

Discours de réception de M. François Le Tacon



L'évolution du monde vivant : réalités et incertitudes

Introduction

D'où venons-nous, où allons-nous ? Depuis toujours, l'Homme a essayé de répondre à ces interrogations par deux voies différentes, la croyance à une organisation supra humaine révélée et l'analyse par le raisonnement. Nous allons tenter de développer cette seconde approche en faisant le point des connaissances actuelles ou des théories en cours. L'évolution des espèces vivantes ne fait plus de doute depuis les prédécesseurs et les successeurs de Charles Darwin. Mais l'évolution des espèces n'est qu'un aspect de l'évolution de la vie et les mécanismes décryptés par Darwin et ses successeurs ne peuvent expliquer à eux seuls l'évolution du monde vivant.

D'autre part, l'évolution du monde vivant n'intègre pas celle de l'Homme moderne. Une conception plus générale a été élaborée par Pierre Teilhard de Chardin à partir de 1934. Elle est basée sur la notion de complexification et permet ainsi d'avoir une vision générale de l'évolution du monde et de l'Humanité. Nous allons tout d'abord rappeler les théories de l'évolution des espèces selon Darwin et ses successeurs, puis celles du monde vivant en intégrant la théorie de la complexification, dont font partie les idées de Lynn Margulis sur les symbioses et celles de James Lovelock, le créateur du concept de *Gaia*.

Nous allons ensuite tenter de donner une vision de l'évolution générale du monde vivant en y intégrant l'Humanité et en nous basant essentiellement sur la pensée de Pierre Teilhard de Chardin et celle de James Lovelock.



L'évolution des espèces

Le monde vivant se compose d'espèces qui sont des entités plus ou moins discontinues. La paléontologie, ou étude des plantes et des animaux du passé, révèle l'existence de formes de vie différentes des formes actuelles.

Pour Aristote, la plupart des philosophes de l'Antiquité, et plus près de nous pour le grand savant suédois Linné, les espèces étaient éternelles et immuables : c'est la théorie du *fixisme*. L'idée de l'évolution des êtres organisés et de leur transformation à partir d'une souche commune remonte cependant à l'Antiquité grecque. Thalès (vers 625-547 avant J.C.), Anaximandre de Milet (610-547 avant J.C.) et Empédocle d'Agrigente (495-435 avant J.C.) donnaient déjà des interprétations évolutionnistes du monde.

Pendant la renaissance, les idées évolutionnistes de ces précurseurs grecs étaient encore connues. Le philosophe italien Lucilio Vanini (1586-1619) suggère le passage d'une espèce à l'autre : l'Inquisition le condamne en 1619 à Toulouse à avoir la langue tranchée et à être brûlé vif. Avec de telles méthodes, c'est évidemment le fixisme qui jusqu'au dix-huitième siècle, est la pensée officielle de l'Église ou des grandes religions en général et de la Science.

Le dix-huitième siècle, avec Buffon (1707-1788), élu associé étranger de notre compagnie en 1760, et avec les encyclopédistes, prépare un climat favorable à l'idée d'évolution. Buffon, dans sa *Théorie de la Terre*, conçoit une succession de flores et de faunes différentes des nôtres. Ses idées lui valent en 1751 une condamnation en seize propositions par la Sorbonne ; prudent, il se rétracte. Mais en 1778, il récidive :

Il ne serait pas impossible que, même sans intervertir l'ordre de la nature, tous les animaux du nouveau monde ne fussent dans le fond les mêmes que ceux de l'ancien, desquels ils auraient autrefois tiré leur origine.

Des précurseurs du dix-huitième siècle, il convient aussi de citer Maupertuis (1698-1759), géographe malouin, élu associé étranger de notre compagnie en 1754.

Lamarck publie ses idées pour la première fois en 1801. Il suggère que tous les animaux, y compris l'Homme, descendent d'espèces antérieures.

La controverse qui oppose en 1830 à Paris Cuvier, partisan du fixisme, à Geoffroy de Saint-Hilaire, partisan de l'évolution des espèces, est restée célèbre. En juillet 1858, indépendamment l'un de l'autre, Charles Darwin (1809-1882) et Alfred Wallace (1823-1813) ne que ka postérité a oublié, présentent à la séance de la *Linnean Society* deux mémoires sur la théorie de l'évolution par sélection naturelle. Ces deux exposés sont

ensuite publiés dans le Journal de cette même société. Notons qu'en 1855, Wallace avait déjà publié une lettre intitulée : *de la loi qui régit l'apparition des nouvelles espèces*. Cette lettre n'est pas aussi claire que son texte de 1858. Elle contient cependant les éléments d'une vision du monde vivant élaborée en très peu de temps. Darwin a élaboré la sienne après près de trente années de réflexions et de voyages. La première édition *De l'Origine des espèces* a en effet été publiée en novembre 1859, alors que la *Beagle* avec à son bord Darwin, avait quitté Devonport pour son tour du monde le 27 décembre 1831. Wallace et Darwin conçoivent une théorie explicative cohérente de l'évolution des espèces en faisant appel à la lutte pour la vie et la sélection naturelle. Dans *De la fécondation des orchidées par les insectes et des bons résultats du croisement*, Charles Darwin écrit en 1870 :

Plus j'étudie la nature, plus je suis frappé avec une force toujours croissante par cette conclusion : en produisant dans chaque partie des variations accidentelles légères mais très diverses, et en recueillant et accroissant par sélection naturelle celles de ces variations qui sont avantageuses à l'organisme, dans les conditions d'existence complexes et toujours changeantes où il peut se trouver, la nature réalise à la longue des combinaisons admirablement appropriées les unes aux autres.

La théorie de l'évolution par sélection naturelle a été considérablement renforcée par la découverte des lois de l'hérédité qui permettent de comprendre les raisons de la variabilité observée à chaque génération lors de la reproduction sexuée, puis de la découverte des mécanismes par lesquels les mutations apparaissent et se transmettent aux générations suivantes. L'intégration de ces nouvelles connaissances aux idées de Wallace et de Darwin a donné naissance à la théorie dite du *néo-darwinisme*, dont Auguste Weismann (1834-1914) a été le précurseur.

Le néo-darwinisme s'appuie donc d'abord sur les lois de l'hérédité découvertes à partir de 1856 par Gregor Johann Mendel (1822-1884), moine, puis supérieur du couvent augustin Saint-Thomas à Brünn, maintenant Brno en république tchèque. C'est à Vienne, auprès du célèbre physicien Johann Doppler, que de 1851 à 1853 Mendel se familiarise avec la méthode expérimentale qu'il va ensuite mettre en pratique dans son couvent. Les travaux de Mendel, maintenant légendaires, sont parus en 1866 dans la revue d'une petite société savante de Brünn après avoir été présentés oralement à deux reprises le 8 février et le 8 mars 1865. Le monumental travail de Mendel, basé sur 28 000 semis de pois et de plusieurs autres plantes, intitulé *Versuche über Pflanzenhybriden*, ou *Recherche sur les hybrides des plantes*, est passé presque totalement inaperçu, bien qu'il ait été adressé à 138 sociétés savantes étrangères, dont l'Académie des sciences de Paris et la *Linnean Society*. Darwin

et Wallace ont donc eu la possibilité de lire cet article qui a bouleversé notre compréhension du monde vivant. Ne l'ont-ils pas lu ou n'ont-ils pas compris sa portée, nul ne le saura jamais. Notons que Mendel possédait l'édition allemande de 1863 de l'*Origine des espèces* de Darwin et qu'il l'avait abondamment annotée. L'absence de réaction de l'Académie des sciences de Paris est tout aussi étrange. En effet, en 1861, elle avait créé un prix pour encourager les recherches sur les hybrides et leurs descendants. En 1863, Dominique Alexandre Godron, membre de notre compagnie, et Charles Naudin ont chacun envoyé un mémoire à l'Académie des sciences. Naudin a reçu le prix de l'Académie pour sa découverte partielle des lois de l'hérédité. Pourquoi le travail de Mendel n'a-t-il pas été ensuite reconnu par l'Académie des sciences de Paris ? Nous ne le saurons jamais. Il n'est toutefois pas possible d'invoquer l'incompréhension de la langue allemande. Les tableaux de résultats et les équations de Mendel sont tellement clairs dans l'article original qu'ils se comprennent par eux-mêmes. Depuis, ils sont d'ailleurs toujours repris tels quels dans les livres et sur les tableaux noirs du monde entier. On dit que trente-quatre ans plus tard, en 1900, Hugo de Vries (1848-1935), Karl Erich Correns (1864-1933) et Erich von Tschermack (1871-1962) ont redécouvert les lois de Mendel chez les végétaux. En réalité, tous les trois connaissaient parfaitement le travail de leur prédécesseur. Le titre de l'article de Correns est d'ailleurs : *Les lois de Mendel appliquées au comportement de la descendance des hybrides*. A la même époque, à la faculté des sciences de Nancy, Lucien Cuénot (1866-1951), membre de notre compagnie, mettait en évidence les lois de l'hérédité chez les animaux. Ses travaux sur la souris, parus en 1904, sont désormais célèbres. Notons que Mendel avait commencé à vérifier ses lois chez les animaux, en l'occurrence les abeilles. Le mot de génétique, en tant que discipline scientifique, a été créé en 1905-1906 par William Bateson (1861-1926). Thomas Hunt Morgan (1866-1945) a fait faire des progrès décisifs à la génétique et à la théorie de l'évolution grâce à ses travaux fameux sur la drosophile ou mouche du vinaigre. En 1933, il obtient le prix Nobel de médecine pour sa théorie chromosomique de l'hérédité.

Le néo-darwinisme a été enrichi une seconde fois par le *mutationnisme*. Au contraire des variants qui apparaissent après reproduction sexuée en raison de la disjonction des caractères au moment de la formation des gamètes, les mutations sont des modifications de l'ADN engendrées par des facteurs internes ou externes à l'organisme, comme par exemple les rayons cosmiques. Charles Darwin connaissait bien ces variations brusque qu'il observait, en particulier sur les gentianes, et qu'il dénommait *sports*. Mais il ne leur attribuait pas de signification évolutive. A Nancy, Dominique Alexandre Godron, a étudié de près ces mu-

tations ou monstruosités, aussi bien chez les animaux que chez les végétaux. Mais Godron, pas plus que Darwin, ne semble avoir compris le rôle des mutations dans l'évolution des espèces. On considère que le mutationnisme est né en 1901 lorsque Hugo de Vries a publié son célèbre ouvrage sur la théorie des mutations *Die Mutationstheorie*. A la notion de variations continues sur lesquelles agit la sélection naturelle, Hugo de Vries ajoute la notion de variations discontinues ou de mutations qui s'inscrivent d'emblée dans le patrimoine héréditaire et qui sont de nature différente des variations engendrées par la reproduction sexuée. D'après ses notes manuscrites, ses premières observations ont été réalisées en 1866 à Hilversum en Hollande sur une primevère, *Oenothera lamarckiana*.

Hugo de Vries a présenté sa théorie en 1900 au congrès international de Botanique qui s'est tenu à Paris dans le cadre de l'Exposition Universelle. A la tribune, devant les plus grands savants de l'époque, c'est un nancéien, Emile Gallé, membre de notre compagnie, qui lui a succédé. Il y a présenté ses propres travaux sur la variabilité des espèces en prenant comme exemple une orchidée, *Aceras hircina*. Auparavant en 1892, dans une communication présentée à l'Académie de Stanislas et intitulée *Anomalies dans les gentianées, une race monstrueuse de Gentiana campestris*, Emile Gallé avait parfaitement décrit les mutations et compris leur rôle dans l'évolution des espèces.

Si le support de l'hérédité, l'ADN ou acide désoxyribonucléique, a été découvert par Friedrich Mieschen en 1869, il faut attendre près de cent ans pour en comprendre la structure. C'est en effet en 1953, que James Watson, Francis Crick et Maurice Wilkins proposent le modèle de la double hélice. En 1962, ils obtiennent tous les trois le prix Nobel de physiologie et de médecine. En 1965, François Jacob, André Lwoff et Jacques Monod, obtiennent le même prix Nobel pour leur découverte sur le fonctionnement et l'expression des gènes. Un peu plus tard, Jacques Monod et François Jacob conçoivent le concept de l'ARN-messager et démontreront sa réalité. Les ARN-messagers sont transcrits à partir de l'ADN, puis sont traduits en protéines dans les ribosomes. Ils assurent donc la liaison entre le génome qui contient toute l'information génétique et l'individu qui en est l'expression.

Enfin, de 1972 à 2002, Stephen Jay Gould, professeur à l'Université Harvard, a apporté diverses corrections à la théorie darwinienne. Il crée en 1972 avec Niles Eldredge le concept des *équilibres ponctués*. Selon ce concept, la spéciation se fait par étapes successives et non progressivement, ce qui permet d'expliquer la longue persistance de certaines espèces ou au contraire la très rapide évolution par bonds d'autres groupes.

Plus tard dans l'*Éventail du vivant*, Gould conteste le mythe du progrès dans l'évolution et considère, contrairement aux idées que nous allons développer, que l'apparition d'une vie intelligente et consciente n'était ni nécessaire, ni prévisible.

Enrichi par l'apport de nombreuses contributions et critiques, le néo-darwinisme est devenu une synthèse multidisciplinaire, acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique. La diversité des espèces résulte de l'action de deux générateurs. L'un est l'accumulation de mutations dans les génomes : ce générateur est interne à l'organisme même si les facteurs déclenchants peuvent être externes. L'autre générateur, externe celui-là, est constitué par les échanges qu'entretient une population avec ses voisines par reproductions sexuée : de nouvelles populations arrivent, tentent de s'installer et apportent de nouveaux allèles, c'est-à-dire des variants d'un même gène apparus par mutation de l'ADN.

Les nouvelles combinaisons issues de ces générateurs externes ou internes sont soumises à la pression de sélection du milieu. Seules les combinaisons les mieux adaptées à un milieu qui existe à un moment donné survivent et sont conservées. Des modifications du milieu où des catastrophes entraînent la sélection de nouveaux caractères et la survie d'autres combinaisons. La pression de sélection n'agit pas simplement sur des gènes déterminés, mais sur des systèmes interactifs complexes.

Il y a ainsi progressivement divergence entre populations soumises à des pressions de sélection différentes. A partir d'un certain niveau de différenciation, la reproduction sexuée ne peut plus s'effectuer entre populations différentes ; il y a alors spéciation.

La spéciation est dite allopathique lorsqu'elle est la conséquence d'un isolement géographique. Elle est dite sympatrique lorsque l'isolement n'est pas physique (Maynard Smith J., 1966). La spéciation sympatrique est en général progressive et il existe tous les intermédiaires entre espèces au sens strict, définies par la barrière génétique qui les isole des autres organismes vivants, et les espèces définies morphologiquement, mais non encore génétiquement isolées des espèces ou des sous-espèces voisines.

La théorie néo-darwinienne de l'évolution des espèces, enrichie de nombreuses fois, repose donc maintenant sur des bases scientifiques extrêmement sérieuses. Mais aussi convaincante soit-elle, elle ne peut seule rendre compte de l'évolution générale du monde vivant.

L'évolution du monde vivant et la théorie de la «complexification» croissante

Un autre grand moteur de l'évolution est l'association entre des structures ayant des propriétés différentes. Il y a ainsi création de nouvelles entités dont les propriétés ne sont pas uniquement l'addition de celles des structures initiales. Ces nouvelles structures possèdent des propriétés nouvelles nées des interactions entre les deux partenaires. Les auteurs de cette théorie sont multiples. Le premier à l'avoir énoncée, 450 ans avant Jésus Christ, est Empédocle d'Agrigente :

Les premiers animaux et les premières plantes ne sont nullement nés dans leur intégrité, mais par parties séparées ne pouvant s'ajuster ; en second lieu se sont produits des assemblages de parties comme dans les images de la fantaisie.

Cette théorie a été reprise à la fin du dix-neuvième, mais ne s'est imposée que dans la deuxième moitié du vingtième siècle grâce à Teilhard de Chardin, Lynn Margulis, auteur de la théorie de la symbiose généralisée et de James Lovelock, qui avec *Gaïa*, a introduit la notion de l'écosystème unique Terre.

Ce processus d'association et donc de complexification a été utilisé à de multiples reprises dans l'histoire de la vie (Maynard Smith et Szathmary, 1995). Les premières manifestations de la vie se sont produites vers moins 0 à moins 3,8 milliards d'années, probablement en conditions d'anaérobiose, en milieu marin et à haute température. De nombreuses étapes associatives ont permis la diversification de la vie telle que nous la connaissons actuellement (Cavalier-Smith, 1987 ; Le Tacon et Selsosse, 1994). Une des premières a été l'association entre deux types de macromolécules, les chaînes polypeptidiques et les chaînes d'acides ribonucléiques (ARN). L'association de ces deux macromolécules par l'intermédiaire d'un autre acide ribonucléique, probablement très proche des actuels ARN ribosomiaux, a permis la reproduction stable d'enchaînements d'acides aminés ayant des propriétés particulières. Ce sont les polypeptides ou protéines, c'est-à-dire les briques qui constituent le vivant et les enzymes qui permettent à ces assemblages de fonctionner. Une seconde association avec des chaînes de nature phospholipidique a permis le confinement des produits de ces réactions à l'intérieur d'une membrane primitive et la naissance d'un milieu cellulaire isolé de l'extérieur. Un nouvel état, celui de la vie, complètement différent de celui de la matière inerte, puisque capable de se reproduire, est donc apparu grâce à ce processus de complexification, il y a environ un peu moins de quatre milliards d'années. Cette triple ou quadruple association a donné naissance aux organismes Procaryotes ou bactéries, caractérisées par l'absence de confinement des acides nucléiques dans

un noyau. Les Archébactéries, récemment découvertes, sont considérées comme les représentants actuels de bactéries primitives. Elles sont souvent caractérisées par des métabolismes adaptés aux conditions extrêmes (haute température, grande profondeur, milieux soufrés ou salés, ...) analogues à celles qui existaient au début de la naissance de la vie. Par création de l'ADN double brin, les Archébactéries et les bactéries au sens strict ont réussi à décharger l'ARN de la transmission héréditaire, en ne lui laissant plus que la fonction de synthèse des protéines. Mais elles n'ont pas réussi à mettre en œuvre une sexualité bien définie, ni à se séparer en espèces bien stables. En effet, les bactéries ont la propriété de transférer horizontalement de l'ADN d'une espèce ou d'une population à l'autre. De plus, les virus, qui sont des ensembles de gènes dépourvus de capacité de transcription et de réplication, ont continuellement contribué au transfert horizontal d'ADN entre espèces. Ce transfert horizontal d'ADN a empêché une véritable évolution au sens de Darwin. Pendant un ou deux milliards d'années, l'évolution de la vie n'a pu suivre de lignes directrices.

On dit qu'elle a été réticulée. Vers moins 3,2 milliards d'années (Knoll, 1992, 1999), l'association d'une Archébactérie avec une bactérie au sens strict aurait donné naissance à la cellule Eucaryote caractérisée par un noyau, c'est-à-dire une double membrane isolant l'ADN du reste de la cellule, et par une véritable sexualité, c'est-à-dire la recombinaison à chaque génération d'un nouveau noyau héritant la moitié de l'ADN de chacun des deux parents. Un article paru en février de cette année émet l'hypothèse qu'une autre entité cellulaire, un Chronocyte, serait impliquée dans la formation des cellules eucaryotes (Hartmann et Fedorov, 2000). Ce chronocyte hypothétique, constitué d'un cytosquelette et d'un complexe membranaire, aurait englobé une Archébactérie à l'origine du noyau. Cette théorie de l'acquisition du noyau par endosymbiose est plus que probable, mais n'est pas encore totalement acceptée par la communauté scientifique. Les Eucaryotes modernes, dont nous sommes, sont nés entre moins 2,8 et moins 2,4 milliards d'années. Ils résultent, de manière incontestable cette fois, d'une nouvelle association ou symbiose des Eucaryotes primitifs et des alpha-protéobactéries qui sont les ancêtres des mitochondries actuelles. Les mitochondries sont des composants de nos cellules qui fabriquent par respiration l'énergie dont nous avons besoin. Elles nous permettent de vivre en présence d'oxygène, alors que les Eurocaryotes primitifs étaient probablement anaérobies et ne pouvaient tirer leur énergie que de l'antique processus de glycolyse. La respiration des cellules eucaryotes se fait uniquement dans les mitochondries qui possèdent des gènes propres, du moins ceux qui n'ont pas été transférés dans le noyau. Plus tard, aux environs de moins d'un milliard d'années, une nouvelle endosymbiose entre un Eucaryote à mito-

chondries et de bactéries capables de photosynthèse, les Cyanobactéries, a abouti à la naissance de chloroplastes et donc à la différenciation entre animaux et végétaux. Chez les protistes chlorophylliens, il est possible que cette endosymbiose chloroplastique primaire ait été suivie d'une seconde et peut-être d'une troisième, ce qui expliquerait l'existence de chloroplastes à quatre membranes. Enfin, les cils, les flagelles et les peroxysomes pourraient aussi avoir une origine endosymbiotique. Mais ces dernières hypothèses restent très controversées.

Autrement dit, pendant trois milliards d'années, le moteur essentiel de l'évolution du monde vivant a été la complexification, c'est-à-dire une succession d'associations symbiotiques entre structures différentes. Avec les Eucaryotes modernes et l'apparition de la sexualité, source de combinaisons innombrables, l'évolution a changé de rythme en adoptant la stratégie darwinienne.

En six cents millions d'années, depuis le cambrien ou la fin du précambrien, cette nouvelle stratégie a permis une incroyable diversification d'espèces dans les eaux marines ou saumâtres. Mais elle a été incapable d'assurer la colonisation des continents. La sortie de l'eau était en effet un problème trop complexe à résoudre par simple évolution darwinienne. Au silurien, pour résoudre ce problème, la vie a une nouvelle fois eu recours à la complexification, en l'occurrence à l'association symbiotique entre des champignons et des végétaux primitifs issus d'algues. C'est ainsi, il y a 420 millions d'années, que des plantes assez proches des fougères actuelles et vivant dans des eaux saumâtres en bordure des continents, ont pu sortir de l'eau grâce à ces associations avec des champignons symbiotiques, qui leur ont permis de s'alimenter en éléments minéraux extraits des sols primitifs (Selosse et Le Tacon, 2000). Les plantes ont ainsi pu coloniser tous les continents et reprendre la stratégie darwinienne. Les animaux ont suivi les plantes dont ils s'alimentent et se sont eux aussi diversifiés sur les continents suivant les mêmes mécanismes.

Mais la stratégie darwinienne n'a jamais complètement supplanté la stratégie de complexification, en particulier sur les continents. L'association entre génomes différents ne s'est pas arrêtée, bien au contraire. Les végétaux, les animaux, les champignons et les bactéries se sont associés en communautés que l'on désigne couramment sous le nom d'écosystèmes. La vie sur terre étant plus difficile que dans l'eau, les écosystèmes terrestres sont plus complexes que les écosystèmes marins. Mais ils fonctionnent tous de la même manière ou presque. Dans chaque écosystème, il existe plusieurs niveaux trophiques liés les uns aux autres et permettant à l'ensemble de fonctionner sous forme de cycles plus ou moins ouverts. Traditionnellement, les écosystèmes sont organisés autour

de deux grands groupes : les capteurs d'énergie, les plantes, les cyanophycées et certains protiste, et les consommateurs d'énergie, les animaux, les champignons et la plupart des bactéries. Chaque niveau d'organisation est indispensable aux autres. Au sein de cette coopération générale avec partage des tâches, il existe en permanence une compétition entre tous les génomes, ce qui permet de conserver toujours les meilleures combinaisons, quelles que soient les conditions de milieu. Mais ces écosystèmes, adaptés à toutes les conditions marines et terrestres, ne sont pas indépendants les uns des autres. Cette interdépendance, qui avait été mise en évidence depuis longtemps par beaucoup de chercheurs, a été théorisée en 1979 par un scientifique indépendant, James Lovelock, avec son célèbre livre : *Gaia, une nouvelle vision de la vie sur terre*. Cette théorisation doit beaucoup à sa collaboration avec Lynn Margulis. Dans un second livre, *L'âge de Gaia*, paru en 1988, James Lovelock essaie de préciser sa pensée et de répondre aux nombreuses critiques qui lui ont été faites. Il intègre dans Gaia l'ensemble du globe. Pour mieux comprendre l'idée de Gaia, nous citons James Lovelock :

L'ensemble des organismes vivant sur la terre, des baleines aux virus et des chênes aux algues, peut être considéré comme constituant une seule entité vivante capable de maintenir une atmosphère terrestre permettant de subvenir à tous ses besoins et possédant des propriétés et des possibilités bien supérieures à toutes celles de ses constituants. Gaia peut être définie comme une entité complexe incluant la biosphère, l'atmosphère, les océans et les continents, dont le fonctionnement d'ensemble fournit par l'intermédiaire de systèmes de nature cybernétique un environnement physique et chimique optimal pour la vie sur cette planète.

James Lovelock s'interroge si notre propre intelligence collective est aussi une partie de Gaia. Est-ce que l'Homme en tant qu'espèce peut constituer le système nerveux de Gaia et posséder une intelligence capables d'anticiper les changements d'environnement ? il rejoint ainsi en partie la pensée de Pierre Teilhard de Chardin que nous allons maintenant développer.



L'évolution générale du monde vivant

Par ses différents écrits, le père jésuite Pierre Teilhard de Chardin (1881-1955), à la fois scientifique préhistorien à la renommée incontestée et théologien, propose une vision évolutive cohérente de l'Univers, où l'Homme par sa capacité d'analyse et d'abstraction crée une dimension nouvelle : *la Noosphère*. La vision de Pierre Teilhard de Chardin, à l'origine plus philosophique que scientifique, comme d'ailleurs celle de James Lovelock, voit cependant sa validité confirmée par les nouvelles

découvertes des mathématiciens, des physiciens, des biologistes et des sociologues. Cette théorie, simple dans son principe, n'en est pas moins lumineuse, même s'il faut la découvrir en décryptant un langage parfois difficilement accessible. Cette théorie peut se résumer en quelques phrases.

Le monde a débuté au point *alpha*. Il n'était alors constitué que de quelques entités simples, mais douées d'une propriété particulière, la possibilité de s'associer les unes aux autres, malgré leurs différences, ou plus exactement en raison de leurs différences. Cette possibilité d'association permet une complexification qui n'a pas de limite et qui permettra d'atteindre un point appelé *oméga*. Que représentent ces deux points à l'heure actuelle, comment sommes-nous en train de passer de l'un à l'autre ? Nous allons tenter de résumer cette longue évolution.

Dans l'état actuel des connaissances, qui découlent des travaux de physique de ces vingt-cinq dernières années, la matière ne serait formée que de deux types de particules élémentaires, les *leptons* qui sont au nombre de six et dont le plus connu est l'électron et les *quarks*, qui eux aussi seraient au nombre de six. Entre ces particules s'exercent quatre catégories de forces, appelées interactions fondamentales : *gravitationnelle* et *électromagnétique, faible et forte*. Cet ensemble de douze particules et de leurs interactions pourrait permettre de comprendre tous les phénomènes observés dans l'Univers, aussi bien à l'échelle de la terre et de la vie, que des galaxies.

Ces particules, avec leurs propriétés, et donc leurs forces d'interactions, se sont associées pour donner des structures plus complexes et plus grosses, les atomes. Il n'existe que 118 combinaisons ou éléments atomiques possibles. Notons que l'équipe de l'Université de Berkeley qui a annoncé en 1999 avoir découvert le 118^{ème} élément, s'est depuis rétractée après plusieurs expériences ne confirmant pas les résultats publiés.

Un élément atomique a la propriété de s'associer avec lui-même ou avec d'autres. Ces possibilités d'association, sous forme de molécules, sont infinies. Certaines de ces molécules sont devenues énormes et elles se sont elles-mêmes associées pour atteindre, comme nous l'avons vu, un état totalement nouveau, celui de la vie. Par complexification continue, puis par mise en place de la stratégie darwinienne, la vie s'est incroyablement diversifiée et compliquée.

L'homme est le fruit de cette longue évolution. Mais par la complexification de notre système cérébral, nous avons atteint un nouvel état, celui de la conscience. Le mot conscience vient du latin *conscientia*, c'est-à-dire la connaissance que l'on a de soi-même. L'Homme

a la possibilité d'analyser son état, son rapport avec le monde et le fonctionnement du monde. Depuis 1980, les fondements moléculaires de la conscience, jusqu'alors considérée comme inaccessible à la science classique, commencent eux-mêmes à pouvoir être décryptés. L'Homme vit dans une autre dimension qui n'est plus celle où les autres espèces se meuvent, même s'il reste soumis aux lois ordinaires de la biologie. Dans son récent ouvrage *Comment notre cerveau est devenu ce que nous sommes*, Joseph Ledoux, professeur de neurosciences à l'Université de Wisconsin-Madison écrit :

Notre cerveau n'a pas évolué jusqu'à un point où la nouvelle organisation qui nous permet d'élaborer des raisonnements complexes peut facilement contrôler l'organisation initiale responsable de nos réactions primaires.

De même, et en dépit de cet état particulier, depuis sa différenciation possible à partir d'*Homo rhodesiensis* il y a cinquante à cent mille ans, l'Homme moderne n'a cependant pas totalement échappé à l'évolution darwinienne. Probablement à partir de l'Afrique, plusieurs migrations successives vers de nouveaux milieux jusqu'à la Terre de Feu en passant par le détroit de Behring et les générateurs de variations génétiques ont entraîné la différenciation de populations ayant des caractéristiques propres. Mais ce processus de différenciation et donc d'évolution est voué à la disparition. Avec le développement des déplacements et des flux migratoires rapides qui en résultent, l'Homme se trouve en situation de plus en plus *panmixtique*. Les couples se forment de plus en plus au hasard, ce qui définit la *panmixie* et leurs gamètes se rencontrent de plus en plus aléatoirement, ce qui définit la *pangamie*. La population devient donc infinie ou n'a plus de limites. Les allèles, c'est-à-dire les variants d'un gène, qui étaient apparus au cours des grandes migrations et qui s'étaient maintenus au sein de populations homogènes, vont pouvoir, plus que jamais, s'apparier avec tous les autres. Les mécanismes de l'évolution des espèces au sens de Darwin ne peuvent donc plus agir. Ils avaient déjà été lis à mal dans le passé en raison de la propension de l'Homme à se déplacer rapidement. Déjà, il y a quarante mille ans, il est possible que des échanges génétiques aient eu lieu en Europe et au Moyen Orient entre les populations néanderthaliennes différenciées il y a 300 à 500 000 ans et les nouveaux arrivants semblables aux hommes actuels. Cependant, une équipe de l'Université de Munich, dirigée par la Suédois Svante Pääboe, puis une équipe américaine, ont réussi en 1997 l'exploit de séquencer une courte région hypervariable de 379 paires de bases de l'ADN mitochondrial, extrait de deux humérus néanderthaliens. La comparaison de cet ADN avec le nôtre montre que ces néanderthaliens étaient assez éloignés des Hommes actuels. Mais le débat est loin d'être clos. Plus tard, et en particulier au Moyen Âge, les grandes

invasions ou les grandes conquêtes qui ont affecté l'Europe, l'Asie et l'Afrique du Nord ont provoqué d'importants brassages génétiques. Mais la rapidité actuelle des déplacements est sans commune mesure avec ces mouvements passés. La diversité initiale entre populations va inexorablement disparaître au profit d'une plus grande variabilité individuelle au sein d'un ensemble homogénéisé. Bien entendu cela va prendre quelques dizaines de générations, ce qui n'est cependant qu'un temps très court au regard de l'évolution. La vitesse d'homogénéisation, qui dépend de l'intensité des flux migratoires, de la taille des populations d'accueil et des barrières sociales, culturelles ou religieuses, est très différente d'un continent à l'autre. Elle est actuellement rapide en Amérique du Sud et très lente en Asie.

Si l'Homme est en train d'échapper à l'évolution au sens de Darwin, il est cependant toujours soumis à l'autre grande loi de l'évolution, c'est-à-dire à la loi de complexification. En fait, depuis l'apparition de la conscience individuelle et de la capacité d'abstraction, depuis le début de la vie en société avec l'apparition de la parole, puis de l'écriture, nous avons été soumis à ce processus de complexification. Les cerveaux différents se sont mis à échanger des informations et à coopérer. Les cerveaux des générations passées ont commencé à communiquer leurs découvertes à ceux des suivantes. Ce processus n'est donc pas nouveau. Mais des tablettes d'argile de Mésopotamie aux disques durs actuels, il y a un monde. Nous assistons à la montée vertigineuse des capacités de stockage des données. La coopération entre les cerveaux s'accélère. Le processus de complexification change de rythme, alors que l'évolution biologique de l'Homme au sens de Darwin s'arrête.

Y a-t-il une limite à la puissance de milliards de cerveaux, tous différents, collaborant ensemble et léguant leur savoir ou leurs découvertes à leurs successeurs ? Nous laissons la parole à Pierre Teilhard de Chardin :

Disposant de l'énorme durée qui lui reste à vivre, l'humanité a devant elle des possibilités immenses. En fait, si l'étude du Passé nous permet une certaine appréciation des ressources que possède la matière organisée à l'état dispersé, nous n'avons encore aucune idée de la grandeur possible des effets «noosphériques». La résonance de vibrations humaines par millions ! Toute une nappe de conscience pressant sur l'Avenir en même temps ! Le produit collectif et additif d'un million d'années de Pensée !... Avons-nous jamais essayé d'imaginer ce que ces grandeurs représentent ?

Et ici reparaît tout naturellement la notion de changement d'état.

En nous et à travers nous va constamment montant le Noogénèse.

Pierre Teilhard de Chardin, *Le Phénomène humain*, p 318.

Nous sommes maintenant pleinement dans ce nouveau changement d'état, le troisième après celui de la naissance de la vie, puis celui de l'apparition de la conscience individuelle. L'homme entre dans ce nouvel état noosphérique qui est celui de la conscience collective et de la connaissance illimitée. Tout s'est brusquement accéléré avec la naissance du réseau Internet, imaginé pour des raisons militaires. En 1957, pour répondre au lancement de Spoutnik, le Président des Etats-Unis d'Amérique, Dwight Eisenhower, décide de créer l'*Advanced Research Projects Agency*, ou ARPA. Par le biais des universités américaines, ce réseau couvre aussi progressivement les besoins de la société civile et en 1968 devient ARPANET. En 1983, l'ARPANET militaire devient MILNET et l'ARPANET civil Internet. Le principal acteur du développement d'Internet est le sénateur des Etats-Unis d'Amérique Albert Gore qui le 24 juin 1986 lance le *Supercomputer Network Study*. Le 21 mars 1994, Albert Gore, alors Vice-président des Etats-Unis, dans son discours de Buenos Aires à l'*International Telecommunications Union* actualise les idées de Teilhard de Chardin et celles de James Lovelock en déclarant :

Par le moyen de l'électricité, le monde de la matière est devenu un vaste système nerveux animant des milliers de kilomètres en une fraction de temps. La terre est devenue un immense cerveau véhiculant l'intelligence et les sentiments.

En quelques années, le monde stupéfié va découvrir l'incroyable puissance de ce réseau. Il permet à chaque homme d'entrer en contact avec tous ceux qui sont reliés au réseau. Chaque chercheur est en contact permanent avec ses collègues dans sa discipline. Il connaît instantanément les progrès qui viennent d'être accomplis dans son domaine, dans quelque lieu de la planète que ce soit. Souvent même il n'y a plus de lieu défini. Les chercheurs travaillent en effet de plus en plus en réseau.

Dans le domaine de la génomique, toute nouvelle séquence d'ADN, obtenue par un laboratoire est immédiatement analysée, comparée aux données existantes et intégrée dans de gigantesques bases de données internationales. La description de l'alphabet complet de la vie est en marche. De puissants calculateurs permettent d'analyser ces séquences et d'écrire l'histoire de la vie. Mais il ne suffit pas de connaître cet alphabet : il faut encore savoir comment il fonctionne, c'est-à-dire comment s'expriment les gènes, comment ils interagissent entre eux. Cette tâche était, il y a peu, hors du domaine de nos possibilités. Personne ne pouvait imaginer, il y a moins de dix ans, qu'il serait possible d'analyser simultanément l'expression de milliers de gènes d'un individu en fonction de centaines ou de milliers de facteurs ou de situations. Le technique des *microarrays* ou microréseaux et des *Gene chips*, ou puces à ADN, née à l'Université de Stanford, permet à l'aide de robots de positionner auto-

matiquement sur quelques mm² de verre des milliers de séquences d'ADN complémentaires et de les hybrider avec les ARN messagers exprimés au cours d'un processus contrôlé expérimentalement ou non. L'analyse d'expression des gènes sur filtres d'ADNc par de puissants calculateurs a permis en moins de cinq ans de rendre accessible le rêve fou de pouvoir comprendre comment fonctionnent les génomes, c'est-à-dire comment s'expriment et interagissent en même temps des milliers de gènes.

Dans un domaine plus général, de gigantesques bases de données se mettent en place partout dans le monde ; les sites *Web* se multiplient. Des moteurs de recherche sont capables d'interroger en quelques secondes tous les sites accessibles dans le monde et toutes les pages de ces sites. Le moteur mis au point à partir de 1995 par Larry Page et Sergey Brin, deux étudiants de l'Université de Stanford, et lancé commercialement le 7 septembre 1998, est en passe de supplanter tous les autres grâce à la puissance des algorithmes mis en œuvre et aux milliers d'ordinateurs installées en réseau.

Ce moteur est capable d'interroger sur plusieurs critères simultanés, formulés en dix langues différentes, les trois milliards de pages Web qui existent actuellement dans le monde et de donner les réponses en moins de deux dixièmes de seconde. Sa vitesse et la pertinence de ses réponses sont sidérantes. Ces «moteurs», aussi extraordinaires soient-ils, puisqu'ils sont capables de mettre de l'ordre dans le chaos, sont cependant très imparfaits. Ils ne répondent qu'à des interrogations formulées sous forme de mots-clés. La prochaine étape va être la construction de moteurs de recherche capables de développer des systèmes de raisonnement. Pour l'instant, le développement de moteurs de recherche capables de développer des systèmes de raisonnement. Pour l'instant, le développement de moteurs capables d'analyse sémantique est encore en balbutiement. Mais tout va très vite. Depuis un an, deux moteurs, un francophone et un anglophone, sont capables de décrypter le sens général d'une question formulée dans un espace sémantique défini par plusieurs centaines de coordonnées. Toute succession de mots peut être ainsi traduite en un objet mathématique porteur de sens.

L'ensemble de la connaissance devient accessible à l'ensemble de la planète. La bibliothèque du monde devient une réalité. On peut la consulter pour un coût modique de chez soi, de son bureau ou tout simplement de n'importe où par téléphone mobile de type *i-mode*. A terme, la quasi totalité de la population du Japon utilisera ce nouveau mode de communication et d'acquisition d'un *i-mode*. A terme, la quasi totalité de la population du Japon utilisera ce nouveau mode de communication et d'acquisition des connaissances. Ce système va arriver en Europe dans les prochains mois.

Cette puissance maintenant libérée nous fait passer dans la nouvelle dimension ou le nouvel état imaginé par Teilhard de Chardin :

Autour de nous et en nous, l'Énergie humaine, soutenue elle-même par l'énergie Universelle qu'elle couronne, poursuit toujours sa mystérieuse progression vers des états supérieurs de pensée et de liberté. Que nous le voulions ou non, nous nous trouvons pris, totalement, dans cette transformation.

Pierre Teilhard de Chardin, *L'énergie humaine*, pp. 155-156.

Si nous suivons la pensée de Pierre Teilhard de Chardin, l'Humanité va arriver à un point fini hors des dimensions et des cadres de l'Univers visible. Pourrons-nous atteindre ce point oméga, autrement dit, parviendrons-nous à la connaissance absolue ? Il n'existe pas de réponse à cette interrogation. Elle appartient à la conscience de chacun.



Conclusions

La complexification est le principal moteur de l'évolution du monde vivant. Pendant trois milliards d'années, elle a été, presque seule, le mécanisme actif d'évolution. Les processus darwiniens ne l'ont vraiment accompagnée que pendant une période de six cents millions d'années environ, mais sont pour une grande part à l'origine de la grande diversité biologique. Deux étapes de l'évolution ont abouti à un changement d'état : la naissance de la vie, puis la naissance de la conscience individuelle. Un troisième changement d'état, la naissance de la Noosphère ou conscience collective, s'accomplit sous nos yeux. Si nous atteignons, ou si nous approchons le point oméga, ce sera, selon Teilhard de Chardin, dans la concorde ou dans la discorde. Pierre Teilhard de Chardin nous semble trop influencé par Saint-Jean l'Évangéliste. Le dernier des livres composant le *Nouveau Testament* est en effet à la fois une vision de lumière et de paix et une vision de ténèbres, de malheurs et de fin du monde. Seule la première hypothèse nous semble envisageable. Ce raisonnement résulte de la nature même de la loi de complexification qui régit l'évolution du monde vivant. L'organisation en systèmes de plus en plus complexes aboutit toujours à des structures plus performantes, mieux adaptées aux situations nouvelles. En conséquence, la connaissance ne peut que triompher de l'obscurantisme et engendrer la sagesse.

Il faudra beaucoup de sagesse pour gérer les nouvelles connaissances que nous allons acquérir et en particulier sur les mécanismes de la vie que fondamentalement nous ne connaissons pas, même si nous progressons à une vitesse vertigineuse. Nous allons en effet aboutir à nous donner la possibilité de transformer notre propre patrimoine génétique.

Mais l'avenir n'est pas dans une nouvelle évolution génétique de l'Homme, même contrôlée. Notre cerveau, avec ses cent milliards de neurones interconnectés capables de synthétiser les ARN messagers à partir de plusieurs milliers de gènes à un niveau cinq fois plus élevé que chez les autres primates, comme vient de le montrer une équipe internationale encore dirigée par Svante Pääboe, a atteint un niveau de performance extraordinaire. Il ne sert à rien de vouloir encore l'améliorer, ce qui d'ailleurs n'est probablement pas biologiquement possible.

L'avenir est toujours dans la complexification, autrement dit dans la coopération de milliards de cerveaux tous différents et donc complémentaires. Le futur est dans une évolution générale contrôlée de la planète au sein d'une nouvelle organisation des sociétés basée sur la conscience collective ou noosphérique. Cette conscience collective se développera par les multiples échanges, maintenant instantanément possibles, de connaissances et d'opinions les plus diverses.

Elle permettra progressivement l'établissement d'une véritable démocratie planétaire. Notre futur est donc dans la libération des échanges régis par des règles définies en commun et applicables à l'ensemble de la planète. Ces règles devront protéger les libertés individuelles comme la diversité des cultures et permettre à chacun de vivre dans la dignité et le bien-être matériel et intellectuel et non dans l'ignorance, la misère ou la violence comme nous le voyons trop. Notre avenir est encore dans la protection des milieux et des espèces dans un environnement dont nous devons contrôler l'évolution.

Notre futur est par conséquent dans un partage équitable des richesses créées au cours de l'évolution passée et l'accès aux nouvelles richesses, matérielles et intellectuelles, générées par le développement illimité des connaissances, maintenant potentiellement accessibles à tous. Comme nous célébrons cette année Victor Hugo et que nous pouvons rêver, nous terminerons par un extrait de la *Légende des siècles*, intitulé *Tout le passé, tout l'avenir* et repris par Émile Gallé pour le vase *Les Lumineuses*.

Au lieu des mondes noirs pleins d'horribles délires,
 Qui rugissent vils et maudits,
 On entendra chanter sous le feuillage sombre
 Les Edens enivrés, et l'on verra dans l'ombre
Resplendir les bleus paradis.

Bibliographie

- ∞ BATESON, William, 1894. *Materials for the Study of Variation Treated with Especial Regard to Discontinuity in the Origin of Species*, Mac Millan and Co, London, New York.
- ∞ BATESON, William, 1916. *Problems of Genetics*, New Haven, Yale University press.
- ∞ BUFFON, Georges, Louis, Leclerc, comte de, 1848. *Ceuvres complètes*, avec des extraits de Daubenton et de Cuvier, Furne et Cie, Paris.
- ∞ CAVALIER-SMITH, Thomas, 1887. The origin of cells : a symbiosis between genes, catalysts and membranes. *Quant. Biol.*, 52, 805-824.
- ∞ CUÉNOT, Lucien, Claude, 1907. *New Experimental Researches on the Questions of Hybrids*. Seventh Inter. Congr. Zoology, pp. 99-110.
- ∞ CUÉNOT, Lucien, Claude, 1914. Théorie de la préadaptation, *Scientia*, 16.
- ∞ CUÉNOT, Lucien, Claude, 1919. L'origine des espèces et le mutationnisme, Genève, *Revue Suisse de Zoologie*, 36, 5.
- ∞ CUÉNOT, Lucien, Claude, 1921. *La genèse des espèces animales*, deuxième édition, Librairie Félix Alcan, Paris.
- ∞ CORRENS, Carl, 1900. G. Mendel's Regel über das Verhalten der Nachkommenschaft der Rassenbastarde, *Berichte der deutschen botanischen Gesellschaft*, 18, 158-168.
- ∞ CUVIER, Georges, 1834-1836. *Recherches sur les ossements fossiles*, E. d'Ocagne.
- ∞ DARWIN, Charles, 1870. *De la fécondation des orchidées par les insectes et des bons résultats du croisement*, traduit par L. Rérolle, C. Reinwald et Cie, Paris.
- ∞ DARWIN, Charles, 1878. *Des différentes formes de fleurs dans les plantes de la même espèce*, traduit par le docteur Edouard Heckel, C. Reinwald et Cie, Paris.
- ∞ DARWIN, Charles, 1864. *De l'Origine des espèces par sélection naturelle ou des lois de transformation des êtres organisés*, traduit par Clémence Royer, nouvelle édition revue d'après l'édition stéotype anglaise de 1859, avec les additions de l'auteur, Flammarion, Paris.

- ✎ ENARD WOLFGANG, Khaitovitch Philipp, Klose Joachim, Zöllner, Heissig Florian, Giavalisco Patrick, Nieselt-Struwe, Muchmore Elaine, Varki Ajit, David Rivka, Doxiadis Gaby M., Bontrop Ronald E., Pääbo Svante, 2002. Intra- and Interspecific Variation in Primate Gene Expression Patterns, *Science*, 296, 340-173.
- ✎ GALLÉ, Emile, 1892. Anomalies dans les gentianées : une race monstrueuse de *Gentiana campestris* L., Nancy, *Mémoires de l'Académie de Stanislas*, 10, 156-173.
- ✎ GALLÉ, Emile, 1900. Orchidées lorraines : formes nouvelles et polymorphisme de l'*Aceras hircina* Lindl. *Loroglossum hircinum* Reich., *Compte rendu du Congrès international de botanique à l'Exposition Universelle de 1900*, 112-117, pl. I-VI.
- ✎ GODRON, Dominique, Alexandre, 1859. *De l'espèce et des races dans les êtres organisés et spécialement de l'unité de l'espèce humaine*, 2 volumes, J.-B. Baillière, Paris.
- ✎ GODRON, Dominique, Alexandre, 1874. *Nouveaux mélanges de tératologie végétale*, 2^{ème} édition, Berger-Levrault et Cie, Nancy.
- ✎ GODRON, Dominique, Alexandre, 1874. *Des races végétales qui doivent leur origine à une monstruosité*, deuxième édition, Berger-Levrault, Nancy.
- ✎ GOULD, Stephen, Jay, 1977. *Ontogeny and Phylogeny*, Harvard University Press.
- ✎ GOULD, Stephen, Jay, 1980. *Ever Since Darwin ; Reflexion in Natural History*, Penguin.
- ✎ GOUYON, Pierre-Henri, 2000. *Les harmonies de la Nature à l'épreuve de la biologie*. Evolution et biodiversité. INRA Editions.
- ✎ HARTMANN, H. and Fedorov, A., 2002. The origin of the eukariotic cell : A genomic investigation. *PNAS*, 99, 3, 1420-1425.
- ✎ HUGO, Victor, 1877. *La légende des siècles, Tout le passé, tout l'avenir*.
- ✎ KNOLL, A. H., 1992. The early evolution of Eukaryotes : a geological perspective, *Science*, 256, 622-627.
- ✎ KRINGS, M.-L., Stone, A., Schmitz, R. W., Krainitzki, H., Stoneking, M. and Pääbo, S, 1997. Neanderthal DNA sequences and the origin of modern humans. *Cell*, 90 : 19-30.
- ✎ LAMARCK, Jean-Baptiste, Pierre, Antoine, de Monet de, 1809. *Philosophie Zoologique*, 2 volumes, Dentu, Paris.

- ∞ LAMARCK, Jean-Baptiste, Pierre, Antoine, de Monet de, 1815-1822. *Histoire Naturelle des animaux sans vertèbres*, 2^{ème} édition revue par G.P. Deshayes et H. Milne Edwards, 11 volumes, J.B. Baillière, Paris 1835-1845.
- ∞ LE DOUX, Joseph, 2002. *Synaptic Self. How Our Brains Become Who We are*. Viking, New York.
- ∞ LE TACON, François et Selosse, Marc-André, 1994. La place des symbioses mycorrhiziennes dans l'évolution de la vie, *Acta Botanica Gallica*, 141, 4, 405-419.
- ∞ LOVELOCK, James, E., 1972. Gaia as seen through the Atmosphere, *Atmospheris Environment*, 6, 579-80.
- ∞ LOVELOCK, James, 1972. *Gaia : A new look at life on earth*, Oxford University Press.
- ∞ LOVELOCK, James, E., 1988 (second edition, 1995). *The Ages of Gaia*, Oxford University Press.
- ∞ MARGULIS, Lynn, 1970. *Origin of Eukaryotic Cells*. Yale University Press.
- ∞ MARGULIS, Lynn and Sagan, Dorian, 1986. *Origins of sex. Three billion years of recombination*. New Haven. Yale University Press.
- ∞ MARGULIS, Lynn and Fester, René, 1991. *Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation*. The MIT Press, Cambridge, Massachussets, London, England.
- ∞ MAYNARD SMITH, John and Szathmary, Eors, 1995. *The major evolutionary transitions in evolution*. Oxford University Press.
- ∞ MENDEL, Gregor, 1866. Versuche über Pflanzen-Hybriden. *Verhandlungen, des naturforschenden Vereines, Abhandlungen*, Brünn 4, 3-47.
- ∞ MORGAN, Thomas, Hunt, 1936. *The Theory of the Gene*, Yale University Press, New Haven.
- ∞ NAUDIN, Charles, 1863. Nouvelles recherches sur l'hybridation dans les végétaux. *Annales sciences naturelles, 4^{ème} série, Botanique*, 19, 180-203.
- ∞ SELOSSE, Marc-André and Le Tacon, François, 1998. The land flora : a phototroph-fungus partnership ? , *TREE*, 13, 1, 15-20.
- ∞ TSCHERMACK, Eric von, 1900. Über künstliche Kreuzung bei *Pisum sativum*. *Berichte der deutschen botanischen Gesellschaft* 18, 232-239.

- ☞ TEILHARD DE CHARDIN, Pierre, 1955. *Le Phénomène humain*, Editions du Seuil.
- ☞ TEILHARD DE CHARDIN, Pierre, 1962. *L'Énergie humaine*, Editions du Seuil.
- ☞ VANINI, Julii, Cæsaris Napolitani, 1616. *Theologi, Philosophi & Juris utriusque Doctoris, de admirandis naturæ Reginae Deæque mortalium arcanis Libri IV*, soit quatre livres de Jules César Vanini, Napolitain, Théologien, Philosophe, Docteur en Droit civil & en Droit canon, touchant les secrets admirables de la nature, qui est la souveraine & la Divinité des hommes. Dédiés au maréchal de Bassompierre, avec Privilège & Approbation, Paris, Adrien Perrier.
- ☞ VRIES, Hugo de, 1900. Sur la loi de disjonction des hybrides, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), 130, 845-847.
- ☞ VRIES, Hugo de, 1901-1902. *Die Mutationstheorie*, Verlag von Veit & Comp., 2 volumes, Leipzig.
- ☞ VRIES, Hugo de, 1909. *Espèces et variétés. Leur naissance par mutation*, traduit par L. Blaringhem, Paris, F. Alcan.