

Jean-Paul Baquiast

Pour un principe matérialiste fort



DécohérenceS

Compléments du livre

"Pour un principe matérialiste fort"

Chapitre 2

L'Évolution, de la mécanosynthèse à la vie

Chapitre 2, section 1 :
Thermodynamique du non-équilibre

Chapitre 2, section 1 :
La morphogenèse artificielle et la théorie constructale

Chapitre 2, section 1 :
Un mécanisme plus général

Chapitre 2, section 4 :
Approfondir le darwinisme (suite)

Chapitre 2, section 3 :
Le Mimivirus, un monstre prometteur

Chapitre 2, section 1 :

Thermodynamique du non-équilibre*

Les travaux du Prix Nobel Ilya Prigogine ont permis de jeter un pont entre la physique et la chimie, puis entre la chimie et la biologie dans ce qui est appelé la thermodynamique du non-équilibre.

Prigogine, comme Einstein l'avait fait pour la relativité avec le calcul tensoriel, a utilisé tout un appareillage mathématique pré-existant (l'analyse linéaire de la stabilité) pour donner une interprétation nouvelle de la thermodynamique. Einstein avait utilisé le calcul tensoriel - mais aussi les travaux de Lorentz et de Poincaré. Prigogine, lui, a utilisé la dynamique non linéaire et la théorie mathématique de la dynamique qualitative. Ainsi, il a pu montrer " comment un système thermodynamiquement ouvert pouvait rester en dehors de l'équilibre ". Ce qui se traduit par des expériences simples : prenez un tube à essai dans lequel vous mettez une certaine solution chimique. Vous regardez le tube : rien ne se passe, rien ne bouge. Chauffez ce tube ou éclairez-le, c'est-à-dire apportez-lui de l'énergie : il ne se passe toujours rien. Mais modifiez un peu les concentrations de la solution et vous voyez alors apparaître des bandes sombres transversales qui disparaissent puis réapparaissent. Le cycle peut se reproduire à condition d'apporter à nouveau de l'énergie.

Si les chimistes Belousov et Zhabotinski avaient découvert ce phénomène par hasard, le physicien Prigogine et son équipe ont pu montrer que l'apparition de ces bandes, cette nouvelle structuration (appelée structures dissipatives) ne survient que pour des valeurs très précisément déterminées des concentrations moléculaires et des paramètres de la cinétique.

Expérience de Belousov-Zhabotinski

La thermodynamique du non-équilibre qui s'applique à ces réactions chimiques permet le calcul des concentrations qui font apparaître les bandes claires et sombres et la période d'apparition de ces bandes, c'est-à-dire des structures dissipatives. Comme l'on se trouve dans un milieu ouvert du point de vue thermodynamique, il était tentant d'extrapoler ces résultats au vivant. Cela a été fait, et avec succès, par exemple par Albert Goldbeter à Bruxelles (Goldbeter, 1996). Des réactions biochimiques présentant une périodicité temporelle, comme celle de la glycolyse (transformation du glucose en énergie), pouvaient être prédites par la théorie pour des êtres vivants très simples.

* Extrait du livre de Gilbert Chauvet "Comprendre l'organisation du vivant et son évolution vers la conscience", Collection Automates Intelligents, Vuibert, 2006..

Pour en savoir plus :

- Réactions oscillantes - ondes chimiques :

<http://www.faidherbe.org/site/cours/dupuis/joupord.htm>

- Des réactions oscillantes à la formation de motifs chimiques :

<http://www.di.ens.fr/~granboul/enseignement/formes/reactionsoscillantes/belousov.html>

- Portrait de phase de la réaction BZ :

<http://members.tripod.com/~RedAndr/BZPhase.htm#BZ%20Gallery>

Chapitre 2, section 1 :

La morphogenèse artificielle et la théorie constructale

L'art de la morphogenèse artificielle intéresse principalement l'ingénierie, c'est-à-dire la conception de systèmes technologiques aussi efficaces que possible. On conçoit bien en effet que si la nature a découvert le secret de la réalisation de formes et de systèmes parfaits, il serait dommage de ne pas s'inspirer d'elle.

Mais le monde naturel est-il parfait ? Il est clair que cette question n'a pas de sens. Sauf à faire appel à des théories idéalistes selon laquelle non seulement l'univers est parfait puisqu'il a réussi à survivre jusqu'à présent, mais aussi parce qu'il est capable d'auto-correction pour maintenir sa perfection face à des perturbations extérieures. On reconnaît là l'hypothèse dite Gaïa, selon laquelle l'écosystème terrestre pourrait maintenir son équilibre (ou homéostasie) en produisant spontanément les mesures correctives aux multiples agressions dont il est l'objet. Une autre version de l'univers parfait pourrait être trouvée dans l'hypothèse anthropique selon laquelle tous les paramètres caractérisant l'univers précis dans lequel nous sommes sont conformes aux exigences de l'apparition de la vie et de l'intelligence. Il s'agirait au regard de nos propres intérêts d'une forme de perfection, mais l'ennui est qu'elle n'est pas finalisée par l'objectif de produire la vie et l'intelligence. Celles-ci, dans l'hypothèse anthropique, sont les conséquences a posteriori de l'apparition d'un certain type d'univers parmi l'infinité des univers possibles. Rien ne garantit que ces paramètres favorables se maintiendront à l'avenir.

Si donc on ne saurait affirmer que la nature produit des formes parfaites, peut-on dire qu'elle produit des formes optimisées ? En ingénierie, nous l'avons dit, l'optimisation consiste à rechercher par essais et erreurs (ou par des processus de simulation numérique) les meilleures catégories de solutions possibles à des contraintes prédéfinies. Elle répond donc à une finalité fixée par l'ingénieur. Dans la nature, par définition, tout ce qui existe dans le monde physique et biologique est là parce qu'il s'est révélé viable, adapté à la survie. Il s'agit donc d'une forme d'optimisation qui peut fournir des références intéressantes à l'ingénieur recherchant des solutions inspirées de celles de la nature. Mais ce type d'optimisation n'est guidé par aucun objectif fixé a priori par qui que ce soit. Les systèmes vivants que nous pouvons étudier aujourd'hui, bien qu'ayant survécu à d'innombrables phénomènes sélectifs, peuvent présenter des défauts tels que l'ingénierie n'aurait aucun intérêt à les copier. De plus, nous l'avons dit, ils ont évolué dans des espaces fortement contraints par des lois physiques bien définies. Si l'homme veut s'affranchir de celles-ci, il devra rechercher des modes d'optimisation originaux.

Si la nature ne crée pas de formes particulièrement parfaites, et ne crée que des formes optimisées pour faire face aux conditions du passé, quel est l'intérêt de s'interroger sur les processus de la morphogenèse naturelle, c'est-à-dire de la création des formes dans la nature ? Le premier de ces intérêts est relatif au simple développement des connaissances. Nous avons vu précédemment que les hommes ont toujours cherché à comprendre pourquoi le monde était fait de tant de formes à la fois différentes et riches en régularité. La question reste plus que jamais posée aujourd'hui, alors que le progrès des sciences fondamentales comme des technologies va permettre le développement d'entités artificielles dont les propriétés et formes plus ou moins complexes ne seront pas fixées nécessairement a priori par les hommes (ni par la nature) mais pourront émerger à partir de la combinaison d'éléments simples mis en œuvre par une science comme la robotique.

Cependant, la compréhension de la morphogenèse naturelle présente aussi un grand nombre d'avantages pratiques. Nous avons vu que la genèse des formes physiques ou vivantes obéit à des lois générales, telles que la recherche du meilleur rendement énergétique, dont nul ingénieur n'aurait la prétention de s'affranchir. Même si on ne veut pas copier servilement les formes naturelles, il est indispensable de connaître ces lois, et la façon dont elles contraignent le développement des formes naturelles, afin d'en tirer le meilleur parti.

Existe-t-il des méthodes pour imiter de la façon la plus efficace que possible les formes optimisées de la nature ? Une méthode empirique aussi vieille que l'humanité consiste à faire ce que l'on pourrait appeler une copie analogique globale du système naturel. On prend ce dernier comme un tout dont on ne cherche pas à analyser l'organisation de détail (le rôle des divers éléments les uns par rapport aux autres). A partir de ce modèle, on essaye de construire un objet dont les apparences soient aussi proches que possible de celles du modèle. Reste ensuite à tester le nouveau système, afin de vérifier si ses fonctionnalités sont proches ou non de celles du système naturel. Dans les cas simples (par exemple le dessin d'une arme copiant la forme d'une défense d'animal) le résultat est satisfaisant. Dans les cas plus complexes, comme l'imitation d'une aile d'oiseau, les échecs sont la règle. L'inventeur empirique doit alors s'engager dans un long processus d'essais et d'erreurs afin de rapprocher l'artefact du modèle. Le plus souvent, il n'y arrive pas et renonce à son projet.

Une méthode plus sophistiquée consiste à décomposer le modèle en éléments dont on étudie les rôles respectifs dans l'obtention de la performance finale. On appelle cela en ingénierie l'"analyse par éléments finis" ou "finite-element analysis". On construit ensuite l'artefact en conjuguant des éléments artificiels aussi proches que possible, anatomiquement et fonctionnellement, des éléments naturels. L'apparence globale de l'artefact peut alors être assez différente de celle du modèle, mais peu importe si le système donne satisfaction. Par la suite, le résultat peut être optimisé de façon continue, en faisant appel à l'analyse et à la conception assistées

par ordinateur. C'est un processus de ce type qui a été suivi dans la conception des ailes des avions. On sait qu'aujourd'hui une analyse plus fine des ailes des oiseaux montre aux ingénieurs qu'ils pourraient désormais fabriquer des ailes prenant des formes et des consistances différentes selon les configurations de vol et les missions.

Nous verrons dans le chapitre 5 qu'aujourd'hui, les méthodes de la programmation et de la robotique évolutionnaires sont aussi utilisées pour obtenir des produits finis optimisés, sans partir d'un cahier des charges d'optimisation fixé à l'avance dans tous ses détails. On laisse les "parents", composants matériels et logiciels, entrer en compétition darwinienne à l'intérieur de contraintes fixées d'une façon assez large, et on conserve les "descendants" qui paraissent les plus aptes à satisfaire ces contraintes. La responsabilité de la conception est alors reportée très largement sur l'intelligence artificielle.

Quel rapport existe-t-il entre ces nouvelles méthodes de conception de formes artificielles optimisées, et ce que Adrian Bejan (Sur Adrian Bejan, voir Wikipedia http://fr.wikipedia.org/wiki/Adrian_Bejan), diplômé du MIT et professeur d'ingénierie mécanique à l'université Duke de Caroline du Nord, a nommé la "théorie constructale" dont il se présente comme l'inventeur ? Rappelons les grandes lignes de cette dernière.

Cette théorie s'inscrit dans la ligne des recherches relatives à la morphogenèse : pourquoi y a-t-il des formes (ou processus formalisés) dans la nature plutôt que rien ? Pourquoi ces formes semblent-elles se développer selon des algorithmes comparables sinon communs alors qu'elles apparaissent dans des domaines très différents : le minéral, le vivant, l'organisation et le fonctionnement des sociétés ?

La théorie constructale repose, comme beaucoup de théories modernes, sur une définition de la complexité devenue quasi obligée : la complexité, dans la nature, naît de la combinaison de processus élémentaires. Elle est dite ascendante ou émergente en ce sens que les résultats de cette combinaison ne peuvent être déduits de l'analyse des processus élémentaires générateurs. Le tout est plus que les parties, et survient de façon imprévisible. Cela paraît une banalité de le dire, mais beaucoup de gens s'imaginent encore que la complexité est descendante, c'est-à-dire qu'elle est donnée d'emblée et peut être réduite en éléments simples par l'analyse. Bejan présente à cet égard la théorie fractale comme contribuant (malgré les mérites qu'elle possède par ailleurs) à ce contresens. Pour la théorie fractale, les formes s'engendrent par fragmentation en répétant un dessin identique à chaque niveau descendant ou montant. Elles le font en application d'un algorithme constant, que l'on peut en principe analyser et réutiliser pour obtenir des résultats identiques. Il suffit de connaître la forme caractérisant un niveau pour en déduire toutes les formes que l'on trouvera aux niveaux supérieurs ou inférieurs. Or cela n'est vrai ni

dans la nature ni en algorithmique informatique (dans le domaine des automates cellulaires (Sur les automates cellulaires, voir chapitre 4, encadré final) souvent évoqué en matière de fractals). La combinaison des règles simples fait toujours apparaître, à un moment ou un autre, une complexité inattendue et non explicable par une démarche réductionniste. Ainsi les formes adoptées par les végétaux dans la nature ne résultent pas uniquement de la reproduction, sur des échelles de plus en plus larges, d'une forme primitive comportant l'organe assurant la photosynthèse (la feuille), l'organe permettant la capture des éléments nutritifs du sol (la racine) et les organes de transfert et de liaison (la tige). Chaque espèce et au sein de l'espèce chaque végétal particulier développent des formes contraintes par la nature du sol, le climat et la compétition avec d'autres espèces.

Ainsi présentée, la théorie constructale n'a rien de très original. Elle est à la source de toutes les démarches dites précisément constructibles, utilisées notamment en Intelligence Artificielle (Sur l'Intelligence Artificielle, voir chapitre 5). Ce qui est intéressant est que Adrian Bejan propose de l'appliquer à la construction de systèmes artificiels ou artefacts optimisés, s'inspirant des processus d'optimisation des formes à l'œuvre dans la morphogenèse naturelle que nous avons présentée plus haut. C'est en effet d'abord pour résoudre des problèmes d'ingénierie qu'Adrian Bejan propose sa théorie constructale. Comment aboutir facilement à des solutions aussi optimisées (certains disent parfaites, mais le mot nous l'avons vu est excessif) que celles existant généralement dans la nature ?

Les études en plein développement relatives à la morphogenèse naturelle paraissent montrer que la construction de formes dans la nature résulte de l'action de lois physiques et chimiques, analysées depuis bientôt deux siècles par les sciences du macroscopique (On n'a pas besoin ici de faire appel aux processus quantiques, puisque le niveau d'approximation permis par la physique classique suffit largement à résoudre les problèmes globaux que pose la compréhension de la morphogenèse naturelle). Ces lois sont en très grand nombre : lois de la diffusion gazeuse, lois de la dilatation en fonction de la température, lois de l'écoulement des fluides, lois des frottements, etc. C'est une chance pour l'ingénieur, puisque le plus souvent il n'a pas besoin d'inventer des algorithmes spécifiques. Les formules mathématiques dont il a besoin existent déjà pour l'essentiel et peuvent être réutilisées sans problème, tant du moins que l'on restera au niveau d'approximation dont peut se satisfaire l'industrie d'aujourd'hui. Si on veut plus de précision, il sera possible de partir de l'existant afin d'affiner les équations.

Peut-on trouver un principe commun derrière toutes ces lois ? La question n'est pas sans intérêt, pratique mais surtout théorique. L'existence d'un tel principe commun nous permettrait de comprendre le fait, déjà signalé ci-dessus, que la morphogenèse naturelle ne génère pas n'importe quelles formes. Même si celles-ci paraissent incroyablement diverses, on sait bien qu'en physique comme en biologie, l'évolution, fut-elle darwinienne, s'exerce dans des fourchettes étroites. On ne verra

pas, par exemple, les vagues de la mer ou les dunes de sable dépasser une hauteur limite, quelle que soit la force du vent. Et ceci dans tous les domaines. Pourquoi ? Si nous admettons que les systèmes étudiés s'inscrivent dans les principes de la thermodynamique et subissent par conséquent la loi de l'entropie croissante, il faut que pour conserver ou accroître leur "ordre", ils réalisent des dépenses d'énergie en puisant dans des sources extérieures. Dans ce cas, les systèmes les plus aptes à survivre, qu'ils soient physiques ou biologiques, seront ceux qui consommeront le moins d'énergie - ou plus exactement ceux dont la consommation d'énergie sera parfaitement ajustée aux exigences de leurs performances. En d'autres termes, les systèmes naturels, ayant survécu à des milliards d'années d'évolution, sont ceux qui sont optimisés au regard de la consommation d'énergie (ou de la consommation de ressources rares quand l'énergie dont ils ont besoin n'est pas obtenue directement). On peut montrer que c'est ce qui se produit en général dans la nature. Ce sera là le principe commun, ou un des principes communs, que nous recherchions. Ainsi en retire-t-on l'impression fautive que la nature est parfaite.

Dans ces conditions, si l'ingénieur veut réaliser un système artificiel qui soit aussi efficace qu'un système naturel, notamment en termes de consommation d'énergie, il lui suffit en principe de copier le système naturel. On analyse celui-ci dans ses détails et on reconstruit un système artificiel en accumulant les détails favorables à l'obtention d'une solution optimisée. Mais nous avons vu que cette approche globale (ou descendante) n'aboutissait généralement pas, car les systèmes naturels sont trop variés et détaillés pour permettre une analyse. Il faut procéder autrement.

C'est ce qu'Adrian Bejan propose de faire de façon systématique, en utilisant sa méthode constructale. Si l'ingénieur veut réaliser un système complexe optimisé, il découpera ce système en unités aussi petites que possible, pour lesquelles il deviendra alors relativement facile de définir les conditions de fonctionnement optimisé. On retrouve l'analyse par éléments finis évoquée plus haut. La forme élémentaire optimale étant trouvée, on reliera plusieurs de ces unités en réseau dont les lois physiques, là encore, permettent de définir la forme optimale. De proche en proche, en remontant par ce procédé les échelles une à une, on arrive à une forme globale optimale par rapport aux contraintes et objectifs désirés. Cette forme optimisée est donc construite de façon ascendante, compte tenu des caractères propres des unités qui la composent, elles-mêmes optimisées chacune à son niveau. Il est évident que sans l'ordinateur, cet assemblage de formes optimisées destiné à être lui-même globalement optimisé ne serait pas possible.

Adrian Bejan et ceux qui s'inspirent de sa théorie donnent de nombreux exemples de l'intérêt de la méthode constructale. Tout laisse penser qu'elle se répandra de plus en plus, et sera appliquée à tous les problèmes d'ingénierie et de design faisant appel aux lois de la physique ordinaire. Elle pourra servir aussi dans le domaine de la construction de systèmes d'intelligence artificielle ou de vie

artificielle optimisés au regard de contraintes non physiques (rapports performance-coûts).

Chapitre 2, section 1 :

Un mécanisme plus général

N'existe-t-il pas un mécanisme évolutif beaucoup plus général, bien moins connu, qui intéresserait le cosmos tout entier. Nous avons rappelé que, selon les théories cosmologiques actuellement admises, le cosmos est né d'un événement unique, le Big Bang ou le phénomène qui en a tenu lieu. Il est admis que depuis le Big Bang, la matière visible de l'univers a constamment évolué, depuis les nuages de poussières et protogalaxies jusqu'aux galaxies semblables à la nôtre. Au sein des galaxies, les astres évoluent eux-mêmes de façon relativement semblable : création d'un disque en rotation autour d'une proto-étoile, apparition des planètes, évolution de l'étoile elle-même jusqu'à sa disparition sous forme de géante rouge ou pour certaines de supernova. Sur les planètes de type terrestre, la matière physique évolue selon des cycles lents. Pour ce qui concerne la Terre, une des voies selon laquelle s'est faite cette évolution a permis l'apparition de la vie à partir de molécules pré-biologiques.

Il est certain qu'aujourd'hui beaucoup de choses restent mystérieuses concernant le cosmos et son évolution – à supposer qu'il y ait vraiment évolution. En quoi consiste et comment évolue la matière noire inconnue qui représenterait une grande partie de la masse globale de l'univers ? Quelle est l'énergie noire, assimilée à la constante cosmologique, qui combat l'effet de la gravité et provoque une expansion semble-t-il accélérée de l'univers ? Que deviennent les astres dont la masse est suffisante pour qu'en phase évolutive terminale ils s'effondrent sur eux-mêmes et deviennent des trous noirs ? Mais ces questions sans réponse n'empêchent pas certains cosmologistes de considérer que l'évolution de la matière visible obéit à des lois communes que l'on doit pouvoir retrouver depuis les corps les plus grands jusqu'aux objets physiques et même biologiques les plus petits de notre environnement terrestre.

Pour Eric J. Chaisson (1) ces lois s'articuleraient autour de la façon dont le flux d'énergie primordial (né lors du Big Bang et peut-être alimenté en permanence depuis lors) est utilisé par les corps physiques et biologiques pour accroître leur complexité. Il s'agit d'une énergie « libre » à la disposition des organisations matérielles et biologiques, qui l'utilisent en conformité avec les principes de la thermodynamique loin de l'équilibre pour se transformer et accroître leur complexité. Il en résulte une compétition entre les organisations qui favorise celles qui optimisent l'usage de l'énergie en rapport avec leur masse. Prenons l'exemple d'un astre. Si sa masse est très importante, il brûle tout son hydrogène trop rapidement et disparaît très vite sans produire de complexité. A l'opposé, notre

soleil dispose d'une masse qui lui permet d'équilibrer longtemps la pression gravitationnelle et la force d'expansion née de la fusion de son hydrogène. Il est donc capable d'optimiser ses ressources énergétiques de sorte qu'il entretient pendant des milliards d'années autour de lui un cortège de planètes sur certaines desquelles la vie a pu apparaître. Mais, revers de la médaille, il se transformera en fin de vie en géante rouge et ne pourra pas atteindre l'état explosif d'une supernova. Il ne répandra donc pas dans son environnement les éléments lourds à partir desquels d'autres formes de vie pourraient se former dans d'autres systèmes solaires. Autrement dit, il n'aura pas de descendance et n'aura pas contribué à l'évolution cosmique. Ainsi les organisations que l'évolution cosmologique sélectionne sont celles qui restent au milieu de deux extrêmes : consommer trop d'énergie et brûler trop vite leurs réserves ou ne pas en consommer assez et ne pas avoir assez de ressources pour se complexifier.

Eric Chaisson applique les mêmes principes aux logiques d'évolution et de sélection des structures et organismes terrestres. Les formes qui apparaissent et qui survivent sont celles qui utilisent au mieux l'énergie nécessaire à leur construction et à leur résistance aux agressions du milieu. Il n'y a rien là de finaliste non plus que de biologique. Prenons l'exemple souvent cité d'un cristal de neige. Pour que celui-ci se forme, les molécules d'eau doivent se rapprocher jusqu'à adhérer et ne pas être rejetées. Bien que les collisions initiales entre molécules se produisent tout à fait au hasard, les molécules en mouvement sont guidées par les forces électromagnétiques jusqu'à ce qu'elles trouvent des positions favorables sur la surface du cristal. Si une molécule arrivant au hasard se trouve positionnée à un endroit favorable à la croissance du cristal, elle est « sélectionnée ». Sinon, elle est rejetée. Sa venue initiale résulte du hasard, mais non sa sélection. De plus, quand le cristal atteint un état d'équilibre thermodynamique, il ne peut plus accepter de molécules et son évolution s'arrête. Eric Chaisson remarque à juste titre que le terme de sélection, dans ce type d'évolution, paraît peu opportun. Il n'existe aucun agent qui exercerait une sélection, en éliminant les moins adaptés. Les objets qui survivent sont ceux qui restent après que les autres ont disparu. Il préfère le terme d'élimination non aléatoire. Dans l'exemple des cristaux, un grand nombre de ceux engagés dans un processus de formation ont disparu parce qu'ils étaient mal conformés pour résister aux forces de destruction. Seuls ont survécu ceux répondant aux contraintes d'équilibre nécessaire à la formation de ce type d'objet.

L'hypothèse selon laquelle existe au plan cosmologique un principe général d'évolution qui se retrouve à tous les niveaux d'organisation de l'univers est satisfaisante pour l'esprit, même si elle n'est pas vraiment vérifiable vu que nous ignorons encore de quoi l'univers est fait dans ses profondeurs. Il existerait ainsi selon cette hypothèse un processus commun (a great unifier) qui, en amont de et en parallèle à l'évolution biologique, agirait sur l'ensemble des structures matérielles (2). Son fondement serait l'optimisation de l'utilisation de l'énergie, qu'il s'agisse de l'énergie cosmologique primaire ou des formes d'énergies spécifiques que nous

retrouvons sur Terre. Les entités biologiques et les entités sociales humaines n'y échapperaient pas, en sous-jacence des autres formes d'évolution complexifiante, génétiques et culturelles, qui se sont greffées progressivement sur le processus évolutif primaire à base d'optimisation de l'énergie. Nous verrons quand nous aborderons la question de l'apparition du langage, que ce soit chez les humains ou chez les robots, que la nécessité d'optimiser l'emploi de l'énergie est un facteur essentiel orientant les choix en matière de symboles langagiers.

1 : Eric J. Chaisson dirige le Wright Center for Science Education à la Tufts University de Medford, Mass. Il a publié un article sur ce sujet, sous le titre The great Unifier, dans le NewScientist du 7 janvier 2006, p. 36.

2 : Inutile de préciser que l'auteur de cette hypothèse ne fait pas allusion à un processus d'inspiration divine, contrairement à ce que pourrait laisser penser le terme anglais de great unifier qu'il utilise.

Chapitre 2, section 4 :

Approfondir le darwinisme (suite)

Nous devons, au jour où ce livre est écrit, mentionner d'autres approches qui toutes permettent de mieux comprendre les mécanismes de l'évolution, notamment au niveau de la reproduction. Le schéma darwinien s'en trouve ainsi approfondi, ce qui lui permettra de mieux résister aux critiques des spiritualistes.

La biologie de l'ARN

On considérait jusqu'à ces derniers temps l'ARN comme le serviteur dévoué mais sans initiative de l'ADN, dont il assurait la duplication des sites codants lors de la construction cellulaire. La double hélice de l'ADN ou plus exactement les portions de celle-ci identifiées comme des gènes, c'est-à-dire comme portant les instructions permettant de commander la fabrication des protéines, avaient en effet jusqu'à présent focalisé l'attention. L'ARN – ARN dit messenger – était considéré uniquement comme la recette que la cellule devait lire pour fabriquer la protéine commandée par le gène, c'est-à-dire par la portion d'ADN s'exprimant sous la forme dudit messenger. Mais on a découvert qu'une grande partie du génome ne code pas pour permettre la fabrication de protéines. On a parlé d'ADN-poubelle, parce que l'on considérait qu'il s'agissait de portions du génome ne servant à rien (ou ne servant plus à rien) conservées parce que personne ne se charge de faire le ménage dans ce dernier. Aujourd'hui, on découvre que cet ADN, qu'il vaudrait mieux qualifier d'ADN de deuxième ligne, joue de nombreux rôles importants. Cela permettrait, mieux que la négligence de la femme de ménage cellulaire, d'expliquer pourquoi il a survécu à la sélection naturelle. Il sert notamment ainsi à fabriquer des fragments d'ARN qui circulent dans les cellules.

Le rôle de ceux-ci a été longtemps obscur. On soupçonne aujourd'hui que cet ARN est encore plus important à la vie de la cellule – et donc de l'organisme – que les protéines. Ceci explique la persistance de cet ADN non codant au long de l'évolution. Mais les expérimentations restent difficiles, l'ARN étant instable et peu observable. On lui prête cependant de nombreuses propriétés pouvant être importantes, notamment celle de catalyser les réactions chimiques (1). On conçoit que, dans l'hypothèse de l'auto-évolution, l'existence d'un agent aussi polyvalent s'exprimant tout au long de la vie du génome, à partir de ses éléments non-codants (et parallèlement à l'activité codante du génome) permettrait d'expliquer pourquoi certaines fonctions adaptatives puissent apparaître et se transmettre au sein des

organismes, qu'il s'agisse de simples bactéries ou d'organismes pluricellulaires complexes. Il ne s'agirait plus du tout alors de mutations s'étant produites au hasard mais d'une véritable co-évolution de l'organisme et du milieu avec lequel il interagit.

Le transfert d'ADN par franchissement de la barrière germinale

Des observations de plus en plus nombreuses montrent par ailleurs aujourd'hui que la barrière germinale réputée étanche protégeant l'intégrité de la partie codante du génome peut être franchie par divers facteurs extérieurs, résultant de l'activité de l'organisme dans son milieu. Il en résulte que le génome est modifié de la même façon que s'il avait subi une mutation. Mais ces modifications peuvent être de bien plus grande ampleur. Elles sont provoquées en laboratoire par des manipulations diverses relevant du génie génétique. Mais dans la nature, elles se produisent spontanément, pour des causes diverses. Certaines sont accidentelles et pourraient être rangées dans la catégorie des mutations aléatoires. C'est le cas lorsque des particules fortement énergétiques, par exemple provenant d'émissions de rayons cosmiques, pénètrent dans la cellule et provoquent des mutations génétiques. Mais d'autres sont systémiques, internes au système cellulaire et contribuant à son auto-réparation et à son adaptation. Ainsi, dans les cellules circulent, outre les éléments d'ARN déjà évoqués, des morceaux d'ADN (ADN circulant) qui peuvent s'introduire dans les génomes et modifier de façon plus ou moins importante l'économie du génome tout entier.

Le transfert d'ADN, commun chez certaines cellules comme les globules blancs, peut aussi se faire entre cellules d'espèces différentes (Horizontal gene transfer). C'est lui qui est craint dans le cadre de la contamination par des organismes au génome artificiellement modifié. Mais il semble répondre à des besoins très anciens permettant de répondre spécifiquement à certains changements environnementaux, notamment en ce qui concerne les réactions immunitaires.

Le parasitisme et la symbiose

Une cause encore plus répandue de modifications adaptatives du génome, cela dès les origines de la vie, relève du parasitisme et de la symbiose, qui permettent à des organismes différents de s'associer pour mettre en commun leurs propriétés. Dans les cas de symbiose allant jusqu'à l'apparition d'une nouvelle espèce, un nouveau génome résulte du rapprochement des deux génomes antérieurs. La symbiose est considérée comme le facteur le plus efficace aux origines non seulement de la biodiversité mais de la constitution des organismes

complexes, par association d'organismes plus élémentaires assurant des fonctions vitales spécialisées. Gilbert Chauvet, là encore, en a précisé les règles, notamment en proposant le concept d'auto-association stabilisatrice (Voir ci-dessous, section 6). La symbiose fait aujourd'hui l'objet de nombreuses études. Nous ne pouvons les évoquer ici. Remarquons, contrairement à ce qui a été dit parfois, que la symbiose n'est pas à ranger dans la catégorie des événements authentiquement aléatoires. On ne se marie pas avec n'importe qui mais avec un partenaire présentant des traits favorables à une vie partagée (2). Nous sommes donc bien là dans le domaine de l'auto-évolution.

La variation facilitée

D'autres hypothèses aboutissant à préciser le mécanisme darwinien classique sont maintenant régulièrement proposées par les généticiens et biologistes voulant répliquer avec des arguments scientifiques aux défenseurs du Dessein Intelligent. Sous le titre de *The plausibility of Life*, deux biologistes évolutionnaires (3) discutent les origines des organes et organismes biologiques complexes. Ils présentent l'hypothèse de la "variation facilitée" (*facilitated variation*) qui selon eux permet de répondre à la question de savoir comment des mutations génétiques survenant au hasard ont pu produire des organes complexes, tel que l'oeil.

Ce livre caractérise la nouvelle attitude des darwiniens, attaqués sur tous les fronts par l'incroyable offensive de l'Intelligent Design (ID). Face à des idéologues qui, soutenus par les milieux politiques et religieux les plus conservateurs, tentent de démontrer que seule la main de Dieu a pu organiser l'évolution, les scientifiques matérialistes ont décidé de réagir, plutôt que traiter ces opposants par le mépris. On comprend mal encore en Europe la virulence des débats, si bien que les biologistes européens n'ont pas encore jugé bon de se mobiliser contre un mouvement qui n'a pas encore vraiment traversé l'Atlantique. Mais peut-être ont-ils tort.

Quoi qu'il en soit, comme toute théorie est perfectible, les critiques faites au darwinisme par les défenseurs de l'ID permettent de perfectionner les hypothèses relatives à l'évolution, ce qui ne peut être inutile. Le livre de Kirschner et Gerhart en donne l'exemple.

Selon les auteurs, le problème de la variation, posé par Darwin dès les origines, avait été occulté par les tenants de la Synthèse Moderne (4) qui insistent sur les mécanismes de l'hérédité. Or la variabilité des organismes est infiniment plus grande que l'on imagine. Elle ne résulte pas seulement de mutations génétiques ponctuelles mais du fait que, depuis le niveau génétique jusqu'à celui des organes, les organismes sont constitués de blocs modulaires. Les mutations génétiques ne produisent pas de variations au hasard. Au contraire, tous les organismes ont

maintenu intact au cours de deux milliards d'années un ensemble de mécanismes vitaux relatifs au métabolisme, à la reproduction de l'ADN, aux processus de croissance. Ce sont ces éléments, conjointement avec des schémas corporels globalement homogènes, qui ont servi de plate-forme aux variations plus visibles.

Ils prennent l'exemple de la défense de l'éléphant, des bois du cerf et de l'éperon du narval. On peut les considérer comme des innovations différentes, caractérisant une grande complexité spécifique. Mais il apparaît que c'est le même type de cellule qui guide leur développement dans chacune des espèces considérées. La structure modulaire de la vie signifie que ces appendices peuvent se développer selon des modalités différentes sans affecter le reste de l'organisme. Ils ne sont que les expressions différentes d'un même type d'activité génétique découlant du processus de la sélection naturelle, dans lequel seules survivent les variantes utiles dans un environnement déterminé. Le corollaire de ceci est que des variations génétiques minimales peuvent produire des changements corporels importants, tout au moins dans l'apparence. Ainsi les yeux des insectes, comme ceux des autres espèces, y compris les mammifères, qui semblent présenter des complexités différentes, partagent d'importants processus biochimiques modulaires de construction et de mise en relation des composants.

Cette hypothèse permet de faire l'économie de celle selon laquelle des mutations convergentes se produisant dans des espèces différentes plongées dans des environnements différents donneraient des résultats voisins (comme l'oeil) bien que provenant de sources distinctes. On retrouverait sous une autre forme la théorie selon laquelle la vie, partie d'une origine simple mais commune, obéit à des logiques de base sous-jacentes elles-mêmes communes, que des études de physiologie intégrative pourraient aujourd'hui mettre en évidence. Ces logiques s'inspirent des processus de la mécanosynthèse et de la morphogenèse constructale évoqués dans la section 1 de ce chapitre. Le darwinisme n'est pas remis en cause, mais situé dans une approche plus globale.

Sur le plan politique et philosophique, qui nous intéresse aussi ici, les auteurs de *The plausibility of Life* militent, non seulement pour une contre-offensive généralisée de tous les scientifiques matérialistes contre l'ID, y compris auprès du grand public et des écoles, mais pour une relance interdisciplinaire de toutes les études portant sur les différents mécanismes de l'évolution, afin d'enrichir une théorie darwinienne qui ne peut être considérée comme définitive. Maintenir une grande activité interdisciplinaire de recherches et d'échanges dans l'étude des phénomènes évolutionnaires constitue la seule façon efficace de répondre aux insinuations de l'ID et aux dégâts produits par cette doctrine dans l'esprit scientifique, au moins aux Etats-Unis.

Mais il ne faut pas se faire d'illusion. Les promoteurs de l'ID, dans leurs blogs et autres publications, ont déjà présenté *The plausibility of life* comme une

nouvelle preuve de la validité de leurs thèses. Il leur est toujours possible d'expliquer que d'éventuelles convergences dans le sens des mutations font partie du grand dessein divin.

Aux origines des bactéries. Le marché commun des gènes

Nous pourrions rédiger un livre entier présentant les travaux en cours visant à compléter la définition néo-darwinienne de l'évolution, sans remettre en cause les fondements du darwinisme. C'est évidemment impossible. Le lecteur sera sans doute intéressé, cependant, par la thèse récemment présentée par deux chercheurs vétérans, le britannique Freeman Dyson et l'américain Carl Woese (5). Elle concerne les origines des bactéries, qui sont les formes les plus anciennes de vie identifiées indiscutablement à ce jour. Carl Woese, dans un article publié en juin 2004 par les *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, *A New Biology for a New Century*, s'est engagé dans une entreprise audacieuse consistant à réécrire en partie la Théorie de l'Evolution. Il s'en est pris au dogme selon lequel toutes les formes de vie aujourd'hui présentes sur Terre descendent d'une forme primordiale de proto-cellules apparue il y a quelque 3 milliards d'années. Ce dogme est souvent présenté comme darwinien, encore que certains des historiens ayant étudié la pensée de Darwin disent que celui-ci n'avait pas des idées aussi arrêtées sur les origines des espèces. C'est en s'appuyant sur les grandes quantités d'informations génétiques aujourd'hui recueillies dans les bases de données génomiques que Woese eut l'idée de rechercher d'où pouvaient provenir les trois grandes familles identifiées aujourd'hui, archa, bactéries et cellules à noyau. Et surtout, pourquoi semblaient-elles être apparues simultanément ?

Pour Woese, on ne peut pas comme le font traditionnellement les arbres de l'évolution, faire descendre les trois ordres d'une branche unique. Elles proviendraient au contraire d'un univers peu organisé de proto-cellules, qui échangeaient constamment du matériel génétique entre elles, au sein d'un environnement commun dont les effets sélectifs s'appliquaient à toutes. Il s'agissait d'une espèce de marché commun des gènes, qualifié par Woese de transfert génétique horizontal (*horizontal gene transfer*), où les espèces n'existaient pas encore. Ce transfert permettait aux diverses sortes de cellules d'échanger les processus biochimiques et catalytiques inventés par les plus efficaces d'entre elles, de sorte que toute la communauté en profitait. Un tel mécanisme a permis à l'évolution de s'étendre rapidement à la Terre entière. De nouvelles solutions en matière de codage pouvaient être découvertes simultanément par des cellules différentes évoluant en parallèle et être ré-assemblées dans de nouvelles cellules par transfert horizontal de gènes. Cette thèse est d'un grand intérêt et ses applications seront nombreuses (6).

Dans un article du NewScientist daté du 11 février 2006, Freeman Dyson reprend cette hypothèse et souligne qu'ainsi, pendant une durée non négligeable, l'évolution a procédé sur un mode non darwinien. Il ne veut pas dire que le mécanisme fondamental mis en évidence par Darwin, les mutations/sélections, ne se produisait pas. Il ne s'agissait pourtant pas du processus généralement qualifié de sélection darwinienne résultant de la compétition pour la survie entre espèces non interfécondes.

Mais pourquoi ou comment les espèces sont-elles alors apparues ? Freeman Dyson explique avec humour que le phénomène s'est produit un certain jour « catastrophique » où une cellule particulière a muté d'une façon si efficace qu'elle a pris un temps d'avance sur ses concurrentes et n'a donc plus voulu (en fait n'a plus été capable de) partager son invention avec elles. Elle les a donc surclassées. Ce fut la première archéobactérie. Ensuite vinrent les premières bactéries puis les premières cellules eucaryotes, sans doute indépendamment les unes des autres. Il assimile le "marché" des processus protéomiques primitifs au marché des logiciels. Si celui-ci est ouvert, c'est-à-dire si les inventions ne sont pas brevetées, tout le monde en profite. Si les brevets existent, ceux qui inventent perçoivent une prime par rapport à leurs concurrents, autrement dit, ils évoluent dans le sens vertical. Mais ils n'évoluent plus dans le sens horizontal et l'ensemble de la communauté perd en adaptabilité et en efficacité productive. Les défenseurs des logiciels libres apprécieront particulièrement cette métaphore (qui montre d'ailleurs que ce concept de logiciel libre a plus de portée philosophique qu'on ne pense).

En effet, l'évolution darwinienne entre des espèces aux génomes fermés est nécessairement lente et surtout cloisonnée. Elle dépend de la survenue aléatoire de mutations qui sont elles-mêmes sélectionnées au sein de niches environnementales étroites. Certes sur des centaines de millions d'années, le processus aboutit à la variété et à l'adaptation fine que l'on sait et dont l'homme est un des produits. Mais en même temps se créent des fragilités. Les menaces actuelles pesant sur la biodiversité en sont l'illustration. Du fait de l'homme, des extinctions massives se sont produites et continueront à se produire. Malheureusement les espèces survivantes n'auront pas la possibilité de se réapprovisionner sur un marché libre des brevets génétiques auxquels seuls les scientifiques auront accès. Elles seront livrées à elles-mêmes, c'est-à-dire que pratiquement elles n'auront pas le temps de muter pour produire des descendants mieux adaptés. Elles ne pourront donc pas réagir rapidement aux menaces que nous leur faisons subir. Mais, et c'est encore plus malheureux, les espèces évoluées complexes seront les seules à en souffrir. Il semble bien au contraire que le marché commun des échanges génétiques continuera à fonctionner au profit des bactéries et des virus, héritiers selon Woese des proto-cellules initiales. Ces micro-organismes sont de ce fait et deviendront de plus en plus les pires ennemis des espèces évoluées.

Freeman Dyson ne se borne pas à paraphraser Carl Woese. Il ajoute à la théorie de ce dernier des perspectives du plus grand intérêt. Selon lui, et nous le

suivrons bien volontiers dans cette approche, on peut distinguer trois époques dans l'évolution : l'époque pré-darwinienne du marché commun des gènes, que nous venons de décrire – l'époque darwinienne, où l'évolution prend une forme spectaculaire avec l'apparition et le développement des espèces – et une époque qui commencerait de nos jours et qu'il qualifie de post-darwinienne. Dans celle-ci, l'homme, jusque là principalement responsable des extinctions massives d'espèces, pourrait se révéler un nouvel et inattendu créateur de biodiversité à grande échelle. Mais comment ?

C'est, on le devine, en pronostiquant, comme beaucoup de futurologues, l'explosion au XXI^e siècle des biotechnologies, analogue à celle des infotechnologies au XX^e siècle, qu'il s'appuie pour décrire cette ère post-darwinienne (Nous développons ces perspectives au chapitre 5). Il estime que, dans un avenir proche, chacun pourra disposer de boîtes de manipulations génétiques en « kits » permettant de réaliser en série l'analyse et la recombinaison de génomes, afin de faire apparaître et d'élever de nouvelles espèces vivantes hybrides ou chimères (Voir par exemple les sites des entreprises Interchim ou Biolynx). Cette activité, que les grandes firmes de biogénétique voudraient se réserver par des brevets, se développera de telle sorte que l'on retrouvera, dans le monde entier, un marché commun des gènes et des génomes analogues à celui qui caractérisait la vie à ses débuts. Très vite, écrit-il, la Terre et pourquoi pas aussi les planètes proches (qui seraient ainsi "terraformées" grâce à l'importation d'organismes adaptés à leurs environnements) se trouveront couvertes de nouveaux systèmes vivants entre lesquels s'exercera une sélection féroce, mais qui produiront en contrepartie de nouveaux écosystèmes qui pourront être favorables à une relance de la vie en général, sous de nouvelles formes. Il s'agit d'une hypothèse optimiste. On verrait ainsi l'homme ressusciter des espèces disparues et parallèlement créer de nouvelles « chimères » ou même des espèces tout à fait nouvelles capables, au sein du règne animal comme dans celui du règne végétal ou bactérien, de s'adapter mieux que les anciennes espèces à un environnement devenu hostile. Dans une hypothèse plus pessimiste, que les esprits chagrins n'ont pas manqué d'opposer aux idées de Dyson, les hommes créeraient, par sottise ou par malignité, un véritable enfer d'espèces nuisibles à l'homme comme aux formes supérieures d'organisation.

Physique quantique et auto-évolution

Nous avons plusieurs fois évoqué les très probables liens entre les mécanismes à l'œuvre dans les systèmes physiques au niveau quantique et ceux à l'œuvre dans les systèmes biochimiques. A priori pourtant il n'y en a pas, notamment parce qu'aucun ensemble de molécules biologiques ne semble capable d'offrir à un micro-état quantique un isolement suffisant pour lui éviter la décohérence (c'est-à-dire pour lui éviter de perdre son état quantique et se

matérialiser sous forme d'une entité du monde macroscopique) le temps nécessaire à ce qu'il accomplisse un travail utile dans un organisme biologique. Ainsi les propriétés spécifiques aux particules quantiques, notamment l'état de superposition ou l'intrication, que l'on espère utiliser dans les calculateurs quantiques pour réaliser des opérations impossibles à un ordinateur ordinaire, ne paraissent pas pouvoir se produire dans les cellules vivantes. Pourtant de plus en plus de chercheurs s'efforcent actuellement de démontrer le contraire. Un article de Paul Davies du Centre australien d'Astrobiologie à l'Université Macquarie, Sydney, en fait le recensement (The Vital Spark, par Paul Davies, NewScientist, 11 décembre 2004, p. 28).

Une intuition simple suggère selon lui qu'il conviendrait d'approfondir ces perspectives. La science se heurte aujourd'hui à deux grands mystères. Le premier est celui de la vie (en ce qui concerne son origine mais aussi en ce qui concerne les mécanismes de l'évolution – pour ne pas parler de ceux propres au fonctionnement des neurones du cerveau). Le second est celui du monde quantique. Il y a tout lieu de penser qu'ils pourraient s'éclairer réciproquement. Nous avons déjà évoqué ces questions au chapitre 1. Inutile d'y revenir. Pour Paul Davies, il serait temps que les hypothèses correspondantes soient reprises très sérieusement par la Big Science, peut-être à l'occasion des travaux concernant l'ordinateur quantique. Il pense notamment qu'explorer le thème d'un ordinateur quantique biologique permettrait de montrer que les idées que nous nous faisons sur la décohérence sont encore bien sommaires. Des systèmes biologiques ont peut-être appris, dès l'origine de la vie, à abriter certains micro-états quantiques des risques de décohérence, au moins le temps nécessaire (quelques nanosecondes ?) pour leur permettre de faire tout ce qui dans les processus vitaux nous paraît encore incompréhensible.

1 : On trouvera dans le NewScientist (Move over DNA, Master and Commander, par Philip Cohen, NewScientist, 27 novembre 2004, p. 36) une liste des fonctions attribuées à l'ARN à l'intérieur de la cellule, par exemple outre l'ARN messager, l'ARN transfert, l'ARN ribosomal, etc.

2 : Les bactéries entretenant des relations symbiotiques avec le système digestif, dont la masse serait équivalente à celle des cellules du corps, sont très variées. Mais gare à l'intrusion d'une salmonelle (*salmonella enterica*) dont le moins que l'on puisse dire est qu'elle n'est pas bienvenue.

3 : The plausibility of life (Yale University Press, octobre 2005), par Marc Kirschner, (fondateur du département de biologie des systèmes à la Harvard Medical School) and John Gerhart (biologiste à l'University of California, Berkeley).

4 : Le terme de Synthèse Moderne, dite aussi Néo-darwinisme, désigne la synthèse entre le darwinisme, les lois de Mendel et celles de la reproduction du génome au niveau moléculaire. Voir note ci-dessus, concernant le néo-darwinisme.

5 : Freeman Dyson, actuellement professeur émérite à Princeton, a servi dans le Bomber Command de la RAF pendant la seconde guerre mondiale. Quant à Carl Woese, il s'était rendu célèbre dans les années 1970 en « inventant » le règne des archéobactéries, là où avant lui on ne voyait pas d'intermédiaires entre les bactéries et les eucaryotes (cellules à noyaux dont nous procédons tous). Rappelons que les « archea » identifiées par Woese ont été retrouvées depuis dans tous les environnements extrêmes, ce qui tend à prouver que la vie a commencé aussi bien dans l'extrême chaud, l'extrême froid, l'extrême acidité, l'extrême sulfurisation, l'extrême pression... et que par conséquent elle pourrait bien exister sous cette forme ailleurs que sur Terre, notamment dans les planètes du système solaire.

6 : Nous avons vu que ce mécanisme d'échange de matériel génétique a été aujourd'hui détecté non seulement chez les bactéries mais entre génomes d'espèces évoluées. Les phénomènes d'acquisition de résistances en résultent.

Chapitre 2, section 3 :

Le Mimivirus, un monstre prometteur

Dans la section ci-dessus, nous évoquons les travaux de Carl Woese, "inventeur" des archéobactéries, et la question posée par Woese et Dyson : d'où pouvaient provenir les trois grandes familles identifiées aujourd'hui, archa, bactéries et cellules à noyau. Et surtout, pourquoi semblaient-elles être apparues simultanément ? D'où leur hypothèse, celle d'un « marché commun » des gènes, antérieur à l'apparition de ces trois branches. Il s'agissait selon les auteurs cités d'un univers peu organisé de proto-cellules qui échangeaient constamment du matériel génétique entre elles, au sein d'un environnement commun dont les effets sélectifs s'appliquaient à toutes. Ce marché commun a été nommé par Woese le transfert génétique horizontal (horizontal gene transfer). Ceux de nos lecteurs qui souhaitent approfondir cette question s'intéresseront sans doute à une découverte récente, réalisée principalement par des chercheurs français, celle du mimivirus.

La découverte du Mimivirus (pour mimicking microbe) s'inscrit dans la réflexion sur les proto-cellules. S'agissait-il de virus ou de virus archaïques ? Certains de ces virus réputés archaïques existent-ils encore parmi nous ? Le Mimivirus paraît en passe de bouleverser une nouvelle fois les conceptions que nous pouvons nous faire de la vie et de ses origines.

Rappelons d'abord la définition du virus. Rien n'est plus éluusif que ce micro-organisme. Il s'agit de petits éléments d'ADN ou d'ARN enveloppés de protéines, intermédiaires entre la vie et la non-vie. Ils n'ont pas de membranes, ce ne sont donc pas des cellules, ni même ces cellules élémentaires que sont les bactéries. Ils ne prennent vie que lorsqu'ils envahissent les cellules afin de les utiliser pour se reproduire. Cela en fait les tueurs que l'on connaît : fièvre Ebola, VIH, grippe, etc. Mais d'innombrables autres virus ne sont pas pathogènes. Rappelons que les virus n'étant pas des cellules ne sont pas sensibles aux antibiotiques.

C'est le botaniste hollandaise Martin Beijerinck qui a soupçonné leur existence au début du 20e siècle en recherchant les causes d'une affection végétale, la Mosaïque du tabac. Les extraits de feuilles infectés demeuraient virulents après passage par un filtre en porcelaine alors que ce filtre aurait dû arrêter une bactérie. Mais l'agent de la mosaïque du tabac n'a été identifié qu'en 1935 grâce à l'invention du microscope électronique. Le chimiste Wendell M. Stanley, qui obtint pour cela le prix Nobel, montra que le virus pouvait être effectivement considéré comme intermédiaire entre un organisme vivant et un composé physico-chimique.

Aujourd'hui, le débat ne s'est pas éclairci. Où se situent les virus, entre les trois branches de micro-organismes officiellement reconnues : les eucaryotes, multicellulaires disposant de cellules à noyau, les bactéries monocellulaires avec ou sans noyau (dites procaryotes en ce cas) et les archa, découvertes par Carl Woese, bactéries sans noyau qui constitueraient peut-être le tiers de toute la matière vivante existant sur la Terre. On considérerait les virus comme dépendant des organismes sans lesquels ils ne peuvent se reproduire. Donc ils seraient apparus après eux-ci et non avant. Mais cette vision est difficilement compatible avec les effectifs de virus que l'on pense exister sur Terre, sans doute en majorité dans les océans comme le généticien Craig Venter vient de le montrer en accomplissant un tour du monde en bateau destiné à prélever et étudier des échantillons de virus océaniques. Le nombre des virus identifiés à ce jour est infime par rapport à ceux qui ne le sont pas. On estime parfois que, mis bout à bout, l'ensemble des particules virales existant sur Terre formerait une ligne longue de 10 millions d'années-lumière. Les plus nombreux de ces virus n'apparaissent pas menaçants pour les espèces complexes comme la nôtre mais font néanmoins partie intégrale de leur vie.

Les modes de répllication des virus sont très variés, avec de nombreuses différences dans la façon d'infecter les cellules hôtes. Les souches de virus à ADN, comme ceux de la variole ou de l'herpes, peuvent vivre des siècles en dehors d'un hôte, en se reproduisant par division avec un taux minimum d'erreur. Les virus à ARN se reproduisent vite et en mutant fréquemment. On estime que ces derniers sont les descendants des formes vivantes existant avant l'apparition de la double hélice, un monde qui avait été qualifié de "monde de l'ARN". Ils dirigent la copie de leur génome sans ADN et, de ce fait, plus rapidement mais avec beaucoup plus d'erreurs – ce qui était un avantage à une époque où la vie n'avait pas encore choisi de s'incarner dans des formes stables. Aujourd'hui, c'est de nouveau un avantage face aux méthodes de lutte anti-virales adoptées par l'homme. Les virus de la grippe, notamment celui de la grippe aviaire, sont aujourd'hui connus, au moins de nom, du monde entier. Le virus de HIV également. Mais celui-ci est encore plus pernicieux. Une fois qu'il s'est introduit dans la cellule de l'hôte, sous forme d'un brin d'ARN, il y fabrique son propre double brin d'ADN qui s'incorpore à celui de l'hôte et se transmet avec lui. Il est qualifié pour cette raison de rétrovirus.

Le monde des virus s'est enrichi récemment des viroïdes, fragments d'ARN sans enveloppes protéiniques dont le rôle est aujourd'hui inconnu. Les viroïdes n'ont pas de gènes et cependant peuvent provoquer des maladies. D'autres organites, nommés satellites, ne peuvent se reproduire que dans un virus, lui-même hébergé par un hôte. Mentionnons pour être complet les prions, protéines complexes dont le rôle, utile ou nuisible à la vie cellulaire, reste encore en partie mystérieux. On les exclut à ce jour de la catégorie des êtres vivants. Rappelons enfin que l'ingénierie génétique fabrique aujourd'hui des ARN entièrement « chimériques », en enfilant des paires de bases pour reconstituer certains virus, existant déjà comme celui de la poliomyélite, ou inconnus à ce jour dans la nature,

mais pouvant potentiellement s'y développer et devenir dangereux pour l'homme. Nous avons évoqué ces travaux à propos de la biologie synthétique.

Dans le panorama déjà surprenant des virus, la découverte du Mimivirus a eu l'effet d'une petite bombe, dont les retombées sont encore loin d'être toutes perceptibles. Le Mimivirus est plus complexe génétiquement, non seulement que les virus mais que beaucoup de bactéries. Cette découverte oblige à redéfinir le concept plus général de virus. On est aujourd'hui tenté de faire des virus une branche à part dans l'arbre de la vie. Mais cette branche ne serait pas récente. Elle pourrait au contraire être l'ancêtre des trois autres. On pourrait alors considérer que les virus seraient à l'origine même de la vie, origine dont on sait qu'elle demeure encore mystérieuse. Nous allons examiner rapidement ces diverses perspectives.

On peut attribuer à Bernard La Scola, bactériologiste au sein de l'équipe de Didier Raoult (1) l'honneur d'avoir identifié, en travaillant sur des germes supposés de la maladie du légionnaire transmis par des collègues britanniques, ce qui lui est apparu immédiatement comme un vrai monstre. Il s'agit d'un organisme montrant des traits caractéristiques des virus, notamment une architecture cristalline. Mais sa taille, l'espèce de chevelure dont il s'entoure, en font un virus différent des autres. Autrement dit, ce que l'on pensait être une bactérie responsable de la maladie du légionnaire et d'autres affections pulmonaires voisines, infectant préférentiellement les amibes vivant dans les réservoirs d'eaux tièdes et qui avait déjà été baptisé le Bradfordcoque (du nom de la ville britannique de Bradford où s'était déclenché en 1992 une épidémie pulmonaire), était en fait un virus, mais un virus très spécial.

La séquence du Mimivirus est désormais connue, suite aux travaux des équipes de Marseille. Le Mimivirus est géant d'abord par sa taille, qui le place à la limite de la visibilité des microscopes optiques ordinaires. Son génome, d'environ 1,2 million de bases est deux fois plus grand que celui du virus qui détenait le record de taille avant lui, un bactériophage (0,67 Mb). Il est également beaucoup plus grand que le génome d'une vingtaine d'organismes unicellulaires (archaebactéries et eubactéries). Les chercheurs y ont identifié environ 1200 gènes potentiels dont 298 auxquels ils ont pu attribuer une fonction. Les virus se contentent généralement de 10 gènes, les plus grands en ayant 300 (dont le rôle, en ce cas, n'apparaît pas clairement).

De plus l'analyse du génome du Mimivirus indique la présence d'une trentaine de gènes habituellement présents chez les organismes cellulaires et absents des virus. Parmi ceux-ci, on trouve plusieurs gènes de la synthèse des protéines, une propriété tout à fait inhabituelle pour les virus, qui utilisent normalement la machinerie de l'hôte qu'ils infectent pour synthétiser leurs propres protéines. On trouve également des protéines de réparation de l'ADN, d'aide au repliement des protéines et des enzymes du métabolisme, jamais identifiées auparavant chez aucun virus.

Cependant, même si le Mimivirus présente quelques caractéristiques cellulaires, il possède encore plusieurs des critères propres aux virus, en particulier l'absence de métabolisme énergétique et un mode de multiplication intracellulaire typiquement viral, supposant l'infection d'organismes hôtes, ici les amibes.

Le Mimivirus offre donc des traits qui ne permettent pas de l'assimiler aux autres virus non plus qu'aux trois catégories d'organismes cellulaires reconnues aujourd'hui, eucaryotes, bactéries et archa. Tout laisse penser qu'il s'agit d'une lignée distincte et vraisemblablement très primitive de virus à ADN. Certaines de ses caractéristiques se retrouvent dans les trois familles de micro-organismes. On peut en déduire qu'elles étaient antérieures à celles-ci. Dans ce cas, le Mimivirus ou des pré-Mimivirus auraient joué un rôle capital dans l'invention des formes cellulaires. Face à lui, les microbiologistes sont un peu dans la situation où seraient des paléanthropologues découvrant une espèce aujourd'hui vivante qui pourrait être placée dans l'échelle de l'évolution au point de divergence des divers embranchements de grands singes.

Mais alors les prédécesseurs supposés du Mimivirus, comme le Mimivirus lui-même, obligerait à revoir l'idée bien acquise que les virus ne se développent qu'en parasitant des organismes cellulaires plus complexes. Mieux encore, si l'archéo-Mimivirus supposé avait été à l'origine des trois branches actuelles de micro-organismes, il faudrait admettre qu'il aurait évolué vers, à la fois, plus de complexité (les cellules) et moins de complexité (les virus actuels). Ces deux types d'évolution se seraient révélés également fructueux, ce qui démontre que le retour à plus de simplicité, ou si l'on préfère à moins de complexité, peut dans certaines conditions être un avantage. Seul le Mimivirus actuel, pour une raison évolutive inconnue, aurait conservé le grand nombre de gènes de la famille archaïque. Apparemment, cela n'a pas nui à sa survie, mais ne l'a pas rendu cependant plus efficace en termes de reproduction que ses divers descendants, car il est resté confiné, autant que l'on sache à ce jour, dans une niche assez étroite, le milieu amibien. Pour reprendre une autre comparaison tirée de la zoologie, on pourrait voir en lui une espèce de cœlacanthe du monde des organismes pré-cellulaires et pré-viraux.

Après l'analyse du génome du Mimivirus, les travaux de séquençage de tous les micro-organismes existants, à ARN ou à ADN, sont en train de se multiplier, avec recherche de références croisées. Les équipes marseillaises et leurs collègues de par le monde ont déjà entrepris de rechercher d'autres espèces de Mimivirus, dans les algues, la mer ou les tours réfrigérantes. Ces travaux renforcent l'hypothèse selon laquelle ce serait les virus qui seraient à l'origine de la vie, il y a quelques 4 milliards d'années.

Pourrait-on alors envisager une époque où les échanges de matériels génétiques se faisaient très librement, avec des taux de mutations considérables,

entraînant des mécanismes d'élimination par sélection darwinienne infiniment plus nombreux qu'aujourd'hui ? On pourrait alors reprendre pour caractériser cette époque les termes de marché commun des gènes ou de transfert génétique horizontal évoqués en début de cet encadré.

Cela pourrait conduire également à la recherche d'une cellule mère qui aurait à un moment donné résulté de l'interaction des bactéries primitives et des virus et qui aurait réussi à s'imposer et survivre.

C'est ce que pense Patrick Forterre, biologiste moléculaire à Paris-Sud (Patrick Forterre, <http://www-archbac.u-psud.fr/LabHome/PForterre/ePF.html>). Il a organisé en juillet 2005 une conférence internationale en France à la fondation Les Treilles, sur le thème « Les origines du noyau cellulaire ». C'est ce noyau qui permet de distinguer clairement les cellules proprement dites des bactéries. Le noyau est le centre de commandement de l'ensemble des mécanismes métaboliques et reproductifs des eucaryotes. Avant lui, la vie pouvait être considérée comme un bouillon de culture confus, où se mêlaient et interféraient très librement les molécules prébiotiques non vivantes et les virus ou pré-virus. Elle s'est structurée avec l'apparition des organismes à noyaux. Mais comment le noyau est-il apparu ? La question préoccupe les biologistes depuis un siècle et demi. La découverte du Mimivirus permet de défendre un scénario séduisant. Un gros virus à ADN semblable au Mimivirus aurait pu à une certaine époque s'introduire dans une archéo-bactérie ou une bactérie. Mais au lieu de la détruire, il s'y serait incorporé et y aurait survécu sous forme d'une nouvelle structure interne, le noyau. L'hypothèse est confortée par l'observation selon laquelle le Mimivirus et les noyaux des cellules des eucaryotes se répliquent dans le cytoplasme des cellules de façon voisine. Notons cependant que pour d'autres biologistes, le noyau s'est développé selon une formule analogue à celle de la formation des mitochondries, par introduction et adoption d'une bactérie.

Patrick Forterre a baptisé l'organisme primitif du nom de LUCA, ou Last Universal Common Ancestor. Celui-ci, selon l'opinion qui se répand, était viral. Dans ce cas, les hommes seraient basiquement des descendants des virus ou de l'organisme archaïque à l'origine des trois ordres d'organismes vivants. Ces considérations conduisent à regarder les virus avec un œil moins craintif que celui que nous leur offrons. La très grande majorité des virus sont inoffensifs pour leurs hôtes. Beaucoup sont sans doute utiles. Mais nous ne pouvons pas encore le mettre en évidence. Ce sont des parasites, certes, mais les parasites survivent parce qu'ils sont non seulement inoffensifs mais utiles à l'organisme parasité. On pourrait les comparer au très grand nombre de séquences d'ADN dont le rôle n'est pas élucidé et qui constituent ce que l'on appelle à tort l'ADN poubelle (junk DNA).

Si l'hypothétique LUCA avait été un virus, pourquoi alors ne serait-il pas arrivé sur Terre à bord d'un astéroïde ? On pense que certaines formes de vie primitives peuvent survivre aux épreuves des voyages interplanétaires et des rentrées dans les atmosphères denses. Cette hypothèse est à la base de la

Panspermie, qui reporte il est vrai plus loin dans le temps et dans l'espace, mais ne résout pas, la question de savoir comment ces virus primordiaux seraient apparus dans l'univers.

1 : La séquence complète du Mimivirus, le plus grand virus à ADN connu, a été publiée en ligne dans la revue Science le 14 octobre 2004 (Science, The 1.2 Mb genome sequence of Mimivirus, Didier Raoult, Stéphane Audic, Catherine Robert, Chantal Abergel, Patricia Enesto, Hiroyuki Ogata, Bernard La Scola, Marie Suzan, Jean-Michel Claverie). Les équipes du CNRS à l'origine de la découverte sont les groupes de Didier Raoult (Unité des Rickettsies et pathogènes émergents, UMR 6020 CNRS/Université de la Méditerranée, Marseille) et de Jean-Michel Claverie (Laboratoire Information Génomique et Structurale, UPR 2589 CNRS, Marseille).