pas non plus oublier pas que l'hérédité ne concerne pas seulement la transmission et l'expression de séquences nucléotidiques inscrites dans l'ADN ou l'ARN<sup>287</sup> : il existe en effet une hérédité indépendante du génome (*genome-independent heredity*<sup>288</sup>), comme la transmission d'une information dite «épigénétique» contenue dans des complexes moléculaires contenant ADN, ARN et protéines<sup>289</sup> ; dans ce cadre, il est fort possible que l'hérédité basée uniquement sur l'ADN se révèle avoir un rôle bien plus modeste<sup>290</sup> que ce que l'on en a longtemps pensé.

En effet, il s'avère que les cellules vivantes sont capables de réguler l'expression, la réplication, la transmission et la restructuration de leurs molécules d'ADN<sup>291</sup>. Plus spécifiquement, les cellules savent réécrire leur génome, processus qui est à la source d'innovations évolutives<sup>292</sup>. Dans cette perspective, l'évolution apparaît comme un mécanisme combinatoire pour produire des systèmes fonctionnels<sup>293</sup>. Dans une proportion étonnement importante d'exemples, des événements de réorganisation génomique complète ont été décrits<sup>294</sup>. Il apparaît ainsi que l'évolution génomique s'opère à différents niveaux, incluant amplification et mécanismes combinatoires<sup>295</sup>, ce qui aboutit à la vision du génome comme un organite complexe de stockage d'information

<sup>285</sup> « *The capacity of living organisms to alter their own heredity is undeniable* » (*idem*).

<sup>286</sup> « [...] *natural genetic engineering represents the ability of living cells to manipulate and restructure the DNA molecules that make up their genomes* » (*idem* ; voir aussi la définition présentée p. 161).

<sup>287</sup> « [...] *we should never forget that not all heredity involves the transmission and interpretation of nucleotide sequences in DNA and RNA molecules* » (*ibid.*, p. 3).

<sup>288</sup> *Idem*.

<sup>289</sup> « [...] *transmission of so-called "epigenetic" information contained in complexes of DNA, RNA, and protein [...]* » (*idem*).

<sup>290</sup> « *It is possible that DNA-based heredity will ultimately find a more modest role [...]* » (*ibid.*, p. 4).

<sup>291</sup> « [...] *we now understand how cells regulate the expression, reproduction, transmission, and restructuring of their DNA molecules* » (*idem*).

<sup>292</sup> « [...] *how the cell rewrites its genome [...] is what we know best about the sources of organic novelty* » (*ibid.*, p. 5).

<sup>293</sup> « [...] *the evolutionary process has clearly been one of combinatorial innovation to produce functional systems [...]* » (*idem*).

<sup>294</sup> « *In a surprisingly large number of cases, [...] reorganization events have comprised whole genomes* » (*idem*).

<sup>295</sup> « [...] *genome evolution is multilevel, amplifying, and combinatorial in nature [...]* » (*ibid.*, p. 6).

intégré dans toutes les cellules et tous les organismes<sup>296</sup>. Dans cette vision «informa-tique» du génome, le processus évolutif doit être plutôt comparé à une «ingénierie des systèmes» qu'à un processus aléatoire sous l'influence de la sélection naturelle à l'intérieur de l'espace indéfini des configurations possibles de l'ADN<sup>297</sup>.

Intéressons-nous plus précisément à ce que les cellules savent faire pour réécrire leur génome<sup>298</sup> : elles s'avèrent capables de le réorganiser et d'y insérer de nouvelles informations à trois différentes échelles de temps biologique :

- A l'intérieur d'un seul cycle cellulaire, ces processus impliquent principalement les complexes nucléoprotéiques qui assurent la réplication, la transcription, la réparation et les mouvements du génome, à chaque étape de la croissance et de la division cellulaire<sup>299</sup> ;
- Sur un nombre limité de cycles cellulaires (soit la durée de vie d'un organisme), cela concerne les modifications épigénétiques et le formatage de la chromatine, au cours de la méiose et de la gamétogenèse ou de la formation des anticorps, par exemple<sup>300</sup> ;
- Sur un nombre indéfini de cycles cellulaires (dimension évolutive au cours des temps géologiques), les cellules inscrivent de nouvelles informations dans leur génome grâce à de nombreux mécanismes de génie génétique naturel, comme la recombinaison spécifique de site, l'insertion ou l'excision de transposon, le transfert latéral d'ADN, la mutagenèse localisée, etc. : ces processus produisent des changements durables à tous les niveaux d'organisation du génome<sup>301</sup>.

<sup>296</sup> « Genomes are sophisticated data storage organelles integrated into the cellular and multicellular life cycles of each distinct organism » (*idem*).

<sup>297</sup> « Thinking about genomes from an informatic perspective, it is apparent that systems engineering is a better metaphor for the evolutionary process than the conventional view of evolution as a selection-biased random walk through the limitless space of possible DNA configurations » (*idem*).

<sup>298</sup> « Reviewing what cells can do to rewrite their genomes over time » (*ibid.*, p. 87).

<sup>299</sup> « Within the cell cycle, most of this inscription occurs by forming transient nucleoprotein complexes that carry out replication, transcription, repair, and physical movement of the genome at each stage of cell growth and division » (*idem*).

<sup>300</sup> « [...] epigenetic modification by imprinting and chromatin formatting [...] particularly during meiosis and gamete formation » (*idem*).

<sup>301</sup> « Over evolutionary time, cells write new information into their genomes by [...] numerous natural genetic engineering processes [...] and by [...] horizontal DNA transfer and symbiotic cell fusions. These processes lead to long-term changes in the DNA structure at all levels of genome complexity » (*idem*).

### 5. 6. 2. Vers une refonte du Dogme central de la biologie moléculaire<sup>302</sup> : du déterminisme génétique à la sentience subjective du vivant

Le Dogme central de la biologie moléculaire, centré sur l'idée que l'ADN porte l'information génétique et que les protéines ne font qu'exécuter ces informations, précise ainsi que tout transfert d'information d'une protéine vers une autre protéine ou un acide nucléique est considéré comme «inacceptable»<sup>303</sup>. Toutefois, on connaît aujourd'hui de nombreux exemples de modification, par l'action de protéines, de l'information portée par l'ADN, par l'ARN et par d'autres protéines<sup>304</sup> ; en outre, de nombreuses autres molécules peuvent avoir une action sur la structure, l'expression et la modification de l'ADN génomique et des ARN issus de la transcription<sup>305</sup> ; bien plus, on en arrive de nos jours à l'idée que l'ADN, par lui-même, ne peut rien faire, ne peut rien diriger<sup>306</sup>. De plus, la biologie moléculaire a permis d'identifier des mécanismes de perception, de transfert d'information et de prise de décision au niveau cellulaire : en d'autres termes, il s'agit d'une véritable cognition cellulaire, qui mène à une vision véritablement informatique et cognitive de la façon dont les cellules exploitent et utilisent leur génome, radicalement différente du déterminisme génétique du Dogme central<sup>307</sup>.

Dans une perspective similaire, Dennis Bray<sup>308</sup> envisage les cellules comme formées de molécules qui constituent tout un réseau de circuits complexes, et agissent à la manière de commutateurs miniatures qui guident les processus biochimiques dans un sens ou dans l'autre. Intégrées à d'immenses réseaux, ces molécules constituent la base à l'origine de toutes les propriétés spécifiques des systèmes vivants. Cette fonction

<sup>302</sup> « *Revisiting the central dogma of molecular biology* » (*ibid.*, p. 24).

<sup>303</sup> « [...] transfers of information from protein to nucleic acid or from protein to protein were unacceptable [...] » (*idem*).

<sup>304</sup> « Today, we know about many examples where proteins modify sequence information in DNA [...], in RNA [...], and in other proteins [...] » (*ibid.*, p. 25).

<sup>305</sup> « We also have far deeper insight into the many ways that [...] other cell molecules [...] influence the structure, expression, and modification of both DNA in the genome and RNA transcripts [...] » (*idem*).

<sup>306</sup> « [...] DNA cannot do anything of direct anything by itself [...] » (*ibid.*, p. 25).

<sup>307</sup> « [...] molecular biology has identified specific components of cell sensing, information transfer, and decision making processes. In other words, we have numerous precise molecular description of cell cognition [...]. The cognitive, informatic view of how living cells operate and utilize their genomes is radically different from the genetic determinism perspective articulated most succinctly [...] in the [...] "Central Dogma of Molecular Biology." » (*ibid.*, p. 24).

<sup>308</sup> Bray, *Wetware—A computer in every living cell* (2011).



informatique moléculaire sous-tend les processus de prise de décision présents chez les organismes unicellulaires comme les bactéries et les amibes. De la sorte, des complexes protéiques s'associent avec l'ADN, formant des structures comparables à des microprocesseurs numériques capables d'activer ou d'inactiver des gènes dans différentes cellules<sup>309</sup>.

Dans cette perspective, Bray voit les cellules comme étant capables de réaliser une forme d'«analyse logique» indispensable à leur survie<sup>310</sup>. De la sorte, les cellules pourraient acquérir des informations<sup>311</sup>, les traiter<sup>312</sup> et les stocker (même de façon très transitoire), en relation avec la mise en place d'une «mémoire» (elle aussi au départ extrêmement volatile<sup>313</sup>). Il en résulte que les cellules possèdent une manière de connaissance de leur environnement<sup>314</sup>. Comme une telle connaissance du monde semble être une propriété fondamentale du vivant, on peut envisager que le processus évolutif ait mené à l'apparition et à la généralisation de molécules dont certaines interactions se sont avérées indispensables pour acquérir cette connaissance<sup>315</sup>. Mieux, il considère que la plupart des micro-organismes ont une capacité d'attention du même type que celle décrite chez les animaux complexes<sup>316</sup>. Bray en arrive à l'idée qu'il existerait chez tous les organismes, y compris unicellulaires, une subjectivité interne comparable à celle rencontrée chez l'être humain<sup>317</sup>. De façon encore plus générale, il exprime l'idée qu'une telle connaissance de l'environnement ait pu faire partie des aspects primordiaux ayant permis l'émergence de la vie<sup>318</sup>.

<sup>309</sup> « *Cells are built of molecules that interact in complex webs, or circuits. [...] Acting like miniature switches, they guide the biochemical processes of a cell this way or that. Linked into huge networks they form the basis of all the distinctive properties of living systems. Molecular computations underlie the sophisticated decision making of single-cell organisms such as bacteria and amoebae. Protein complexes associated with DNA act like microchips to switch genes on and off in different cells [...]* » (*ibid.*, p. x).

<sup>310</sup> « *Living cells must be capable of some sort of logical analysis or they would never survive* » (*ibid.*, p. 64).

<sup>311</sup> « *[...] a sort of knowledge acquired by a cell* » (*ibid.*, p. 8).

<sup>312</sup> « *[...] cellular information processing* » (*ibid.*, p. 6).

<sup>313</sup> « *[...] short-term memory [...]* » (*ibid.*, p. 7).

<sup>314</sup> « *[...] single cells are aware of their surroundings* » (*ibid.*, p. 18).

<sup>315</sup> « *[...] because knowledge of the world is such a fundamental part of life, [...] [i]t seems reasonable to suppose that [...] evolution could have preserved essential molecular interactions able to capture features of the world* » (*ibid.*, p. 142).

<sup>316</sup> « *Most microorganisms display what in higher animals is termed attention* » (*idem*).

<sup>317</sup> « *[...] living matter might have internal, subjective states that are in any way comparable to those experienced in humans [...]* » (*ibid.*, p. 20).

<sup>318</sup> « *A primitive awareness of the environment was an essential ingredient in the origins of life [...]* » (*idem*).

### 5. 6. 3. Pluralité des mécanismes évolutifs et évolution multifactorielle

Il est clair que la perspective envisagée pour interpréter l'évolution biologique doit être largement modifiée. En effet, un certain nombre de découvertes obligent à élargir notre vision des choses en prenant en compte de nombreux autres mécanismes que ceux envisagés par le darwinisme, et dont l'importance a souvent été minimisée voire carrément ignorée.

#### 5. 6. 3. 1. La nature saltatoire de l'évolution – La Théorie des équilibres ponctués

Depuis la critique du gradualisme darwinien par Niles Eldredge et Stephen Jay Gould<sup>319</sup>, ainsi que leur Théorie des équilibres ponctués, une nouvelle vision de l'évolution émerge, faisant intervenir des processus temporellement brutaux, abrupts, permettant l'apparition rapide d'innovations évolutives<sup>320</sup>, d'où une évolution ponctuelle et massive, par intervalles brefs (à l'échelle des temps géologiques), sous la forme de véritables sauts : on parle ainsi d'évolution saltatoire.

Partant de l'idée que « le gradualisme phylétique est virtuellement infalsifiable »<sup>321</sup> mais qu'il influence profondément la pensée de nombreux scientifiques<sup>322</sup>, Eldredge et Gould observent que « la plupart des changements évolutifs morphologiques apparaissent au cours de périodes de temps relativement courtes par rapport à la durée d'existence des espèces »<sup>323</sup> et que « la plupart des espèces font preuve de peu ou pas de changement au sein de leur répartition stratigraphique »<sup>324</sup>. Ils en concluent que « c'est une affaire de stases : l'absence de tout changement au cours de vastes étendues

<sup>319</sup> Eldredge & Gould, *Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism* (op. cit.).

<sup>320</sup> Dans cette perspective, il est même possible d'envisager cette apparition littéralement d'une génération à la suivante.

<sup>321</sup> « [...] *phyletic gradualism virtually unfalsifiable* » (Eldredge & Gould, *Punctuated equilibria* [...], op. cit., p. 90).

<sup>322</sup> « [...] *the influence of phyletic gradualism remains so strong that discussions of [...] speciation are almost always cast in its light* [...] » (ibid., p. 94) ; également, « la vision a priori du gradualisme phylétique a été obtenue à partir de données peu nombreuses » (« [...] *the a priori picture of phyletic gradualism has imposed itself upon limited data* » ; ibid., p. 97).

<sup>323</sup> « *Most evolutionary changes in morphology occur in a short period of time relative to the total duration of species* » (ibid., p. 95).

<sup>324</sup> « [...] *most species show little or no change throughout their stratigraphic range* » (ibid., p. 97).

de temps »<sup>325</sup>. En fin de compte, « la solution à adopter réside probablement dans une conception des espèces et des organismes considérés comme des systèmes homéostatiques auto-régulés, capables, aussi incroyable que cela puisse paraître, de résister aux changements et de préserver leur stabilité face à des perturbations extérieures »<sup>326</sup>.

Dans un article qui reprend et complète le précédent, Gould et Eldredge<sup>327</sup> expriment leurs doutes, qui rappellent ce que pense Shapiro, selon lesquels « des mutations ponctuelles au sein de gènes structuraux ne peuvent mener à l'apparition de nouvelles structures morphologiques, même si elles s'accumulent de façon graduelle »<sup>328</sup>. De plus, ils indiquent que « le gradualisme phylétique ne peut être réfuté car il exclut a priori toute information contradictoire »<sup>329</sup>, et qu'ainsi « le gradualisme a toujours fonctionné, non sur la base d'informations paléontologiques, mais sur d'anciens préjugés »<sup>330</sup>, le qualifiant de « dogme restrictif » (*restrictive dogma*<sup>331</sup>), voire d'idéologie<sup>332</sup>, faisant appel à un « raisonnement circulaire, partant de présuppositions gradualistes pour en arriver à des conclusions gradualistes elles-mêmes basées sur les présuppositions en question, et non sur des preuves apportées par les fossiles »<sup>333</sup>. De plus, ils considèrent que « ce qui représente la norme, pour une espèce, c'est la stase morphologique »<sup>334</sup> : dans ce cadre, « ce à quoi on doit s'attendre, c'est à une rupture menant au remplacement brutal d'ancêtres par leurs descendants »<sup>335</sup>. De façon plus générale

<sup>325</sup> « [...] *the story is one of stasis: no variation [...] through long spans of time* » (*ibid.*, p. 106).

<sup>326</sup> « *The answer probably lies in a view of species and individuals as homeostatic systems—as amazingly self-buffered to resist change and maintain stability in the face of disturbing influences* » (*ibid.*, p. 114).

<sup>327</sup> Gould & Eldredge, *Punctuated equilibria: tempo and mode of evolution reconsidered* (1977).

<sup>328</sup> « *We do not see how point mutations in structural genes can lead, even by gradual accumulation, to new morphological designs* » (*ibid.*, p. 138). On pourrait certes reprocher à Gould et Eldredge de donner dans « l'argument d'incrédulité personnelle » dénoncé par Richard Dawkins (*River Out of Eden*, 1995, p. 70) ; toutefois, cet argument est selon moi fortement contestable, notamment grâce à ce que j'appelle l'argument de crédulité collective.

<sup>329</sup> « [...] *phyletic gradualism [...] could not be refuted [...] because it excluded contrary information [...]* » (*ibid.*, p. 115 ; également, « Le gradualisme présente la fâcheuse particularité de ne pas prendre en compte a priori des données qui pourraient le réfuter » : « [...] *gradualism [...] has the unhappy property of excluding a priori the very data that might refute it* » ; *ibid.*, p. 119).

<sup>330</sup> « [...] *gradualism has always rested on prior prejudice rather than paleontological data* » (*ibid.*, p. 122).

<sup>331</sup> *Ibid.*, p. 119.

<sup>332</sup> *Ibid.*, p. 146.

<sup>333</sup> « *Some [...] arguments are circular—from gradualistic presuppositions to gradualistic conclusions (based on the presuppositions, not on fossil evidence)* » (*ibid.*, p. 125).

<sup>334</sup> « *The norm for a species [...] is morphological stasis [...]* » (*ibid.*, p. 117).

<sup>335</sup> « [...] *we expect [...] a break with essentially sudden replacement of ancestors by descendants [...]* » (*ibid.*, p. 117).

et plus cruciale, les auteurs en arrivent à l'idée que « l'extrapolation des équilibres ponctués à la macroévolution permet de proposer une nouvelle explication à ce phénomène très important que représentent les tendances évolutives »<sup>336</sup>. Ils précisent que « les équilibres ponctués représentent de loin le rythme le plus fréquent du processus évolutif, alors que le gradualisme s'avère, en tout état de cause, non seulement rare, mais également incapable de servir de fondement pour expliquer l'origine des grands événements de l'histoire évolutive »<sup>337</sup>. Mieux, Gould et Eldredge insistent sur le fait que « les événements de nature gradualiste sont trop lents pour pouvoir rendre compte de la plupart des grands changements évolutifs, en particulier dans le cas des radiations adaptatives et de l'origine des nouvelles configurations morphologiques. [Ils considèrent] le gradualisme comme secondaire dans le processus évolutif, non seulement parce qu'il se manifeste rarement, mais encore parce que sa fréquence ne saurait être suffisante que pour influencer le changement évolutif de façon superficielle »<sup>338339</sup>.

<sup>336</sup> « We realized that the extrapolation of punctuated equilibria to macroevolution suggested a new explanation for the fundamental phenomenon of evolutionary trends » (*ibid.*, p. 117).

<sup>337</sup> « We do regard punctuated equilibria as by far the most common tempo of evolution—and we do assert that gradualism is both rare and unable in any case [...] to serve as the source for major evolutionary events » (*ibid.*, p. 119).

<sup>338</sup> « [Gradualistic events] are too slow to account for most important evolutionary phenomena, particularly for adaptive radiations and the origin of new morphological designs. We regard gradualism as unimportant in evolution not only because it occurs rarely, but also because its rates are only sufficient to cast a superficial molding upon the pattern of evolutionary change » (*ibid.*, p. 133).

<sup>339</sup> L'importance de ces réflexions n'empêche nullement certains auteurs, tels Richard Dawkins et Daniel Dennett, d'affirmer que les équilibres ponctués ne sont qu'une forme d'extrapolation du gradualisme. Partant de l'idée que la Théorie des équilibres ponctués serait confondue avec la notion d'évolution saltatoire (« [...] the theory of punctuated equilibria is frequently confused with saltatory evolution » ; Dawkins, *The blind watchmaker*, op. cit., p. 236), Dawkins établit qu'Eldredge et Gould sont tout autant des gradualistes que Darwin et ses successeurs (« [...] Eldredge and Gould are really just as gradualist as Darwin or any of his successors » ; *ibid.*, p. 241) ; il en arrive à affirmer que les équilibres ponctués font déjà partie intégrante de la synthèse néodarwinienne, et que la théorie d'Eldredge et Gould finira par n'être considérée que comme un aspect mineur du darwinisme (« [...] the theory of punctuated equilibrium lies firmly within the neo-Darwinian synthesis. [...] The theory of punctuated equilibrium will come to be seen [...] as an interesting but minor wrinkle on the surface of neo-Darwinian theory » ; *ibid.*, p. 251).

Dans une interprétation similaire, Dennett prétend que la théorie des équilibres ponctués n'avait été présentée que comme une rectification prudente d'une illusion due au darwinisme conventionnel – l'idée que la sélection naturelle devait nécessairement aboutir à un grand nombre de formes intermédiaires dans le registre fossile (« [...] the thesis of punctuated equilibrium was presented [...] as a conservative correction of an illusion to which orthodox Darwinians had succumbed [...] in thinking that Darwinian natural selection should leave a fossil record showing lots of intermediate forms » ; Dennett, *Darwin's dangerous idea*, 1995, p. 283), et que, de façon contradictoire, le darwinisme est déjà une théorie d'équilibres ponctués (« [...] orthodox Darwinism was already a theory of punctuated equilibrium » ; *ibid.*, p. 284). Il considère que les phases de stase évolutive ne sont que des artefacts dus à une lecture biaisée des diagrammes d'arbres

### 5. 6. 3. 2. Importance et universalité des transferts horizontaux d'ADN

Il est maintenant acquis que tous les procaryotes et de nombreux eucaryotes font l'acquisition de nouveaux segments génomiques et de nouvelles fonctions biochimiques à partir d'autres organismes qui n'ont souvent aucun lien de parenté avec eux : on parle de transferts horizontaux ou latéraux d'ADN, qui s'opèrent selon toute une variété de mécanismes, à partir, notamment, d'agents infectieux : virus, bactéries et autres parasites eucaryotes (qui peuvent, eux-mêmes, contenir des séquences d'ADN en provenance d'un très grand nombre d'organismes appartenant aux différents règnes du vivant).

Eric Bapteste précise que « [...] la circulation des gènes a depuis toujours structuré le monde vivant, et particulièrement le monde microbien, en un grand réseau d'échanges génétiques [...] »<sup>340</sup>, car « [...] les gènes voyagent en présentant de multiples "véhicules" qui permettent le transfert latéral d'instructions génétiques »<sup>341</sup>. Partant de l'observation que « [...] la majorité de la diversité biologique (c'est-à-dire de la diversité microbienne) et de ses causes évolutives nous demeure encore invisible »<sup>342</sup>, Bapteste indique que « [...] cette face cachée de la biodiversité n'évolue pas vraiment selon les modèles de division clonale et de reproduction sexuée [...] »<sup>343</sup> "classiques" et que, en fin de compte, « [e]xpliciter la complexité biologique et ses origines reste un défi majeur pour les scientifiques »<sup>344</sup>. Il pose alors une question cruciale : « Les êtres clonaux peuvent-ils vraiment produire suffisamment de diversité uniquement avec des mutations aléatoires rares ? »<sup>345</sup> – et sa réponse est éloquente : « Probablement pas [...] »<sup>346</sup>, car « [p]our comprendre la richesse biologique du vaste monde, il faut en effet

---

de la vie darwiniens (« [...] *stasis* [...] is an artifact [...] of a particular forced reading of the "ramps" in Darwin's [...] diagrams » ; *ibid.*, p. 291) ; il va même jusqu'à affirmer que les concepts d'équilibre et de ponctuation ne sont pas du tout des problèmes pour les darwinistes, car ils peuvent être expliqués et même prédits (« [...] *equilibrium* is no more a problem for the neo-Darwinian than *punctuation*; it can be accounted for, and even predicted » ; *ibid.*, p. 294).

<sup>340</sup> Bapteste, *Les gènes voyageurs* (2013 ; p. 9).

<sup>341</sup> *Ibid.*, p. 9.

<sup>342</sup> *Ibid.*, p. 43.

<sup>343</sup> *Ibid.*, p. 43.

<sup>344</sup> *Ibid.*, p. 43.

<sup>345</sup> *Ibid.*, p. 43.

<sup>346</sup> *Ibid.*, p. 43.

beaucoup plus de variabilité et de mécanismes de création de la diversité »<sup>347</sup>. L'auteur insiste : « Ces mécanismes supplémentaires, bien plus puissants, sont fondés sur la mise en mouvement de gènes voyageurs »<sup>348</sup>, car il s'avère que « [...] l'ADN se déplace dans le vaste monde [...] [i]l saute un peu partout, entre tous les types de cellules et hors des cellules »<sup>349</sup>. Il en résulte que « [c]es voyages de gènes changent [...] fondamentalement notre conception de l'évolution »<sup>350</sup>, qui doit être vue comme « une hypercombinatoire transgressive »<sup>351</sup>. Une idée fondamentale ici, c'est qu'« [u]n gène particulier peut ainsi explorer le vaste monde biologique sans rester coincé dans sa branche généalogique initiale »<sup>352</sup> ; mieux encore, « [e]n raison de tous ces échanges, l'évolution signifie aussi coopération, voire convergence, quand des copies du même gène voyageur se retrouvent chez des êtres qui ne sont pas forcément des parents directs, mais plus simplement des voisins »<sup>353</sup>. Au bout du compte, « [c]e flux, cette valse des instructions génétiques, [...] transforment les vivants, ils créent des liens fonctionnels et écologiques entre eux, ils créent de nouvelles formes de gènes et de nouvelles formes de vie. Au final, le vaste monde est rempli d'hybrides, de chimères, de mélanges [...] : nous, les vivants, nous sommes tous des mosaïques génétiques »<sup>354</sup>.

Eugene Koonin va encore plus loin. En effet, selon lui, « le darwinisme ne s'applique pas au monde microbien »<sup>355</sup>, car, constate-t-il, « le génome microbien, extrêmement dynamique et hétérogène, s'avère relativement stable seulement sur de courtes périodes de temps »<sup>356</sup>. Selon lui, « il n'y a plus aucun doute que les transferts horizontaux de gènes représentent un processus fondamental de l'évolution des procaryotes qui affecte tous les domaines de la biologie des bactéries et des archées »<sup>357</sup>. Il insiste même sur le fait que

---

<sup>347</sup> *Ibid.*, p. 44.

<sup>348</sup> *Ibid.*, p. 44.

<sup>349</sup> *Ibid.*, pp. 44-45.

<sup>350</sup> *Ibid.*, p. 45.

<sup>351</sup> *Ibid.*, p. 45.

<sup>352</sup> *Ibid.*, p. 45.

<sup>353</sup> *Ibid.*, p. 46.

<sup>354</sup> *Ibid.*, p. 46 ; on retrouve ici l'idée développée plus haut par Didier Raoult.

<sup>355</sup> Koonin, *The logic of chance* (op. cit., p. 106 : « [...] Darwinian evolution [does] not apply to the microbial world [...] »).

<sup>356</sup> « [...] microbial genomes are extremely dynamic, heterogenous entities that are relatively stable over only short time intervals [...] » (*ibid.*, p. 107).

<sup>357</sup> « In my view, it is no longer a matter of sensible dispute that HGT is a defining process in the evolution of procaryotes that affects all aspects of bacterial and archaeal biology » (*ibid.*, p. 127 ; en italique dans le texte original).

non seulement « les transferts horizontaux de gènes sont primordiaux dans l'évolution des procaryotes », mais qu'en outre « ces transferts peuvent être légitimement considérés comme indispensables à la survie à long terme des archées et des bactéries »<sup>358</sup>. Koonin en arrive finalement à la conclusion selon laquelle « *les procaryotes représentent une forme de vie qui se caractérise par un mode d'évolution particulier faisant intervenir d'importants et nombreux transferts latéraux de gènes* »<sup>359</sup>.

De façon plus générale, Eric Bapteste aboutit à l'idée qu'« [u]n très grand nombre d'entités biologiques (les gènes, les véhicules à ADN, les individus mosaïques, [...] etc.) n'évoluent pas par le seul processus de divergence et selon une filiation simple. Les nombreux processus combinatoires et la dynamique considérable de l'ADN [...] ne doivent pas être sous-estimés. Ces processus sont essentiels »<sup>360</sup>. Il précise que, « [p]our décrire l'évolution sous cette autre perspective, l'étude du seul contenu génétique des chromosomes des organismes cellulaires ne suffit pas. Un nouveau style de raisonnement, que nous appelons "style intégratif" parce qu'il inclut autant les gènes des véhicules à ADN que ceux des organismes cellulaires, a [...] été introduit [...]. En plaçant délibérément les mouvements des gènes voyageurs et la combinatoire au centre de ses processus de prédilection, ce style intégratif devrait permettre de faire des propositions évolutives d'un autre type que les propositions généalogiques et de lever certaines zones d'ombre associées au style arborescent. L'ajout de ce style est donc une démarche fondamentalement pluraliste »<sup>361</sup> – une prise de position défendue également par Momme von Sydow<sup>362</sup>.

Aucune barrière taxonomique n'existe dans le transfert latéral d'ADN<sup>363</sup> : que ce soit entre procaryotes et eucaryotes, entre bactéries et plantes, entre bactéries et animaux, le transfert d'ADN semble pouvoir se faire entre n'importe quels organismes vivants :

<sup>358</sup> « [...] HGT is essential for the evolution of prokaryotes and can be legitimately viewed as a necessary condition of the long-term survival of archaea and bacteria » (*ibid.*, p. 131)

<sup>359</sup> « I am compelled to conclude that the concept of prokaryotes as life forms characterized by a distinct mode of evolution that involves extensive and essential HGT [...] is valid » (*ibid.*, p. 139 ; en italique dans le texte original).

<sup>360</sup> Bapteste, *Les gènes voyageurs* (*op. cit.*, p. 181).

<sup>361</sup> *Ibid.*, p. 208. Bapteste énumère alors un certain nombre de ces propositions (pp. 208-216), sur lesquelles je ne m'étendrai pas afin d'éviter des longueurs supplémentaires.

<sup>362</sup> Von Sydow, *From Darwinian Metaphysics [...]*, (*op. cit.*, en particulier pp. 153-158 et p. 377).

<sup>363</sup> « No inviolable taxonomic barriers exist for horizontally transferred DNA » (Shapiro, *Evolution [...]*, *op. cit.*, p. 93).

ainsi, la théorie de l'évolution doit incorporer le transfert horizontal de multiples séquences codantes à partir de n'importe quel règne du vivant comme un mode fondamental de changement génomique ; en outre, suite au transfert d'ADN, les séquences se retrouvent intégrées dans le génome de l'hôte, où elles subiront des processus d'ingénierie génétique naturelle : ces mécanismes apparaissent comme un aspect central du changement évolutif<sup>364</sup>.

### 5. 6. 3. 3. L'évolution des protéines par duplication de modules<sup>365</sup>

Les protéines partagent des segments communs bien définis (appelés domaines) bien plus qu'elles ne partagent des structures globales : elles apparaissent alors comme des structures composites construites à partir de domaines structuraux et fonctionnels autonomes<sup>366</sup>. De la sorte, on pourrait dire qu'au cours de leur évolution ces protéines "mélangent", "remanient" des segments fonctionnels préexistants, et "croissent" par une sorte d'"accrétion" de tels domaines<sup>367</sup>, au cours de l'évolution des eucaryotes : en d'autres termes, les protéines se diversifient par un processus d'acquisition, d'amplification et de réarrangement de séquences codant pour des structures d'une longueur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de résidus aminoacyls de long<sup>368</sup>, dans une vision combinatoire<sup>369</sup> d'un nouveau genre. De cette manière, la probabilité qu'une protéine intègre un changement fonctionnel fructueux est bien plus élevée par l'acquisition d'un domaine de fixation ou d'un domaine catalytique préexistant que par un processus graduel de changement d'un résidu aminoacyl à la fois impliquant la sélection répétée d'améliorations mineures de ses propriétés catalytiques ou de fixation<sup>370</sup> ; en outre, les séquences protéiques préexistantes ne fournissent pas la base nécessaire

<sup>364</sup> « *Integration and engineering of horizontally transferred DNA is a key feature of evolutionary change* » (*ibid.*, p. 92).

<sup>365</sup> « *The modular and duplicative nature of protein evolution.* » (*ibid.*, p. 95).

<sup>366</sup> « [...] *proteins as composite structures built as systems of structurally autonomous domains.* » (*ibid.*, p. 96).

<sup>367</sup> « [...] *protein[s] "shuffled" and "accreted" copies of functional protein segments called domains [...]* » (*ibid.*, p. 95 ; en italique dans le texte original).

<sup>368</sup> « *In other words, proteins diversify through a process of acquiring, amplifying, and rearranging coding sequences for subprotein structures that may be dozens or hundreds of amino acids in length* » (*ibid.*, p. 95).

<sup>369</sup> « [...] *the new combinatorial thinking [...]* » (*ibid.*, p. 96).

<sup>370</sup> « [...] *this has a far higher probability of proving effective than does a random process of changing one amino acid at a time and gradually selecting modest improvements in catalysis or binding specificity* » (*idem*).



permettant l'apparition de nouvelles fonctions en changeant un acide aminé à la fois, tout simplement parce que ces nouvelles fonctions requièrent des structures polypeptidiques entièrement différentes<sup>371</sup>. Cette restriction est bien évidemment contournée par l'acquisition d'un nouveau domaine entier, qui possède déjà la configuration appropriée<sup>372</sup>. Il s'agit là d'une stratégie évolutive bien plus efficace que des changements indépendants, simples ou même multiples, de résidus aminoacyles<sup>373</sup>.

Il apparaît ainsi que les protéines évoluent par ingénierie génétique plutôt que par mutations localisées<sup>374</sup> : il est clairement établi que les cellules vivantes sont capables de mettre en place les opérations de génie génétique naturel nécessaires pour l'évolution des protéines par échange de domaines<sup>375</sup> (amplification puis remaniement des séquences codant pour ces domaines) ; en plus des domaines pris isolément, des protéines entières, possédant une fonction adaptative essentielle, sont également communément amplifiées dans ce que l'on appelle des familles de protéines<sup>376</sup>.

#### 5. 6. 3. 4. Ubiquité des associations mutualistes et nature chimérique des organismes

De nombreux eucaryotes sont constitués de deux ou plusieurs organismes différents, dans des associations mutualistes, dont l'importance pour produire des innovations évolutives a souvent été proposée. Il est virtuellement impossible d'affirmer que chaque organisme soit composé uniquement de cellules végétales ou animales : il semble nécessaire de devoir redéfinir un organisme vivant de façon plus large, en tant que communauté allant bien au-delà de la vision traditionnelle selon laquelle les êtres

---

<sup>371</sup> « *In many cases, existing sequences do not provide suitable starting material for evolving new functions one amino acid at a time, because those novel functions require entirely different polypeptide structures* » (*idem*).

<sup>372</sup> « [...] *this restriction does not apply to the process of acquiring an entire new domain, which already comes appropriately configured* » (*idem*).

<sup>373</sup> « [...] *a more effective protein innovation strategy than individual or multiple independent amino acid changes* » (*idem*).

<sup>374</sup> « [...] *[proteins] evolve by natural genetic engineering rather than by localized mutation* » (*ibid.*, p. 97).

<sup>375</sup> « [...] *the capacity of living cells to carry out the requisite natural genetic engineering operations for protein evolution by domain swapping is unequivocally established* » (*idem*).

<sup>376</sup> « [...] *whole proteins are commonly amplified into protein families* » (*idem* ; en italique dans le texte original).

vivants possèdent uniquement leur génome propre, hérité de façon verticale<sup>377</sup>. Ainsi, il semble établi que la cellule eucaryote est apparue suite à la fusion de deux ou plusieurs cellules procaryotes<sup>378</sup> : certains systèmes cellulaires ont une origine archéenne (réplication, transcription et traduction à partir du génome nucléaire), tandis que les autres ont une origine bactérienne (structures membranaires, voies métaboliques diverses)<sup>379</sup>.

Dans cette perspective, la fusion cellulaire apparaît comme une véritable force évolutive<sup>380</sup> qui permet à des cellules de combiner leurs génomes et s'avère fondamentale chez les eucaryotes<sup>381</sup>. Il suffit de considérer le fait que la fusion cellulaire est à la base de toute reproduction sexuée : chaque fécondation est, tout à la fois, une fusion cellulaire et un transfert latéral de gènes. Vu sous cet angle, la reproduction sexuée fait de la symbiogenèse et des transferts horizontaux deux aspects centraux de la reproduction du génome chez les eucaryotes complexes.<sup>382</sup>

### 5. 6. 3. 5. Génie génétique naturel, éléments génétiques mobiles et innovations évolutives génomiques<sup>383</sup>

La génération de certaines innovations génomiques est liée au génie génétique naturel impliquant des éléments génétiques mobiles :

- L'exonisation est le mécanisme par lequel environ 3500 gènes humains contiennent des exons qui proviennent d'éléments mobiles<sup>384</sup> ;

<sup>377</sup> « *It seems that we need to think of organism as a term that has a much broader community-based or systemic meaning than the significance given by traditional perspectives based on the idea that each organism has its own separate, vertically inherited genome* » (*ibid.*, pp. 101-102).

<sup>378</sup> C'est la théorie endosymbiotique, proposée par Lynn Margulis en 1967.

<sup>379</sup> « *This symbiogenetic view typically sees the eukaryotic nuclear system and translation apparatus as being of archeal descent, with the mitochondrion, cytoplasmic membrane, and perhaps other organelles derived from one or more bacterial ancestors* » (Shapiro, *Evolution [...]*, op. cit., p. 104).

<sup>380</sup> « [...] *how powerful an evolutionary force cell fusion has been [...]* » (*ibid.*, p. 106).

<sup>381</sup> « [...] *the ability of cells to merge and combine their genomes is a fundamental property of eukaryotic cells [...]* » (*idem*).

<sup>382</sup> « [...] *cell fusion is the essential basis of all sexual reproduction [...]. Every fertilization event is both a symbiosis (cell merger) and a horizontal transfer of genomic material. This way of looking at sexual reproduction makes both symbiogenesis and horizontal transfer central to genome reproduction in complex eukaryotes* » (*idem*).

<sup>383</sup> « *Natural genetic engineering and evolutionary genomic innovations* » (*ibid.*, p. 107).

<sup>384</sup> « *About 3,500 of the estimated 26,000 human "genes" contain exons originating from mobile elements [...]* » (*ibid.*, p. 109) ; certaines de ces séquences auraient joué un rôle dans l'évolution rapide des hominidés et

- L'intronisation est le mécanisme par lequel l'insertion d'éléments mobiles est à l'origine de nouveaux introns et sites d'épissage, ce qui permet l'expression de protéines différentes dans différents tissus ou dans des conditions différentes<sup>385</sup> ;
- Certains éléments mobiles ont la capacité de ralentir la transcription s'ils s'insèrent dans un intron<sup>386</sup> ; d'autres peuvent modifier la régulation de certains loci<sup>387</sup> ;
- Le formatage de la chromatine permet un contrôle de l'expression génomique sur de grandes étendues du génome : l'insertion d'un élément mobile peut modifier la nature de la chromatine, ce qui peut produire des répercussions phénotypiques<sup>388</sup> ; de façon similaire, des domaines de la chromatine auraient été établis au cours de l'évolution par l'insertion de transposons et rétrotransposons<sup>389</sup>, ce qui implique que ces éléments mobiles sont capables d'établir un contrôle épigénétique spécifique<sup>390</sup> ;
- Certaines fonctions cellulaires fondamentales sont régulées par des molécules d'ARN non codant<sup>391</sup> qui joueraient un rôle dans l'apparition de la complexité évolutive qui ne peut être expliquée par la capacité codante limitée du génome mammalien<sup>392</sup> ;
- Il existe une corrélation étroite entre les mécanismes de réarrangements chromosomiques et l'intervention d'éléments génétiques mobiles<sup>393</sup>.

autres primates (« *A great deal of present speculation centers on the role of [...] exonization in the apparently rapid evolution of hominids and other primates* » ; *idem*).

<sup>385</sup> « [...] *mobile element insertions may be an important source of alternative splice sites available for expression of distinct protein products in different tissues or under different conditions* » (*ibid.*, p. 110).

<sup>386</sup> « [...] *elements can slow down the rate of transcription when inserted into an intron* » (*idem*).

<sup>387</sup> « [...] *mobile elements [...] altered the regulation of a genetic locus [...]* » (*idem*).

<sup>388</sup> « [...] *localized chromatin alteration accounts for phenotypic effects of many mobile element mutations* » (*ibid.*, p. 112).

<sup>389</sup> « [...] *chromatin domains can be established during evolution by the insertion of transposons and retrotransposons* » (*idem*).

<sup>390</sup> « [...] *the rôle of mobile elements in establishing specific epigenetic controls [...]* » (*idem*).

<sup>391</sup> « [...] *noncoding ncRNA play [...] a pervasive role in controlling cell functions [...]* » (*idem* ; en italique dans le texte original).

<sup>392</sup> « [...] *ncRNA control regimes compensate for the disappointment in finding less protein-coding capacity than expected in human and other mammalian genomes and [...] ncRNA provides the predicted evolutionary complexity* » (*idem*) ; certains de ces ARN régulateurs correspondraient à des éléments mobiles précocement apparus au cours de l'évolution des mammifères (« *There are ancient and conserved ncRNAs that correspond to mobile elements that appeared early in mammalian evolution [...]* » ; *ibid.*, p. 113).

<sup>393</sup> « [...] *an intimate connection exists between rearrangement breakpoints [...] and mobile genetic elements* » (*ibid.*, p. 115).

### 5. 6. 3. 6. Utilisation et réutilisation des innovations évolutives<sup>394</sup>

La biologie développementale évolutive (Évo-Dévo), déjà évoquée, a démontré une étonnante conservation de mécanismes morphogénétiques sur de longues périodes<sup>395</sup>, dont l'exemple le plus remarquable est constitué par le complexe de gènes *Hox*<sup>396</sup> présent chez tous les métazoaires, et dont la mise en place aurait impliqué des mécanismes d'ingénierie génétique naturelle<sup>397</sup>. Le cas du complexe *Hox* illustre le fait qu'au cours de la mise en place de nouveaux programmes de développement un certain nombre d'innovations évolutives ont été conservées et réutilisées<sup>398</sup>. De façon plus générale, la perspective Évo-Dévo indique que la plupart des changements morphologiques au cours de l'évolution se font par la modification de séquences amplificatrices et de l'expression de signaux de régulation de la transcription, ainsi que par différents motifs de formatage épigénétique<sup>399</sup>.

### 5. 6. 3. 7. Duplications génomiques intégrales lors d'étapes-clés de l'évolution<sup>400</sup>

Conséquences de duplications génomiques intégrales, des épisodes au cours desquels le génome est doublé, triplé, quadruplé et même octuplé<sup>401</sup> ont été détectés chez de nombreux vertébrés au niveau de loci importants comme le complexe *Hox*. Il est

<sup>394</sup> « *Use and reuse of evolutionary inventions* » (*idem*).

<sup>395</sup> « [...] *the surprising conservation of morphogenetic routines over long periods of time* » (*ibid.*, p. 116).

<sup>396</sup> *Ibid.*, pp. 116-117.

<sup>397</sup> « [...] *natural genetic engineering to put together the Hox complex may have been a key process* [...] » (*ibid.*, p. 117).

<sup>398</sup> « *What the Hox complex illustrates in a dramatic way is the principle that evolutionary inventions are retained and reused within the context of new developmental programs* » (*ibid.*, p. 118).

<sup>399</sup> « [...] *much of morphological change in evolution occurs by modification of expression through alteration of enhancers and other transcriptional regulatory signals, as well as distinct patterns of epigenetic formatting* » (*ibid.*, p. 119) ; par exemple, les humains et les souris partagent pratiquement les mêmes gènes et protéines ; leurs différences morphologiques et métaboliques sont dues à des motifs de régulation différents au cours du développement embryonnaire tardif et postnatal (« [...] *humans and mice share most of their proteins, and the most obvious differences in morphology and metabolism can be attributed to distinct regulatory patterns in late embryonic and postnatal development* » ; *ibid.*, p. 120).

<sup>400</sup> « *Whole genome doubling at critical stages of evolutionary innovation* [...] » (*idem*).

<sup>401</sup> « [...] *duplications, triplications, tetraplications, and even octaplications* [...] *are now seen to be the result of "whole genome duplications" (WGDs)* » (*idem*) ; ainsi, une première duplication intégrale aurait mené aux premiers vertébrés, une seconde aurait mené aux premiers gnathostomes (vertébrés à mâchoires) (« [...] *the first [WGD] preceding appearance of the first vertebrates, and the second preceding appearance of jawed vertebrates* [...] » ; *ibid.*, p. 121).

clairement établi que de telles duplications sont impliquées dans les épisodes de spéciation<sup>402</sup>.

En effet, il est important de souligner que c'est l'hybridation interspécifique, et non la sélection naturelle, qui mène à la formation de nouvelles espèces<sup>403</sup> : le doublement des chromosomes permet la formation d'hybrides présentant un génome dédoublé, à l'origine de nouvelles espèces<sup>404</sup>. Ces duplications sont des événements soudains, en totale opposition avec le gradualisme darwinien<sup>405</sup>. Elles produisent deux copies des régions du génome qui encodent des réseaux complexes : il en résulte qu'aucune fonctionnalité ne sera perdue si l'une des copies est modifiée<sup>406</sup>. Ainsi, l'adaptation des réseaux de signaux intracellulaires à différentes fonctions cellulaires et développementales indique qu'au cours de l'évolution ces réseaux ont été dupliqués et modifiés pour de nouveaux besoins<sup>407</sup>.

Il existe un lien hautement significatif entre les bases moléculaires des changements génomiques et le rôle des duplications génomiques intégrales au cours de l'évolution. La formation d'hybrides interspécifiques et les modifications de la ploïdie sont de véritables *chocs génomiques* qui ont pour résultat la perturbation du contrôle épigénétique<sup>408</sup> : un tel contrôle, tout au long de l'histoire de la vie, plutôt que la variation héréditaire, est l'une des différences les plus marquées et fondamentales entre la vision du changement génomique résultant d'une myriade de fonctions cellulaires (ingénierie génétique naturelle) et le point de vue traditionnel du changement génomique à partir d'événements aléatoires et accidentels<sup>409</sup>.

<sup>402</sup> « [...] we can actually observe WGD and its direct role in speciation in real time » (*idem*).

<sup>403</sup> « [...] interspecific hybridization led to the formation of new species » (*idem*).

<sup>404</sup> « [...] hybridization and genome duplication have been the sources of new [...] species » (*ibid.*, p. 122).

<sup>405</sup> « [...] genome doubling are the kinds of sudden, genome-wide changes [...] that [Darwin] explicitly excluded from his gradualist, uniformitarian thinking » (*idem*).

<sup>406</sup> « [...] WGD events [...] produce two copies of the dispersed genome regions that encode complex networks [...] no functionality is lost if one copy of the network is modified [...] » (*idem*).

<sup>407</sup> « The fact that intracellular signaling networks [...] have been adapted to many different cellular and developmental functions indicates that, in the course of evolution, they have been duplicated and modified to meet new adaptive needs » (*idem*).

<sup>408</sup> « There is a striking and highly significant connection between [...] the molecular basis of genome change and the role of WGDs in evolutionary history. Formation of interspecific hybrids and changes in ploidy are [...] genome shocks that lead to the disruption of epigenetic control [...] » (*ibid.*, p. 123 ; en italique dans le texte original).

<sup>409</sup> « The potential for life-history-based control over the occurrence of hereditary variation is one of the most trenchant and fundamental differences between the 21st Century view of genome change resulting from a

En conclusion, l'étude des génomes a permis de déduire les différents modes de changement héréditaire qui se sont manifestés au cours des phases les plus importantes de l'histoire évolutive, ce qui conduit à la conclusion suivante : des occurrences brutales, impliquant des formes d'hérédité non conventionnelle, ont mené à l'apparition de changements génomiques majeurs, tant au niveau de la structure que de la fonction, tout au long de l'histoire du vivant ; l'analyse des séquences d'ADN ne plaide pas du tout en faveur d'une lente accumulation de changements graduels aléatoires transmis selon le schéma restrictif de la descendance verticale<sup>410</sup>.

#### 5. 6. 4. Présentation des nouvelles bases conceptuelles de l'évolution biologique

Il est maintenant évident que, en ce qui concerne la véritable nature du changement évolutif, les suppositions simplificatrices du 19<sup>e</sup> et de la première partie du 20<sup>e</sup> siècle sont manifestement fausses, car elles ne parviennent pas à rendre compte de toute la panoplie de mécanismes cellulaires et génomiques qui se sont déroulés<sup>411</sup>. Il est donc grand temps de partir à la recherche de nouvelles fondations conceptuelles qui rendent mieux compte des changements génomiques au cours de l'histoire évolutive<sup>412</sup>.

224

#### 5. 6. 4. 1. Approche systémique et production d'innovations fonctionnelles<sup>413</sup>

Nous assistons au sujet de l'apparition de nouvelles fonctionnalités évolutives à un changement de paradigme (au sens de Kuhn), vers une perspective systémique qui incorpore les circuits cellulaires et les réseaux moléculaires dans une conception

---

*constellation of regulated cell functions (natural genetic engineering) and the traditional view that genome change results from random and accidental events » (idem).*

<sup>410</sup> « *Examining genomes and deducing what kinds of hereditary changes occurred coincidentally with major transitions points in evolution [...] lead to a clear conclusion: Rapid events involving non-canonical modes of inheritance have introduced major changes to genome structure and function throughout evolutionary history. The DNA record definitely does not support the slow accumulation of random gradual changes transmitted by restricted patterns of vertical descent » (ibid., p. 126).*

<sup>411</sup> « *As to the actual nature of evolutionary change processes, [...] the simplifying assumptions made in the 19th and early 20th Centuries are plainly wrong. They fail to account for the variety of cellular and genomic events we now know have occurred » (ibid., p. 128).*

<sup>412</sup> « *[...] we will search for alternative conceptual foundations that better account for our current knowledge of genome change over evolutionary time » (idem).*

<sup>413</sup> « *A systems approach to generating functional novelties » (ibid., p. 129).*

intégrée des activités des cellules et des organismes, attribuant ainsi une signification de première importance aux propriétés collectives des réseaux moléculaires<sup>414</sup>. La variation héréditaire et le changement génomique sont alors perçus comme des processus cellulaires actifs, résultant de fonctions cellulaires spécialisées<sup>415</sup>. Les mécanismes d'ingénierie génétique naturelle présentent des similitudes avec les protocoles d'ingénierie humains de développement ou d'amélioration de nouveaux produits ou systèmes<sup>416</sup>, d'où la métaphore de l'ingénierie des systèmes appliquée au changement évolutif<sup>417</sup> et basée sur des analogies entre les organismes biologiques et les possibilités de l'ingénierie systémique.

#### 5. 6. 4. 2. Réorganisation de fonctions préexistantes et production d'innovations<sup>418</sup>

Certaines inventions évolutives préexistantes servent de point de départ pour générer une nouvelle architecture génomique, en réutilisant des séquences codantes, des signaux de régulation, des signaux de formatage de la chromatine, des centromères, des télomères et des complexes de gènes homéotiques : les cellules possèdent la machinerie moléculaire leur permettant d'amplifier des séquences d'ADN ou d'ARN et de les placer à de nouveaux endroits et selon de nouveaux arrangements dans le génome<sup>419</sup>, par un processus combinatoire.

<sup>414</sup> « [...] we have witnessed a paradigm shift in scientific thinking [...] to a systems perspective that incorporates cell circuitry and molecular networks into a more integrated view of cellular and organismal activities [...]. Current "systems" thinking attributes primary functional significance to the collective properties of molecular networks [...] » (idem).

<sup>415</sup> « [...] hereditary change results from processes carried out by dedicated cell functions [...]. Our view of genome change has become one that describes active cell processes [...] » (idem).

<sup>416</sup> « [...] [natural genetic engineering operators] have the capacities needed for a process similar to the kind of engineering humans undertake when we want to develop novel products [...] » (idem).

<sup>417</sup> « Accordingly, let us adopt systems engineering as a theoretical metaphor for evolutionary change » (ibid., p. 130).

<sup>418</sup> « Reorganizing established functions to generate novelty » (idem).

<sup>419</sup> « [...] existing evolutionary inventions [are utilized] as the basis for a novel genomic architecture: coding sequences (exons), regulatory signals, chromatin formatting signals, [...] centromeres, telomeres, and Hox complexes. [...] cells possess the molecular apparatus to amplify the corresponding sequence components as either DNA or RNA and then place them in new locations and new arrangements in the genome » (idem).

Cette façon d'opérer est un puissant moteur évolutif par amplification et réorganisation de segments génomiques<sup>420</sup>, notamment parce que des interactions coopératives et synergiques entre signaux répétitifs s'avèrent nécessaires car de nombreuses interactions moléculaires sont faibles ou transitoires, et de nombreux événements synergiques permettent de stabiliser la formation de complexes fonctionnels permettant d'assurer des fonctions cellulaires telles que la réplication, la transcription et la division cellulaire<sup>421</sup>. Cette multiplicité se manifeste à la fois dans la structure des protéines et dans l'organisation des signaux dans des régions critiques du génome<sup>422</sup>.

#### 5. 6. 4. 3. Avantage évolutif spécifique du ciblage de la restructuration du génome<sup>423</sup>

La perspective offerte par la biologie des systèmes est que la fonctionnalité réside dans la mise en œuvre de réseaux moléculaires coordonnés<sup>424</sup>. Au niveau de tels systèmes, les processus de génie génétique naturel présentent une forte probabilité de produire des innovations réussies s'il y a possibilité de reconnaître les régions du génome qui codent pour des molécules fonctionnellement apparentées et ainsi être à l'origine de changements similaires ou complémentaires dans ces régions en même temps, comme l'insertion des mêmes domaines dans plusieurs protéines différentes qui agissent de concert, ou le placement de ces molécules sous le contrôle des mêmes signaux régulateurs de la transcription<sup>425</sup>. Si le génie génétique naturel peut opérer simultanément sur plus d'un locus encodant des protéines fonctionnellement

<sup>420</sup> « *The way that biological circuits operate is a powerful driver of evolution by amplification and reorganization of genome segments* » (*ibid.*, p. 131).

<sup>421</sup> « *The need for cooperativity arises because many biomolecular interactions are either weak or transitory, and multiple synergistic events stabilize the formation of functional complexes for carrying out cellular tasks such as replication, transcription, and cell division* » (*idem*).

<sup>422</sup> « *Such multiplicity is [...] documented, both in protein structure and in the arrangement of signals at critical regions of the genome* » (*idem*).

<sup>423</sup> « *Can a distinct evolutionary advantage be gained by targeting genome restructuring?* » (*ibid.*, p. 135).

<sup>424</sup> « [...] *the current systems biology view is that functionality resides in the correct operation of molecular networks [...]* » (*idem*).

<sup>425</sup> « *From a systems perspective, it is obvious that natural genetic engineering processes will have the highest probability of generating successful novelties if they can recognize regions of the genome encoding functionally related molecules and produce similar or complementary changes in those regions concurrently. For example, changing the inputs or outputs of a cell network may involve inserting the same protein domains into several different molecules that work together to receive or transmit signals or placing these molecules under the control of the same transcriptional regulatory circuit* » (*idem*).



apparentées, alors les chances de générer des innovations fonctionnelles sont grandement augmentées. Les possibilités d'un tel ciblage sont particulièrement importantes après une duplication génomique intégrale, offrant des copies supplémentaires des multiples locus codant pour les composantes d'un grand nombre de réseaux différents qui pourront être réarrangées<sup>426</sup>.

#### 5. 6. 4. 4. Mécanismes cellulaires et moléculaires et ciblage génomique heuristique<sup>427</sup>

De nombreuses interactions entre acides nucléiques et protéines permettent le ciblage particulier de processus d'ingénierie génétique naturelle dans différentes régions du génome<sup>428</sup>, comme dans le cas de l'insertion préférentielle d'éléments mobiles dans certains sites soumis à une régulation commune. Il semble ainsi ne pas y avoir de limite aux mécanismes moléculaires qui peuvent être cooptés comme base heuristique pour le ciblage d'opérations de génie génétique naturel<sup>429</sup>.

De plus, il s'avère que des locus fonctionnellement liés seraient localisés activement dans les mêmes compartiments, comme pour les locus impliqués dans des fonctions spécifiques (réplication, transcription, réparation) au sein de compartiments nucléaires spécifiques. De même, de tels locus pourraient être regroupés dans une même région où ils pourraient subir des processus de génie génétique naturel similaires, comme l'insertion d'un site régulateur ou l'échange d'exons. Dans cette perspective, on voit bien qu'il n'y a rien d'improbable lorsqu'on envisage les cellules comme étant capables d'introduire des changements coordonnés dans des régions du génome fonctionnellement reliées<sup>430</sup>.

<sup>426</sup> « The potential for such multilocus targeting will be especially great after a whole genomic duplication event, when extra copies of the multiple loci encoding the components of many different networks are available for rearrangement » (*ibid.*, pp. 135-136).

<sup>427</sup> « Can we envisage reasonable cellular and molecular mechanisms for heuristic genome targeting to occur? » (*ibid.*, p. 136).

<sup>428</sup> « [...] nucleic acid and protein interactions target particular natural genetic engineering processes to different genomic locations [...] » (*idem*).

<sup>429</sup> « [...] distinct genome regions subject to common regulation can be preferential sites of insertion. So there is no shortage of molecular mechanisms that can be co-opted as heuristics for targeting natural genetic engineering operations » (*idem*).

<sup>430</sup> « In addition, we are learning how genetic loci undergoing specific functions (replication, transcription, repair) localize into special subnuclear compartments. Growing evidence suggests that functionally related loci are subject to active colocalization within the same compartment. So there is also plausible mechanistic basis for grouping

#### 5. 6. 4. 5. Un lien entre changements génomiques et perturbations écologiques ?<sup>431</sup>

Le registre fossile présente des périodes soudaines d'extinctions de masse, suivies de périodes d'innovations de masse accélérées, des radiations évolutives en relation avec des crises écologiques globales<sup>432</sup>. Comme les phases d'innovations ont été plus nombreuses que les phases d'extinctions, on observe, sur le long terme, une augmentation du nombre de groupes phylogénétiques<sup>433</sup>. Toutefois, les interruptions ou lacunes du registre fossile donnent l'impression qu'un événement d'extinction est plus précoce et qu'une radiation est plus tardive qu'ils le sont en réalité<sup>434</sup>. C'est peut-être pour cette raison que peu d'attention a été accordée aux relations entre les perturbations écologiques et les changements génétiques<sup>435</sup> ; pourtant, il paraît logique de penser que de telles perturbations majeures ont dû être à l'origine d'importantes déstabilisations du génome<sup>436</sup>.

#### 5. 6. 4. 6. De la conservation, la duplication et la diversification des innovations évolutives<sup>437</sup> à la convergence

Plutôt que d'attribuer la tendance vers la complexification du vivant à une impulsion indéterminée, il est plus intéressant de l'interpréter comme provenant de la capacité des organismes vivants à conserver, amplifier, diversifier et réutiliser leurs

---

*such loci physically and temporally into a region where they can undergo similar natural genetic engineering processes, such as regulatory site insertion or exon swapping. Thus, we see there is nothing magical or implausible in thinking about how cells can be capable of introducing coordinated changes into different but functionally related regions of their genomes » (idem).*

<sup>431</sup> « *Can genomic changes be linked to ecological disruptions?* » (ibid., p. 139).

<sup>432</sup> « *Among the most striking features of the fossil record are the periods of accelerated mass extinctions followed by periods of accelerated mass "originations" [...]* » (idem).

<sup>433</sup> « *Over time, [...] originations have [...] outnumber[ed] extinctions [...]. There is a long-term increase in the number of taxonomic families [...]* » (ibid., p. 140).

<sup>434</sup> « *A gap makes an extinction event seem earlier than it occurred and makes an origination or radiation event seem later* » (ibid., p. 141).

<sup>435</sup> « *[...] little attention has been paid to the relationship between ecological disruption and genetic change* » (idem).

<sup>436</sup> « *[...] the genome destabilizing events that would logically follow major ecological disruptions* » (ibid., p. 142).

<sup>437</sup> « *Retention, duplication and diversification of evolutionary inventions* » (ibid., p. 133).

innovations évolutives<sup>438</sup>. Des exemples d'innovations évolutives qui ont fait l'objet d'une réutilisation et d'une réadaptation répétées concernent, dans les protéines, les domaines de fixation à l'ADN et, dans l'ADN, les éléments amplificateurs, les centromères, les télomères et les complexes homéotiques<sup>439</sup>. La signification de cette conservation, de cette amplification et de cette réadaptation est précisément que les organismes vivants qui ont réussi au cours des temps géologiques possèdent les systèmes de génie génétique naturels nécessaires pour dupliquer et modifier des constructions génomiques de plus en plus complexes.

#### 5. 6. 4. 7. Convergence et contraintes – Prévisibilité et inévitabilité de l'évolution

Un certain nombre de travaux suggèrent fortement, contrairement à une idée reçue, que l'évolution biologique présenterait un certain degré de prévisibilité. Par exemple, Virginie Orgogozo<sup>440</sup> parle d'une « certaine prédictibilité de l'évolution sur de longues périodes »<sup>441</sup>. L'auteure indique que « le processus évolutif se répète à de multiples niveaux, des molécules aux écosystèmes »<sup>442</sup>. Elle précise que « dans des conditions environnementales données, certaines catégories de phénotypes sont attendues »<sup>443</sup> : elle en arrive alors à l'idée que « si l'ensemble des conditions environnementales auxquelles les êtres vivants doivent faire face est connu, alors il se peut que nous puissions en quelque sorte, dans certains cas, prédire le résultat en termes de propriétés phénotypiques »<sup>444</sup>. Elle parle de « la possibilité de faire des prédictions au sujet des traits phénotypiques et génotypiques des organismes au cours de leur évolution »<sup>445</sup>. Ainsi,

<sup>438</sup> « Rather than attribute this apparent pattern of increase in size and complexity to some undefined innate drive, [...] we can understand the succession of larger and more intricately organized forms over time to illustrate the tendency of living organisms to retain amplify, diversify, and reuse their evolutionary inventions » (*idem*).

<sup>439</sup> « [...] some of the evolutionary inventions [...] that have been subject to widespread reuse and readaptation: Among proteins, DNA-binding domains [...]. Among DNA elements, [...] enhancers, centromeres, telomeres, and Hox complexes » (*idem*).

<sup>440</sup> Orgogozo, *Replaying the tape of life in the twenty-first century* (2015).

<sup>441</sup> « [...] a certain kind of predictability can emerge at higher levels over long time periods » (*ibid.*).

<sup>442</sup> « [...] the evolutionary process repeats itself at multiple levels, from molecules to ecosystems » (*ibid.*).

<sup>443</sup> « [...] given a set of environmental conditions, then certain types of phenotypes are expected » (*ibid.*).

<sup>444</sup> « [...] if the set of environmental conditions faces by living beings is known, we may somehow, in some cases, predict the outcome in terms of phenotypic properties » (*ibid.*).

<sup>445</sup> « [...] predictions are possible about the phenotypic and genotypic traits of evolving organisms » (*ibid.*).

il semble que « l'évolution soit plus limitée et plus répétable que prévu »<sup>446</sup>. Orgogozo termine en suggérant que « l'évolution semble suivre un ensemble limité de voies génétiques et phénotypiques à un moment et un endroit donnés au cours de l'évolution »<sup>447</sup>. En conclusion : « Il y a des parties prévisibles dans le film de la vie, et l'évolution pourrait bien ne pas être aussi imprévisible qu'on a pu le penser »<sup>448</sup>.

Lobkovsky et Koonin<sup>449</sup> affirment qu'il « devient clair que les trajectoires évolutives dans les paysages adaptatifs statiques corrélés sont essentiellement non aléatoires »<sup>450</sup>. Ils concluent par le fait que « l'évolution est fortement contrainte et [que] les régions des paysages adaptatifs disponibles pour être explorées sont extrêmement variables mais typiquement réduites. Aussi, s'il avait été possible de véritablement rejouer le film de l'évolution, le résultat final aurait été significativement proche de la biodiversité existante »<sup>451</sup>.

Terry Ord et Thomas Summer<sup>452</sup> définissent la convergence comme étant l'apparition indépendante, au cours de l'évolution, de phénotypes semblables, au sens strict à partir d'informations génétiques différentes (ce qui différencie la convergence de l'évolution parallèle, basée sur des informations génétiques similaires – si toutefois l'origine génétique de ces processus a pu être déterminée). Il faut également distinguer la convergence de la redondance fonctionnelle, ce qui peut s'avérer délicat <sup>453</sup>.

<sup>446</sup> « [...] evolution is more limited and more repeatable than expected » (ibid.).

<sup>447</sup> « [...] evolution seems to follow a limited set of genetic and phenotypic paths at a given time point and space point during evolution » (ibid.).

<sup>448</sup> « [...] there are predictable portions within life's tape and [...] evolution might not be as unpredictable as once thought [...] » (ibid.).

<sup>449</sup> Lobkovsky & Koonin, *Replaying the tape of life: quantification of the predictability of evolution* (2012).

<sup>450</sup> « It is becoming clear that evolutionary trajectories in static correlated fitness landscapes are substantially non-random [...] » (ibid.).

<sup>451</sup> « [...] evolution is strongly constrained and the part of the fitness landscape available for exploration is highly variable but typically small. Thus, if we actually could replay the tape of evolution, the outcome could have been considerably [...] similar to the existing diversity of life forms [...] » (ibid.).

<sup>452</sup> Ord & Summer, *Repeated evolution and the impact of evolutionary history on adaptation* (2015).

<sup>453</sup> « Convergent evolution. The independent evolution of a similar phenotype. [...] Ideally convergent evolution (adaptive or otherwise) is distinct from parallel evolution in that phenotypes have been generated from different genetic processes. However, this distinction cannot be made for most cases of reported convergence because the genetics that underlie characteristics have yet to be investigated. Convergent adaptations should also be distinct from those that are functional redundant, but in some cases it can be difficult to determine whether phenotypic characteristics are in fact similar or different among taxa » (ibid.).

Convergence, évolution parallèle et redondance fonctionnelle sont toutes trois regroupées sous l'appellation d'«évolution répétitive»<sup>454</sup>.

Powell et Mariscal<sup>455</sup> affirment que « l'évolution convergente peut faire l'objet d'expériences grandeur nature valables pour soutenir des inférences au sujet de la stabilité profondément contradictoire des innovations macro-évolutives »<sup>456</sup>. Ils parlent d'« innovations évolutives répétées qui sont probablement répandues au sein d'histoires évolutives différentes et pourraient faire l'objet de généralisations semblables à des lois »<sup>457</sup>. Ils affirment que « certains problèmes de conception sont omniprésents au cours de l'histoire de la vie » et que « l'ensemble des solutions évolutives à ces problèmes est extrêmement limité »<sup>458</sup>. Ils vont jusqu'à se demander : « Pourquoi les contraintes biomécaniques universelles qui agissent sur l'évolution de la forme ne devraient-elles pas être aussi intéressantes pour les biologistes que les résultats finaux de l'évolution, bizarres et circonstanciés ? »<sup>459</sup>.

Geerat Vermeij<sup>460</sup> l'affirme : « D'importants aspects de l'histoire de la vie, écologiques, fonctionnels et directionnels, sont reproductibles et prévisibles »<sup>461</sup>. Se basant sur l'idée que « l'histoire se répète souvent », il remarque que « de nombreux événements prétendument uniques de l'histoire précoce de la vie résultent de la réunion, de la coopération et de l'intégration d'éléments auparavant indépendants »<sup>462</sup>. Il met en garde sur le fait que « l'impression d'unicité naît souvent de notre tendance à ignorer les "expériences ratées" ayant mené à des résultats très proches voire identiques dans

<sup>454</sup> « *Repeated evolution. The independent evolution of a similar functional outcome in different taxa, either through the evolution of similar phenotypes (parallel and convergent evolution) or different phenotypes that achieve the same functional outcome (functional redundancy)* » (ibid.).

<sup>455</sup> Powell & Mariscal, *Convergent evolution as natural experiment: the tape of life reconsidered* (2015).

<sup>456</sup> « [...] *convergent evolution can constitute valid natural experiments that support inferences regarding the deep counterfactual stability of macroevolutionary outcomes* » (ibid.).

<sup>457</sup> « [...] *iterated evolutionary outcomes that are probably common among alternative evolutionary histories and subject to law-like generalizations* » (ibid.).

<sup>458</sup> « [...] *certain design problems are pervasive in the history of life* » ; « [...] *the set of evolutionary solutions to pervasive design problems is highly circumscribed [...]* » (ibid.).

<sup>459</sup> « *Why should universal biochemical constraints on the evolution of form not be as interesting to biologists as the quirky, more detailed outcomes of evolution ?* » (ibid.).

<sup>460</sup> Vermeij, *Historical contingency and the purported uniqueness of evolutionary innovations* (2006).

<sup>461</sup> « [...] *important ecological, functional, and directional aspects of the history of life are replicable and predictable* » (ibid.).

<sup>462</sup> « [...] *many of the purportedly unique events in the early history of life result from the union, cooperation and integration of previously independent components* » (ibid.).

des clades mineurs (la plupart du temps éteints) »<sup>463</sup>. Vermeij en arrive à l'idée que « l'on peut s'attendre à ce que la plupart des innovations apparaissent de multiples fois dans de nombreux clades, car leurs bénéfiques adaptatifs sont valables dans une gamme de conditions très large »<sup>464</sup>. Il conclut : « Peu ou pas d'innovations sont vraiment uniques ». Et il termine : « Les transitions ne sont pas aléatoires. Certaines directions et certains résultats fonctionnels sont fortement favorisés par rapport à d'autres, ce qui confère à l'histoire un certain degré de reproductibilité et de prévisibilité. En privilégiant certaines directions et certains résultats, l'auto-organisation et la sélection posent des limites à la contingence historique »<sup>465</sup>.

Adoptant une perspective similaire, Simon Conway Morris<sup>466</sup> insiste sur le fait que « l'évolution est bien plus prévisible qu'on le pense généralement »<sup>467</sup> et sur la possibilité « d'identifier une certaine prévisibilité dans le processus évolutif ainsi que dans ses résultats »<sup>468</sup>. Il rajoute que « les destinations évolutives sont très loin d'être accidentelles »<sup>469</sup> et « qu'en réalité, plutôt qu'un processus totalement ouvert, l'évolution est extrêmement contrainte »<sup>470</sup>. Faisant référence à « l'étrange capacité des organismes à se diriger vers des solutions particulières »<sup>471</sup>, Conway Morris en arrive à l'idée qu'il « est peut-être temps d'aborder le problème des propriétés biologiques en elles-mêmes si l'on veut apporter quelque ordre à l'évolution plutôt que répéter pour la énième fois la formulation darwinienne de façon stérile »<sup>472</sup>. Aussi conclut-il que « la biologie va aller bien au-delà de [cette] formulation »<sup>473</sup>, notamment avec l'idée que « l'évolution

<sup>463</sup> « *The perception of uniqueness [...] often arises from our tendency to ignore "failed experiments", closely similar or identical states that arose in minor (usually extinct) clades* » (*ibid.*).

<sup>464</sup> « *Most innovations [...] are expected to arise multiple times in many clades, because their adaptive benefits apply under a wide range of circumstances* » (*ibid.*).

<sup>465</sup> « [...] *there is strong evidence from evolutionary convergences that the transitions are not random. [...] economic selection strongly favors some directions and some functional outcomes over others. These physical and economic realities therefore impart to history a certain predictability and replicability. By nudging dynamic systems toward some directions and outcomes, self-organization and selection set limits to the contingency of history* » (*ibid.*).

<sup>466</sup> Conway Morris, *The predictability of evolution: glimpses into a post-Darwinian world* (2009).

<sup>467</sup> « [...] *evolution is much more predictable than generally assumed [...]* » (*ibid.*).

<sup>468</sup> « [...] *it is possible to identify a predictability to the process and outcomes of evolution* » (*ibid.*).

<sup>469</sup> « [...] *the evolutionary destinations [...] are very far from being fortuitous [...]* » (*ibid.*).

<sup>470</sup> « [...] *in reality rather than being an open-ended process evolution is deeply constrained* » (*ibid.*).

<sup>471</sup> « [...] *the uncanny capacity of organisms to navigate to particular solutions* » (*ibid.*).

<sup>472</sup> « [...] *perhaps it is time we addressed biological properties per se if we want to bring some order to evolution rather than reiterate for the umpteenth time the dry bones of the Darwinian formulation* » (*ibid.*).

<sup>473</sup> « [...] *a biology that will move far beyond the Darwinian formulation [...]* » (*ibid.*).

présente une forme inévitable »<sup>474</sup>. Car en effet, toujours selon Conway Morris<sup>475</sup>, « où que l'on porte son regard [dans le monde biologique], l'évolution est bridée par la convergence »<sup>476</sup> : ainsi, la réitération d'occurrences évolutives semble plus être la règle que l'exception. Conway Morris insiste : « Qu'on s'intéresse à la fonctionnalité des solutions mises en place par les organismes ou aux voies évolutives empruntées par ces derniers, les choix possibles s'avèrent limités, si ce n'est inévitables »<sup>477</sup>. Il remarque que « quel que soit le niveau biologique considéré, on trouvera des foyers présentant une stabilité biologique prolongée et qui agiront comme des attracteurs irrésistibles »<sup>478</sup>. Il fait appel à la notion d'«écomorphe», défini comme « une configuration anatomique récurrente en adéquation avec des impératifs écologiques particuliers »<sup>479</sup>. Dans le cadre d'une vision déterministe du processus évolutif, qui explore les différentes régions accessibles de «l'hyper-espace biologique», chaque solution, correspondant à un écomorphe particulier, présente alors une forte probabilité d'apparaître un certain nombre de fois au cours des temps géologiques<sup>480</sup>. Ainsi semble se dessiner « un schéma prévisible »<sup>481</sup> de l'histoire évolutive. En fin de compte, « les voies suivies par l'évolution s'avèrent étroites et inévitables »<sup>482</sup>.

Parmi les nombreux facteurs qui, activement ou passivement, ont la potentialité d'orienter le processus évolutif, on trouve les nombreuses contraintes<sup>483</sup> auxquelles les organismes sont soumis, de tous ordres : contraintes absolues ou universelles (lois de la physique et de la chimie), contraintes fonctionnelles (comme les compromis évolutifs), contraintes génétiques (comme les corrélations génétiques, la pléiotropie, la superdominance et le flux génétique), contraintes développementales (comme les mécanismes de contrôle du développement tels la canalisation et la stabilité, et l'intégration

<sup>474</sup> « [...] evolution has an inevitable geometry [...] » (*ibid.*).

<sup>475</sup> Conway Morris, *The runes of evolution* (2015).

<sup>476</sup> « [...] everywhere you look evolution is hedged in by convergence » (*ibid.*, p. 10).

<sup>477</sup> « [...] when one looks at either the functionality of biological solutions or the roads taken, then the choices are restricted, if not inevitable » (*ibid.*, p. 31).

<sup>478</sup> « [...] at whatever level of biology one considers there will be loci of persistent biological stability that will act as irresistible attractors » (*ibid.*, p. 33).

<sup>479</sup> « [...] recurrent anatomical configurations that answer the call of particular ecological needs » (*idem*).

<sup>480</sup> « [...] if evolution is a deterministic process, then each solution has a high probability of evolving several times » (*ibid.*, p. 34).

<sup>481</sup> « [...] a predictive framework » (*ibid.*, p. 43).

<sup>482</sup> « [...] the roads of evolution are indeed narrow and inevitable [...] » (*ibid.*, p. 10).

<sup>483</sup> Alibert et. coll., *Les contraintes* (2010).

et la modularité) et contraintes macro-évolutives (contraintes phylogénétiques). A leur sujet, on peut parler de « [...] barrières agissant comme des guides de l'évolution [...] qui déterminent la direction de l'évolution »<sup>484</sup>, en insistant sur l'idée que « la notion de contraintes traduit le fait que toutes les issues évolutives ne sont pas équiprobables et que la part de l'espace théorique des phénotypes réellement occupé par une lignée peut être limitée »<sup>485</sup>. Toutefois, certaines contraintes, comme la canalisation (agissant sur le développement embryonnaire en limitant l'expression de la variation génétique, d'où la conservation du phénotype malgré les changements environnementaux), joueraient « [...] un rôle significatif sur l'augmentation du potentiel adaptatif des organismes »<sup>486</sup>. Douglas Erwin<sup>487</sup> fait aussi appel à la notion de contraintes, mentionnant « une quantité limitée de solutions face à un problème particulier »<sup>488</sup>, d'où « des restrictions imposées à l'histoire évolutive des différents taxons »<sup>489</sup>, résultant dans la convergence. Il précise que « les contraintes présentent de nombreuses formes, allant de celles qui limitent la gamme de variation sur laquelle la sélection naturelle peut agir, jusqu'aux forces physiques induites par la dynamique des fluides et la gravité, entre autres »<sup>490</sup>. Il cite Kurt Schwenk, qui présente deux classes de contraintes, la première limitant la production de nouveaux variants<sup>491</sup>, la seconde menant au contraire à une grande variabilité sur laquelle la sélection naturelle peut agir de façon drastique<sup>492</sup>. Aussi peut-on envisager que ces contraintes pourraient intervenir dans le processus évolutif en rendant certains phénotypes obligatoires, inévitables.

Erwin précise que les preuves apportées par la convergence devraient mener à une nouvelle théorie de l'évolution<sup>493</sup>, sous la forme d'« une extension qui prendra davantage en considération la génétique du développement telle qu'envisagée par l'Évo-

---

<sup>484</sup> *Ibid.*, p. 246.

<sup>485</sup> *Ibid.*, p. 263.

<sup>486</sup> *Ibid.*, p. 264.

<sup>487</sup> Erwin, *Evolutionary contingency* (2006).

<sup>488</sup> « [...] a limited range of solutions to a particular problem [...] » (*ibid.*).

<sup>489</sup> « [...] the limited range of viable solutions constrained the evolutionary history of different groups [...] » (*ibid.*).

<sup>490</sup> « Constraints come in many forms, from those that limit the range of variation available for natural selection to act upon [...] to the physical forces of fluid dynamics, gravity and the like » (*ibid.*).

<sup>491</sup> « For one class, the constraint operates because organisms simply are unable to produce new variants [...] » (*ibid.*).

<sup>492</sup> « The second class of constraint is one where there is abundant variation, but various forces act through natural selection to limit the range of solutions » (*ibid.*).

<sup>493</sup> « Is a new theory of evolution in the offing? » (*ibid.*).



Dévo, une meilleure compréhension de la façon dont la production de la variation est biaisée et aussi une vision plus hiérarchisée de l'évolution »<sup>494</sup>.

#### 5. 6. 4. 8. L'homéostasie comme mécanisme ultime de l'évolution

John Torday<sup>495</sup> présente l'homéostasie comme le fondement mécaniste de la biologie, prenant son origine dans les premières protocellules<sup>496</sup>, et permettant le maintien, la perpétuation et la modification des structures et fonctions physiologiques<sup>497</sup> par adaptation du milieu intérieur des organismes vivants aux conditions environnementales externes, sans faire appel ni à des mutations aléatoires ni à la sélection naturelle<sup>498</sup>. Il en arrive à une conception globale de l'homéostasie en tant que mécanisme général en biologie, se représentant les fonctions assurant sa mise en œuvre à tous les niveaux d'organisation du vivant comme une sorte de fractale<sup>499</sup>. Il envisage l'homéostasie sous l'angle d'un processus temporel reliant le passé, le présent et le futur des organismes vivants<sup>500</sup> : ainsi, il ne faudrait pas juste se focaliser sur l'état présent des êtres vivants, mais également prendre en compte leurs états passés et futurs<sup>501</sup>.

#### 5. 6. 4. 9. De l'arbre au rhizome de la vie<sup>502</sup>

La représentation classique de l'évolution du vivant est celle d'un arbre, selon Didier Raoult attachée à une vision hiérarchique, verticale et dichotomique finalement

<sup>494</sup> « [...] an expansion that will include a more prominent role for the developmental genetics of evo-devo [...]. It will also include a greater appreciation for interesting biases in the generation of variation and possibly a role for a more hierarchical view of evolution [...] » (ibid.).

<sup>495</sup> Torday, *Homeostasis as the mechanism of evolution* (2015).

<sup>496</sup> « [...] homeostasis is the mechanistic fundament of biology, beginning with the protocell » (ibid., p. 573).

<sup>497</sup> « [...] homeostasis is a [...] mechanism for the maintenance, perpetuation and modification of physiologic structure and function » (idem).

<sup>498</sup> « It is no longer random mutation and Natural Selection, but adaptation of the internal environment of the organism to the external environment of the physical world in service to homeostasis » (ibid., p. 577).

<sup>499</sup> « If in effect life is a continuum that emanates from the unicellular state, then homeostasis functions at all levels of biology as a fractal, independent of scale » (ibid., p. 585).

<sup>500</sup> « That perspective subsumes a diachronic, or across-time process for mechanistically interconnecting the past, present and future of the organism » (ibid., p. 574).

<sup>501</sup> « [...] we have to see the organism as both its past and its future, not just as it appears in its current condition [...] » (ibid., p. 586).

<sup>502</sup> « "Rhizome of life" : retourner l'arbre de la vie pour mieux le comprendre » (Raoult, *Dépasser Darwin*, op. cit., p. 148).

paradoxe puisque cet arbre est l'inverse d'un arbre généalogique. Cette représentation simplificatrice et réductionniste néglige le fait que, certaines séquences d'ADN étant transmises horizontalement, les gènes sont de véritables mosaïques : ainsi, il n'existe pas deux arbres de gènes exactement comparables<sup>503</sup>. « L'arbre de la vie, de ce fait, perd beaucoup de sa pertinence »<sup>504</sup> : la complexité génétique, qui ne peut être réduite à un ancêtre commun unique à tous les organismes vivants, ne peut alors pas être représentée par un arbre, et doit être remplacée par l'image d'un rhizome<sup>505</sup>. « L'organisation de la vie qui porte ce modèle diffère assez radicalement de celle que portent les arbres de toute essence issus de l'arbre darwinien [...] met[tant] en évidence la complexité des origines »<sup>506</sup>.

En effet, il apparaît comme de plus en plus probable que les formes vivantes actuelles dérivent non pas d'un ancêtre commun unique, mais de plusieurs. Les origines différentes, archéennes ou bactériennes, de différents modules fonctionnels des organismes, plaident en faveur de cette hypothèse, en relation avec la notion, déjà développée, selon laquelle les êtres vivants sont des chimères, des assemblages d'éléments de provenances diverses, organisés de façon cohérente. A l'extrême, on peut même penser que ces origines différentes dériveraient de plusieurs événements d'apparition de la vie ayant fourni des formes vivantes originales mais « compatibles », c'est-à-dire dont certaines structures fonctionnelles auraient été, dans une certaine mesure, plus ou moins « interchangeables » – d'où ces échanges, précisément, à la base de la nature composite des organismes.

## § 6. La nouvelle théorie de l'évolution – post-darwinisme, synthèse étendue, autonomie du vivant, information et téléologie

*Il ne faut pas croire que la révolution [darwinienne] soit terminée.*<sup>507</sup>

I. B. Cohen (1985)

---

<sup>503</sup> *Ibid.*, p. 149.

<sup>504</sup> *Ibid.*, p. 151.

<sup>505</sup> « Le rhizome est la partie souterraine de la racine de certaines plantes. Il peut, dans certains cas, se ramifier considérablement, avec des racines horizontales et verticales ; jusqu'à en paraître inextricable » (*ibid.*, p. 152 ; il s'agit en fait d'une tige souterraine horizontale rampante multi-ramifiée).

<sup>506</sup> *Ibid.*, p. 152.

<sup>507</sup> « *It should not be thought that the [Darwinian] revolution is over* » (Cohen, *Revolution in science*, 1985, p. 297).

## 6. 1. La place de l'évolution au sein de la recherche scientifique du 21<sup>e</sup> siècle<sup>508</sup>. Approches systémique et informationnelle et changement de paradigme

La science de ce nouveau siècle s'intéresse aux multiples composantes des systèmes complexes, qui vont des simples agrégats de particules élémentaires jusqu'aux amas de galaxies. Cette science se démarque irrésistiblement de la recherche classique, qui consiste à comprendre les propriétés de chaque unité fondamentale pour ensuite tenter de déduire le comportement des grands systèmes à partir d'un petit nombre de règles et des caractéristiques de leurs éléments fondamentaux<sup>509</sup>. Dorénavant, l'une des préoccupations centrales de l'investigation scientifique consiste à comprendre la façon dont les systèmes changent au fil du temps, qu'il s'agisse d'atomes, de molécules, d'organismes, d'écosystèmes, de climats, de galaxies, de trous noirs ou d'univers<sup>510</sup>.

L'ensemble de ces données permet d'anticiper un changement de paradigme, pour passer d'un gradualisme basé sur des changements aléatoires et localisés à de soudaines restructurations génomiques soumises à des réseaux de systèmes : la «main invisible» de la sélection naturelle est alors remplacée par des réseaux cognitifs et des fonctions cellulaires d'auto-modification. L'accent est mis sur une dimension systémique plutôt qu'atomiste, et sur l'information plutôt que sur le hasard<sup>511</sup>. Il s'avère que répondre à des nécessités adaptatives futures et inconnues n'implique pas forcément un processus aveugle. Le génie génétique naturel fait en effet apparaître des motifs

<sup>508</sup> « Where does evolution fit in 21st Century science? » (Shapiro, *Evolution* [...], *op. cit.*, p. 145).

<sup>509</sup> C'est ce qu'on appelle l'approche réductionniste, qui a permis d'énormes progrès dans l'établissement de connaissances du fonctionnement du vivant au niveau moléculaire, grâce à des disciplines telles que la biologie moléculaire, la génétique moléculaire, la biochimie, etc., mais se montre aujourd'hui insuffisante et dépassée pour atteindre une compréhension plus globale des organismes.

<sup>510</sup> « *The science of the 12st Century deals with the interactions between the multiple components of complex systems, ranging from aggregates of elementary particles [...] to the behavior of the largest structures in the cosmos. This kind of science is fundamentally different from earlier periods, when the goal was to understand the unique property of each atomistic unit and then try to derive the behavior of large systems from a small set of interaction rules plus the character of their component parts. Today, a major focus in scientific inquiry is to understand how systems change over time, whether they are atoms, molecules, organisms, ecosystems, climates, galaxies, black holes, or universes* » (Shapiro, *Evolution* [...], *op. cit.*, p. 145).

<sup>511</sup> « [...] we can anticipate [...] a paradigm shift [...] from thinking about gradual selection of localized random changes to sudden genome restructuring by sensory network-influenced cell systems [...]. It replaces the "invisible hands" of geological time and natural selection with cognitive networks and cellular functions for self-modification. The emphasis is systemic rather than atomistic and information-based rather than stochastic » (*ibid.*, pp. 145-146).

récurrents de restructuration génomique qui facilitent l'apparition de nouveaux outils moléculaires dont l'utilité dans le monde vivant se trouve augmentée. L'évolution du vivant a ainsi mené à la production d'entités immensément complexes, fiables et capables de s'auto-reproduire, et qui ont su, de façon répétée, changer, survivre et proliférer malgré d'importants bouleversements écologiques<sup>512</sup>.

## 6. 2. Le post-darwinisme

Une vision plus élargie et réaliste des organismes et de leur processus évolutif doit passer par une redéfinition d'un certain nombre de concepts de base, afin de sortir des interprétations anthropomorphiques et, comme le suggère Pichot, de «laisser le vivant se définir lui-même»<sup>513</sup>.

Par exemple, Raoult<sup>514</sup> invite à abandonner la distinction entre procaryotes et eucaryotes, centrée sur l'illusion d'une supériorité des derniers par la présence d'un noyau, et sur l'idée fausse que les procaryotes ne présenteraient qu'une compartimentation intracellulaire limitée, voire absente. Cette proposition est d'ailleurs relayée par certains darwinistes<sup>515</sup>, qui parlent de «groupe marche-pied» impliquant l'idée d'un progrès évolutif qu'ils rejettent<sup>516</sup> – même s'il est clair qu'une partie significative de l'histoire évolutive révèle une tendance générale vers la complexification des organismes<sup>517</sup>.

La sélection naturelle doit aussi être redéfinie, pour lui rendre la véritable place qu'elle occupe au sein du processus évolutif. Par définition, il s'agit d'une survie et d'une reproduction différentielles, bien loin des propriétés créatrices que lui prête le darwinisme. A cet égard, la sélection naturelle doit être vue comme un filtre plutôt

---

<sup>512</sup> « The fact that future adaptive needs are unknowable does not mean that filling those needs has to be a blind process. In [...] natural genetic engineering, [...] we have been able to discern regular features of genome restructuring that facilitate the production of novel molecular tools with an enhanced likelihood of real-world utility. [...] Evolving life has far exceeded human ingenuity in producing immensely complex and reliable self-reproducing entities that have repeatedly managed to change, survive, and proliferate despite major ecological upheavals » (*ibid.*, p. 147).

<sup>513</sup> Pichot, *Éléments pour une théorie de la biologie* (*op. cit.*, p. 1 & p. 30).

<sup>514</sup> Raoult, *Dépasser Darwin* (*op. cit.*, pp. 143-146).

<sup>515</sup> *Guide critique de l'évolution* (*op. cit.*, p. 30).

<sup>516</sup> *Ibid.*, pp. 67-68.

<sup>517</sup> Toutefois, cette complexification est elle aussi contestée (voir Gould, *The Evolution of Life on the Earth*, 1994).

grossier, seulement capable d'éliminer les formes les plus inadaptées, lui conférant une dimension purifiante et stabilisante<sup>518</sup>. Il est même possible d'envisager l'action de la sélection naturelle comme étant l'exception plutôt que la règle : elle n'agirait vraiment qu'au moment des phases de spéciation, tandis que les stases évolutives correspondraient à des périodes d'inaction de la sélection naturelle (soit grâce à des conditions environnementales stables, soit grâce à une adaptation optimale d'une espèce à son milieu de vie).

Dans un tel cadre, une vision post-darwinienne de l'évolution doit prendre en compte un grand nombre de mécanismes ignorés ou sous-évalués, dont l'importance vient encore amoindrir le rôle de la sélection naturelle. En effet, la Synthèse moderne incluait l'hypothèse *ad hoc* concernant la nature aléatoire de la variation héréditaire, l'action positive de la sélection naturelle et la certitude que les temps géologiques étaient suffisants pour que l'accumulation de petits changements adaptatifs puisse mener à l'apparition de nouvelles formes de vie<sup>519</sup> – et les réalisations de la biologie moléculaire furent interprétées comme fournissant les bases physico-chimiques de cette vision des choses<sup>520</sup>.

Aujourd'hui, un nouvel état d'esprit scientifique est en train d'émerger, sur la base d'informations inédites ou réinterprétées concernant le traitement cellulaire d'informations et les circuits de contrôle, la capacité des cellules à réparer et restructurer leur génome, et les changements de l'organisation génomique rapides et à grande échelle<sup>521</sup>, mais aussi les transferts horizontaux d'ADN et les multiples événements de fusion cellulaire<sup>522</sup>. Le registre fossile apparaît bel et bien comme discontinu et caractérisé par

---

<sup>518</sup> Shapiro, *Evolution* [...], *op. cit.*, p. 144.

<sup>519</sup> Il est remarquable de constater que les ultra-darwinistes considèrent, au contraire, que ce sont précisément les hypothèses qui s'opposent à l'aspect aléatoire de la variation héréditaire, ou bien à la suffisance de l'immensité des temps géologiques, qui sont *ad hoc* (voir *Guide critique de l'évolution*, *op. cit.*).

<sup>520</sup> « *The basic elements of the Modern Evolutionary Synthesis included an ad hoc assumption about the random nature of hereditary variation, [...] the positive action of natural selection, and a belief that geological time was sufficient for the selection-guided accumulation of small selective changes to produce new life forms. [...] the early pioneering accomplishments of molecular biology were interpreted to provide a solid physical and chemical basis for this perspective* » (Shapiro, *Evolution* [...], *op. cit.*, p. 142).

<sup>521</sup> « *Today, we have a different body of information and a distinct scientific mind-set. We know about cellular information processing and control circuits, the ability of cells to repair and restructure their genomes, and the rapid large-scale changes in genome organization that distinguish life-forms* » (*ibid.*, pp. 142-143).

<sup>522</sup> « *We know about [...] DNA transfers, and multiple cell mergers [...]* » (*ibid.*, p. 143).

des changements brutaux de la nature et de la distribution des organismes<sup>523</sup>. Dans cette toute nouvelle perspective, un ensemble de principes évolutifs plus interactif, basé sur la notion d'information, se fait jour<sup>524</sup> :

- Les cellules et les organismes vivants sont des entités cognitives (connaissantes), sensibles (sentientes), qui agissent et interagissent délibérément, intentionnellement, pour assurer leur survie, leur croissance et leur prolifération : ils sont donc doués des capacités sensorielles, de communication, de traitement d'information et de prise de décision correspondantes<sup>525</sup> ;
- Les cellules sont conçues pour évoluer : elles possèdent la capacité à modifier leurs caractéristiques héréditaires rapidement, par le jeu de processus de génie génétique naturel et épigénétiques ainsi que par fusion cellulaire<sup>526</sup> ;
- Les innovations évolutives apparaissent à partir de la production de nouvelles structures cellulaires et multicellulaires, comme le résultat de fonctions d'auto-modification et de fusions cellulaires. Dans de nombreux cas, ces nouvelles structures impliquent l'amplification et/ou le réarrangement de composants moléculaires préexistants et fonctionnels. De plus, les cellules (mais aussi les virus) savent générer des molécules entièrement nouvelles (acides nucléiques, protéines, etc.) qui peuvent ensuite être intégrées dans des systèmes cellulaires ou multicellulaires fonctionnels. Dans ce cadre, on peut raisonnablement supposer que l'orientation appropriée de l'ingénierie génétique naturelle pourrait augmenter la probabilité de succès à générer des innovations utiles<sup>527</sup> ;

<sup>523</sup> « We see the fossil record as episodic and characterized by geologically abrupt changes in the nature and distribution of organisms » (idem).

<sup>524</sup> « Using this [...] scientific perspective, we can articulate a more interactive and information-based set of basic evolutionary principles [...] » (idem).

<sup>525</sup> « Living cells and organisms are cognitive (sentient) entities that act and interact purposefully to ensure survival, growth, and proliferation. They possess corresponding sensory, communication, information-processing, and decision-making capabilities » (idem).

<sup>526</sup> « Cells are built to evolve; they have the ability to alter their hereditary characteristics rapidly through [...] natural genetic engineering and epigenetic processes as well as by cell mergers » (idem).

<sup>527</sup> « Evolutionary novelty arises from the production of new cell and multicellular structures as a result of cellular self-modification functions and cell fusions. In many cases, these new structures involve the amplification and/or rearrangement of existing functional molecular components. In addition, cells (and associated entities such as viruses) have the capacity to generate entirely new nucleic acid, protein, and other molecular components that can subsequently be integrated into functional cell or multicellular systems. [...] it remains to be thoroughly investigated to what degree cell sensing, information processing, and genome targeting can heuristically accelerate the production of useful novelties » (idem).

- Le rôle de la sélection est d'éliminer les innovations non-fonctionnelles qui interfèrent avec les nécessités adaptatives : ainsi, la sélection naturelle est-elle purifiante et non pas créatrice<sup>528</sup> ;
- Les innovations évolutives qui surmontent l'action de la sélection purifiante, et s'avèrent donc utiles, peuvent alors être l'objet d'une amélioration ou d'un perfectionnement de type micro-évolutif<sup>529</sup>, possiblement grâce aux processus envisagés dans les théories conventionnelles (à ce sujet, voir la notion de «masques adaptatifs»<sup>530</sup>) ;
- Les innovations évolutives réussies sont sujettes à une amplification, une réutilisation et une adaptation à de nouvelles fonctions, en réponse à des défis écologiques successifs<sup>531</sup> ;
- Suite à l'intégration fonctionnelle d'innovations évolutives passées, qui impose des contraintes grandissantes sur toute innovation supplémentaire qui s'avère adaptative, les caractères spécifiques, d'un point de vue taxonomique, se retrouvent fixés<sup>532</sup>.

Il s'ensuit, à partir de ces principes, un processus évolutif qui rappelle les changements épisodiques et brutaux qui émaillent tout à la fois les registres fossile et génomique, selon le modèle des équilibres ponctués proposé par Eldredge et Gould, qui devrait être considéré comme la situation «normale»<sup>533</sup>.

### 6. 3. L'importance de la dimension écologique de l'évolution – Interactions, écologie évolutive, coévolution écologique, écoéthologie

<sup>528</sup> « The role of selection is to eliminate evolutionary novelties that prove to be non-functional and interfere with adaptive needs. Selection operates as a purifying but not creative force » (*ibid.*, p. 144).

<sup>529</sup> « Evolutionary inventions that survive purifying selection are subject to microevolutionary refinement [...] » (*idem*).

<sup>530</sup> Denton, *Evolution: still a theory in crisis* (*op. cit.*, p. 17, p. 75 & p. 111).

<sup>531</sup> « Successful evolutionary inventions are subject to amplification, reuse, and adaptation to new functions in response to successive ecological challenges » (Shapiro, *Evolution* [...], *op. cit.*, p. 144).

<sup>532</sup> « Taxonomically specific characters become established as the functional integration of past evolutionary novelties increasingly places constraints on the kinds of additional inventions that will prove adaptive » (*idem*).

<sup>533</sup> « An evolutionary process that follows these principles will naturally display the kind of episodic and abrupt changes found in both the fossil and genomic records. Indeed, the punctuated equilibrium pattern of Gould and Eldredge should be the default situation [...] » (*idem* ; en italique dans le texte original).

Insistant sur les aspects écologiques de l'évolution, Thierry Lodé estime que « [j]amais il ne fut aussi temps de construire un nouveau paradigme évolutif qui :

Discute le modèle d'une *coévolution écologique*, intégrant les organismes dans un ensemble d'interrelations dynamiques et changeantes avec leur environnement et reconnaissant *la force structurante des interactions* [...].

Désavoue la dichotomie des sélections naturelle et sexuelle au profit d'une réflexion sur la *reproduction différentielle* [...] reconnaissant combien les individus et leurs décisions stratégiques pèsent sur l'histoire diversifiante de leur évolution.

[...] [A]dmette les *transferts horizontaux* et une construction phylétique en *mosaïque*, selon le principe d'une *évolution réticulée*.

[...] [P]ropose [...] de réfléchir au rôle des *interactions* et de la *facilitation* dans le processus évolutif [...].

[...] [A]ccepte [...] d'étudier la sexualité comme une interaction primitive [...] suivant la *théorie des bulles libertines* [...].

Et, enfin, conçoive que le comportement [...] cherche [...] à retrouver une écoéthologie, le développement des comportements dans leur environnement [...].<sup>534</sup>

#### 6. 4. Redéfinition de la Théorie de l'évolution vers une Synthèse évolutive étendue<sup>535</sup>

Les phénomènes complexes requièrent de multiples contributions pour obtenir des explications satisfaisantes, parce que ces phénomènes se dérobent aux interprétations simples<sup>536</sup>, car de nombreux aspects de la nature sont directement sous l'influence de mécanismes divers et variés<sup>537</sup>. Or, la plupart des scientifiques et des philosophes se sont concentrés sur des représentations étroites de la Théorie de l'évolution<sup>538</sup>, centrées sur la génétique des populations. Il est bien peu probable qu'une telle représentation soit appropriée dans la recherche d'une Synthèse étendue, car elle n'est pas adaptée

<sup>534</sup> Lodé, *Pourquoi les animaux trichent et se trompent* (op. cit., pp. 279-280 ; en italique dans le texte original).

<sup>535</sup> Pigliucci & Müller, *Elements of an Extended Evolutionary Synthesis* (op. cit., pp. 3-14)

<sup>536</sup> « [...] complex phenomena require multiple disciplinary contributions in order to provide satisfactory explanatory accounts [...] because complex phenomena elude straightforward scientific explanations [...] » (Love, *Rethinking the structure of evolutionary theory for an extended synthesis*, p. 423).

<sup>537</sup> « [...] many features of nature are directly influenced by multiple mechanisms that fall into disparate scientific disciplines » (idem).

<sup>538</sup> « Most philosophers interested in evolutionary theory have focused on a narrow representation [...] » (ibid., p. 412).



pour saisir l'hétérogénéité des processus impliqués<sup>539</sup>. En effet, la Théorie de l'évolution émerge de la synthèse de différents concepts, méthodes et spécialités<sup>540</sup>. Les représentations larges de la théorie de l'évolution sont plus ouvertes quant à leur contenu, permettant d'inclure l'intégralité du pouvoir explicatif de la biologie évolutive, comme par exemple l'histoire naturelle (histoire de la vie), la systématique et la phylogénie, la biogéographie, l'origine des innovations, la coévolution, la spéciation et l'extinction, la paléobiologie, l'écologie, la biologie du développement ou l'anatomie comparative<sup>541</sup>.

En outre, une théorie scientifique ne devrait pas seulement prédire avec succès de nouveaux phénomènes ni seulement expliquer d'autres phénomènes que ceux initialement utilisés pour formuler ladite théorie : elle doit aussi faire preuve, durablement, de cohérence et de consilience<sup>542</sup>, c'est-à-dire impliquer de nombreuses sources indépendantes et des disciplines différentes dont les arguments sont mis en relation pour bâtir des démonstrations exhaustives et intégrales<sup>543</sup>. On peut soutenir que l'une des origines de la volonté de formuler une théorie étendue est le manque de cohérence entre les résultats empiriques, les méthodologies, les concepts et les approches disciplinaires de la biologie évolutive<sup>544</sup>. L'analyse philosophique entreprise ici vise à retrouver cette cohérence, à la fois en termes de contenu et de structure, par le moyen de la Synthèse étendue<sup>545</sup>.

Dans cette perspective, Pigliucci et Müller présentent une nouvelle version de la Théorie de l'évolution, dite Synthèse évolutive étendue, qui met l'accent sur certains

---

<sup>539</sup> « *The narrow representation is unlikely to be appropriate when searching for structure relevant to an Extended Synthesis* » (*idem*).

<sup>540</sup> « *Evolutionary theory is structured as a synthesis of different concepts, methods, and disciplines* » (*ibid.*, p. 421).

<sup>541</sup> « *Broad representations of evolutionary theory are more inclusive with respect to content, and embrace the full explanatory power of evolutionary biology [...]. They incorporate evolutionary genetics [...] as well as systematics, biogeography, speciation, paleobiology, ecology, and comparative development [...]* » (*ibid.*, p. 412).

<sup>542</sup> « [...] *a scientific theory should not only successfully predict new phenomena and explain different kinds of cases that were used in formulating the theory ("consilience"), but also exhibit "coherence" or consilience over time* » (*ibid.*, p. 434 ; en italique dans le texte original).

<sup>543</sup> « *Evolutionary theory needs to be a synthesis of disciplinary approaches in order to produce an integrated or cohesive body of scientific knowledge* » (*ibid.*, pp. 421-422).

<sup>544</sup> « *Arguably, one stimulus for an extended evolutionary synthesis stems from a perceived lack of coherence in the midst of new empirical findings, methodologies, concepts, and disciplinary approaches in evolutionary biology* » (*idem*). De façon plus générale, le même genre d'idée est défendu par Thomas Kuhn dans le cadre des «changements de paradigme» (Kuhn, *The structure of scientific revolutions*, *op. cit.*).

<sup>545</sup> « *The philosophical analysis offered here [...] attempts to recover coherence through the vehicle of an Extended Synthesis* » (Love, *Rethinking the structure of evolutionary theory [...]*, *op. cit.*, p. 434).

points plus ou moins négligés auparavant, comme la plasticité ou l'hérédité épigénétique. L'un des changements les plus critiques dans la pensée évolutionniste consiste à passer d'une corrélation statistique à une causalité mécaniste<sup>546</sup>. Ainsi, sortant du confinement explicatif cantonné aux fréquences d'allèles et au maintien des variants favorisés, la théorie peut maintenant étudier les conditions mécanistes de l'origine des innovations évolutives<sup>547</sup>. De même, il devient possible de surmonter certaines restrictions fondamentales comme le gradualisme, pour montrer que les changements non graduels représentent une propriété des systèmes dynamiques complexes, y compris les organismes vivants – de nombreux mécanismes de changements discontinus ont d'ailleurs été mis au jour dans l'évolution génomique, la plasticité phénotypique, le développement épigénétique et l'hérédité non génétique<sup>548</sup>.

L'externalisme<sup>549</sup>, c'est-à-dire la focalisation quasi-exclusive sur la sélection naturelle donnant la priorité à tous les facteurs externes permettant l'adaptation<sup>550</sup>, peut aussi être surmonté. C'est l'inclusion de l'Évo-Dévo qui représente l'un des changements les plus importants, par la prise en compte de la contribution des processus dits par lesquels des propriétés des organismes orientent le changement vers certaines formes plutôt que d'autres. Dans cette perspective, la sélection naturelle opère au second plan, mais la spécificité du phénotype final provient du développement : de ce fait, ce sont les organismes vivants eux-mêmes qui représentent les facteurs déterminant la variation et l'innovation. Ainsi, on assiste au passage des conditions externes

---

<sup>546</sup> « [...] *shift of emphasis from statistical to mechanistic causation* [...] » (Pigliucci & Müller, *Elements* [...], *op. cit.*, p. 12).

<sup>547</sup> « [...] *evolutionary theory is no longer confined to the explanation of the increase in frequency and maintenance of favorable variants, but [...] becomes a theory for the mechanistic conditions for the origin and innovation of traits* » (*ibid.*, p. 13).

<sup>548</sup> « [...] *nongradual change is a property of complex dynamical systems, including biological organisms, and [...] various kinds of mechanisms for discontinuous change are now known from the domains of genome evolution, phenotypic plasticity, epigenetic development, and nongenetic inheritance.* » (*idem*).

<sup>549</sup> Voir aussi von Sydow, *From Darwinian metaphysics* [...] (*op. cit.*, p. 359 & p. 362).

<sup>550</sup> « *The nearly exclusive concentration of the Modern Synthesis on natural selection gave priority to all external factors that realize adaptation* [...] » (Pigliucci & Müller, *Elements* [...], *op. cit.*, p. 13).

de la sélection vers les propriétés génératives internes<sup>551</sup> des phénotypes en évolution<sup>552553</sup>.

La nouvelle théorie permet, enfin, de dépasser le centrisme génique, qui ne reconnaît que le gène comme unique agent de variation et comme unité d'hérédité<sup>554</sup> – position intenable dans une version étendue qui prend en compte une multiplicité de facteurs évolutifs<sup>555</sup>. Loin de nier l'importance des gènes dans l'évolution, la théorie étendue attribue moins de poids à la variation génétique en tant que force créatrice : une nouvelle vision apparaît, celle des gènes comme «suiveurs» dans le processus évolutif<sup>556</sup>, un véritable changement de paradigme.

### 6. 5. Des mécanismes moléculaires «intelligents»<sup>557</sup> à une vision téléologique du vivant

Il est maintenant bien établi que les cellules n'agissent pas en aveugle : elles contiennent de véritables circuits qui permettent l'exécution précise et «bien informée» de fonctions régulatrices et sensorielles complexes, ce qui renforce les idées d'une véritable cognition cellulaire et d'une prise de décision dans le cadre d'objectifs fonctionnels bien définis<sup>558</sup>. Ainsi, le concept de génie génétique naturel guidé par les cellules

<sup>551</sup> On parle d'internalisme (voir von Sydow, *From Darwinian metaphysics [...]*, op. cit., p. 362).

<sup>552</sup> « *The inclusion of EvoDevo [...] represents a major change [...] by taking the contributions of the generative processes into account, as entrenched properties of the organism promote particular forms of change rather than others. On this view, natural selection becomes a constantly operating background condition, but the specificity of its phenotypic outcome is provided by the developmental systems it operates on. Hence, the organisms themselves represent the determinants of selectable variation and innovation. At the theoretical level, this shifts a significant portion of the explanatory weight from the external conditions of selection to the internal generative properties of evolving phenotypes* » (Pigliucci & Müller, *Elements [...]*, op. cit., pp. 13-14).

<sup>553</sup> Au-delà d'une «défiance vis-à-vis du darwinisme» (Guillaume Lecointre, *Guide critique*, 2005, p. 6), une telle «logique interne» (*ibid.*, p. 23) de l'évolution est habituellement rejetée car «anti-darwinienne» (*ibid.*, p. 22), voire «une tentative d'intrusion spiritualiste dans les sciences» (*ibid.*, p. 5).

<sup>554</sup> « *The focus on the gene as the sole agent of variation and unit of inheritance [...]* » (Pigliucci & Müller, *Elements [...]*, op. cit., p. 14).

<sup>555</sup> « [...] *gene centrism necessarily disappears in an extended account that provides for multicausal evolutionary factors [...]* » (*idem*).

<sup>556</sup> « *Far from denying the importance of genes in organismal evolution, the extended theory gives less overall weight to genetic variation as a generative force. Rather, the opinions [...] converge on the view of "genes as followers" in the evolutionary process [...]* » (*idem*).

<sup>557</sup> « *Is the intelligent application of such molecular mechanisms outside the boundaries of contemporary biology?* » (Shapiro, *Evolution [...]*, op. cit., p. 136).

<sup>558</sup> « [...] *the idea of cellular cognition and decision-making with well-defined functional objectives has gone mainstream* » (*ibid.*, p. 137).

ne sort pas du tout des limites des sciences biologiques du 21<sup>e</sup> siècle. Malgré des préjugés philosophiques répandus, il est parfaitement raisonnable de considérer que les cellules opèrent de façon téléologique : les buts qu'elles poursuivent sont leur survie, leur croissance et leur reproduction<sup>559</sup>. Cette façon de penser, entièrement nouvelle et rigoureusement scientifique, s'est développée au sujet de la cognition, de la prise de décision et de fonctions orientées vers un but. Il s'agit d'un cadre conceptuel résolument différent, et il est temps de délivrer les sciences évolutives pour les réinsérer au sein de ce courant intellectuel moderne<sup>560</sup>.

### 6. 6. Thermodynamique et évolution informationnelle – Le rôle de l'entropie dans l'origine de la vie et l'évolution biologique

En partant du fait qu'énergie, matière et information sont interconvertibles, on peut envisager, par une série de transformations successives de l'information, assimilables à des transitions de phase, que la matière et l'énergie qui constituent l'Univers se sont progressivement agencées et organisées, dans une direction précise : la production prébiotique de molécules, qui, permettant la mise en œuvre d'un déterminisme circulaire, on aboutit aux premières formes vivantes, elles-mêmes à l'origine des biodiversités passées et actuelle.

En effet, la vie semble indissociable de la notion d'information. Tout organisme vivant est intimement lié à l'utilisation, au stockage, à la modification et à la communication d'information<sup>561</sup> :

- La vie *est* communication : «Ne pas communiquer, c'est simplement disparaître»<sup>562</sup>. Une bactérie qui se rapproche d'une substance dissoute dans son milieu de vie et la prélève (ou, au contraire, perçoit une autre substance comme nocive

---

<sup>559</sup> « *Despite widespread philosophical prejudices, cells are now reasonably seen to operate teleologically: their goals are survival, growth, and reproduction* » (*idem*).

<sup>560</sup> « [...] *developing entirely new and rigorously scientific ways to think about cognition, decision-making, and goal-oriented function. Thus, at the start of the 21st Century, we have a radically different conceptual environment, and the time has arrived to rescue evolution science and reintegrate it into these contemporary intellectual trends* » (*ibid.*, p. 139).

<sup>561</sup> Par opposition, la matière inerte (comme le cas typique d'un échantillon de roche) ne semble correspondre qu'au stockage d'information (correspondant, ici, à la structure minéralogique), encore que ce stockage soit passif (dans le cas des organismes, ce stockage est, par bien des aspects, actif).

<sup>562</sup> Gagnon, *Les limites du vivant sont-elles riches d'une leçon ?* (2009, p. 157).

et s'en éloigne) établit une forme de communication avec cette molécule : dans cette optique, il y a utilisation et traitement d'information<sup>563</sup>, même les plus élémentaires ;

- Tout organisme vivant est capable de stocker de l'information. On pense bien évidemment à l'information génétique, mais pas seulement : la forme d'un être vivant, par exemple, qui dépend en particulier de propriétés structurales de la matière, peut être vue comme contenant une certaine quantité d'information, à tous les niveaux d'organisation biologique (molécules, organites, cellules, tissus, organes, appareils et systèmes, organisme entier), même au-delà des organismes individuels (groupes, populations, écosystèmes, jusqu'à la biosphère dans son ensemble<sup>564</sup>) ;
- Toute information est susceptible d'être modifiée. Que ce soit activement ou passivement, la vie des organismes est étroitement liée à une telle modification de l'information. Ici aussi, ce qui vient immédiatement à l'esprit, ce sont toutes les mutations, insertions, délétions, inversions, duplications, recombinaisons, ainsi que tous les processus de réécriture partielle ou totale du patrimoine génétique ; même le changement conformationnel d'une biomolécule, induit par l'interaction avec un partenaire (substrat, coenzyme, etc.), peut être également considéré comme un transfert ou une modification d'information<sup>565</sup> – l'activation ou la répression d'un gène également ;
- Enfin, toute information est susceptible de se déplacer (par exemple, en changeant de support), ce qui semble être l'une des caractéristiques de base du vivant : des cellules voisines dans un tissu établissent un transfert d'information<sup>566</sup> en lien, par exemple, avec la cohérence de l'ensemble de la structure.

<sup>563</sup> Idée défendue par Dennis Bray dans *Wetware—A computer in every living cell* (op. cit. ; par exemple, « le mécanisme moléculaire à la base de la chimiotaxie dont fait preuve *E. coli* est un magnifique exemple de traitement de l'information par une cellule » [« *The molecular mechanism of E. coli chemotaxis is a superb illustration of cellular information processing* » ; p. 6 ; en italique dans le texte original]).

<sup>564</sup> Voir le concept de Gaïa, développé par James Lovelock.

<sup>565</sup> Par exemple, « les récepteurs membranaires constituent un moyen idéal pour communiquer des informations » (« *Receptors [...] are ideally suited to convey information [...]* » ; Bray, *Wetware*, op. cit., p. 73).

<sup>566</sup> Par exemple, « la majeure partie de l'information provient des cellules adjacentes au sein du tissu » (« *Most of the signals come from neighboring cells in the tissue [...]* » ; *ibid.*, p. 193).

### 6. 6. 1. Thermodynamique, entropie et organismes vivants

Les organismes vivants, en tant qu'entités capables de produire et de consommer de l'énergie et de fournir un travail, sont des systèmes thermodynamiques. En effet, les êtres vivants se caractériseraient par la capacité à créer de l'ordre à partir du désordre, ce qui semble contredire le second principe de la thermodynamique, selon lequel l'entropie d'un système ne peut qu'augmenter. A cet égard, la vie ferait figure d'exception, d'où la vision des organismes comme «points d'entropie négative» (ou «néguentropie») ou «systèmes dissipatifs d'entropie» : ainsi, les êtres vivants seraient capables, à partir d'énergie puisée dans leur environnement (l'énergie solaire ou l'énergie chimique potentielle des nutriments), d'organiser et d'ordonner leur propre matière. En fait, le second principe est respecté, car les êtres vivants ne peuvent maintenir leur ordre interne qu'au prix d'échanges permanents d'énergie avec leur milieu extérieur : par conséquent, l'entropie totale du système global «organisme + reste de l'Univers» finit par augmenter. D'un point de vue thermodynamique, la vie peut donc être envisagée comme une résistance, ponctuelle et éphémère, face aux lois qui gouvernent l'Univers : les organismes représenteraient donc des zones d'entropie négative, extrêmement localisées dans le temps et dans l'espace – et, à la mort de chaque organisme, c'est le désordre qui finit par reprendre le dessus<sup>567</sup>.

### 6. 6. 2. Origine thermodynamique de la vie<sup>568</sup>

Karo Michaelian indique que le fait de « comprendre comment le vivant fonctionne sur le plan thermodynamique pourrait donner des indications sur l'origine de la vie »<sup>569</sup>, car « la production d'entropie constitue une mesure de la propension de la nature à exploiter les différents micro-états accessibles »<sup>570</sup>. Ces observations le mènent à « formuler l'hypothèse selon laquelle c'est en vertu de son rôle de catalyseur de l'absorption et de la dissipation de l'énergie des rayons solaires, à la surface des mers au cours de la période archéenne, que la vie serait apparue et aurait perduré jusqu'à

---

<sup>567</sup> Adapté de l'article d'Anne Debroyse *Qu'est-ce que la vie ?* (2008).

<sup>568</sup> Michaelian, *Thermodynamic origin of life* (2011).

<sup>569</sup> « *Understanding the thermodynamic function of life may shed light on its origin* » (*ibid.*).

<sup>570</sup> « *Entropy production is a measure of the rate of the tendency of Nature to explore available microstates* » (*ibid.*).

aujourd'hui »<sup>571</sup>. Ainsi, « dans cette perspective, l'origine et l'évolution de la vie peuvent être envisagées comme procédant d'un impératif thermodynamique naturel : l'augmentation de l'entropie de la Terre en interaction avec son environnement solaire »<sup>572</sup>.

A l'appui de cette hypothèse, Michaelian suggère que, « de façon générale, la complexité des organismes vivants, des premières cellules jusqu'à la biosphère tout entière, a augmenté au cours du temps ; par conséquent, leur production totale d'entropie, ainsi que la production nette d'entropie par unité de biomasse ont, elles aussi, augmenté »<sup>573</sup>. Il insiste sur le fait que « l'origine de la dimension tautologique de la théorie darwinienne de l'évolution par sélection naturelle<sup>574</sup> vient, en fait, de l'absence de prise en compte de la production d'entropie comme fonction des organismes vivants. C'est une idée que Boltzmann avait proposée il y a 150 ans : la dynamique fondamentale du vivant résulte de la production d'entropie »<sup>575</sup>. Au contraire, « selon la théorie proposée, l'origine de la vie et du mécanisme évolutif présenterait la caractéristique d'un cycle autocatalytique faisant intervenir un important couplage entre processus biotiques et abiotiques ; ce cycle serait mis en place sous l'influence d'un mécanisme d'augmentation de la production d'entropie terrestre, dans le cadre de l'interaction de la planète avec son environnement solaire – mécanisme tout à la fois universel

<sup>571</sup> « Here we hypothesize that life began, and persists today, as a catalyst for the absorption and dissipation of sunlight on the surface of Archean seas » (ibid.).

<sup>572</sup> « From this perspective, the origin and evolution of life [...] can be understood as resulting from the natural thermodynamic imperative of increasing the entropy production of the Earth in its interaction with its solar environment » (ibid.).

<sup>573</sup> « Empirical evidence from the fossil record of the evolutionary history of Earth indeed suggests that living systems, from cells to the biosphere, have generally increased in complexity over time, and correspondingly, there has been an increase in their total entropy production, as well as in the net entropy production per unit biomass » (ibid.).

<sup>574</sup> Momme von Sydow résume particulièrement bien cet aspect tautologique du darwinisme : « Les organismes qui survivent sont en général ceux qui sont mieux adaptés, puisqu'ils survivent. On définit le plus souvent la capacité d'adaptation par la survie. Il en résulte que l'affirmation darwinienne de la persistance des plus aptes équivaut à l'affirmation tautologique de la survie des survivants » (« Those entities which survive are generally more adapted, since they survive. Fitness becomes defined – as has actually often been done – by survival. Thereby the Darwinian claim of the survival of the fittest results in the tautological claim of the survival of the survivor » ; von Sydow, *From Darwinian Metaphysics [...]*, op. cit., p. 341).

<sup>575</sup> « Ignoring the entropy producing function of life is, in fact, the basis of the tautology in Darwin's theory of evolution through natural selection. As Boltzmann hinted 150 years ago, the vital force of life and evolution is derived from photon dissipation, i.e. through entropy production » (Michaelian, *Thermodynamic origin of life*, op. cit.).

et orienté vers un but<sup>576</sup>. Ce vaste cycle autocatalytique, faisant non seulement intervenir le vivant mais aussi des processus abiotiques de production d'entropie, est toujours d'actualité et semble même avoir évolué vers encore plus d'efficacité à produire de l'entropie »<sup>577</sup>.

Dans cette perspective, l'augmentation d'entropie aurait donc joué un rôle prépondérant dans l'apparition de la vie et la mise en œuvre du processus évolutif.

### 6. 6. 3. Entropie et évolution

Selon John Collier<sup>578</sup>, dans le cadre d'une « théorie systémique en cours d'élaboration, l'environnement et les organismes vivants, ainsi que leurs nombreuses interactions, sont considérés comme reposant sur des principes communs »<sup>579</sup>. En relation avec les informations précédentes concernant l'origine thermodynamique de la vie, on peut considérer que « [l']évolution est sous l'emprise de processus hors équilibre qui sont à l'origine d'une augmentation de l'entropie et du contenu en information de l'ensemble des espèces vivantes »<sup>580</sup>. Plus précisément, « des augmentations de l'entropie et de l'information des organismes, considérés comme des systèmes se reproduisant de façon imparfaite, seraient à l'origine de la dynamique de l'évolution. La sélection naturelle ne ferait que jouer le rôle d'un facteur externe limitant, influençant le rythme de l'évolution »<sup>581</sup>.

De plus, il s'avère que les systèmes biologiques présentent deux types d'entropie :

---

<sup>576</sup> Voir le paragraphe sur la téléologie.

<sup>577</sup> « *The origin of life and beginnings of evolution, as depicted by this theory has the general feature of an autocatalytic cycle involving a strong coupling between biotic and abiotic processes, driven by the goal oriented and universal process of increasing the entropy production of Earth in its interaction with its solar environment. This great auto-catalytic cycle involving life and abiotic entropy producing processes remains to this day, and appears to be evolving towards still greater efficiency at producing entropy* » (Michaelian, *Thermodynamic origin of life*, *op. cit.*).

<sup>578</sup> Collier, *Entropy in Evolution* (1986).

<sup>579</sup> « [...] a yet to be completed systems theory which treats environment, biological entities, and their interactions using common principles [...] » (*ibid.*).

<sup>580</sup> « *Evolution is driven by non-equilibrium processes which increase the entropy and information content of species together* » (*ibid.*).

<sup>581</sup> « [...] the dynamics of evolution derive from [...] increases in the information and entropy of a system of imperfectly reproducing organisms. Natural selection is merely rate-determining, and is best viewed as an extrinsic factor affecting evolutionary dynamics » (*ibid.*).



- « L'entropie de l'information est une mesure de la capacité d'un système à résister aux fluctuations aléatoires, c'est-à-dire une mesure de sa stabilité »<sup>582</sup> ;
- « L'entropie de cohésion d'une espèce vivante est une mesure de son désordre dû aux difficultés qu'ont les individus qui la composent, considérés séparément, à échanger leur matériel génétique »<sup>583</sup>.

Ainsi, en définitive, « l'évolution résulterait de l'effet cumulé de l'augmentation de l'entropie de l'information et de l'entropie de cohésion »<sup>584</sup>.

#### 6. 6. 4. Relations entre l'entropie thermodynamique et l'entropie biologique

De l'ensemble des données précédentes, on peut tirer les réflexions suivantes :

- Bien que l'entropie thermodynamique ne puisse qu'augmenter, l'entropie biologique, elle, diminue localement et temporairement chez les organismes individuels ;
- L'entropie biologique globale de la biosphère comprise dans son intégralité spatio-temporelle (zone superficielle de la Terre – entre environ 11 000 mètres de profondeur et 9000 mètres d'altitude – depuis au moins 3,5 milliards d'années) a augmenté, en relation avec l'augmentation générale de la disparité, de la diversité<sup>585</sup> et de la complexité<sup>586</sup>, donc du contenu en information, des organismes ;
- De façon ultime et générale, l'entropie serait intimement liée à la nature du vivant, à son origine et à son évolution.

<sup>582</sup> « [...] the entropy of information is a measure of the indifference of the system to random fluctuation, or of its ability to withstand random fluctuations, i.e., its stability » (ibid.).

<sup>583</sup> « The entropy of cohesion is a measure of the disorder of the biological entity resulting from the segregation of its parts. In the case of species, this is due to difficulties in sharing genetic material between diverse members » (ibid.).

<sup>584</sup> « Evolution, then, results from the joint effect of increases in the entropy of information and the entropy of cohesion » (ibid.).

<sup>585</sup> Stephen Jay Gould introduit, dans *La Vie est Belle* (1991, Chapitre 3), la distinction subtile entre *diversité* et *disparité* : la diversité fait référence au *nombre d'espèces différentes*, tandis que la disparité se base sur *l'ensemble des plans d'organisation* : au Cambrien, la disparité fut maximale, malgré une diversité apparemment limitée ; au cours de l'histoire ultérieure du vivant, la tendance s'est complètement inversée.

<sup>586</sup> Au sujet des problèmes controversés liés à la notion de complexité biologique, voir Espeset (2021).

6. 6. 5. *L'Univers information : «It from bit»*<sup>587</sup>

Selon Igor et Grichka Bogdanov, il pourrait exister « [...] une information primordiale à l'origine de l'Univers »<sup>588</sup>, « [u]ne information de nature mathématique qui "oriente" peut-être l'évolution de l'Univers »<sup>589</sup>. Ainsi, « [...] le cosmos tout entier ne serait qu'un immense nuage d'informations dont l'évolution semble réglée par une sorte de "programme" [...] »<sup>590</sup>. Plus précisément, « [...] chaque élément du monde physique, au niveau le plus profond, a une source et une explication immatérielles », ce qui rejoint l'idée « [...] qu'une "information platonicienne" existe quelque part, enfouie dans les profondeurs de l'espace-temps [...] »<sup>591</sup>. Finalement, « [...] l'Univers était déjà (dès l'origine) un fantastique système d'informations entrelacées, tressées les unes aux autres au sein de notre réalité »<sup>592</sup>.

6. 6. 6. *Entropie, information initiale, information finale et histoire de l'Univers*

Les frères Bogdanov rappellent alors que « [...] le second principe de la thermodynamique s'applique à l'Univers entier », ce qui:

<sup>587</sup> Bogdanov & Bogdanov, *Au Commencement du Temps* (2009, p. 296).

<sup>588</sup> *Ibid.*, p. 13.

<sup>589</sup> *Ibid.*, p. 25.

<sup>590</sup> *Ibid.*, p. 37 ; voir aussi, par les mêmes auteurs, *Le Code Secret de l'Univers* (2015), en particulier les chapitres 25 à 28.

<sup>591</sup> *Ibid.* (p. 39). Comme le précise Jean-Pierre Changeux, rappelons que « [l]'idée platonicienne de "réalités invariantes", d'"essences" issues des mathématiques, qui composent un ordre universel, [...] représente pour l'évolutionniste Ernst Mayr un "véritable désastre" de la pensée occidentale » (Changeux, *Du Vrai, du Beau, du Bien*, p. 331). De façon plus modérée, Guillaume Lecointre et coll. considèrent que « [l]a pensée essentialiste est [...] incompatible avec tout transformisme et toute évolution » (*Guide critique de l'évolution, op. cit.*, p. 27). Toutefois, au lieu de chercher à « dépasser la pensée essentialiste », il est bien plus intéressant de remarquer qu'il existe en fait deux types d'essentialisme, souvent confondus : l'un typologique (en relation avec le concept d'espèce) et l'autre explicatif (en relation avec le concept de forme). L'essentialisme explicatif implique des essences en tant que structures causales qui expliquent les faits qui se répètent (notamment des caractères ou attributs) chez les espèces vivantes. Ainsi, en donnant la priorité à l'explication fonctionnelle d'un trait (et non à son appartenance à tel ou tel groupe taxonomique), ce type d'essentialisme est tout-à-fait compatible avec les notions de mode de vie, d'adaptation et d'évolution (voir Anda Danciu, *Explications mécanistes et téléologiques [...], op. cit.*, pp. 88-90).

<sup>592</sup> Bogdanov & Bogdanov, *Au Commencement du Temps (op. cit.*, p. 43).

[...] veut dire que l'entropie – c'est-à-dire le désordre – de l'Univers augmente à mesure que le temps passe. Et, puisque l'information est l'inverse de l'entropie, la flèche du temps implique que l'information globale de l'Univers diminue à mesure que le temps s'écoule. [...] Mais alors, comment concilier cette «diminution de l'information» avec l'augmentation locale de l'ordre – par exemple, la formation des planètes, l'apparition de l'évolution de la vie, etc. – à mesure que le temps progresse ? [...] Tout simplement en introduisant la distinction entre deux types d'information situés, d'une certaine manière, «aux deux bouts de l'Univers» : l'une est à l'origine, l'autre à la fin. La première, c'est l'information initiale. Virtuellement infinie à l'instant zéro, cette information initiale [...] «code» l'Univers avant le Big Bang. [...] Or, «à l'autre bout» [...], il y a [...] l'information finale. Elle correspond à [...] la complexité. Elle est naturellement très faible au moment du Big Bang [...] et ne cesse d'augmenter avec le temps [...]. Dès lors, toute l'histoire de l'Univers peut se comprendre ainsi : une transformation de l'information initiale en information finale. [...] [T]out se passe comme si l'Univers entier était en train d'acquérir, au fil des milliards d'années, de plus en plus d'information : lancé dans l'aventure de sa complexité croissante, le cosmos semble contraint de recomposer, au cours d'une histoire immensément longue, l'information initiale d'avant le Big Bang.<sup>593</sup>

Les Bogdanov posent alors les questions : « Est-il raisonnable [...] de considérer que l'Univers est né d'un prodigieux flot d'information qui aurait trouvé sa source dans le zéro ? »<sup>594</sup> ; « [...] [Q]uelle est, au niveau le plus profond des phénomènes, l'essence même de la réalité ? » ; « [...] [E]xiste-t-il des règles, un code sous-jacent à la réalité ? ». Ils citent John Wheeler, selon qui « [...] l'Univers pourrait être comparé à un système de traitement d'information [...] »<sup>595</sup>.

#### 6. 6. 7. *Énergie, information, complexité*

Ainsi, au moment du Big Bang,

[...] à cet instant fantastique [l'Univers] n'était encore que de l'énergie [...], une énergie colossale, inimaginable, qui n'a atteint un tel sommet qu'une seule fois dans toute l'histoire du cosmos. [...] [Ensuite,] en même temps que l'Univers commençait son expansion, cette énergie allait commencer à se transformer, donnant naissance, au fil du temps, à des structures organisées, à un ordre global, repérable de l'atome à l'étoile. Et, aujourd'hui, 13,7 milliards d'années après le début, il est possible d'observer [...] qu'une partie de l'énergie primordiale a engendré une complexité incroyable, un état

<sup>593</sup> *Ibid.*, pp. 47-48.

<sup>594</sup> *Ibid.*, p. 284.

<sup>595</sup> *Ibid.*, p. 291.

d'ordre bien plus élevé qu'à l'origine : l'énergie du début des temps a été progressivement convertie en information [...] le cosmos semble reconstituer une information qui n'attendra sa forme définitive qu'au tout dernier instant : à l'instant où il aura réalisé l'information finale.<sup>596</sup>

Dès lors, il faut considérer « [...] que l'information puisse représenter, au plus profond du réel, un état fondamental de l'Univers » : « [...] il semble qu'il existe [...] un lien mystérieux entre l'énergie d'un système et l'information qui le caractérise ».

Il est ainsi possible de replacer l'évolution biologique dans le cadre général de l'évolution de l'Univers, et de mettre en relation l'évolution du vivant avec la notion d'information. En prenant en compte les diverses formes d'information présentes chez les organismes, la façon dont ces différentes formes s'interconvertissent, sans oublier les très nombreux autres processus discutés dans cet essai, devrait en fin de compte émerger une théorie plus complète, plus exhaustive, globale et holistique, du vivant, de sa nature unique et extraordinaire, de son origine encore si mystérieuse et de son évolution décidément pluri-factorielle.

## § 7. Conclusion – Une nouvelle révolution scientifique

D'après Kuhn<sup>597</sup>, pendant des périodes «stables», une pratique scientifique «normale» se développe<sup>598</sup>, organisée autour d'un paradigme dominant, sorte de cadre théorique auquel adhère l'ensemble de la communauté scientifique du moment<sup>599</sup> : ces périodes de stabilité permettent une croissance régulière et cumulative des connaissances. Toutefois, cette science «normale» finit toujours, tôt ou tard, par fournir des «anomalies»<sup>600</sup> qui, en s'accumulant, ne pourront à un moment donné plus être résolues de façon satisfaisante. S'intéressant à ces grands bouleversements de la pensée scientifique, en particulier au cours de l'histoire de la physique et de la chimie, Kuhn étudie ces phases de crise que traverse la science au fur et à mesure de ses

<sup>596</sup> *Ibid.*, p. 312-313.

<sup>597</sup> Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* (*op. cit.*).

<sup>598</sup> « [...] *normal science* [...] *depends upon commitment to a paradigm* » (*ibid.*, p. 100).

<sup>599</sup> « [...] "*paradigms*" [...] *universally recognized scientific achievements that for a time provide model problems and solutions to a community of practioners* » (*ibid.*, p. viii).

<sup>600</sup> « [...] *normal science ultimately leads [...] to the recognition of anomalies [...]* » (*ibid.*, p. 122).

avancements : il y a alors un changement de paradigme<sup>601</sup>, véritable révolution scientifique<sup>602</sup>, lorsqu'une théorie scientifique est rejetée au profit d'une autre, nouvelle et incompatible avec la précédente<sup>603</sup>. Le nouveau paradigme produira en conséquence un nouveau cadre de recherche, de nouveaux outils<sup>604</sup> et sera en contradiction avec l'ancien. Ainsi, selon Kuhn, toute révolution scientifique est un facteur de progrès<sup>605</sup>, qui mène, en particulier, à une nouvelle vision du monde<sup>606</sup>.

D'après tout ce que nous avons vu précédemment, il semble bien que la Théorie de l'évolution ait commencé à traverser une période de révolution scientifique. En effet, alors que la Synthèse moderne avait parfaitement fonctionné pendant plusieurs décennies, sur la base d'un consensus général et sans véritable remise en cause, on observe, depuis les années 1990, ce qui ressemble fort à un changement de paradigme, incluant de nombreux mécanismes longtemps ignorés ou sous-estimés et remettant en cause certains concepts fondamentaux (comme le rôle des mutations ponctuelles «aléatoires», la sélection naturelle et la pensée populationnelle) et permettant d'expliquer des faits considérés jusque-là comme marginaux, telle l'origine des innovations évolutives. Une nouvelle vision du monde se fait alors jour, recentrée sur l'individu biologique lui-même, et dans laquelle les êtres vivants peuvent être envisagés dans toute leur dimension d'autonomie, d'auto-référence, d'auto-détermination et de téléologie.

## Remerciements

Je remercie le Dr. Thierry Lodé pour son implication et sa patience dans la lecture approfondie de mon manuscrit et ses nombreux conseils pour réécrire, reconstruire et améliorer mon texte.

Je remercie le Dr. Joël Espeset pour sa correction des parties en langue anglaise.

---

<sup>601</sup> « [...] how crisis [...] provides the incremental data necessary for a fundamental paradigm shift » (*ibid.*, p. 89).

<sup>602</sup> « The resulting transition to a new paradigm is scientific revolution [...] » (*ibid.*, p. 90).

<sup>603</sup> « [...] scientific revolutions are here taken to be those non-cumulative developmental episodes in which an older paradigm is replaced in whole or in part by an incompatible new one » (*ibid.*, p. 92).

<sup>604</sup> « Led by a new paradigm, scientists adopt new instruments and look in new places » (*ibid.*, p. 111).

<sup>605</sup> « [...] revolutions can be compatible with the apparently unique character of scientific progress » (*ibid.*, p. 8).

<sup>606</sup> « Revolutions as changes of world view » (*idem*).

Je remercie le Pr. Delphine Rodriguez (Collège François-Mitterrand, Simiane-Colongue, France) pour sa traduction du résumé en espagnol.

## Bibliografía

- Alibert, P., Claude, J., Debat, V., Garnier, S. et Neige, P. (2010), «Les contraintes», dans Thomas, F., Lefèvre, T. et Raymond, M. (dirs.), *Biologie évolutive*. De Boeck Université, pp. 245-266.
- Bailenger, J. (1995), *L'aventure animale: les orientations évolutives*. Belin.
- Bapteste, E. (2013), *Les gènes voyageurs: l'odyssée de l'évolution*. Belin.
- Bogdanov, I. et Bogdanov, G. (2015), *Le code secret de l'Univers*. Albin Michel.
- Bogdanov, I. et Bogdanov, G. (2009), *Au commencement du temps*. Flammarion.
- Bray, D. (2011), *Wetware: A Computer in Every Living Cell*. Yale University Press. <<http://www.krusch.com/books/evolution/Wetware.pdf>> [22/10/2022].
- Callebaut, W. (2010), «The dialectics of dis/unity in the evolutionary synthesis and its extensions», dans Pigliucci et Müller (eds.), *Evolution: the extended synthesis*, pp. 443-481.
- Changeux, J.-P. (2008), *Du Vrai, du Beau, du Bien: Une nouvelle approche neuronale*. Odile Jacob.
- Cohen, I. B. (1985), *Revolution in Science*. Belknap Press.
- Collier, J. (1986), «Entropy in evolution», dans *Biology and Philosophy*, 1, pp. 5-24.
- Conway Morris, S. (2015), *The runes of evolution*. Templeton Press.
- Conway Morris, S. (2009), «The predictability of evolution : glimpses into a post-darwinian world», dans *Naturwissenschaften*, 96, pp. 1313-1337. <<https://doi.org/10.1007/s00114-009-0607-9>>.
- Danciu, A. E. (2019), *Explications mécanistes et téléologiques de l'évolution de la forme*. Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de maître en Philosophie, option Philosophie au collégial. Université de Montréal. <[https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/22705/Danciu\\_Anda\\_2019\\_memoire.pdf](https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/22705/Danciu_Anda_2019_memoire.pdf)> [22/10/2022].
- Darwin, C. (1859), *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. London, John Murray.
- Darwin, C. & Wallace, A. R. (1858), *Laws which affect the production of varieties, races, and species*. Communication to the Linnean Society of London.
- Dawkins, R. (1987), *The Blind Watchmaker: Why the evidence of evolution reveals a universe without design*. New York/London, W. W. Norton & Company.
- Dawkins, R. (1976), *River out of eden. A Darwinian view of life*. BasicBooks.
- Debroise, A. (2008), «Qu'est-ce que la vie ?», dans *Science & Vie*, Hors série, n.º 245 : «Les origines de la vie – Comment tout a commencé».
- Dennett, D. C. (1995), *Darwin's dangerous idea. Evolution and the meanings of life*. Penguin Books. <<http://www.inf.fu-berlin.de/lehre/pmo/eng/Dennett-Darwin'sDangerousIdea.pdf>> ([22/10/2022]).
- Denton, M. (2016), *Evolution: still a theory in crisis*. Discovery Institute Press.
- Denton, M. J. (2013), «The Types: A Persistent Structuralist Challenge to Darwinian Pan-Selectionism», dans *BIO-Complexity* 3, pp. 1-18.
- Denton, M. (1997), *L'évolution a-t-elle un sens ?* Fayard.

- Denton, M. (1985), *Évolution : une théorie en crise*. Flammarion, Champs Sciences.
- Denton, M. J., Dearden, P. K. & Sowerby, S. J. (2003), «Physical law not natural selection as the major determinant of biological complexity in the subcellular realm: new support for the pre-Darwinian conception of evolution by natural law», dans *Biosystems* 71(3), pp. 297-303.
- Dobzhansky, T. (1937), *Genetics and the origin of species*. Columbia University Press.
- Dupré, J. (2010), «It Is Not Possible to Reduce Biological Explanations to Explanations in Chemistry and/or Physics», dans Francisco J. Ayala & Robert Arp (dirs.), *Contemporary debates in philosophy of biology*, Part I, ch. 2. Wiley-Blackwell; pp. 32-47.
- Eldredge, N. & Gould, S. J. (1972), «Punctuated Equilibria: an Alternative to Phyletic Gradualism», dans Thomas J. M. Schopf, (dir.), *Models in Paleobiology*. San Francisco, Freeman/Cooper and Company, pp. 82-115.
- Erwin, D. H. (2006), «Evolutionary contingency», dans *Current Biology*, 16(19):R825-6. <<https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.08.076>>
- Espeset, D. (2021), «La notion de complexité en Biologie évolutive : une revue synthétique», dans *Biologie Géologie – Bulletin pédagogique trimestriel de l'APBG* (Association des Professeurs de Biologie et Géologie), n.º 2-2021 (Fasc. 400), pp. 101-120. <[https://www.researchgate.net/publication/356537227\\_LA\\_NOTION\\_DE\\_COMPLEXITE\\_EN\\_BIOLOGIE\\_EVOLUTIVE\\_UNE\\_REVUE\\_SYNTHEIQUE](https://www.researchgate.net/publication/356537227_LA_NOTION_DE_COMPLEXITE_EN_BIOLOGIE_EVOLUTIVE_UNE_REVUE_SYNTHEIQUE)> [25/11/2021].
- Fisher, R. A. (1930), *The genetical theory of natural selection*. Clarendon Press.
- Gagnon, P. (2009), «Les limites du vivant sont-elles riches d'une leçon ? Contribution à l'étude du déterminisme morphique», dans *Eikasía, Revista de Filosofía*, año IV, extra., n.º 27, pp. 155-186. <[https://www.revistadefilosofia.org/revistadefilosofia\\_old/27-10.pdf](https://www.revistadefilosofia.org/revistadefilosofia_old/27-10.pdf)>
- Gould, S. J. (2002), *The structure of evolutionary theory*. The Belknap Press of Harvard University Press.
- Gould, S. J. (1994), «The Evolution of Life on the Earth», dans *Scientific American* 271 (4), pp. 84-91.
- Gould, S. J. (1991), *La vie est belle – Les surprises de l'évolution*. Points Sciences.
- Gould, S. J. (1980), *Le pouce du Panda – Les grandes énigmes de l'évolution*. Points Sciences.
- Gould, S. J. & Eldredge, N. (1977), «Punctuated equilibria: the tempo and mode of evolution reconsidered», dans *Paleobiology* 3, pp. 115-151.
- Grant, P. R. & Grant, B. R. (2002), «Unpredictable Evolution in a 30-Year Study of Darwin's Finches», in *Science* 296 (26), pp. 707-711.
- Habermas, J. (1973), *La technique et la science comme idéologie*. Bibliothèque Méditations, Denoël/Gonthier.
- Haldane, J. B. S. (1932), «The time of action of genes, and its bearing on some evolutionary problems», dans *The American Naturalist* 66 (702), pp. 5-24.
- Jacob, F. (1977), «Evolution and tinkering», dans *Science* 196 (4295), pp. 1161-1166.
- Juignet, P. (2015), «Les paradigmes scientifiques selon Thomas Kuhn», dans *Philosophie, science et société*. <<https://philosciences.com/philosophie-et-science/methode-scientifique-paradigme-scientifique/113-paradigme-scientifique-thomas-kuhn>> [22/10/2022].
- Kettlewell, H. B. D. (1959), «Darwin's missing evidence», dans *Scientific American*, 201 (3), pp. 48-53.
- Koonin, E. V. (2011), *The Logic of Chance: The Nature and Origin of Biological Evolution*. FT Press Science. <<http://www.evolocus.com/Textbooks/Koonin2011.pdf>> [22/10/2022]
- Kuhn, T. S. (1970), *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press.

- Laland, K., Odling-Smee, J. & Turner, S. (2014), «The role of internal and external constructive processes in evolution», dans *The Journal of Physiology*, 592 (11), pp. 2416-2422.
- Lecointre, G. (2013), «La complexité en évolution : une notion inutile». <<https://www.youtube.com/watch?v=xtwAXVqepc4>> [11/09/2018].
- Lecointre, G. (dir.), Fortin, C., Guillot, G. & Le Louarn-Bonnet, M.-L. (2009), *Guide critique de l'évolution*. Belin.
- Lennox, J. G. (1993), «Darwin was a teleologist», dans *Biology and Philosophy*, 8: 409-421.
- Lobkovsky, A. E. & Koonin, E. V. (2012), «Replaying the tape of life: quantification of the predictability of evolution», dans *Frontiers in Genetics*, 3:246. <<https://doi.org/10.3389/fgene.2012.00246>>.
- Lodé T. (2013), *Pourquoi les animaux trichent et se trompent – Les infidélités de l'évolution*. Odile Jacob.
- Lodé, T. (2001), «Genetic divergence without spatial isolation in polecat *Mustela putorius* populations». *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 14, pp. 228-236. <<https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.2001.00275.x>>
- Lodé, T. (1995), «Convergences morphologiques du putois (*Mustela putorius*) et du vison américain (*M. vison*) avec le vison d'Europe (*M. lutreola*)», dans *Gibier Faune Sauvage, Game and Wildlife*, vol. 12, pp. 147-158.
- Louart, B. (2010), «Aux origines idéologiques du darwinisme», dans *Sniadecki*. <<https://sniadecki.wordpress.com/2012/05/23/origines-ideologiques-darwinisme/>> [02/09/2022].
- Love, A. C. (2010), «Rethinking the structure of evolutionary theory for an extended synthesis», dans Pigliucci & Müller (eds.), *Evolution, the extended synthesis*. MIT Press, pp. 403-441.
- Love, A. C. (2005), *Explaining evolutionary innovation and novelty: a historical and philosophical study of biological concepts*. Thèse de Doctorat de l'Université de Pittsburgh.
- Lynch, M. (2007), «The frailty of adaptive hypothesis for the origins of organismal complexity», dans *PNAS*, 104 (suppl. 1), pp. 8597-8604.
- Mayr, E. (1942), *Systematics and the origin of species*. Harvard University Press.
- Meinesz, A. (2011), *Comment la Vie a commencé*. Belin Pour la science.
- Michaelian, K. (2011), «Thermodynamic origin of life», dans *Earth Syst. Dynam.*, 2, pp. 37-51. <<https://doi.org/10.5194/esd-2-37-2011>>.
- Moreel, J.-F. (2007), *Le darwinisme, envers d'une théorie*. François-Xavier de Guibert.
- Mossio, M., Bich, L. (2017), «What makes biological organisation teleological?», dans *Synthese*, 194, pp. 1089-1114. <<https://doi.org/10.1007/s11229-014-0594-z>>.
- Mossio, M. & Bich, L. (2014), «La circularité biologique : concepts et modèles», chapitre 5 dans Franck Varenne (dir.), *Modéliser & simuler – Tome 2. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*. Paris, Éditions Matériologiques, pp. 137-169. <<https://doi.org/10.3917/edmat.varen.2014.01.0137>>.
- Nietzsche, F. (1995), *La volonté de puissance*. Gallimard [1901].
- Noble, D. (2007), *La musique de la vie – La biologie au-delà du génome*. Éditions du Seuil.
- Ord, T. J. & Summers, T. C. (2015), «Repeated evolution and the impact of evolutionary history on adaptation», dans *BMC Evolutionary Biology*, 15(1), pp. 137-148. <<https://doi.org/10.1186/s12862-015-0424-z>>.
- Orgogozo, V. (2015), «Replaying the tape of life in the twenty-first century», dans *Interface Focus*, 5 : 20150057. <<https://doi.org/10.1098/rsfs.2015.0057>> .
- Pelt, J.-M. (2011), *L'évolution vue par un botaniste*. Fayard.



- Perez, A. M. (2017), *Téléologie et fonctions en biologie – Une approche non causale des explications téléofonctionnelles*. Thèse de Doctorat de l'Université Autonome de Madrid (directeur : Jesus Vega Encabo).
- Pichot, A. (1980), *Éléments pour une théorie de la biologie*. <[https://ia800300.us.archive.org/12/items/PichotETB2011/Pichot\\_ETB\\_2011.pdf](https://ia800300.us.archive.org/12/items/PichotETB2011/Pichot_ETB_2011.pdf)> [22/10/2022] ; la pagination utilisée correspond à celle de l'édition numérique.
- Pigliucci, M. & Müller, G. B. (eds.) (2010), *Evolution, The Extended Synthesis*. MIT Press.
- Pigliucci, M. & Müller, G. B. (2010), «Elements of an Extended Evolutionary Synthesis», dans *Evolution, The Extended Synthesis*. MIT Press, pp. 3-17.
- Popper, K. (2012), *La quête inachevée*. Calmann-Lévy [1974].
- Popper, K. (2005), *The logic of scientific discovery*. Routledge Classics. <<http://philotextes.info/spip/IMG/pdf/popper-logic-scientific-discovery.pdf>> [22/10/2022].
- Powell, R. & Mariscal, C. (2015), «Convergent evolution as natural experiment: the tape of life reconsidered», dans *Interface Focus*, 5 : 20150040. <<https://doi.org/10.1098/rsfs.2015.0040>>.
- Quirantes, A. (2016), *L'espace-temps quantique – Le rêve contrarié de grande unification de la théorie du tout*. RBA France, Collection Voyage dans le Cosmos.
- Raoult, D. (2010), *Dépasser Darwin – L'évolution comme vous ne l'aviez jamais imaginée*. Plon.
- Rosslenbroich, B. (2009), «The theory of increasing autonomy in evolution: a proposal for understanding macroevolutionary innovations», dans *Biology & Philosophy*, 24, pp. 623-644.
- Schutzenberger, M.-P. (2017), «Une cellule est bien plus complexe qu'un Boeing 747. Le soleil, lui, est simplement compliqué», entretien réalisé par Olivier Postel-Vinay. <<http://www.uip.edu/blog/-une-cellule-est-bien-plus-complexe-quun-boeing-747-le-soleil-lui-est-simplement-complique>> [02/12/2018].
- Shapiro, J. A. (2011), *Evolution—A view from the 21st century*. FT Press Science.
- Simpson, G. G. (1944), *Tempo and mode of evolution*. Columbia University Press.
- Sniadecki, A. (2005), *Dossier de presse – Guillaume Lecointre, guide critique* (1<sup>er</sup> épisode – octobre 2005). <<https://sniadecki.wordpress.com/2012/11/17/lecointre-2005/>> [02/10/2022].
- Stebbins, G. L. (1950), *Variation and evolution in plants*. Columbia University Press.
- Suing, G. & Aubert, D. (2017), «Evolution : vers une approche dialectique», dans *apbg Biologie Géologie* n.º 4-2017. <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01691524/document>> [22/10/2022].
- Torday, J. S. (2015), «Homeostasis as the mechanism of evolution», dans *Biology* 4, pp. 573-590.
- Tort, P. (2011), *Darwin et le darwinisme*. Presses Universitaires de France, Que Sais-Je ?
- Vermeij, G. J. (2006), «Historical contingency and the purported uniqueness of evolutionary innovations», dans *PNAS* 103 (6), pp. 1804-1809. <<https://doi.org/10.1073/pnas.0508724103>>.
- Von Sydow, M. (2012), *From Darwinian metaphysics towards understanding the evolution of evolutionary mechanism*. Universitätsverlag Göttingen. <<https://library.oapen.org/bitstream/id/303fdc80-b201-4e12-9dc7-34cf3840917b/610358.pdf>> [22/10/2022].
- Wikipédia – L'encyclopédie libre ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil\\_principal](https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal)), «Histoire de la pensée évolutionniste» <[https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire\\_de\\_la\\_pensée\\_évolucionniste](https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_pensée_évolucionniste)> [11/10/2022].
- Williams, G. C. (1985), «A defense of reductionism in evolutionary biology», dans *Oxford Surveys in Evolutionary Biology*, 2, pp. 1-27.
- Wright, S. (1932), «The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution», dans *Proceedings of the Sixth International Congress of Genetics*, 1, pp. 356-366.

