

16 LA NATURE DE LA VIE : UNE TRANSMISSION D'INFORMATION

○ 161 QU'EST-CE QUE LA VIE ? (LE PARADOXE DE SCHRÖDINGER)

Par le mot vie, nous entendons le fait de se nourrir, de grandir, de se reproduire et de dépérir par soi-même. Cette première définition que proposait Aristote¹ est encore pertinente et les définitions plus modernes l'expriment seulement d'une autre manière quand elles disent que la vie est un système original de transformation de l'énergie (c'est pourquoi nous avons commencé par voir d'où vient cette énergie). Mais la vie utilise moins de 1% de l'énergie solaire, et il faut comprendre, en deuxième analyse, que la vie est un système de codage et de transmission de l'information portée par l'énergie absorbée.

En effet, un physicien éminent, ERWIN SCHRODINGER, a fait remarquer qu'un animal, un homme, ou une plante adultes ne consomment pas d'énergie, puisqu'ils en rendent au milieu extérieur autant qu'ils en reçoivent (en particulier quand ils transpirent en transformant l'eau qu'ils ont importée sous forme liquide en vapeur incolore inodore et sans saveur). Par exemple, un homme qui reçoit 3 000 calories par jour, et garde un poids constant, les rend sous forme de chaleur sensible et, surtout, de chaleur latente (cf. annexe 1-3) ; il fonctionne comme une machine thermodynamique transformant de l'énergie de haute qualité en énergie "dégradée"(cf. annexe 1-2) mais, pour le comprendre, il faut revenir au problème de l'originalité du vivant et au rôle éventuel du hasard, des probabilités et de la nécessité.

○ 162 LA VIE EST REGIE PAR LES LOIS DE LA PHYSIQUE

I1 162.1 Aspects biochimiques

La chimie du XVIIIe siècle était essentiellement une science d'analyse ; celle du XIXème a donné de plus en plus de place aux synthèses minérales, puis organiques, mais elle n'a pas su réaliser la synthèse des grosses molécules biologiques. Pour les premiers biochimistes, la construction de ces édifices regroupant des milliers d'atomes paraissait un prodige de la nature. Les recherches rigoureuses de LOUIS PASTEUR, montrant que la génération spontanée des microbes est impossible, ont contribué à ancrer dans les esprits le caractère extraordinaire, au sens originel du mot, de ces molécules.

Dans ce contexte, il est normal que l'on ait alors pensé que la vie était un phénomène improbable, un accident de la nature. On a même tenté de calculer la probabilité de synthèse spontanée des protéines. En effet, une molécule d'ADN est un arrangement des 4 nucléotides fondamentaux en une chaîne d'environ 4.000 maillons. La probabilité de la synthèse spontanée d'une molécule d'ADN paraît alors, *a priori*, aussi faible que celle de la sortie de quatre mille nombres pairs consécutifs à la roulette d'un casino. Ce type de calcul avait beaucoup impressionné plusieurs biologistes du milieu du XXe siècle, qui en avaient conclu que la vie n'avait pas pu apparaître spontanément sur la Terre. Mais cela reposait sur l'idée que la probabilité d'un événement pourrait être définie comme la limite de la fréquence observée de cet événement. Mais il faut être plus précis et se souvenir que le calcul de la probabilité – définie comme étant égale au rapport du nombre de cas "favorables" au nombre de cas "possibles" – suppose que tous les cas possibles sont équiprobables. En fait, ils ne sont pas tous également probables *a priori*, et il faut faire appel à des calculs de chromodynamique quantique pour connaître leurs probabilités. Et il faut aussi regarder

¹ De l'âme, Livre II, ch 1 : 412 a-b

d'autres aspects avant de conclure.

I1 162.2 Aspects thermodynamiques

Dans un domaine plus théorique, les thermodynamiciens découvraient progressivement la signification du principe de Carnot, selon lequel les systèmes isolés tendent statistiquement vers un "désordre" maximal, par transformation de toute l'énergie disponible en chaleur, c'est-à-dire en agitation désordonnée des molécules constituantes. (cf. l'annexe 1-2, à la fin du présent chapitre).

La synthèse biologique des grosses molécules fragiles (thermolabiles) que sont les sucres, les graisses et les protéines paraissait, aux yeux de certains, aller à l'encontre de ce principe physique, et de nombreux biologistes admettaient plus ou moins implicitement que la biologie était un domaine scientifique très particulier, situé hors du champ d'application de la physique.

Ainsi, quand LOUIS PASTEUR a découvert que l'acide tartrique produit par certaines réactions biochimiques comprenait un seul isomère, l'acide tartrique "gauche" (alors que les deux isomères apparaissent en quantités égales dans les réactions chimiques qui ont lieu en dehors des êtres vivants), il paraissait logique d'en déduire que les phénomènes biologiques ont des caractères originaux (la "chiralité", dans le cas présent), qui les différencient nettement des phénomènes étudiés en chimie minérale. Mais c'était aller un peu trop vite parce que l'affaire est plus complexe (& 211).

I1 162.3 Entropie, néguentropie et information

162.31 Un retour de pendule

Une réaction ne pouvait manquer de se dessiner et, par exemple, E. SCHOFFENIELS (1973) montre que des réactions apparemment peu probables ont, en fait, des chances non négligeables de se produire si l'on tient compte des structures moléculaires dans l'espace à trois dimensions.

De même, si une auto-synthèse des tartrates est amorcée par une première molécule "gauche" (selon un processus analogue à l'ensemencement des nuages par des cristaux d'iodure d'argent qui font cesser la surfusion des gouttelettes d'eau), il est normal que toutes les molécules suivantes soient aussi des molécules "gauches". X. SALLANTIN (2000 ET 2003) relie cette particularité à des propriétés fondamentales de la matière.

NIELS BOHR (1885-1962) avait vu que les phénomènes biologiques ne devaient pas être étudiés comme les autres : dans toutes les expériences sur les organismes vivants, il doit rester une incertitude sur les conditions physiques auxquelles le système est soumis, et la liberté laissée à l'organisme doit être suffisamment large pour lui permettre de nous cacher ses secrets ultimes. ?

La raison pour laquelle les systèmes biologiques ne peuvent pas être étudiés en faisant seulement appel aux lois que les physiciens utilisent habituellement est clairement exposée par le physicien E. SCHRODINGER (né en 1887 et mort en 1961, qui avait osé demander Qu'est-ce que la vie ?) : Tout ce que nous connaissons sur la structure des êtres vivants conduit à penser que leur activité ne peut pas être réduite aux manifestations des lois habituelles de la physique. Et ce n'est pas parce qu'il faudrait faire intervenir une quelconque nouvelle force contrôlant le comportement des atomes dans les organismes vivants, mais c'est parce que leur structure est différente de tout ce qui est étudié dans les laboratoires de physique. De manière analogue, un ingénieur connaissant seulement le fonctionnement des machines à vapeur qui examinerait un moteur électrique serait prêt à admettre qu'il ne comprend rien aux principes de fonctionnement de ce nouveau moteur. (*in*

What's Life, 1972, Atomisdat, p. 77 ; c'est moi qui ai souligné le mot habituelles).

E. SCHRODINGER ne dit nullement que la vie échappe aux lois de la physique, il rappelle seulement que les lois utilisées habituellement ne suffisent pas pour comprendre le fonctionnement des êtres vivants. Actuellement, la physique a considérablement progressé et les spécialistes de la physique quantique manipulent des outils extrêmement puissants (en particulier la chromodynamique quantique) qui pourront peut-être expliquer le comportement inhabituel des molécules biologiques (P. PERRIER, 1998).

Sur le plan thermodynamique, l'affaire est encore plus simple : il suffit de faire attention à l'énoncé du principe de Carnot pour voir que l'accroissement de l'entropie est inéluctable seulement dans les systèmes isolés (les exemples donnés au paragraphe 8 de l'annexe 1-2 placée à la fin de ce chapitre aideront à comprendre la différence entre un système isolé et un système fermé). Or, la biosphère est un système fermé (puisqu'elle n'échange pratiquement pas de matière avec le reste du cosmos), mais elle ne constitue pas un système isolé (puisqu'elle reçoit en permanence de l'énergie solaire). En conséquence, elle peut "dégrader" cette énergie radiative de "haute qualité" pour la transformer en chaleur, et peut ainsi "exporter" de l'entropie (et importer de la néguentropie, c'est-à-dire de l'information).

Cette diminution locale de l'entropie n'est pas en contradiction avec le deuxième principe de la thermodynamique. En effet, ce principe reste valable si l'on considère l'ensemble constitué par la Terre et le Soleil, où le total de la production d'entropie reste toujours positif : en résumé, le Soleil envoie de l'énergie de haute qualité (longueur d'onde voisine de 0,5 micron = 500 nanomètres) vers la Terre ; la Terre renvoie de l'énergie de moins bonne qualité, parce que sa longueur d'onde est plus grande (10 microns) ; une partie de cette différence de qualité d'énergie est acquise par la biosphère sous forme de néguentropie lors de chaque capture d'un photon par la chlorophylle lors de la photosynthèse.

Ce n'est pas le seul cas où un rayonnement est capable de structurer un matériau désordonné : un faisceau d'ions d'hélium frappant une couche mince d'un alliage amorphe de fer et de platine déplace les atomes jusqu'à ce qu'ils se structurent en couches horizontales. Pour mieux comprendre ce phénomène, il faut regarder de plus près la notion d'entropie.

162.32 L'évolution spontanée des systèmes isolés

L'entropie est présentée, dans l'annexe 1-2, sous son aspect relatif aux échanges de chaleur et d'énergie. Pour passer à la notion de néguentropie et d'information, nous commencerons ici par rappeler l'expérience de GAY-LUSSAC, réalisée en 1806.

Cette expérience consiste à laisser un gaz se détendre dans le vide et à constater que cette détente, qui ne produit pas de travail, ne modifie pas la température ; elle est réalisée en ouvrant le robinet qui relie un ballon A, plein de gaz, à un ballon B, de volume identique, où est réalisé un vide aussi poussé que possible (figure 16-1).

A l'échelle macroscopique, le système passe ainsi spontanément de l'état 1 (ballon A plein et ballon B vide), qui est un système hétérogène, (c'est-à-dire un système structuré), à l'état 1-2, où A et B sont pleins (système homogène = système déstructuré). Cette expérience simple exprime parfaitement l'un des aspects les plus forts du deuxième principe de la thermodynamique, qui peut être énoncé ainsi :

Toute transformation spontanée d'un système thermiquement et radiativement isolé en augmente l'homogénéité, et le déstructure par une augmentation de son entropie globale.

Cette formulation du deuxième principe conduit à dire que l'entropie est approximativement analogique au "désordre" des molécules. Malheureusement, cette analogie est trop imprécise pour être vraiment utile. L'annexe 1-2 essaiera d'aller un peu plus loin dans ce domaine.

Depuis l'apparition de la vie, les systèmes biologiques se sont de plus en plus structurés, sans échapper au second principe de la thermodynamique. Pour mieux le comprendre, il faut préciser un peu les notions de néguentropie et d'information.

162.33 Indétermination et information

Revenons à l'expérience de GAY-LUSSAC, dans son état 1, où le gaz est seulement présent dans un ballon, mais supposons que nous ne savons pas si le gaz est dans le ballon A ou s'il est dans le ballon B. Un observateur qui veut savoir quel est le ballon plein peut placer chacun d'eux sur l'un des plateaux d'une balance, pour voir quel est le ballon le plus lourd, et il a une chance sur deux de trouver le gaz dans le ballon A et une chance sur deux de le trouver dans B. Autrement dit, cette observation lui apporte de l'information sur le contenu des deux ballons qu'il examine.

S'il examine 4 ballons, A, B, C, D, dont un seul serait plein, il devrait faire deux fois plus d'observations : il pourrait placer deux ballons sur chacun des deux plateaux d'une balance, par exemple A et B d'un côté, C et D de l'autre. Si, par exemple, le plateau portant C et D est le plus lourd, il lui suffit de recommencer l'expérience en plaçant C sur un plateau et D sur l'autre.

S'il examine 8 ballons, c'est-à-dire 2×3 ballons, le même raisonnement montre qu'il lui faudrait 3 expériences. S'il examine, plus généralement, 2^n ballons, il lui faut n expériences pour acquérir l'information correspondant à la réponse à la question : "quel est le ballon qui contient le gaz ?". Formalisons ceci en un calcul de probabilités : s'il y a deux ballons, la probabilité de trouver le gaz dans A est égale à $1/2 = 1/2^1$ et une seule expérience suffit pour savoir où est le gaz. S'il y a quatre ballons, la probabilité est égale $1/4 = 1/2^2$, et deux expériences sont nécessaires. S'il y a 2^n ballons, la probabilité est égale $1/2^n$, et n expériences sont nécessaires pour acquérir l'information souhaitée.

Cet exemple très simple permet de comprendre pourquoi les ingénieurs qui se sont souciés de l'information transmise par les lignes téléphoniques et du codage des messages (H. NYQUIST, 1924, 1928 ; R. HARTLEY, 1928 ; C. SHANNON, 1948) ont été conduits à prendre pour unité d'information la réponse à la question "oui ou non", quand les deux éventualités ont autant de chances de se produire, c'est-à-dire quand la probabilité de chaque éventualité est égale à $1/2$. A. LIBCHABER (2003) a écrit que L. Szilard a ensuite montré que le coût énergétique d'une unité d'information est égal à $k_B T \ln 2$, où k_B est la constante de Boltzmann ($= 1,38 \cdot 10^{-16}$), mais cette formule non équilibrée peut nous laisser perplexe (*cf.* l'annexe 2 ? 11).

Pour les expériences plus complexes, où le voile d'indétermination est progressivement levé par des observations successives, les remarques du paragraphe précédent aident à comprendre pourquoi la quantité d'information moyenne acquise en regardant l'issue d'une expérience est estimée par le nombre d'observations élémentaires qu'il faut effectuer pour lever l'indétermination qui existait avant l'expérience. On démontre que ce nombre est exactement le logarithme à base 2 de l'inverse de la probabilité et l'on arrive à la formule de BRILLOUIN (1959) :

$$I(E) = \log_2 \text{ de l'inverse de la probabilité de E} \\ = \log_2 (1/P) = - \log_2 P$$

Quand la probabilité P est égale à $1/2^n$ (c'est-à-dire quand l'expérience réalisée est exactement la combinaison de n observations élémentaires du type pile ou face), la formule précédente devient :

$$I(E) = \log_2 (2^n) \\ I(E) = n$$

Le comité consultatif international télégraphique et téléphonique a donné à l'unité d'information le nom de binon (CULLMANN, 1968) puis de shannon, dont l'abrégié est "sha". Ainsi, une expérience telle que pile ou face, dont les deux issues ont chacune une probabilité égale à $1/2$, apporte exactement 1 sha d'information. Une expérience qui peut produire n issues équiprobables permettra d'acquérir n shannons d'information.

Si les issues possibles, numérotées 1, 2, ..., i, ..., n, ne sont pas équiprobables, et si chacune d'elles correspond à n_i cas possibles, la formule précédente devient :

$$I(E) = \log_2 1/P \\ \text{avec : } P = \frac{n_1! n_2! \dots n_i! \dots n_n!}{N!} \quad N = \sum n_i$$

$$\text{soit : } I(E) = \log_2 \frac{N!}{\prod n_i!}$$

L'approximation de Stirling conduit alors à la formule de Shannon :

$$H(E) = - \sum P_i \cdot \log_2 (1/P_i)$$

et il apparaît ainsi que la formule de Shannon n'est qu'une approximation de la formule de Brillouin, qui est plus fondamentale (parce qu'elle ne fait pas inférence à un univers infini et inconnu).

●162.33 Néguentropie et information

Dans l'expérience de GAY-LUSSAC, quand on ouvre le robinet qui sépare les deux ballons, l'entropie thermodynamique du système augmente ; sa néguentropie diminue, et l'information que l'on pouvait obtenir en observant la présence (ou l'absence) du gaz est devenue nulle, puisque l'on est certain de trouver le gaz dans les deux ballons. Ce rapprochement permet de comprendre pourquoi néguentropie et information sont synonymes, quoique ces deux quantités concernent habituellement deux échelles d'observation extrêmement différentes.

Les liaisons entre l'entropie et l'information sont analysées en détail par L. BRILLOUIN (1959) ; pour nous, il suffit de comprendre que la quantité d'information contenue dans une structure (telle que l'ensemble des deux ballons de Gay-Lussac, ou un message télégraphique ou le code génétique) peut être transmise en étant "portée" par une énergie assez faible. S. FRONTIER (1981) souligne que "les applications de la théorie de l'information ne font que croître", et M. GODRON (2007) montre pourquoi les calculs d'information sont un outil utile pour analyser l'hétérogénéité des habitats et des paysages (cf. ? 54).

●163 Evolution des systèmes et stabilité

●63.1 Entropie maximale et structuration

Les systèmes physiques isolés suivent la tendance très générale imposée par le principe de Carnot et se "déstructurent" inévitablement, en allant vers des états de plus en plus probables et de plus en plus stables ce qui correspond à un accroissement de leur entropie (cf. annexe 1-2). Cette déstructuration peut se réaliser directement par la désagrégation des nucléons (protons et neutrons), s'il se confirme qu'ils sont instables à l'échelle de 10^{33} années. L'espace serait alors sans doute finalement rempli uniquement par des photons et des neutrinos (P. SALATI, 1985).

A l'opposé de cette tendance, des structurations apparaissent localement, par exemple dans les "cellules de Bénard" : un liquide placé dans une casserole est entraîné dans des tourbillons qui s'ordonnent quelquefois en cellules de forme approximativement hexagonale, qui ressemblent aux cellules des "sols polygonaux". La structure "dissipative", qui apparaît alors, correspond à une diminution locale de l'entropie, qui n'est pas en contradiction avec le principe de Carnot puisque le récipient qui contient le liquide n'est pas isolé : les cellules de Bénard apparaissent dans l'eau seulement si elle est couplée avec une source de chaleur, et cette chaleur provient obligatoirement d'une dégradation d'énergie de bonne qualité (chauffage électrique, réaction chimique, pompe mécanique à chaleur, etc.) qui s'accompagne d'une production d'entropie.

Le bilan de l'ensemble constitué par le liquide chauffé et la source de chaleur est toujours une augmentation d'entropie, c'est à dire une acquisition d'information selon la formule de Brillouin, et cet ensemble finira par atteindre l'égalisation des températures correspondant au principe de Carnot, quand la source de chaleur sera épuisée.

L'inéluctable augmentation de l'entropie n'exclut pas une structuration locale quand le système est hétérogène et quand il reçoit de l'énergie venant de l'extérieur. L'une des expériences les plus remarquables dans ce domaine a été réalisée par T. SHINBROT ET F. J. MUZZIO (2001) : ils placent des billes dans les deux moitiés d'une boîte dont le fond est soumis à des vibrations qui peuvent faire sauter les billes au-dessus de la cloison qui sépare les deux moitiés ; si la répartition des billes dans les deux moitiés de la boîte n'est pas parfaitement symétrique, les billes s'accumuleront progressivement dans la case où il y a déjà un plus grand nombre de billes ; en effet, dans cette case, les billes disposeront individuellement d'un peu moins d'énergie que dans la case la moins pleine, et elles sauteront moins facilement par dessus la cloison ; au contraire, dans la case la moins pleine, chaque bille dispose de plus d'énergie et pourra plus facilement franchir la cloison. Le calcul des transferts d'énergie montre que le second principe de la thermodynamique est respecté, parce que l'entropie globale des billes diminue plus que lorsque les deux moitiés de la boîte contiennent exactement le même nombre de billes.

Depuis l'origine de la vie, les systèmes biologiques ont vécu une structuration qui est un peu analogue à l'apparition des cellules de Bénard. C'est possible parce que la biosphère n'est pas un système thermodynamiquement isolé ; elle constitue ainsi une "irrégularité locale" en cours de structuration à l'intérieur du système Soleil-Terre qui, dans son ensemble, se déstructure lentement. Un écosystème peut se structurer en restant durablement fermé, à condition qu'il ne soit pas isolé de toute source d'énergie de bonne qualité. Pratiquement, l'humanité ne risque nullement de manquer d'énergie (? 87), mais seulement des formes d'énergie dont elle sait prélever facilement l'information dont elle a besoin.

Dans les deux exemples qui viennent d'être présentés, la structuration est possible grâce à un

apport d'énergie venant de l'extérieur du système, qui est donc un système non-isolé. A l'INRA de Bordeaux, R. DEWAR se pose la question. Il reprend les calculs de Boltzmann, mais au lieu d'étudier la distribution statistique de l'énergie à l'équilibre, il étudie statistiquement le cheminement de l'énergie. Il démontre mathématiquement que, dans un système thermodynamique non-isolé, hors équilibre, et stationnaire, les chemins les plus probables sont ceux qui maximisent le flux d'énergie. Le résultat de Prigogine est donc général. Une structure dissipative s'auto-organise de façon à maximiser la dissipation d'énergie de l'univers. C'est le principe de production maximale d'entropie.

Les structures dissipatives ont été très étudiées depuis 1960 (P. GLANSDORFF ET I. PRIGOGINE, 1971), et elles sont liées au fait que la matière ne peut pas convoyer l'énergie sans subir de contrecoup (I. PRIGOGINE, 1989). Nous y reviendrons dans les annexes 1-2 et 1-4.

Pour la végétation, le flux solaire qui l'atteint produit un déséquilibre qui entraîne la possibilité de prendre plusieurs chemins, par des "bifurcations" (R. THOM, 1993) qui constituent l'histoire du système. Une question lourde de conséquences reste encore posée : pourquoi les systèmes isolés ne vont-ils pas tous immédiatement vers leur état le plus stable, c'est-à-dire vers l'état où la température est uniforme, et où tous les corps sont mélangés ?

●163.2 La lenteur des transformations énergétiques

Un premier élément de réponse est banal : le passage d'un système vers un état plus stable est souvent très lent : les gaz se mélangent assez rapidement, mais les solides résistent très longtemps à l'érosion du temps, et des millions d'années sont nécessaires pour que leurs assemblages de molécules se désagrègent, et produisent le mélange homogène où l'entropie est maximale.

●163.3 L'inertie des systèmes énergétiques et les chemins anastomosés

Cette lenteur est certaine, mais elle ne suffit pas pour expliquer que certains systèmes peuvent suivre plusieurs chemins pour aller vers un état plus stable, et il faut ajouter un deuxième élément de réponse : les systèmes énergétiques matériels possèdent une "inertie", qui les conduit souvent à dépasser le point d'équilibre, un peu comme le balancier d'une pendule, entraîné par son élan, dépasse la verticale et ne l'atteint définitivement qu'après y être passé à grande vitesse plusieurs milliers de fois. C'est pourquoi, lorsque les "états" sont ainsi très transitoires, ils sont trop insaisissables pour être, à proprement parler, des "états" observables, et il vaut mieux employer alors le terme de "**complexion**", dont le charme un peu désuet n'exclut pas une signification thermodynamique très rigoureuse (cf. l'annexe 1-2 ?10 du présent chapitre).

Finalement, si un système tend inéluctablement vers sa complexion la plus stable, il peut subsister pendant longtemps dans des complexions relativement instables, où plusieurs futurs immédiats bien différents sont presque aussi probables les uns que les autres. Une analogie aidera à comprendre cette multiplicité des futurs : l'eau d'un torrent qui arrive à son cône de déjection finira toujours par arriver au confluent du torrent et de la rivière qui coule au fond de la vallée, mais l'eau peut suivre un très grand nombre de chemins, qui partent du sommet du cône et s'anastomosent d'une génératrice à l'autre, avant de se rejoindre dans la rivière, au point le plus bas du cône de déjection ; la fin du trajet est parfaitement "déterminée", mais le chemin suivi par une molécule d'eau dépend d'un si grand nombre de variables qu'il est difficilement déterminable et, en fait, "aléatoire". Cette apparition du hasard et des probabilités nous conduira à un troisième élément de réponse, dans le paragraphe 164.4.

●163.4 L'évolution de l'univers

Essayons de préciser la place des phénomènes biologiques dans l'évolution de l'univers : il a été vu précédemment que l'entropie du système isolé constitué par la Terre et le Soleil qui lui envoie une avalanche de photons reste constante, mais qu'en est-il de la Voie lactée et de l'ensemble des galaxies qui constituent notre univers ? Les lois de la physique nous permettent de remonter dans le temps presque jusqu'à une fraction de seconde – le "temps de Planck" – après le big bang . A cet instant, l'univers était un formidable concentré d'énergie considérée comme une fluctuation du vide quantique concentrée dans un très petit espace. Les atomes, puis les molécules, puis les nébuleuses, les étoiles, les planètes, etc. sont apparus ensuite. L'univers est devenu de plus en plus complexe, de plus en plus structuré et cette évolution paraît, à première vue, en contradiction avec le second principe de la thermodynamique. En fait, il n'en est rien, puisque cette structuration s'est accomplie en consommant de l'énergie de très haute qualité, riche en néguentropie.

164 STABILITE ET PROBABILITE : LA RESISTANCE AUX PERTURBATIONS

☞164.1 Ce qui caractérise la vie

Notre monde est un terrain d'expériences spontanées, où les systèmes biologiques, emportés par leur élan, produisent sans cesse de nouvelles complexions, qui sont plus ou moins stables. L'eau du torrent ne descend pas toujours exactement selon la ligne de plus grande pente du terrain : il suffit d'un très faible obstacle pour que l'eau parte vers un chenal en pente plus douce.

Autrement dit, l'écologie moderne ne peut être que probabiliste, et le deuxième principe peut s'y formuler ainsi :

"Tout système biologique est un perpétuel ajustement dynamique de structures métastables, soumises à des variations d'environnement plus ou moins aléatoires, et les structures les moins instables sont aussi les plus probables".

Une formulation plus simple serait : **la vie produit régulièrement des structures de plus en plus stables et de plus en plus complexes**, tout simplement parce qu'elles résistent mieux aux perturbations et durent plus longtemps que les structures instables.

Il est alors possible de revenir à la question simple : "Où est donc la différence entre les systèmes biologiques et les systèmes purement chimiques ?". Il me semble qu'il n'existe pas une différence radicale qui permettrait de savoir si un ensemble de molécule est vivant ou mort. Par exemple, certains tissus continuent à se développer dans le corps d'un animal, longtemps après la mort de l'individu. Il est particulièrement difficile de dire précisément à quel moment la chimie nucléaire "minérale" – qui régnait dans le creuset des étoiles où sont apparus les éléments lourds – a développé les nouveaux processus qui ont amorcé la vie.

Les grosses molécules prébiotiques réagissent instantanément aux modifications de leur environnement, selon les lois des équilibres physico-chimiques dans des systèmes de réactions "immédiates", sans médiation, même quand elles sont lentes. Mais, en cybernétique, on connaît des systèmes plus perfectionnés qui comprennent un "capteur" sensible aux modifications de l'environnement, un centre de décision qui traduit le signal transmis par le capteur sous la forme d'une action, qui est alors une "rétro-action". L'exemple biologique le plus banal est celui de la

réaction des muscles de votre bras quand vous avez posé la main sur une casserole brûlante.

Les premiers êtres vivants se distinguent alors des agrégats de molécules minérales par leur réaction commandée par un centre de décision qui met en jeu une "**mémoire**". C'est pourquoi de nombreux biologistes pensent que le premier système biochimique qui puisse être qualifié de "vivant" est la combinaison d'un acide nucléique codant (ARN) et de la protéine dont il catalyse la production. Les premières structures "vivantes" ont ainsi pu se dédoubler en gardant une "mémoire", liée à des "nucléotides" constitués d'un ribose, d'une base et d'un phosphate (les acides nucléiques libérés lors de la destruction d'une cellule sont d'ailleurs une importante source de phosphates dans les cycles de la matière organique).

A. CAIRNS-SMITH (1985) souligne à juste titre que des structures dotées d'une mémoire des formes sont nécessaires pour assurer toute "reproduction" et il montre bien l'importance des "échafaudages" moléculaires relativement primitifs (peut-être constitués en liaison avec des argiles) qui peuvent avoir joué ce rôle à l'aurore de la vie.

Les expériences de T. CECH ET A. ZAUG, parues dans *Science* en janvier 1986, permettent de penser que l'ARN peut avoir été simultanément l'embryon de mémoire et le support des activités catalytiques "utiles", que l'on croyait réservées aux protéines des enzymes. W. GILBERT, prix Nobel en 1980, proposa aussitôt d'appeler ces ARN "**ribozymes**", pour souligner l'importance de ce double rôle.

L'ARN (acide ribonucléique) diffère de la double hélice de l'ADN sur trois points :

- une molécule d'ARN correspond à un seul des deux montants de l'échelle d'ADN, muni des demi-barreaux correspondants ;
- le ribose y remplace le désoxyribose ;
- sur le demi-barreau, la thymine de l'ARN est remplacée par l'uracyle, qui admet l'adénine comme binôme dans le deuxième demi-barreau, comme pour l'ADN.

Chez les êtres vivants actuels, un filament d'ARN messenger est la "crémaillère" le long de laquelle un ribosome se déroule, en accrochant au passage les molécules d'acide aminé accolées à de petits morceaux d'ARN "de transfert" qui portent chacun le "négatif" de l'un des codons enchâssés le long de l'ARN messenger. Une protéine composée de 1.000 acides aminés se construit de la même manière. L'hypothèse actuelle est donc que l'ARN primitif catalysait directement la production des protéines. Cette hypothèse est crédible puisque les virus à ARN, après des inversions de polarité, induisent dans les cellules l'enchaînement d'acides aminés apportés par les ARN de transfert.

N. GALTIER, M. GOUY ET N. TOURASSE ont montré que les proportions de guanine et de cytosine dans les ARN d'organismes très anciens font penser qu'ils se sont produits en milieu tempéré. C. PONNAMPERUNA ET AL. (1963) ont observé la production de précurseurs de l'ARN et de l'ADN (ribose et désoxyribose) dans des expériences analogues à celles de S. MILLER. L'utilisation de ces molécules hélicoïdales comme mémoire capable d'orienter la synthèse des acides aminés a pu être assez précoce. Quelle est l'origine de l'association fidèle d'une séquence spécifique d'ADN à une lignée de Pro-caryotes ? Il n'est pas impossible que la "sélection chimique" (qui sera évoquée un peu plus loin) ait favorisé des "pré-virus" constitués d'une molécule d'ADN (ou d'ARN ?) parallèlement à l'élaboration des gouttes de protoplasme des "pré-bactéries".

La double hélice de l'ADN apporte l'avantage d'une stabilité plus grande, et d'un système de duplication rapide (par ouverture de l'échelle, comme une fermeture éclair, et réappariement de chacun des demi-barreaux, à la vitesse de 10 à 20 nucléotides par seconde). Par exemple, le virus du

Bactériophage T2 (qui mesure environ 0,1 micromètre et qui est souvent nommé virus T2) injecte seulement un filament d'ADN (long d'environ 60 micromètres quand il est déplié) à travers la membrane d'une Bactérie. Ce filament suffit pour mobiliser les protéines de la Bactérie et pour produire une centaine de Bactériophages nouveaux. Les cocervats (? 212.4) contenant des ARN avaient ainsi plus de chance d'assurer la reproduction du système.

Il est possible que plusieurs systèmes de codage primitif aient coexisté en ces époques lointaines, préluant très tôt à l'émergence de lignées durables. F. JACOB (1981) pense que, très vraisemblablement, tout a commencé avec de petites séquences de 30 à 50 nucléotides (ce sont les constituants élémentaires de l'ADN et de l'ARN, cf. ? 253) produites par l'évolution chimique et capables chacune de coder 10 à 15 acides aminés. C'est seulement après coup que de telles séquences ont pu être unies par un processus de ligature pour former des chaînes protéiques plus longues. Certaines de celles-ci se sont alors avérées utiles et ont été sélectionnées. Des mutations suffisent alors pour affiner la structure. Un essai d'approfondissement de cette idée est recensé dans l'annexe 2-2.

Le processus ainsi décrit par F. JACOB correspond exactement à la règle générale proposée au paragraphe 164, et c'est une "sélection chimique" qui a été à l'origine des premières structures vivantes, qui aboutissent à des polynucléotides composées de plusieurs millions de paires de nucléotides. Le même auteur attire l'attention sur une conséquence de ce qu'il appelle des "bricolages" : "La phase réellement créatrice de la biochimie n'a pu survenir que très tôt, car l'unité biochimique qui sous-tend l'évolution du monde vivant n'a de sens que si les organismes primitifs contenaient déjà la plupart des constituants communs aux êtres vivants : systèmes de réplication et de traduction, etc."

L'une des questions qui restent posées est : pourquoi ces processus ne sont-ils plus observés aujourd'hui sur la Terre ? Une première réponse est l'existence de la couche d'ozone qui atténue la puissance du rayonnement solaire, exactement dans la gamme de longueurs d'ondes favorables aux synthèses biochimiques. De plus, s'il arrive que des molécules "pré-biologiques" se forment encore de nos jours dans les eaux superficielles, elles sont vraisemblablement absorbées par l'un des organismes qui composent les chaînes alimentaires actuelles. En conséquence, il serait vain de courir les océans à la recherche de ces précurseurs moléculaires de la vie.

De même, à l'intérieur d'un système de planètes analogues à celles qui sont proches de nous (cf. l'annexe 1-5 du premier chapitre), il apparaît que la Terre occupe une position privilégiée pour que la vie, telle que nous la connaissons, puisse s'y développer : les planètes plus proches du Soleil sont trop chaudes et les planètes lointaines sont trop froides. Sur Vénus, le climat a suivi la même évolution que sur la Terre, pendant les deux ou trois milliards d'années qui ont suivi la constitution de ces planètes (G. ISRAËL, 1985). Mais, sur Vénus, en particulier à cause de l'effet de serre, l'eau s'est presque totalement évaporée, puis échappée (la température actuelle de la surface de Vénus est voisine de 470°C).

●164.2 Stabilité et structures spatiales

En fait, l'eau d'un torrent ne suit pas toutes les génératrices du cône de déjection, parce que le champ des possibles n'est pas homogène, puisque l'espace lui-même n'est pas homogène, dès qu'il est habité par la matière. Les physiciens le savent bien, puisque toute particule "organise" l'espace autour d'elle-même, et le jeu des interactions entre des particules voisines aboutit à la constitution des structures relativement stables que sont les atomes. De même, toute molécule d'acide désoxyribonucléique participe à la structuration biologique de l'individu où elle se trouve, en se

combinant avec ses compagnes d'hélice pour intervenir dans les réactions enzymatiques.

Considérons, par exemple, des acides aminés présents dans une solution aqueuse ; ils peuvent être regroupés en "séquences", en fonction du code génétique, pour constituer une molécule de protéines. La formation d'une protéine correspond alors à une diminution d'entropie qui peut être calculée (G. SCHULZ, 1951, *Electrochem.* 55, p. 569) en imaginant que la séquence est linéaire. Pour une séquence longue, l'information correspondante à cette entropie est égale à $4,57 \log n$, en appelant n le nombre initial d'acides aminés.

Ce type de calcul n'est évidemment pas applicable directement aux organismes et aux communautés d'êtres vivants. Cependant, une formulation analogue peut être utilisée pour calculer l'information incluse dans un paysage, où les animaux et les végétaux sont groupés en bâtissant des communautés. Puisque l'étude des communautés est, depuis ERNEST HAECKEL (1866), l'objet de l'écologie, ceci peut être résumé sous une forme plus concise :

"Les transformations des systèmes écologiques qui ont lieu dans l'espace hétérogène où vivent les plantes et les animaux aboutissent à des structures spatiales plus ou moins métastables ; la structure spatiale des individus et des communautés est alors le résultat de leur fonctionnement passé aussi bien que la source de leur fonctionnement futur."

Ce principe est le fondement majeur de l'écologie des paysages (? 542) qui prend directement en compte l'hétérogénéité de l'espace où nous vivons.

●164.5 Types et degrés de stabilité : le modèle des "montagnes russes"

Les paragraphes 164.1 à 164.3 peuvent aider à comprendre le paradoxe de SCHRODINGER (? 161) : les êtres vivants absorbent de l'énergie et la rendent ensuite pour la dégrader, c'est-à-dire pour en tirer l'information (= la néguentropie) qui leur permet de maintenir et de développer leurs propres structures. Cette acquisition d'information par une plante ou par un animal lui est utile, parce qu'elle lui permet d'atteindre un état plus stable en augmentant sa capacité de réponse aux perturbations. Le point délicat est le passage vers cet état plus stable, car le système doit souvent franchir un seuil avant de pouvoir atteindre cet état plus stable.

La comparaison avec l'équilibre d'une bille sur des montagnes russes (fig. 16-2) aidera à le comprendre : dans le profil qui va de A à Z, le point d'équilibre le plus stable est B (entropie maximale), mais, C, D et E sont aussi des points d'équilibre "métastable", où la bille revient si les perturbations qu'elle subit restent modérées.

Si nous secouons le système, il est quasiment certain que la bille finira, le plus souvent, par aller en B, mais il pourra arriver qu'elle aille en C, et elle y restera aussi longtemps que les secousses ne la feront pas sortir du "puits" C. A fortiori, si elle arrive en D ou en E, elle n'en partira que par accident.

Si la bille est en C, et si on la perturbe, elle atteindra "presque spontanément" le point B, mais il lui faudra un "accident" favorable pour qu'elle atteigne D et, a fortiori, E.

Ceci montre que l'évolution du système ne dépend pas seulement du niveau de stabilité maximale, mais aussi des probabilités d'accès (hauteurs des seuils, "sections de capture", puissance

des attracteurs) aux points d'équilibre métastables, et aussi des risques de départ des puits de stabilité.

Le but de ce schéma est de faire comprendre que les équilibres biologiques, qui sont tous métastables (puisque tous les êtres vivants mourront un jour), résistent inégalement aux perturbations. Ainsi, un état métastable, tel que E, peut résister mieux aux perturbations que l'état le plus stable, B, où un faible choc suffit pour envoyer la bille en C ; c'est pourquoi la formulation la plus précise consiste à dire que E est "moins instable" que D et que C.

Un des exemples les plus curieux est celui de la capture des Insectes par une plante carnivore, la *Venus dioneae* : au repos, ses feuilles sont convexes, comme une coque de navire, ce qui correspond à une situation de basse énergie dans un puits de métastabilité peu profond ; quand un Insecte se pose sur la feuille, elle commence à se fermer par une réaction cellulaire, puis, en quelques dixièmes de seconde, sa courbure s'inverse, et elle se referme brutalement, en emprisonnant sa proie. La petite quantité d'énergie apportée par l'Insecte a suffi pour que la feuille sorte du puits de métastabilité et tomber très vite dans un autre puits de métastabilité, correspondant à une courbure inversée, comme un couvercle de boîte de conserve qui se courbe en produisant un "clic" sonore.

Ce schéma s'applique aussi dans un domaine très différent, celui de l'équilibre temporaire du champ d'inflation ouverte qui serait lié à l'origine de notre univers (M. BUCHER, A. GOLDHABER - Open Universe from Inflation, Physical Rev. D 52, 6 : 3314 -3337, 1995). Il est aussi nommé "paysage énergétique" en physique (P. G. DEBENEDETTI ET F. H. STILLINGER, 2001).

Ce genre de raisonnement s'applique aussi, par exemple, aux variations d'énergie qui accompagnent le devenir d'un électron issu du choc d'un photon sur une molécule de chlorophylle (fig. 16-3) parce que chacun des états du système est nettement distinct des autres. Il correspond aussi à la "stabilisation sélective" chère à J.-P. CHANGEUX : ce sont les images mentales "sélectionnées" (par le passage d'un seuil tel que L, M ou N) et "stabilisées" qui sont mises en mémoire dans notre cerveau.

En économie, ce schéma correspond aux équilibres de Nash (? 863). On parle alors quelquefois de "dynamique intermittente" qui s'applique à des phénomènes de turbulence étudiés par Kolmogorov et qui se traduit spatialement par des plages homogènes laminaires séparées par des falaises turbulentes (J. PH. BOUCHAUD, Pour la Science, 314 : 142-147, 2003).

Plus généralement, les "bifurcations" de R. THOM, qui se produisent dans les systèmes énergétiques situés loin de l'équilibre étudiés par I. PRIGOGINE, montrent que l'alternance de variations progressives et de ruptures brutales est thermodynamiquement possible. Le modèle des montagnes russes intègre ces deux types de phénomènes.