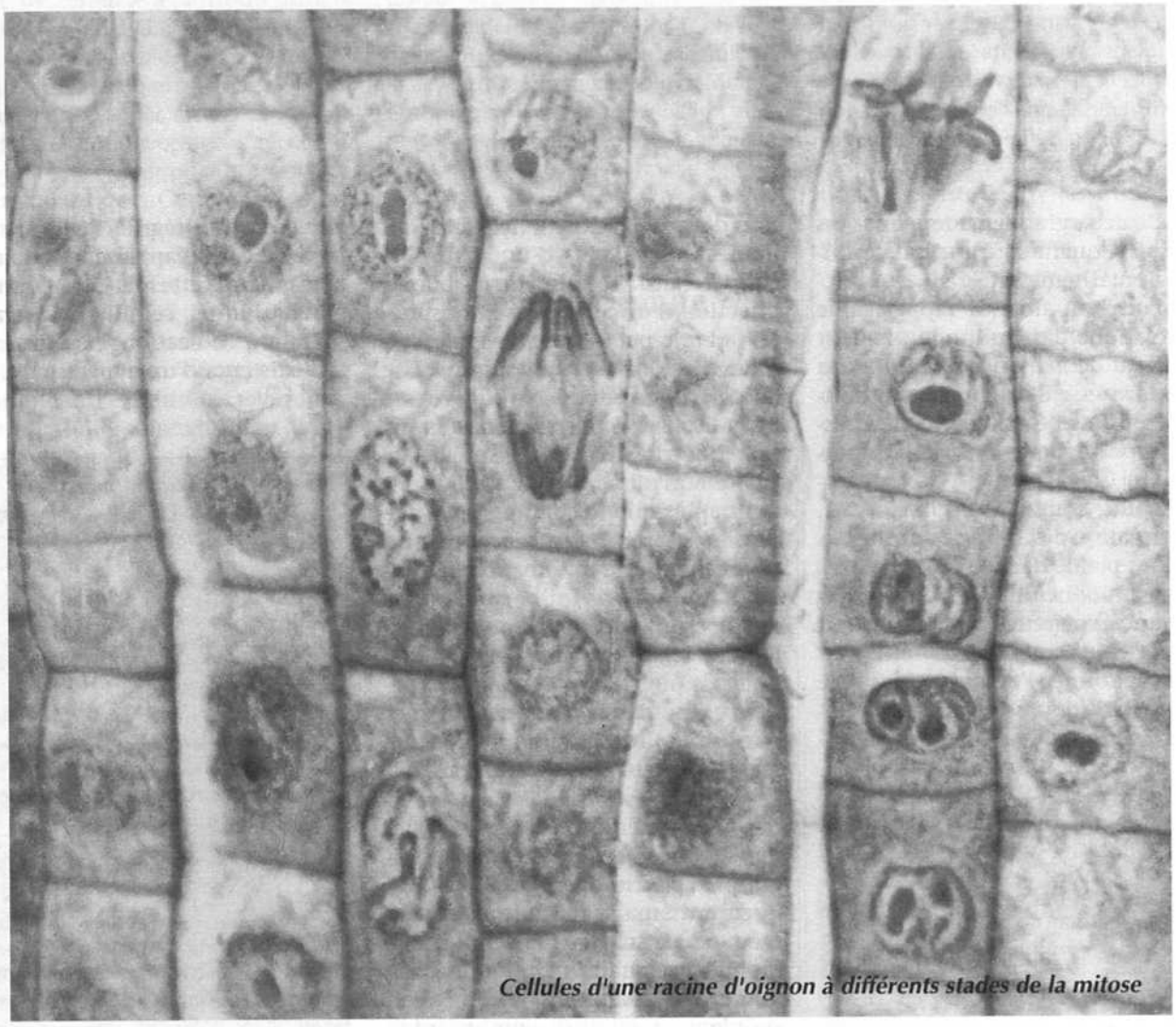
Première approche des notions de processus vivant et d'organisation du processus

JEAN-MICHEL DUTUIT



Cellules d'une racine d'oignon à différents stades de la mitose

« Le concept d'organisation n'appartient pas, à proprement parler, au vocabulaire de la physique ou de la chimie. L'organisation implique une fonction, et les sciences physiques ne prennent pas en compte les fonctions (...)
Les systèmes organisés sont caractérisés par des relations structurales qui exigent de l'information pour leur mise en place (...)
Puisqu'elle dépend toujours des fonctions, l'organisation est un concept nécessairement qualitatif. »[1]
Wicken J.S., 1987, p.40

« Lorsque l'on prend en compte des processus de transformation accomplissant certaines tâches précises, on les appelle des fonctions (...) Un systèmes sera considéré comme organisé, s'il accomplit un ensemble de fonctions coordonnées. Le degré d'organisation d'un système organisé peut ensuite être défini comme la complexité d'un ensemble de fonctions coordonnées. (C'est une définition qui nécessiterait d'être précisée). »[2]
Eriksson K.E., 1986, p.3

Il y a un peu de présomption de notre part à traiter des notions de processus vivant et d'organisation en un simple article. Si nous voulions argumenter décemment les domaines concernés, il nous faudrait caractériser et discuter les relations de ces notions avec la théorie de l'information et celle des systèmes. Il faudrait davantage montrer l'ambiguïté de la notion de complexité. Enfin, il conviendrait d'aborder l'énergétique de la vie au plan moléculaire et ses relations avec la thermodynamique généralisée. Pour avoir un aperçu de ces problèmes classiques qui sont au centre même de la biologie théorique, on peut au moins se référer à Mercer E.H., Peacocke A.R., Salthe S.N., Wicken J.S., et au recueil de communications édité par Kilmister C.W. En ce qui concerne la notion de complexité, les actes du colloque de Montpellier (IDATE) en fournissent également un tableau varié. Notre propre approche de ces notions est en discordance avec ce que nous appellerons le « paradigme biologique actuel ».[3] Nous ne ferons que caractériser l'ampleur du débat et ferons un pas de plus par rapport à nos articles précédents. Notre ancrage théorique y était davantage suggéré que défini. C'est problème de place.

1. LES APPROCHES METHODOLOGIQUES HABITUELLES EN BIOLOGIE

1.1. Importance de la méthode et contraintes conceptuelles

L'histoire des sciences foisonne d'exemples de cécités d'ordre théorique ou d'enchaînements conceptuels sur base axiomatique qui ont dévoyé ou freiné la science durant des décennies. Le constat d'une telle impasse conduit à passer au crible les concepts vieillis et refondre la méthode sur de nouvelles bases.

Il existe une physique théorique, constituée et reconnue comme indispensable. Sa réflexion va du microcosme (physique quantique) au macrocosme (mécanique relativiste). La biologie contemporaine, toutes disciplines confondues, surtout lorsqu'elle parle évolution, tend à mésestimer la nécessité d'avoir des conceptions théoriques englobantes, propres à la biologie. Elle ancre toujours ses théories et sous-théories aux pôles cellulaire et moléculaire du vivant, considérés comme les seuls signifiants, car en contact direct avec la physico-chimie et la thermodynamique.

Lorsque l'on passe au niveau des être évolués, le centrage des débats se fait au niveau d'une notion qui a statut d'axiome indiscutable ou d'évidence dans la biologie actuelle : l'espèce. Par la génétique, on ramène l'espèce et la réflexion sur les êtres les plus organisés vers le niveau moléculaire. On considère alors comme incongru et hors de raison de prétendre en discuter les dogmes.

On commença à admettre voici quelques siècles que le monde du vivant avait une histoire. Bien plus tard, l'on reconnut qu'il est sujet à des transformations, et a toujours été de nature évolutive. La prise de position en faveur du fait transformiste ne fut théorisée de façon conséquente qu'au début du XIXème siècle, avec Lamarck. Nous ne faisons pas fi de l'évolution des idées et ne négligeons pas les éléments transformistes qui existaient chez beaucoup d'auteurs avant le XIXème siècle. Notre propos présent n'est pas l'histoire des idées ou de la science.

Ainsi, depuis Lamarck au moins, la vie est conçue comme la transformation d'*entités vivantes*. En cette première partie d'article, nous utiliserons le terme mal défini d'entité, d'abord pour éviter de caractériser les échafaudages théoriques du XIXème siècle, lamarckiens ou darwiniens principalement, ensuite pour procéder avec logique à l'introduction des notions. Apportons seulement quelques éclaircissements minimums mais nécessaires.

Lamarck, cohérent avec son mécanisme biologique (Aron J.-P., 1968 ; Dutuit J.-M., 1994), ne séparait pas formellement la vie de l'univers physique. Pour lui, ce n'était nullement la notion d'espèce qui devait être considérée mais celle d'individu. Il centre la réflexion autour de l'individu. Cependant, si ce choix lui permit de rendre compte de l'aspect continu de l'évolution mieux que ne le put

Darwin (ce dernier y accéda en utilisant Lamarck), elle ne lui permit pas de comprendre ses aspects discontinus. C'est avec Darwin et à sa suite que l'entité de référence pour juger des transformations de la vie deviendra l'espèce.

La focalisation de la pensée transformiste (écoles lamarckiste et darwiniste) sur une entité privilégiée de référence, individus ou espèces, « atomise », parcellise déjà le vivant et sa dynamique. Elle engage l'étude de l'évolution sur la voie des réductionnismes. C'est pour nous une des conséquences inéluctables des prises de position mécanistes, puis de l'influence comtiste (positiviste). Nous ne nous insérons ni dans une filière théorique lamarckienne, ni dans une filière darwinienne.

Il est certes nécessaire de simplifier pour comprendre. L'utilisation de schèmes de pensée permet de dégager l'essentiel de ce qu'il faut retenir de nos explorations du réel. Mais comment simplifier, avec quel outil intellectuel ? Dans la deuxième partie du XIXème siècle, dans la mesure où l'on partait d'une conception mécaniste de la causalité **(Figure 1)**, l'entité la plus aisément reconnaissable dans le cadre de l'Actuel, et la plus dense en signification, était bien l'espèce. Notre biologie est encore ancrée sur ce môle philosophique.

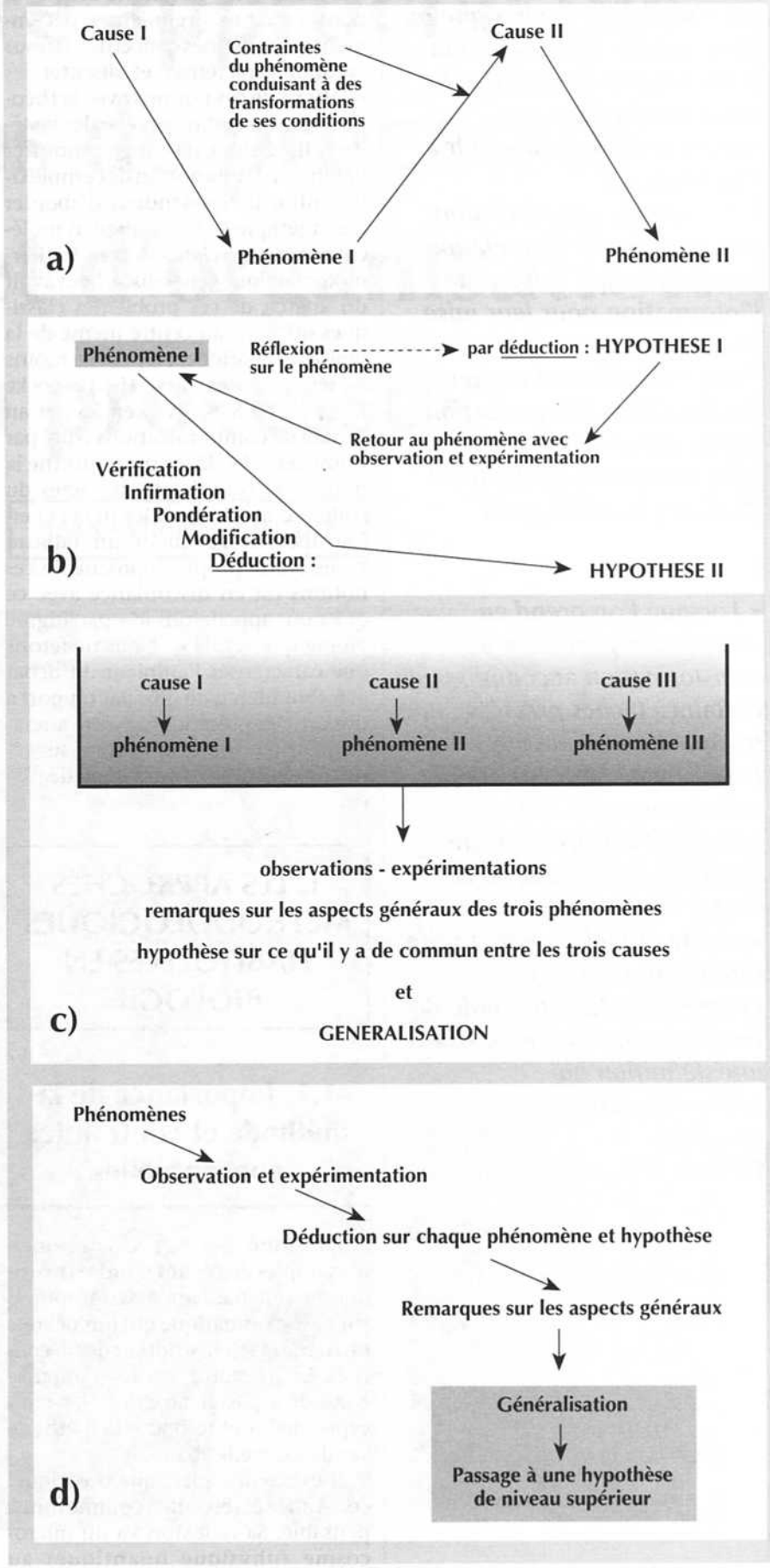
L'apport du XXème siècle à la notion d'espèce et à celle de mutation, la logique scientifique du XXème siècle aussi, fut de lui trouver un fondement cellulaire, en même temps que l'on explorait le noyau de la cellule.

Une fois que ce fondement nucléaire de l'espèce eût été exploré jusqu'à son déterminisme génétique, on continua, logiquement, à appliquer les schémas caténaires habituels de la mécanique en partant de ce niveau microscopique et en prolongeant les chaînes causales en allant vers les entités les plus grandes du vivant.

Le réductionnisme explique le grand à partir du petit, le tout à partir des parties.

Cette méthode générale a une efficacité technique *dans le cadre du quasi instantané évolutif où nous expérimentons et vivons* (voir 4 : coupe temporelle), et pour expliquer la reproduction et l'ontogénie (le développement) des individus. Il n'y a pas lieu de mettre en doute le fait qu'il existe bien une *expression de niveau cellulaire*

Figure 1 - Causalité



et raisonnement

a) Chaîne causale. On peut simplifier ainsi la notion : la chaîne causale fait alterner causes et phénomènes. On y considère que l'univers s'explique par des chaînes causales que l'on s'efforce d'isoler pour les étudier (c'est un schéma de type généalogique). Une cause I entraîne un phénomène I. Des contraintes, internes et externes au phénomène, s'exercent sur lui. Ces contraintes peuvent être relatives à d'autres chaînes causales. Elles jouent le rôle de cause II. Le phénomène I se transforme et devient le phénomène II.

b) Dans le raisonnement de type hypothético-déductif qui est généralement considéré aujourd'hui comme garant de rigueur, la pensée exerce sa réflexion sur un phénomène. Elle fait une hypothèse sur la cause du phénomène et cherche à la vérifier par l'observation et l'expérimentation. Elle aboutit à une hypothèse II en fonction des résultats de l'observation et de l'expérimentation.

c) Dans le raisonnement par induction, le plus souvent considéré comme incertain de nos jours, on s'efforce d'aboutir à une généralisation pour rendre compte de plusieurs chaînes causales que l'on estime liées entre elles. On retient les aspects généraux des phénomènes pour émettre une hypothèse sur ce qu'il y a de commun dans les trois causes.

Plutôt que de toujours parler de «pensée hypothético-déductive», qui serait garante de la rigueur de la démarche scientifique, on devrait réfléchir à la façon dont ont été fondés certains des principaux dogmes de l'époque en biologie. Entre autres éléments du contexte, on se rendrait compte que la part d'induction dans le raisonnement y fut toujours **majeure**. Quand on raisonne à partir de paléofaits (de faits fossiles), la part d'induction est prédominante. L'hypothèse darwinienne est un vaste ensemble inductif. La théorie symbiogénétique, sur laquelle nous insistons depuis plusieurs articles, est de nature inductive.

d) En fait, si l'on tient absolument à différencier au sein de la démarche scientifique induction et déduction, mieux vaut peut-être concevoir que l'investigation scientifique est de type inductivo-déductif, et que c'est le seul moyen d'aboutir à une hypothèse de niveau supérieur.

des lois générales du développement de la vie. Ce qui est en cause par contre, c'est le postulat réductionniste selon lequel il suffit de comprendre le fonctionnement de la cellule pour, *de proche en proche*, être en mesure de comprendre n'importe quelle autre entité ou ensemble de phénomènes du vivant. Le réductionnisme ne permet ni d'accéder à la dynamique globale de la vie, ni de comprendre pourquoi le vivant « **prend d'autant plus de sens à nos yeux** » que nous en étudions une histoire plus complète, dans la multitude de ses aspects.

Certains éléments d'observation et d'expérimentation, des travaux de réflexion, appellent à davantage de prudence et de rigueur conceptuelle, choses qui sont proclamées comme vertus par les scientifiques, mais que l'histoire des sciences montre trop souvent oubliées, sinon piétinées, à chaque siècle :

a) Observation comme expérimentation démontrent de plus en plus l'importance de la dimension épigénique[4] dans le codage génomique alors qu'elle fut niée ou minimisée longtemps. C'est particulièrement clair dans le règne végétal et apparaît en toute lumière lorsque l'on travaille à l'amélioration des semences végétales. On commence à mieux connaître ces voies de recherche (voir, par exemple : Demarly Y., 1975, 1976, 1977, 1985 ; Schoffeniels E., 1984).

b) Un élément théorique plus déterminant encore, nous semble-t-il, doit être pris en considération. Il s'agit du faisceau des observations paléontologiques d'une part, l'articulation entre elles des différentes disciplines biologiques d'autre part. Analysées de façon globale, ces observations mettent en évidence des preuves de cohérence de l'ensemble biologique planétaire, au plan de la montée en puissance relative (ramenée, par exemple, à l'unité de surface terrestre) comme au plan de la montée en organisation. Nous verrons plus loin que les explications de type probabiliste qui sont proposées pour tenter d'en rendre compte sont insuffisantes et reconnues comme telles par de nombreux auteurs (voir, par exemple, Schützenberger M.-P., 1996).

c) Un domaine d'expérimentation existant depuis plus de vingt ans (émissions de « biophotons » non thermiques en ondes ultra-faibles), est presqu'entièrement occulté par

les raideurs, certitudes et dogmatismes, particulièrement en France, sans qu'aucune contre-expérimentation, à notre connaissance, ne soit venue justifier cet ostracisme. Ce domaine de recherche, s'il se vérifiait réellement riche d'intérêt, contraindrait à faire l'hypothèse que puisse exister un canal d'information bi-sens du génome. Nous consacrerons ultérieurement un article à ce problème et publierons une bibliographie sommaire. On peut d'ores et déjà se référer à l'ouvrage en français de F.-A.Popp (Popp F.-A., 1984). On se référera aussi avec le plus grand profit à : Fisher H.A., 1989 ; Fröhlich H., 1983 ; Grundler W. et al, 1988 ; Kremer F. et al, 1988 ; Li K.H. et al, 1983 ; Mishra R.K., 1986 ; Popp F.-A., 1989. Des dizaines d'autres travaux ponctuels ou actes de symposiums sont disponibles.

1.2. Notion de hiérarchie dans le cadre paradigmatique actuel

Dès que l'on commença à concevoir que la vie dans l'Actuel pût être le résultat de transformations, on chercha à identifier dans le temps l'échelle des êtres que l'on reconnaissait dans l'espace de l'Actuel. Le premier qui opéra clairement le rapprochement fut Lamarck. Il existait pour Lamarck une certaine correspondance entre l'échelle des êtres constatée par nous sur terre actuellement et leur ordre d'apparition au cours de l'histoire de la vie (Dutuit J.-M., 1994 ; Pichot A., 1993).

Expliquons-le plus concrètement. On constate l'existence, dans la biosphère actuelle, de formes vivantes de niveaux d'organisation variés, formes vivantes qui s'associent pour composer les écosystèmes. L'ensemble de nos formes de vie actuelles constitue ce que l'on peut appeler le « spectre du vivant contemporain », c'est-à-dire le déroulement ordonné exhaustif de ses formes connues sur toute la surface de la planète, selon les critères de la systématique (classement du moins organisé au plus organisé : c'est une hiérarchie dont le critère principal est la morphologie). Or, la paléontologie retrouve ces mêmes formes, ou des formes qui leur sont apparentées, ordonnées dans le temps géologique selon leurs niveaux d'organisation (ce que nous avons appelé l'« Axe rapide » : Dutuit J.-M., 1987). L'idée vient alors de faire le rapprochement entre ces deux gradations des formes vivantes (l'échelle des êtres, disait-on il y a deux siècles), l'une des gradations s'observant dans le temps géologique, l'autre dans la biosphère actuelle.

On peut distinguer trois acceptions classiques, voisines l'une de l'autre, ou se complétant l'une l'autre, de la notion de hiérarchie :

a) Une notion reconnue par la plupart des évolutionnistes est celle qui, jusqu'au stade de la cellule eucaryote, enregistre comme valable le schéma de progression de la vie par symbiogenèse (Dutuit J.-M., 1996, fig.3). Cette sous-théorie de l'évolution est de nature inductive puisque c'est essentiellement à partir de notre connaissance des formes de vie actuelles qu'elle a été conçue. Et c'est à ce niveau, recouvrant quelques trois milliards d'années d'évolution de la vie, que l'on peut le mieux mettre en évidence la notion de gradient organisationnel (voir Dutuit J.-M et P.Dutuit, ch.2, 3, 5, ?1996).

b) L'approche systémique (cf. par ex. : Peacocke A.R., 1989). Nous ne la présenterons pas.

c) L'approche « naturaliste » est fondée en premier sur des critères morphologiques. Il y est d'abord question de classer, et ordonner selon une optique purement phylétique (généalogique), des unités que l'entier hasard des variations génétiques que l'on stipule et la contingence de ce que l'on dénomme « sélection naturelle » ne peuvent pas relier de façon nécessaire et font en principe échapper à toute cohérence, sinon celle des grands nombres. L'espèce y est l'unité de référence pour juger des transformations de la vie. On y privilégie l'angle d'attaque systématique, phylétique et taxinomique.[5] La notion de hiérarchie est alors basée sur la succession dans le temps de taxons (espèces, genres, tous grades de plus en plus compréhensifs) dont l'ordonnancement temporel est celui de la filiation, les autres connotations étant secondaires. Cette approche est prise le plus souvent en considération pour la partie la plus récente de l'évolution (à partir de -0,8 à -0,6 milliards d'années environ), celle qui voit le développement des êtres pluricellulaires avec tissus différenciés en organes et systèmes d'organes. On n'y fait peu ou pas du tout intervenir les *notions de gradients énergétiques ou organisationnels*, ce qui explique les débats paléontologiques actuels, pour nous byzantins et sans références vraiment scientifiques, entre les aspects continus et discontinus de l'évolution (gradualisme et ponctualisme) (**Figure 2**).

Dans ce type d'archivisme ultra-positiviste, on veut constater une hiérarchie, un ordre, et rien de plus. Rechercher une signification globale (un sens, une loi générale), d'ordre énergétique, ou une progression organisationnelle *cohérente et nécessaire*, lors des successions d'entités au cours des transformations de la vie, y fait parfois figure d'antiscience : la notion de sens, de signification, a toujours des relents de finalisme pour l'ultra-positiviste, car, selon ses schémas linéaires de pensée, il a l'impression que l'on projette la cause en aval temporel de l'effet.

Pour nous au contraire, les termes de hiérarchisation, mais surtout celui de subordination, risquent de masquer partiellement ou totalement la signification de ce que nous serions tentés d'appeler le *gradient d'organisation* biosphérique, du microcosme au macrocosme. Il n'y a là aucun finalisme.

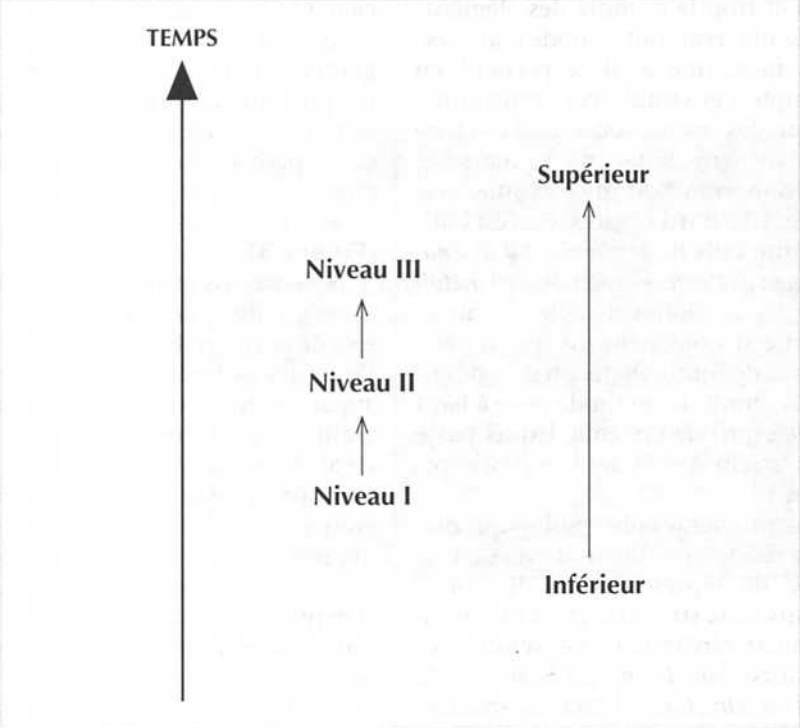
Cette idée de subordination casse, par des chemins conceptuels détournés, celle d'unité, de globalité spatio-temporelle de la vie. Nous développerons un peu ce point ci-après.

2. EXISTE-T-IL UNE STRUCTURE GLOBALE DU VIVANT ?

2.1. Concepts d'organisation et de complexité

La notion d'organisation n'a pas de définition unanimement admise. Cela tient au fait qu'existe de notre temps une certaine confusion entre trois notions équivoques et incertaines : l'organisation, la complexité, l'information. La dernière a été l'objet de formalismes mathématiques à

Figure 2 - Hiérarchie de type mécaniste



Dans une hiérarchie que nous dirons de type mécaniste, chaque niveau d'organisation est sensé se comprendre éventuellement par lui-même. Chaque niveau est conçu comme une étape, qui dépasse la précédente et la rend obsolète, voire caduque à terme. Les niveaux sont ordonnés selon l'horloge géologique, de l'inférieur au supérieur. La grande lacune de ce type de compréhension, pensons-nous, est de ne pas voir que, quelles qu'aient été les vicissitudes de l'histoire biosphérique, il n'y a pas succession des niveaux d'organisation mais **cumul des organisations.** Au sein du niveau III, les niveaux I et II continuent en réalité d'agir et poursuivent leur évolution.

partir de la théorie de l'information (voir Atlan H., 1972, 1974, 1975, 1979). La notion la plus galvaudée et protéiforme, selon nous, est celle de complexité. Nous en donnerons un aperçu avec les citations suivantes, tirées d'articles du colloque de Montpellier de 1984 (voir IDATE, 1986).

Pour l'histoire de la notion de complexité, référons-nous à Edgar Morin (Morin E., 1986) : « *La complexité n'est apparue curieusement que dans une lignée marginale entre l'engineering et la science, dans la cybernétique, la théorie des systèmes. Le premier grand texte sur la complexité vient de Warren Weaver qui annonçait que le XIXème siècle, siècle de la complexité désorganisée (il pensait évidemment au deuxième principe de la thermodynamique), devait faire place au XXème siècle, qui serait celui de la complexité organisée* ».

A propos de la mesure formelle de l'information entreprise par Shannon, Karl Pribram, neurophysiologiste et psychiatre, laisse voir que le concept de complexité traduit la recherche d'une quantification de l'organisation (Pribram K., 1986, p.148) : « *Sa mesure de l'information* [celle de Shannon] *s'est également avérée une mesure utile de la complexité. Plus le nombre des options nécessaires pour décrire un objet ou un événement est élevé, plus on peut estimer qu'il est complexe. Néanmoins, comme on le verra sous peu, la complexité structurelle ne peut pas être résumée dans sa totalité sous la rubrique des mesures de l'information* ».

Mais l'on voit aussi apparaître chez Pribram le constat d'échec du réductionnisme, l'impossibilité de toujours expliquer le tout à partir du déterminisme de la partie. C'est ainsi que dans le chapitre « Le cerveau, la complexité, la causalité et leurs relations » du même article cité ci-dessus, Pribram n'hésitait pas à introduire la notion de « *sens* », et il soulignait la possibilité de causes globales pour un effet partiel inexpliqué, sinon de façon statistique (p.155) : « *Pour qu'il y ait des causes, n'importe lequel des quatre types de causes aristotéliciennes, il faut que se manifestent les dimensions spatiales et temporelles ordinaires et capables d'être perçues. Lorsque le cerveau procède à certains calculs dans le domaine de type holographique, les résultats des calculs doivent, pour avoir du sens, être transformés en espace-temps.* » Et plus loin (p.156) : « *...lorsque les faits sont considérés comme probables,* ***la probabilité reflète peut-être bien l'existence de contraintes bien définies à un niveau plus global*** » (souligné par nous, J.-M.D.).

Nous verrons en 5. l'importance de la notion d'espace-temps qu'il évoque également.

Enfin, nous pensons indispensable, afin de bien caractériser le débat, d'inclure une citation d'Atlan (Atlan H., 1986), théoricien du « bruit organisateur » (avec d'autres auteurs, tels Ashby et von Foerster) : « *Dans le cas des systèmes naturels, l'expérience de la complexité comme difficulté de compréhension est celle d'un manque, d'un fossé entre ce que nous devons expliquer et la meilleure explication que nous puissions en donner. J'ai une fois défini la complexité naturelle (1979) comme un désordre apparent dans lequel nous avons des raisons de croire qu'il existe un ordre. Cet ordre nous est caché ; cependant, en général on soupçonne son existence à partir de l'observation d'une fonction : il semble que le désordre apparent effectue quelque chose d'une manière organisée, qui a un sens.* »

Atlan décrit ainsi (p.208) l'auto-organisation, « *comme un processus par lequel des perturbations ou du bruit, agissant sur les canaux de communication d'un système organisé, peuvent non seulement produire un mauvais fonctionnement ou une désorganisation, mais peuvent également aboutir à une modification de l'organisation, en en augmentant la complexité et en réduisant la redondance* ».

Que l'on compare avec la citation de Wicken mise en exergue du présent travail, citation où il montre que l'organisation est un concept nécessairement qualitatif, et l'on aura une idée des discordances au sein même du paradigme en place, Schützenberger le soulignait récemment (Schützenberger M.-P., 1996). Le terme de

« complexité » désigne en fait, et sans le dire, l'organisation, marque du vivant, *ce qui lui donne un sens*. Mais la complexité peut tout autant, selon ces auteurs, être de la désorganisation. Ces ambiguïtés, équivoques, contradictions, sont attribuables au fait qu'il est impossible de caractériser l'« organisation » dans le cadre du paradigme biologique actuel. Les formalismes issus de la théorie de l'information et de la thermodynamique généralisée qui prétendent la quantifier n'ont pas permis de traduire et d'expliquer l'essentiel des faits majeurs observés : l'intégration croissante des formes vivantes et des écosystèmes par des appareils de commande neuro-encéphaliques, endocriniens et immunitaires.

Notre position est que cette intégration croissante des différentes unités biosphériques s'accompagne d'une montée en puissance et en organisation de type exponentiel de l'ensemble du vivant sur la planète. Il nous faut l'exprimer, mais certainement d'une façon plus satisfaisante qu'à partir de la théorie de l'information et de la métaphore sélectionniste darwinienne.

L'appareil mathématique à utiliser n'est pas forcément algébrique en première instance.

Une des contradictions majeures du paradigme biologique actuel est que la vie y est conçue comme un ensemble d'entités hiérarchisées, mais *sans qu'il y ait de lien forcément nécessaire entre elles* (le hasard préside à leurs successions). Si la hiérarchisation n'est pas seulement une perception mais qu'elle définit une « échelle réelle des êtres », le critère de hiérarchisation des entités n'étant pas clairement défini, comment pourrait-on définir clairement ce qu'est une montée en organisation ?

Ce flou pour désigner un développement spatio-temporel global de la vie que l'on est incapable de concevoir dans le cadre de l'évolutionnisme actuel, voilà qui explique que le mot le plus souvent utilisé soit celui de « complexité » : moins complexe, plus complexe, l'adjectif suggère inévitablement, dans les tréfonds des pensées scientifiques, une relation *avec le nombre d'éléments. Pour une pensée qui est vite désemparée par le qualitatif et qui perçoit néanmoins l'organisation comme une qualité, abruptement identifiée au subjectif, le « complexe » vient sauver la mise en réintroduisant en apparence le nombre.*

Nous avions déjà écrit en 1987 (Dutuit J.-M., 1987) que le mot de « complexité » était ambigu et privilégiait trop le nombre des éléments présents. Pour notre mode d'analyse des faits, une analyse prenant en compte l'ensemble des transformations des entités observables et ne partant pas, de façon axiomatique, *obligatoirement* du microcosme, derrière la notion d'organisation est sous-jacente celle de *géométrie et d'aménagement de l'espace et du temps planétaire par la vie*. Sous cet angle d'analyse, même si nous pensons que les éléments de compréhension sont désormais réunis, la méthode reste à bâtir avec esprit de système, lequel passe par la remise en cause des concepts admis.

Le problème épistémologique majeur réside sans aucun doute dans le type de représentation que nous avons de la structure et du fonctionnement généraux de l'ensemble des vivants, *dans la mesure bien entendu où l'on admet qu'existent une structure et un fonctionnement globaux de cet ensemble des vivants dans le temps et l'espace*. Nous prenons cette dernière précaution oratoire car admettre une unité structurelle et fonctionnelle de la biosphère, dans le temps et dans l'espace, n'a rien d'évident dans un cadre conceptuel biologique où le **hasard** des déterminations génétiques et sélectives est le présupposé (ou l'admis) de la biologie théorique.

Dans la représentation contemporaine, le vivant se trouve compartimenté en unités singulières, sans lien spatio-temporel **nécessaire** entre elles, mais dont certaines sont stipulées comme plus denses que d'autres en signification : par exemple l'espèce, la cellule.

2.2. Derrière les « formes » ou les structures, se reconnaît un principe d'engendrement et de dynamique interfacique

Nous avions vu dans certains des articles parus précédemment dans *Fusion* (Dutuit J.-M., 1995a, 1996 ; voir aussi Mercer E.H., 1981, p.128 et suiv.) qu'au cours de l'évolution biosphérique, l'on voyait apparaître ce que nous appelons des « modules » individuels de plus en plus grands et organisés. Les modules les plus anciens étaient progressivement emboîtés dans d'autres modules plus intégrants et plus récents. Les modules les plus anciens étaient utilisés au sein des modules plus récents de façon répétitive pour y remplir des tâches précises : acquisition de l'oxygène, transformation de l'énergie, etc. (**Figure 3**).

Nous avions insisté sur le fait qu'il y avait cumul des expériences passées de la vie, et diversification croissante des tâches parmi les modules apparaissant successivement et intégrant ceux qui les ont précédés. Le vivant cumule, utilise, toutes ses élaborations passées, et de façon intégrative, générant un appareil de commande de plus en plus organisé, de façon à régir de façon économique la synergie (le travail d'ensemble) des formes modulaires dont il est composé.

L'élaboration d'une tâche commune à plusieurs unités associées exige qu'elles puissent communiquer entre elles afin de coordonner leurs activités. Ainsi est assurée la cohésion d'un individu élaboré.

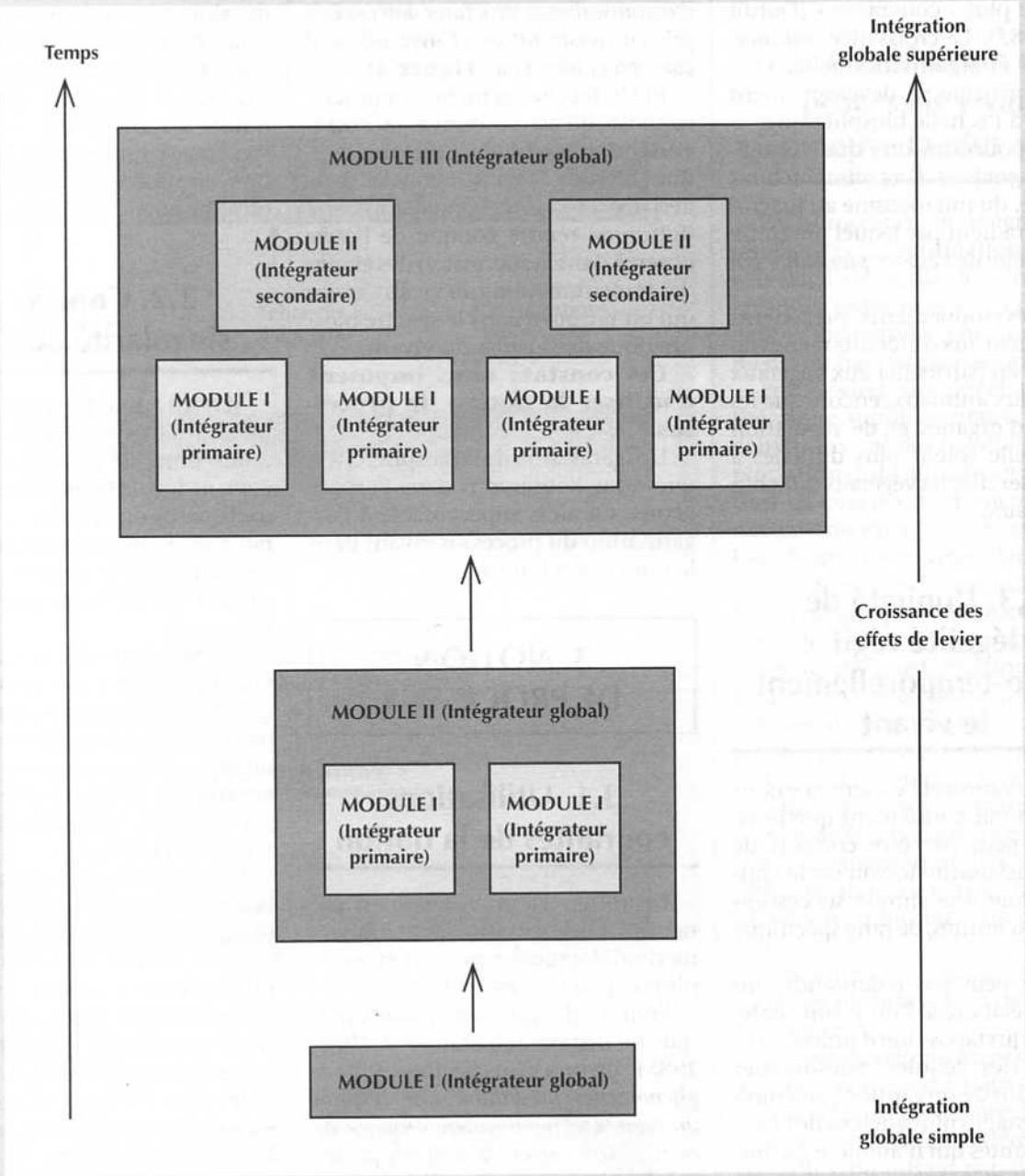
Nous avions vu que cette communication intermodulaire s'effectuait au niveau des interfaces de contact des différents modules et que les principes de la communication étaient les mêmes à tous les niveaux de la hiérarchie modulaire. Les déstabilisations du vivant montrent que des constantes existent aux différents niveaux d'organisation du vivant, lors des réponses aux stress. La dérégulation induite, et inversement sa correction, passe toujours de la même façon au travers des interfaces modulaires, quels que soient les rangs hiérarchiques des modules en communication.

Si nous résumons (consulter pour plus de détails, après parution : Dutuit J.-M. et P.Dutuit, ?1996) :

a) le principe d'engendrement des modules successifs, c'est-à-dire l'apparition des discontinuités dans le cours temporel de l'évolution, obéit toujours au même ensemble de règles ;

b) au niveau des interfaces, il existe un même type de réponse aux déstabilisations. A chacune des *discontinuités* intermodulaires que sont les interfaces, des *gradients de réorga-*

Figure 3 - Hiérarchie d'intégration



Dans ce que nous appelons la « hiérarchie d'intégration », qui est notre conception, on ne peut parler de montée vers le supérieur que si nous parlons de la *puissance* de l'ensemble biosphérique. C'est la synergie biosphérique qui passe de l'inférieur au supérieur. Les niveaux d'organisation distingués ne sont que des *balises témoignant de la réorganisation d'ensemble de la biosphère.* Ce qui augmente est l'intégration des unités, et le partage des tâches biosphériques entre elles. Au sein du niveau III les niveaux I et II continuent en réalité d'agir et poursuivent leur évolution.

nisation règlent les problèmes d'échanges ou de transferts d'énergie, de substances, d'information. Cette constance, quel que soit le niveau d'organisation, est un *aspect continu* qu'il convient de noter.

c) on peut dire que la cohérence de développement de la vie et de son action modelante sur l'environnement est déjà incluse dans les deux principes précédents.

Au cours de la progression modulaire, et par suite de la dynamique des emboîtements, c'est le dernier module apparu qui a le plus de potentialités transformatrices (on parle plus facilement de pouvoir adaptateur) sur l'écosystème général planétaire. Un cœur à quatre cavités et un système vasculaire répartissant de façon plus sélective le sang oxygéné dans l'organisme, apanage des mammifères, sont des perfectionnements « biotechnologiques », qui autorisent l'affrontement de conditions qui étaient « extrêmes » pour les structures et fonctions moins organisées qui

étaient antérieures aux mammifères, d'où la possibilité pour la biosphère (aspect global) d'une intensité de flux démographique plus grande, et d'une biomasse plus « couvrante » (Dutuit J.-M., 1987). La croissance *continue*, massique et organisationnelle, a valeur de principe de développement de la vie à l'échelle biosphérique.

Nous pourrions dire que l'on observe un *gradient d'organisation* biosphérique, du microcosme au macrocosme, gradient par lequel progresse *l'habitabilité de l'espace planétaire par la vie.*

Les développements précédents s'appliquent aux différents règnes du vivant et en particulier aux végétaux comme aux animaux, encore que les notions d'organes et de régulation individuelle soient plus difficiles à caractériser chez les végétaux que chez les animaux.

2.3. L'unicité de légalité régit spatio-temporellement le vivant

L'observation et l'expérience nous montrent par conséquent que le vivant ne peut pas être compris de façon satisfaisante lorsqu'on le conçoit comme une simple succession aléatoire d'entités, de rang spécifique ou autre.

On ne peut pas comprendre un individu élaboré si l'on y voit seulement une juxtaposition d'unités constitutives (les cellules, elles-mêmes incorporant des organites qui témoignent de stades plus anciens de l'évolution), unités qui n'auraient été mises en synergie que par des voies de nature stochastique et sélective.

Il est plus difficile mais plus riche en explication, plus conformes aux observations et aux expériences, de reconnaître les lacunes existant dans nos explications, de modifier les postulats de base et de rechercher le corps de lois qui peut expliquer la cohérence du vivant dans le temps comme dans l'espace.

Deux conclusions découlent des considérations ci-dessus :

a) Si le caractère d'unicité de principe de la communication aux interfaces inter-unitaires donnent la clef des transformations du vivant, en ce cas notre mode d'approche doit être radicalement différent de celui qui est habituellement pratiqué. Il ne peut plus y avoir d'entité référentielle fixe, telle que l'« espèce ». *Tous les niveaux d'organisation et structures doivent être pris en considération et avec un outil conceptuel identique* (**Figure 4**).

b) Un tel changement d'approche suppose qu'est reconnue la **cohérence** d'ensemble des objets biologiques d'étude, dans le temps et dans l'espace. Ce changement d'approche doit aussi rendre compte de l'*ordre* observé dans la succession des étapes des transformations du vivant, ordre qui est retrouvé dans le spectre biosphérique des formes du vivant.

Ces constats nous imposent d'utiliser la notion de processus.

L'organisation de la biosphère, tels que nous l'observons dans l'espace actuel, est alors superposable à l'organisation du processus vivant dans la dimension temps.

3. NOTION DE PROCESSUS

3.1. Utilisations courantes de la notion

La notion de processus n'est pas neutre. Elle contraint à la rigueur méthodologique et ne peut être employée qu'à bon escient.

Pour le dictionnaire philosophique de Lalande (Lalande A.1926, 1985) : un processus est une « *Suite de phénomènes présentant une certaine unité ou se reproduisant avec une certaine régularité. Se dit surtout des phénomènes physiologiques, psychologiques ou sociaux, plus rarement des phénomènes physiques* ». Il est ajouté que ce mot est utile pour éviter quelques-unes des équivoques qu'engendre le mot « Evolution », en particulier entre ses cinq principaux sens. Et suit un avertissement disant que le terme est utilisé généralement de façon restrictive.

Les implications philosophiques les plus évidentes apparaissent déjà. Parler de « processus vivant », c'est admettre l'unité de lois de développement du vivant. Nous avons constaté dernièrement, lors de notre étude de l'interface à trois feuillets (Dutuit J.-M., 1995), l'impossibilité de parler de processus vivant dans le cadre du paradigme actuel. Opposer évolution humaine à évolution biologique est possible dans le paradigme alors que c'est impossible dans le cadre de notre conception. Si nous considérons que la vie est un processus, en ce cas nous sommes contraints d'admettre une unité de déroulement entre stade pré-humain de la biosphère et stade humain de la biosphère.

3.2. Concept de singularité du vivant

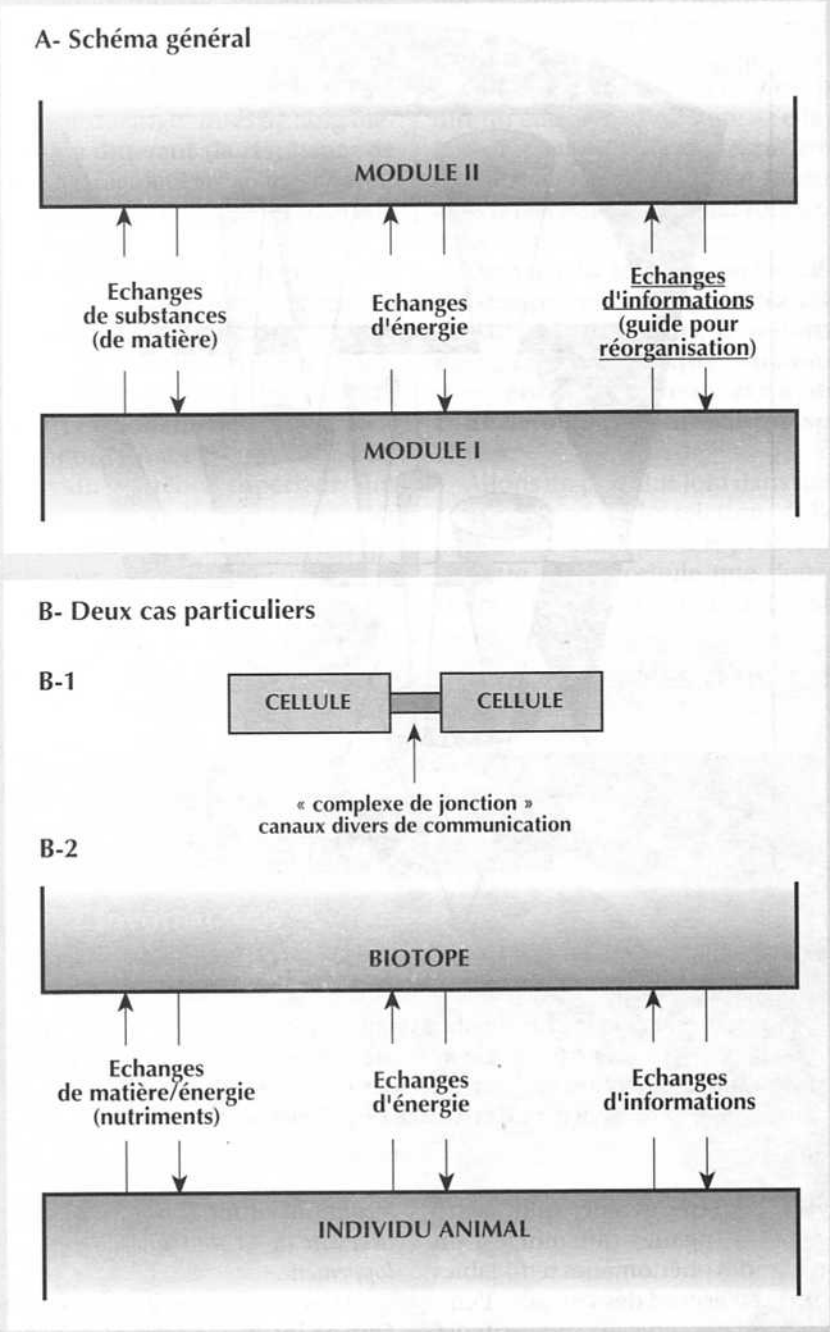
Si nous admettons que le déroulement de la vie est un processus doté d'une unité de légalité, en ce cas il devient légitime de reconnaître que toute partie du processus est déterminée par ce même corps de lois, avec les particularités inhérentes à sa situation spatio-temporelle au sein du processus.

Précédemment, nous n'avions voulu parler que d'« entités » biologiques, terme volontairement vague mais compréhensif (admettant tout objet que la pensée puisse isoler légitimement), de façon à ne pas préjuger de notre possibilité d'utiliser le terme de processus.

Si, par contre, nous admettons que le vivant doit être considéré comme un processus unique présentant à chaque instant t le tableau d'une multiplicité discrète, instantané d'une transformation globale, en ce cas le vivant sera conçu comme un ordonnancement de singularités liées entre elles de façon nécessaire. Une singularité est alors un « objet » biologique, éventuellement abstrait (par exemple, une fonction), défini par des particularités et propriétés qui lui sont propres : un taxon de rang quelconque est une singularité, mais un organite intracellulaire ou un type de système d'organes le sont également. Les singularités que nous identifions sont avant tout des objets d'analyse, des « points singuliers » significatifs de la marche ou de la composition du processus, mais pas forcément des unités « libres » dans un environnement écosystémique donné.

L'optique que nous choisissons alors n'est pas celui du naturaliste recensant ou archivant les formes spécifiques de vie, mais celui de l'analyste cherchant à comprendre l'unité

Figure 4 - Similitude des modes de communication entre les unités biosphériques



Nous cédons ici à la tentation de simplifier exagérément. Certes, il est toujours possible de distinguer entre les trois types de communication habituels : échanges de substances (nous préférons ce mot à « matière »), échanges d'énergie, échanges d'information. L'échange de substance exprime la croissance massique : apports de sucres ou de protéines à tel ou tel niveau biosphérique, par exemple. L'échange d'énergie exprime les moyens de la communication, et du travail effectué. Les échanges d'informations (infiniment variés) expriment la réorganisation croissante et indispensable, à tous les niveaux. Mais dans le cas particulier b2, nous avons tenté de montrer le côté souvent artificiel de ces distinctions sémantiques : un apport de nutriments amène à la fois matériaux d'élaboration et énergie pour l'élaboration, et même informations sur l'environnement, et sur l'organisme lui-même.

de fonctionnement de la biosphère à tous ses niveaux, prise comme un tout, dans l'espace et le temps à la fois.

3.3. Définition du processus vivant Géométrie la plus simple

Par « processus », je désignerai l'ensemble des transformations présentées par l'ensemble des singularités vivantes, ordonnées selon deux modalités majeures : chronologiquement, ou par l'organisation.

Pour éviter un développement théorique supplémentaire, nous ne débattrons pas des possibilités d'appréciation de la montée en organisation du processus, et encore moins des critères énergétiques envisageables. Remarquons cependant qu'une appréciation approchée, intuitive, du flux énergétique du processus, est possible si l'on tient compte de ses capacités de transformation, de « colonisation », d'environnements planétaires de plus en plus variés et de surface plus étendue avec le temps.

L'essence même du processus est, en effet, sa croissance planétaire :

- montée en puissance énergétique : augmentation des démographies et transformation du milieu planétaire, multiplication des biotopes.
- montée en organisation des singularités du processus comme de la biosphère.

Dans le développement du processus vie organisant progressivement l'espace-temps planétaire, il est clair que peuvent être considérés comme emboîtés, ou mis en parallèle, selon les besoins de notre réflexion, des millions et des milliards de sous-processus (**Figure 5**). Les lois générales de transformation des sous-processus sont les mêmes que celles du processus.

Au cours de son développement, le processus vivant a d'abord été confronté aux événements du monde physique (géologie planétaire). Ces événements ont généré des déséquilibres du vivant, avant même que l'histoire de ce dernier ne lui fasse accentuer ses propres hétérogénéités (augmentation de la biodiversité). De par la nature même de la vie, toute singularité est vouée aux contraintes

et aux déséquilibres.

Le processus est hétérogène, dans le temps et dans l'espace : il est fait de singularités : structures et fonctions différentes, indépendantes, complémentaires ou antagonistes. Cette hétérogénéité est le gage de la souplesse du processus dans la transformation du monde physique planétaire. Elle lui permet de se calquer plus aisément aux caractéristiques variables du monde physique au sein duquel il se développe.

3.4. Notion de hiérarchie au sein du processus Le temps

A l'échelle de temps de l'Actuel, de part et d'autre d'une interface entre deux singularités, les vitesses de développement sont les mêmes lorsque les singularités sont de même rang hiérarchique (deux cellules identiques d'un même tissu, par exemple). En ce cas, la mise en synergie se fait sans problème majeur de mise en accord des vitesses, c'est-à-dire risque de déstabilisation, sauf si l'une des singularités est elle-même dérégulée (contact d'une cellule cancéreuse et d'une cellule saine, par exemple).

Les vitesses et les rythmes des singularités de part et d'autre de l'interface sont différents lorsque les singularités sont de rangs hiérarchiques différents (une cellule d'un tissu musculaire et l'axone d'un neurone régulateur de l'activité de ce tissu, par exemple). En ce cas, un appareil adaptateur (ce que l'on appelle la « plaque motrice » des vertébrés, par exemple) règle le problème de communication entre nerf et muscle.

A l'échelle de temps de l'évolution, le problème se retrouve sous une autre forme, et à une tout autre échelle de temps : transition évolutive entre deux modules individuels, par exemple. En ce cas, la transition se fait avec une réorganisation longue et profonde, de façon à adapter les vitesses et les rythmes des deux sous-processus évolutifs successifs. Cette adaptation se fait grâce à une régulation nouvellement apparue : par exemple, le stade de procaryote, précédant la cellule eucaryote, est inclus comme organite du stade eucaryote, et la régulation du nouveau modèle régit les deux stades évolutifs en un même être. Au niveau des êtres évolués (pluricellulaires et à organes différenciés) on constate des phénomènes semblables de mise en accord des vitesses : l'emboîtement des cerveaux successifs des grands stades animaux, et leur régulation commune au sein du dernier stade résout un problème semblable.

Dans tous les cas, chaque communication interfacique ou intermodulaire est une plage de discontinuité et de réorganisation du vivant.

Le discontinu est un caractère quasiment normatif du vivant.

Mais le continu (la permanence des lois des *transformations autorisant la croissance*) intègre, englobe, la succession des discontinuités.

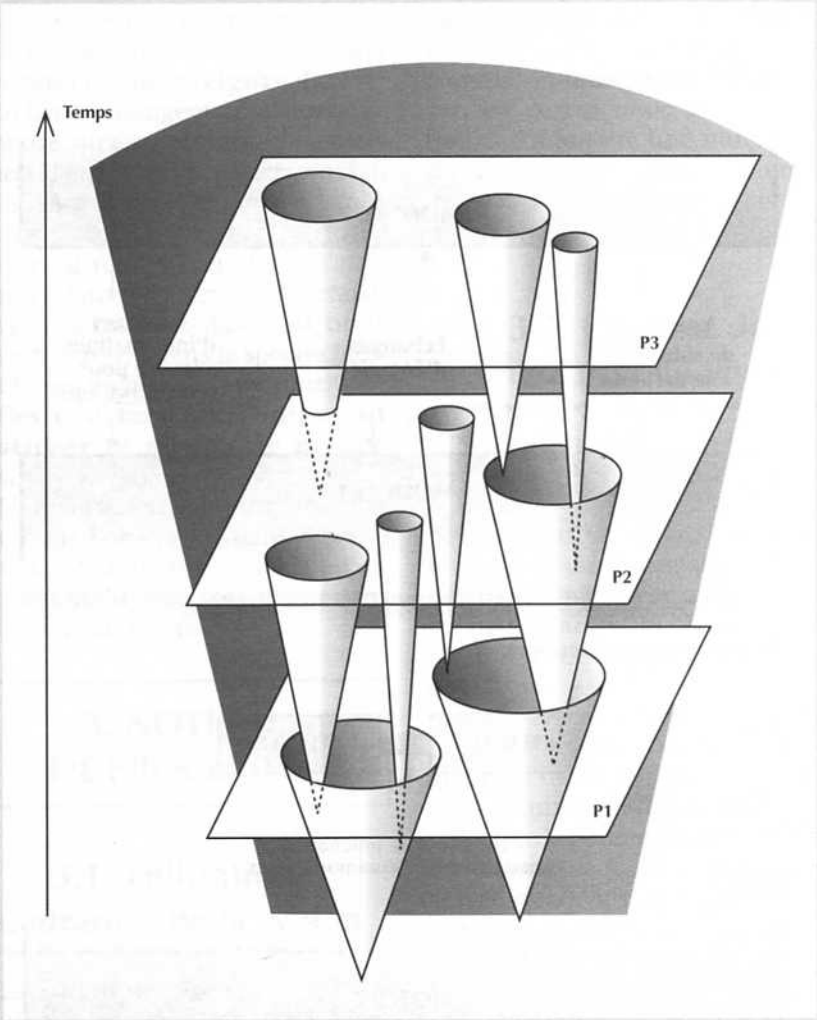
Le continu est la marque de l'unité de légalité du vivant. Il est identifiable à la nécessité de sa croissance, de son développement.

Dans tous les cas, il est clair que **le temps joue forcément le rôle de coordonnée** et non de paramètre.

Remarquons que dans cette conception d'un processus dont les diverses singularités sont liées entre elles de façon nécessaire, le rang hiérarchique d'une singularité témoigne d'abord de l'ordre d'apparition sur terre du module (la forme d'organisation) qu'elle représente.

L'ordre hiérarchique témoigne aussi de la fonction de la singularité en question dans le processus. Nous avons vu en effet qu'il y avait partage des tâches au sein du processus bios-

Figure 5 - Processus et sous-processus



La représentation la plus simple d'un processus en croissance est ce que l'on appelle parfois en topologie le «cône d'avenir». Ce schéma illustre de façon simple la notion de sous-processus en croissance emboîté dans un processus en croissance. (tiré et adapté de J. Tennenbaum, 1987).

phérique dans sa colonisation planétaire. Néanmoins, les observations qui suivent vont montrer à quel point toutes ces notions peuvent être relatives.

La connotation de subordination n'intervient au sein de la notion de hiérarchie qu'en ce sens seulement que l'*intégration des régulations* d'un ensemble de singularités de rang hiérarchique différent (la résultante de toutes les régulations sous-jacentes) se situe toujours en haut de la cascade des interfaces.

Paradoxalement, au sommet de cette hiérarchie, les organes régulateurs utilisent les modules les plus inférieurs de l'évolution comme sous-unités effectrices (rappelons encore qu'il y a emboîtement).

Donnons-en un exemple concret. L'individu vertébré supérieur (un mammifère) réunit en lui toutes les formes modulaires individuelles générées par le processus : organites intracellulaires, tissu, organes et systèmes d'organes. Mais l'organite intracellulaire, (une mitochondrie, par exemple), ou une cellule (une cellule du foie ou de l'épithélium pulmonaire, par exemple), exerce, lui aussi, une régulation sur l'organisme entier : en envoyant des messagers chimiques, ou des signaux ioniques, par exemple. En ce sens, on ne peut pas dire qu'elle soit « inférieure » : elle ne fait que remplir le *rôle qui est déterminé par son ordre d'apparition temporel dans le processus*, ce dernier fonctionnant comme un seul ensemble.

On voit là le rôle particulier du temps : en tant que quantité mesurable par nous, il ordonne des singularités que nous-mêmes tendons à considérer avant tout selon les dimensions spatiales.

Allons un peu plus loin dans notre considération sur les relations de l'espace et du temps dans le processus :

Cette même cellule que l'on retrouve partout dans tout organisme vivant, et dans toute la biosphère, nous avons vu qu'elle correspond à un module, disons un agencement spatial de molécules mais aussi de formes antérieurement générées par le processus (les organites intracellulaires).

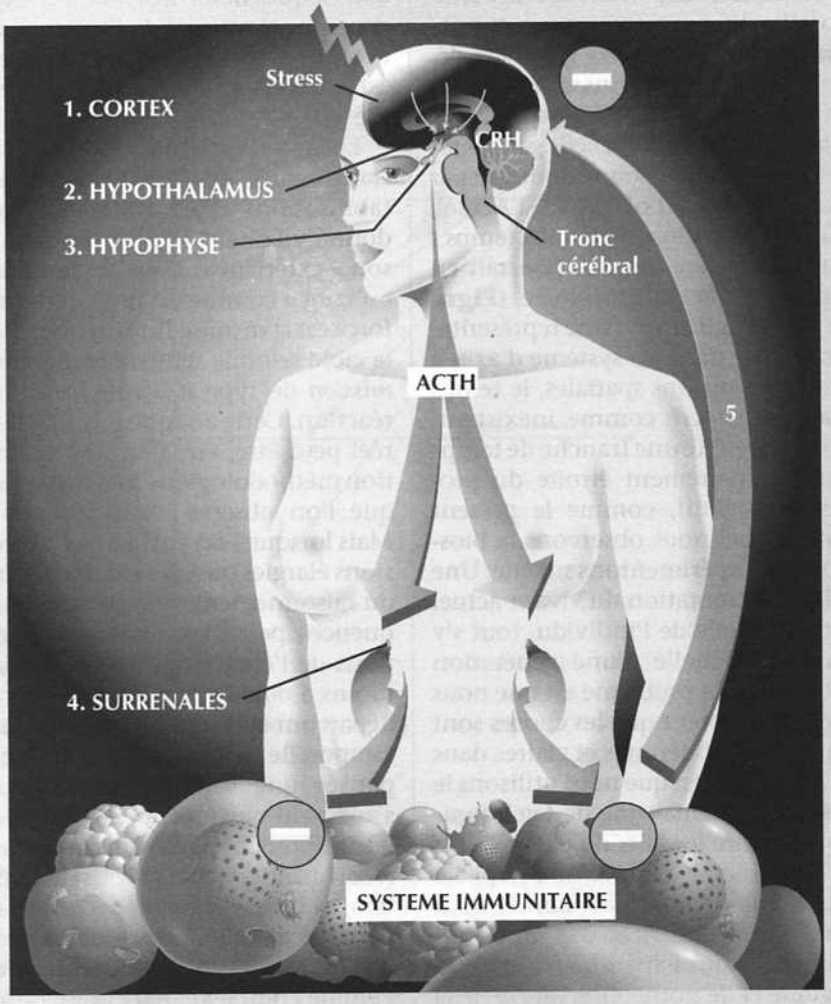
Ces modules (cellule eucaryote et ses organites) exécutent des fonctions de base fondamentales telle que l'acquisition de l'énergie.

En même temps que se développe le processus, le plan modulaire initial de la cellule eucaryote va continuer à évoluer, et l'ensemble de ses fonctions *possibles* va se diversifier.

Ainsi, une fois le module « cellule eucaryote » apparu, voici 1,5 à 2 milliards d'années, le module a continué à évoluer en même temps que d'autres modules « hiérarchiquement supérieurs » (individus pluricellulaires) étaient apparus et avaient commencé eux-mêmes leurs évolutions.

Le module « cellule eucaryote » (mais aussi les modules organitiques

Figure 6 - Régulations générales d'un organisme supérieur



Dans un organisme évolué, ici l'homme, mammifère, tout l'individu est sous régulation centralisée. On voit ici le départ de la régulation centrale (cérébrale) en direction des glandes surrénales, d'où seront libérées les hormones anti-stress. Selon nous, voir dans une cellule encéphalique un simple mécanisme asservi à un ensemble appellé « homme », c'est oublier le temps, et que l'évolution est de type autocumulatif. C'est oublier aussi que c'est l'homme entier qui est fait de cellules, module « mis au point » dans le processus en un temps du processus situé à deux milliards d'années de nous. S'il y a «supériorité» de l'homme, elle est faite de l'« infériorité » du module cellulaire. Les paradoxes instruisent parfois sur la nécessité de réhabiliter le tout : l'histoire biosphérique.

Illustration reproduite avec l'aimable autorisation d'Actualités - Innovations - Médecine, 1996, n°26, p.36.

qu'il incorpore, témoins du stade procaryote antérieur) n'est pas donné une fois pour toute. Il poursuit son élaboration, sa diversification d'expression, en même temps que les modules hiérarchiquement supérieurs et inférieurs poursuivent la leur *en connexion avec celle de la cellule*. On le voit pleinement lorsque l'on étudie les cellules nerveuses, puis corticales (celles du cortex encéphalique des vertébrés évolués), lesquelles représentent le niveau supérieur de cette expression de la cellule eucaryote.

Dans ce cas précis de cellules intégrées dans les systèmes de régulation des animaux les plus évolués, on est alors amené à constater que le très ancien module « cellule eucaryote », chronologiquement situé presqu'à la base de l'« échelle des êtres », selon la vieille expression, ce module est amené, en connexion avec des milliards d'autres au sein d'un cerveau d'organisme évolué, à réguler l'ensemble du dernier module apparu (maintenir sa cohésion structurelle et fonctionnelle), module hiérarchiquement supérieur à tous les autres modules. Le vertébré-individu n'est rien sans ses cellules, mais chacune ne se comprend que dans son intégration dans l'agencement spatio-temporel du vertébré-individu.

Prenons maintenant l'exemple de l'homme, animal doué d'une psyché réflexive (reflétant l'univers) et créatrice (susceptible de réagencer l'espace-temps biosphérique : l'espace et les vitesses). Les cellules hypothalamiques (base du cerveau) et hypophysaires y régissent les fonctions de l'organisme dont celle de la reproduction, en liaison avec le cortex cérébral. On voit là qu'*un des modules les plus anciennement généré par le processus (la cellule) est amené, en connexion avec des unités semblables, à gérer la démographie planétaire de la forme la plus évoluée du dernier module apparu, l'homme* (**Figure 6**).

Quant aux cellules corticales, qu'en tout schématisme rapide on peut dire « sièges cellulaires de la pensée », elles pourraient être considérées comme ayant à charge de transformer la planète.

Analysé de la sorte, le concept de subordination des singularités disparaît au profit de ceux de complémentarité des tâches singulières et d'unicité de la transformation biosphérique.

N'avons-nous cherché, dans les paragraphes et exemples ci-dessus qu'à générer des paradoxes ? Assurément pas. Nous avons cherché à montrer que le processus biologique n'est pas une succession d'étapes dont l'une rend caduque les précédentes en les « asservissant » à une régulation supérieure, mais qu'il doit être considéré comme un tout indissociable, au niveau de l'espace comme au niveau du temps. Ce tout génère progressivement ses phases (ou stades, ou solutions) « biotechniques », stades structurels et fonctionnels à la fois qui *poursuivent leur évolution en même temps que le processus se développe de façon nécessaire* avec leur devenir.

Seule la connaissance de l'ensemble donne la compréhension du processus. Chaque partie du tout est en même temps le tout. Et à la limite du raisonnement, distinguer entre partie et tout est affaire de perception plus que d'objectivité.

4. COUPE TEMPORELLE

Lorsque nous parlons de *coupe* temporelle du processus, nous supposons la possibilité de « geler » le déroulement du processus vivant et d'en « faire l'état ou le bilan » selon un *quasi instantané à l'échelle géologique des temps*, à une époque donnée : par exemple, ce que l'on appelle l'Actuel, ou encore la biosphère d'un temps *t* du Carbonifère, tel que pourrait en témoigner la paléontologie (**Figure 7**). Il s'agit alors d'une représentation plane dans un système d'axes à deux dimensions spatiales, le temps étant considéré comme inexistant. C'est en réalité une tranche de temps extraordinairement étroite du processus évolutif, comme le présent dans lequel nous observons la biosphère et expérimentons sur elle. Une telle représentation du vivant actuel est à l'échelle de l'individu, tout s'y passe à l'échelle d'une génération d'homme. Le problème est que nous croyons souvent que les choses sont parfaitement définies et claires dans ce cadre. Si bien que nous utilisons le principe d'actualisme de Lyell pour comprendre les faits du passé.

Le principe d'*actualisme* (appelé aussi d'*uniformitarisme*) admet qu'il est légitime de tirer des enseignements de notre expérimentation biologique et de notre observation de la nature, puis d'extrapoler ces résultats à l'échelle de l'évolution. Ce principe dit en réalité que les même causes produisent les mêmes effets à toutes les époques. Il s'agit d'un principe qui est pour nous à tendance mécaniste et qui ne dit que ce qu'il veut dire : dans des conditions identiques, les mêmes causes physico-chimiques produisent les mêmes effets.

L'organisation du processus apparaît certes mieux selon un mode d'étude diachronique (historique) que selon un schéma synchronique (dans l'organisation d'une coupe temporelle). Cependant, l'expérimentation n'est possible que dans le cadre restreint de ce que nous avons défini ci-dessus comme une tranche conventionnelle du processus, d'extension temporelle infime et négligeable par rapport à la durée de l'existence effective de la biosphère.

Mais il est vrai aussi que la « durée temporelle » biologique, dans l'*Actuel*, ne peut pas se réduire à un instantané où plus rien ne changerait. Ce ne serait que fiction scientifiquement nocive. Ce que l'on appelle l'Actuel (le Quaternaire très récent dans lequel nous observons et expérimentons) est aussi le théâtre d'une évolution biologique, même si elle est indécelable. Ce ne peut pas être nié.

Lorsque l'on étudie la vie, à son stade actuel, on admet que les déstabilisations d'un système vivant donné viennent le plus souvent de son « extérieur ». L'agent stressant y est conçu comme un moteur dont la force est transmise linéairement vers la cible selon le schéma d'une *transmission* de type mécanique action/réaction. Cette attaque mécaniste du réel peut être, en effet, une précaution méthodologique inévitable lorsque l'on observe ou expérimente. Mais lorsque l'on passe à des conclusions élargies ou à des extrapolations du raisonnement qui ont des conséquences possibles sur nos conceptions de l'évolution, on tend néanmoins à oublier que les concepts de départ ont été fondés dans une coupe temporelle de la vie. Les outils de la pensée que sont les concepts ne s'adaptent plus aux nécessités que de façon approchée, n'autorisant qu'une reconstitution linéaire et sans relief temporel des événements, compréhension qui a les mêmes insuffisances qu'une photographie plane d'un volume complexe, par comparaison avec un hologramme.

On sait, en physique, que la matière se comporte différemment à nos yeux selon ses états physiques, selon des ordres de dimensions spatiales et temporelles différents. On change alors de méthodes si cela s'avère nécessaire (physique quantique ou physique relativiste, par exemple). Nous voyons rarement qu'il devrait en être de même en biologie évolutive.

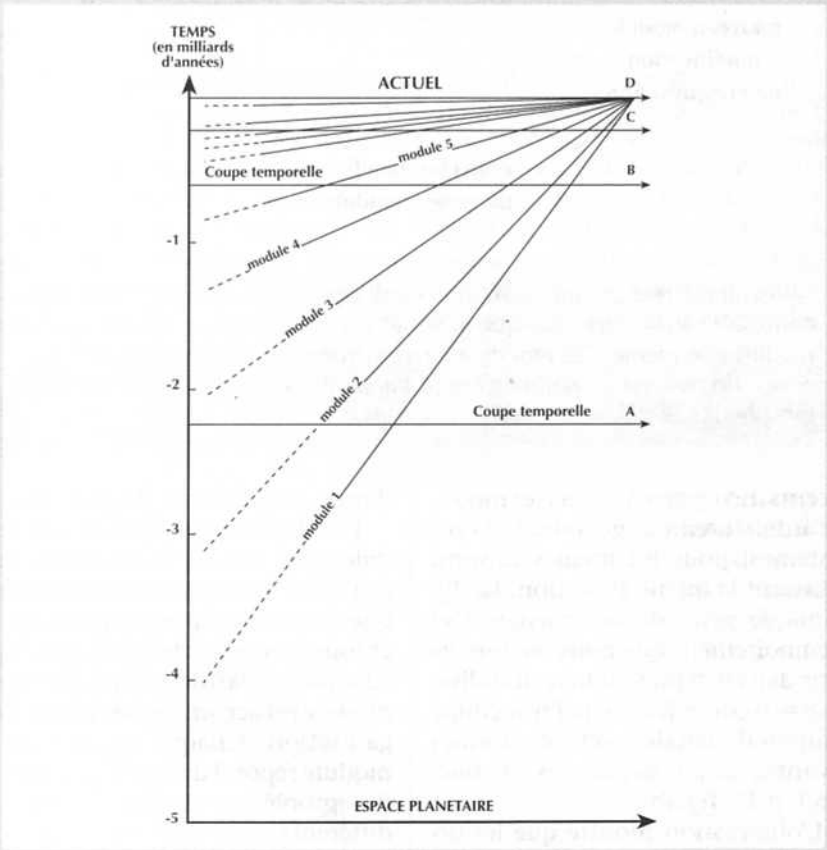
5. PREMIERE APPROCHE DE LA NOTION DE « REFERENTIEL DU PROCESSUS »

5.1. Insertion de la vie

On *postule* que le processus vivant a une origine. L'univers physique serait comme la matrice du monde vivant. La vie serait apparue dans un univers qui, selon la physique contemporaine, est un continuum (voir par exemple : Einstein A. et L.Infeld, 1963 ; Heisenberg W., 1962 ; Poincaré H., 1968 ; Schrödinger E., 1951). La physique est le cadre le plus général de nos représentations et conceptualisations. Mais, tandis que l'univers physique est caractérisé par ce que l'on peut appeler trivialement une certaine permanence, ou stabilité (le fait que les catégories d'objets relativement « simples » de l'univers physique demeurent toujours les mêmes), tout est en instabilité relative et en transformation dans le monde du vivant.

Ce type de distinction assez abrupte entre monde physique et monde vivant appartient selon nous, si l'on excepte ses fondements thermodynamiques actuels, à une vision superficielle et conventionnelle des choses, liée entre autres à des problèmes d'échelle. L'histoire géologique sédimentaire (l'histoire de la croûte terrestre), conséquence et cadre d'insertion de la vie, est déjà faite de ruptures, de successions d'étapes historiquement ordonnées. Or, elle est à la fois d'essence biologique et de nature minérale.

Figure 7 - Notion de coupe temporelle



Toute coupe temporelle, accessible aisément dans l'Actuel, difficilement par la paléontologie et la géologie pour les paléofaits, nous livre l'état d'un instantané du processus : l'ensemble des singularités générées à cet instant, moins celles qui ont disparu de la surface planétaire.

5.2. Espace et temps « biologiques » Le géocentrisme inconscient

L'ancrage de nos concepts en biologie eut lieu jusqu'à présent dans un cadre dimensionnel étroit, la terre, par comparaison avec l'échelle des grandeurs de l'univers, pour l'espace comme pour le temps, cadre habituel à la physique. Nous sommes dans le cadre d'une représentation où nous stipulons que les phénomènes significatifs du vivant ne peuvent avoir qu'une dimension, et des problèmes, terrestres.

Toutefois, cet ancrage terrestre de la vie que l'on tend à concevoir comme frappé d'évidence n'a que *valeur de postulat*. Cette position méthodologique n'est en accord qu'avec l'état de nos ignorances actuelles et non celui de nos connaissances : nous ne connaissons actuellement de vie organisée que sur terre, et nous croyons faire preuve de rigueur en ne laissant pas ouvert le champ de la réflexion à une hypothèse qui semble encore difficilement imaginable : et si la vie n'avait pas d'origine ? Et si l'évolution était un processus d'échelle cosmique ?...

Disant cela, nous ne recherchons aucunement la provocation. Nous n'insistons que sur une évidence : nous ignorons encore quel est le cadre spatio-temporel réel du processus vivant.

5.3. Eléments dynamiques principaux des transformations du processus

Le processus biosphérique transforme l'espace planétaire : la modification des écosystèmes au cours du

temps est l'expression de cette transformation globale. Les sous-processus emboîtés que nous distinguons conventionnellement sont les expressions de cette transformation globale, à leurs échelles respectives.

Nous pouvons accéder à la compréhension de cette transformation globale sans chercher à voir, pour le moment, comment elle s'effectue à tel ou tel niveau (nous évoquons là les modalités des variations et adaptations des espèces vivantes). Le processus biogénique s'inscrit dans un contexte lithosphérique et atmosphérique planétaire que nous avons reconnu hétérogène. L'écosystème général planétaire comprend une phase biologique et une phase minérale, toutes deux en évolution conjointe. A tout moment du processus, le dynamisme propre de la phase biologique (de toutes ses singularités) la porte à s'auto-transformer, ne serait-ce que pour s'adapter aux transformations qu'elle induit dans son support physique. Pour exemple de ces transformations, que l'on songe aux systèmes géologiques crétacés : les organismes vivants ont édifié des kilomètres d'épaisseurs de strates calcaires. Que l'on songe aussi aux couches à oolithes ferrugineuses de Normandie, aux récifs coralliens, au rôle des stromatolithes dans l'histoire de la croûte terrestre, etc.

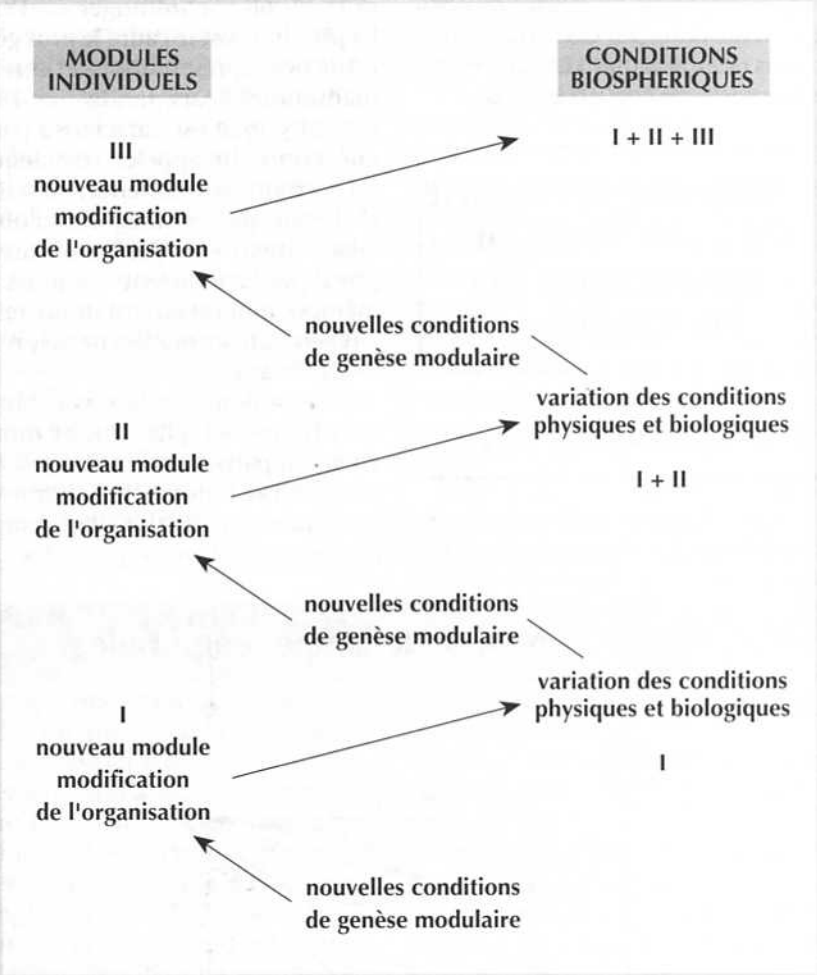
Le processus génère périodiquement des modules ou réorganise certains des modules déjà apparus : stades rénaux ou cardio-vasculaires des vertébrés, par exemple. On peut considérer que chaque module nouvellement apparu répond à un nouvel état biosphérique au sein duquel il a davantage de potentialités évolutives que les modules précédemment générés. Il représente la solution optimum, c'est-à-dire la plus économique énergétiquement et la plus riche en potentialités organisationnelles ultérieures, aux problèmes posés par la transformation biosphérique. *Chaque module est en quelque sorte la réponse à une crise de croissance planétaire, la réponse à un stress auto-induit du processus.* En résumé : la genèse régulière de tels modules est **nécessaire** dans le cadre d'un processus qui transforme son environnement lors de sa progression (**Figure 8**).

Les modules individuels successifs sont de plus en plus organisés, ne serait-ce que parce qu'il y a accroissement de leur diversité et que les plus récents incorporent en eux les modules antérieurement générés. Les écosystèmes, pour les mêmes raisons, subissent la même évolution. La dynamique générale de croissance et d'emboîtement que nous reconnaissons dans le temps au niveau individuel se reconnaît au sein d'une coupe temporelle dans le spectre des formes vivantes des écosystèmes (*Fusion*, n°59, p.35, fig.5b).

L'observation montre que les ordres de dimensions moyennes de ces formes d'organisation modulaires vont en croissant selon la flèche du temps. Deux ordres de dimension environ séparent les formes les plus petites des formes les plus grandes d'un même module (**Figure 9**).

L'emboîtement répétitif des modules générés successivement au cours de l'évolution revient à utiliser à chaque étape des réponses structurelles et fonctionnelles de même principe. Chaque apparition d'un nouveau module est accompagnée d'une réorganisation. Chaque apparition de module répond de façon spécifique à des problèmes environnementaux différents : la cellule eucaryote photosynthétique génère une atmosphère oxygénée, freine le développement des organismes anaérobies qui vivaient depuis deux milliards d'années et autorise du même coup une vie aérobie évoluée. Une fois inclus

Figure 8 - Progression synergique des modules individuels et des écosystèmes planétaires



Au fur et à mesure que les modules individuels apparaissent, la biosphère complète son spectre faunique et floral, la phase minérale des biotopes se modifie elle-même. Ces modifications environnementales créent en permanence de nouvelles conditions pour l'apparition de nouvelles singularités biosphériques.

Figure 9 - Spécificité de dimensions des principaux modules structuraux

MODULES REPERES		ORDRES DE DIMENSION APPROCHEES (en mètres)
Rickettsies		$0,5.10^{-6}$
bactéries (cellules procaryotes	→ organites intra-cellulaires	10^{-6}
cellule eucaryote libre ou incluse dans un organisme supérieur		10^{-5} à 10^{-4}
tissus		10^{-3} à 10
organes		10^{-1} à 10
individus animaux individus végétaux		10^{-1} à 30 10^{-1} à 100

L'engendrement de chaque nouveau module s'accompagne d'une augmentation de ses dimensions moyennes, par rapport à celles du module précédent. C'est une des multiples expressions de la croissance du processus.

dans un module plus compréhensif (par exemple, l'organite photosensible et générateur d'oxygène dans le cytosol d'une cellule eucaryote, ou l'organite de type vibrion qui va jouer le rôle de flagelle et permettre le déplacement), le module de base va permettre le partage des tâches au sein de l'organisme plus élaboré ainsi constitué. Parallèlement, *les instances informatives et régulatrices de chaque entité se développent rapidement. Les interrelations entre ses éléments successifs augmentent.* L'organisation et l'emboîtement des écosystèmes offre une dynamique plus large pour la genèse de nouveaux modules en même temps qu'un partage des tâches s'effectue aussi au sein des écosystèmes emboîtés. C'est ainsi que l'existence conjointe de formes de vie aérobies et anaérobies va permettre le recyclage plus rapide et plus complet de la matière organique.

Complétons les constats et remarques ci-dessus. S'il existe une spécificité de dimension pour chaque module (aspect structurel du problème), il existe aussi une spécificité de ses propriétés, c'est-à-dire son adaptation à une tâche particulière (aspect fonctionnel). C'est pourquoi l'on retrouve dans une même coupe temporelle des modules approximativement spécifiques de chaque ordre de dimension : organismes pré-bactériens (virus, mycoplasmes, prophages, etc.) et bactériens, organites intracellulaires, cellules eucaryotes, tissus, organes et systèmes organiques, individus organisés.

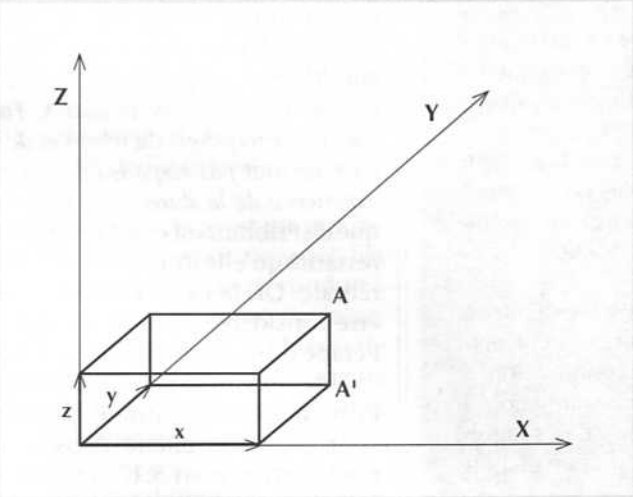
5.4. Référentiel physique et référentiel évolutif

Nous ne ferons ici qu'amorcer la présentation de la notion de référentiel évolutif. Il serait trop long de la développer, mais néanmoins elle est inséparable de la notion de processus.

En mécanique, le référentiel est un corps supposé solide par rapport auquel peut être situé un solide. Ce corps est symbolisé par un système d'axes (**Figure 10**).

Ce que nous cherchons est un ca-

Figure 10 - Référentiel (repère) mécanique



Lorsque l'on veut situer à un instant *t* un corps en physique, il faut trois axes spatiaux, correspondant aux trois dimensions que nous connaissons. Le temps a valeur paramétrique et il n'y a pas de transformation du corps au cours de son déplacement.

dre de valeurs (de repères) nous permettant d'apprécier les transformations du processus biosphérique au cours du temps et dans l'espace planétaire. Toujours est-il qu'il nous faudra établir une jauge acceptable permettant de situer les singularités du processus au sein de ce dernier.

Remarquons que, même si ce n'est pas dit explicitement par la biologie évolutionniste actuelle (par la Théorie Synthétique de l'Evolution), elle utilise empiriquement un tel cadre : il est d'ordre systématique et taxinomique, le « repère » étant l'espèce, animale ou végétale. On cherche à ramener tout jugement sur l'évolution à cette jauge paradigmatique qu'est la notion d'espèce. Or, nous avons dit que l'espèce n'était pour nous qu'une singularité comme les autres au sein du processus.

Les principales valeurs dont il conviendra de juger pour situer dans le processus un sous-processus, ce qu'il y représente, ou une singularité à un temps *t* donné du processus, ce seront les potentiels énergétique et organisationnel du sous-processus ou de la singularité. Nous définirons dans un autre travail des moyens d'appréciation de ces valeurs (cf. aussi Dutuit J.-M., 1987).

Il nous faudra également être en mesure d'apprécier les vitesses des transformations aux différents niveaux d'organisation, et *leur donner un sens* dans la marche globale du processus. Il y a de nombreux arguments, objectifs, factuels ou méthodologiques, qui nous disent que les vitesses sont relatives. Mais par rapport à quelle jauge planétaire peut-il en être jugé ? Si, par exemple, la durée de vie d'une cellule eucaryote n'a rien à voir avec la durée de vie d'un être pluricellulaire, il n'en demeure pas moins qu'au sein d'un même être pluricellulaire, il y a un ajustement, une régulation, qui se fait entre la durée de vie de l'être global (l'individu métazoaire) et les durées de vie des cellules qui le constituent. Le phénomène d'« *apoptose* » ou « mort cellulaire programmée », que l'on commence à mieux comprendre, est un de ces mécanismes de régulation de ces différences de « vitesses de vie » (voir Anonyme, 1994 ; Denis H. et B.Mignotte, 1994 ; Phélouzat M.-A., R.A.Quadri, J.J.Proust, 1995 ; Zychlinsky A. et Ph.J.Sansonetti, 1994).

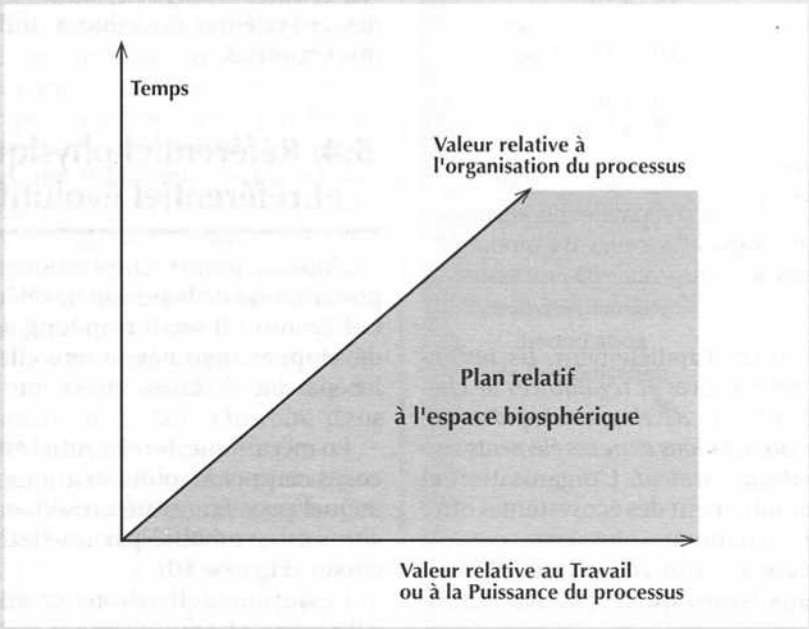
Et enfin, toujours au plan des vitesses, il demeure à apprécier à sa réelle valeur la notion plus intuitive qu'objective d'« accélération de l'évolution » (Dutuit J.-M. et P.Dutuit, ?1996, ch.6).

Voilà qui nous ramène au temps.

Karl Pribram faisait remarquer (1986, p.147) : « *Dans le cerveau comme dans la description par Einstein (...) du monde physique en général,* l'espace et le temps forment un seul jeu de coordonnées (souligné par nous J.-M.D.). *Des successions rapides de sons sont perçues tout aussi simultanément que des lecteurs composent des configurations visuelles et tactiles. Lorsque des objets ou des événements sont distincts dans l'espace, on peut les séparer et s'en occuper les uns après les autres. Toutefois, ces perceptions du temps et de l'espace ne sont pas responsables de notre expérience de la durée,...* ». La remarque de Pribram est d'autant plus intéressante qu'elle intéresse l'activité cérébrale. Or, la psyché humaine peut être considérée comme l'expression, l'étape ultime actuelle, du processus.

Une remarque similaire à celle de Pribram, concernant le processus, était presqu'implicite dans ce que nous écrivions en 5.1. Nous tentons seulement de débusquer les fausses évidences. Cette remarque est qu'il y

Figure 11 - Base d'un référentiel biologique



Ce n'est pas l'aspect schématique qui est le plus important. Poser les bases d'un référentiel biologique sous forme de repères axiaux a surtout un intérêt conceptuel, celui de réfléchir à une jauge possible d'un état du processus ou de l'un de ses sous-processus.

Et quand nous écrivons « jauge », nous ne cherchons pas à quantifier à tout prix, ce qui n'aurait guère de sens, pour des raisons trop longues à développer ici. Par contre, raisonner sur des vitesses et variations de vitesses relatives de sous-processus présente un réel intérêt.

Pour la maniabilité du repère, il faut nous contenter de trois axes. Or le temps est obligatoirement une des coordonnées : ce sont des variations de vitesses relatives qui nous intéressent, et nous voulons figurer des transformations de sous-processus et non pas le déplacement d'un solide dans un espace euclidien.

Nous pourrions utiliser pour l'espace deux axes ayant valeur volumique. Mais l'espace biosphérique en lui-même n'est pas d'un intérêt immédiat pour notre propos. Ce que nous entendons étudier est plutôt la transformation de cet espace biosphérique par un processus lui-même en transformation. Il vaudra donc mieux consacrer nos deux axes spatiaux à des valeurs faisant référence au travail et à l'organisation du processus, dans la mesure où nous pourrions définir ces valeurs de façon acceptable.

a une ressemblance entre la mécanique relativiste et la biologie évolutive : le temps n'y est d'aucune façon un paramètre, comme en mécanique classique.

Le temps y est une coordonnée au même titre que l'espace.

En ce cas, si nous avions à matérialiser notre référentiel par un système d'axes, le référentiel comporterait au moins quatre axes. *Ce sera un référentiel d'espace-temps.*

Et tout nous dit que si nous jugeons de la variation de la vitesse du processus, ce ne pourra être qu'au plan planétaire. La jauge la plus simple sera proche d'une *densité de flux démographique*, laquelle implique la biomasse planétaire, assimilable à une puissance si on la considère dans sa croissance, ou sa décroissance. Espace, temps, énergie et organisation, peuvent alors être pris en considération.

On comprend, puisqu'il n'y a pas d'évolution biologique sans temps à l'échelle des milliards d'années, que nous mettions toujours l'accent sur l'expression : l'*« espace-temps biologique »*.

6. CONCLUSION

On a sans doute constaté que l'utilisation de la notion de processus a des conséquences conceptuelles immédiates, et lointaines, qui ne sont pas anodines.

Il est clair que si l'on était amené à adopter une telle conception du vivant, par nécessité de cohérence méthodologique, c'est l'édifice scientifique tout entier qui devrait alors, lui aussi, « se réorganiser après déstabilisation causée par un stress » ! Et la technologie, l'économie, les autres sciences humaines, seraient contraintes de suivre le mouvement. Ces refontes du savoir ont toujours été observées à l'échelle des décennies ou du siècle.

Admettre que la vie est un processus *dont les sous-processus sont liés entre eux de façon nécessaire*, conduit à admettre du même coup, de façon contraignante, que tout problème de déstabilisation durable sur la terre ne pourra se régler efficacement qu'à l'échelle planétaire. Le retour à une régulation efficace, une réorganisation après déstabilisation, doit toujours s'opérer par le haut (Dutuit J.-M. et P.Dutuit, ?1996).

Si le savant Faust s'imagine « pragmatique » en faisant entrer le diable dans son cabinet (Goethe W., 1808 et 1832) et prétend obtenir son bonheur tout seul, en oubliant qu'il ne peut rester souverain qu'en observant la légalité valable pour tous, c'est la perte de Marguerite qu'il risque d'entraîner, et en même temps son malheur et son ignominie à lui, Faust le chercheur.

C'est un drame quotidien et commun, d'origine séculaire ou même millénaire, que l'illusion que l'on accédera plus facilement à la connaissance du réel si on tronçonne son étude en mille morceaux. C'est un peu ce que traduit la fable du poète Ogden Nash qu'aimait citer le célèbre psychiatre américain Milton Erickson (Erickson M., 1983, p.21), pour expliquer qu'exhorter à la spontanéité est dénué de tout sens. La fable d'Ogden Nash pourrait illustrer aussi l'union indissoluble du continu et du discontinu dans l'évolution.

Dans cette fable, un grand mille-pattes avance sans heurt le long de sa route. Arrive un curieux qui veut connaître le comment de sa progression et lui demande : « Quel pied vient avant l'autre ? » Et voilà que le pauvre mille-pattes, psychologiquement déstabilisé, se renverse dans le fossé ! ■

Notes

1. « The concept of organization doesn't properly belong to the lexicon of physics or chemistry. Organization involves function, and the physical sciences don't deal in function...

Organized systems are characterized by structural relationships that require *information* for their specification...

Since it depends always on functions, organization is a necessarily qualitative concept. » (Wicken J.S., 1987, p.40).

2. « When dealing with transformation processes performing certain prescribed tasks we call them *functions*....

A system will be considered as organized, if it performs a set of coordinated functions. The *degree of organization* of an organized system may then be defined as the complexity of the set of coordinated functions. (This is a definition which needs to be made more precise.) » (Eriksson K.-E., 1986, p.3).

3. Paradigme: Thomas S.Kuhn (1970/1983) a défini les paradigmes comme : *« ...les découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs des problèmes types et des solutions »*. Nous définirons quant à nous un paradigme comme le cadre axiomatique et conceptuel général dans lequel s'inscrit un corps de sciences. Un paradigme a donc des interdits, et il contraint la pensée à tenir compte d'obligations au niveau des postulats, des concepts et des logiques.

4. Epigenèse - Epigénie : Le concept d'épigenèse est multiple, difficile à cerner dans la mesure où il caractérise justement une plage de phénomènes mal connus : ceux qui se situent entre le codage déclenché par le génome au début de l'ontogénie (l'élaboration de l'être) et le type (le phénotype) qu'exprimera une population de l'être, dans des conditions environnementales données. Chez les végétaux supérieurs Demarly Y. et M. Sibi (1989) comparent l'information de la plante à un clavier riche en information redondante et dotée de systèmes de régulation génétique très sensibles. D'où résulte la souplesse adaptative du végétal supérieur. Cette gestion de l'information génétique a pour eux la forme d'un réseau complexe de signaux moléculaires constituant une *« information mobile qui circule d'environnement à tissus, d'organe à organe, de cellule à cellule, de cytoplasme à noyau, et qui détermine donc au contact de l'ADN une population d'informations mobiles appelée épigénique »*. Ils vont jusqu'à comparer le mode d'action des éléments tissulaires et cellulaires intervenant dans cette transmission à la transmission de signaux neuronaux dans une structure cérébrale. C'est là un schéma très riche qui favorise la réflexion sur la vie.

5. Systématique, phylétique, taxinomie. La systématique est l'ensemble des disciplines ayant à classer les espèces vivantes. La phylétique cherche à retrouver au travers de cette classification une généalogie réelle, et non arbitraire, qui exprime la transformation réelle d'une lignée que matérialisent les espèces étudiées. La taxinomie est la discipline qui attribue, selon des règles précises, un nom, une appellation, à une espèce ou à un groupe d'espèces de rang divers.

Bibliographie

Anonyme, 1994, *Le point sur l'apoptose*, Dossier de Act.-Innov.-Méd., 11, Sept.94, 35-37.

Aron J.-P., 1968, *Présentation de l'édition de la Philosophie zoologique*, de Lamarck, Union Générale d'Edition (10/18 n391-392), Paris, 5-35.

Atlan H., 1972, *L'organisation biologique et la théorie de l'information*, Hermann (Actualités scientifiques et industrielles, 1432), 1992, Paris.

Atlan H., 1974, « On a Formal Definition of Organization », *J.Theor.Biol., 45*, 295-304.

Atlan H., 1975, *Modèles d'organisation cérébrale*, Rev.élect.encéphal.neurophy.clin., Prob. méthodol.syst.nerv., Av.-Juin 1975, 5, 2, 182-193, Masson.

Atlan H., 1979, *Entre le cristal et la fumée. Essai sur l'organisation du vivant*, Seuil, Paris, 1979.

Demarly Y., 1975, *Considérations théoriques sur la concurrence chez les végétaux*, Ann. Amélior. Plantes, 25 (I), 65-83.

Demarly Y., 1976, *La notion de programme génétique chez les végétaux supérieurs*, Ann. Amélior. Plantes, 26 (2), 117-138.

Demarly Y., 1977, *Relations hôte-pathogène et stratégie des multilignées*, Ann. Phytopathol., 9 (1), 21-31).

Demarly Y., 1985, *L'épigénique*, Bull.Soc.Bot.Fr., 132 (3/4), 79-94.

Demarly Y. et M. Sibi, 1989, *Amélioration des plantes et biotechnologies*, John Libbey Eurotext, Montrouge.

Denis H. et B.Mignotte, 1994, *L'apoptose dérive-t-elle de la mort nucléaire programmée mise en œuvre par les protistes ?*, Méd./Sciences, 10, 6-7 (Juin-Juil.), 687-695.

Dutuit J-M., 1987, « Fonction générale de croissance du processus vivant », *Fusion*, éd.fr., 21, 16-38, 23 pl., 24 fig., 2 tab., I annexe.

Dutuit J.-M., 1994, « Lamarck, le XXème siècle et la dynamique biosphérique », *Fusion*, 53, Nov.Déc. 1994, 13-23.

Dutuit J.-M., 1995a, « Théorie de l'évolution de la biosphère et établissement de nouvelles frontières », *Fusion*, 54, Janv.Fév. 1995, 24-39.

Dutuit J.-M., 1995b, « Die Evolution des Lebens als Prozess steigender Negentropie », *Fusion* (All.), 16, 4, 41-49.

Dutuit J.-M., 1996, « L'homme-individu et la biosphère. Notion d'Interface à trois feuillets », *Fusion*, 59, Janv.Fév. 1996, 22-41.

Einstein A. et L.Infeld, 1938, *L'évolution des idées en physique*, Payot 1963 (p.b. n47), Paris.

Erickson M.H., 1983,- Healing in Hypnosis. 1986, *L'hypnose thérapeutique*, quatre conférences, ESF, Paris.

Eriksson K.-E., 1986, Self-Organization and Information Theory, *In* : C.W.Kilmister (ed.), Disequilibrium and Self-Organisation, D.Reidel, Dordrecht (Holland), 1-10.

Fischer H.A., 1989, Photons as Transmitter for Intra- and Intercellular Biological and Biochemical Communication - The Construction of a Hypothesis, *In* : F.A.Popp, Electromagnetic Bio-Information, Urban & Schwarzenberg, München, Baltimore, 193-199.

Fröhlich H., 1983, *Coherent Excitations in Biological Systems*, Ouvr. collec., Springer-Verlag, Berlin, New York.

Goethe W., 1808 et 1832, *Faust*, Herausgegeben und kommentiert von Erich Trunz, Verlag C.H.Beck, München, 1991, Faust : p.9-420, Kommentarteil : p.421-775 ; Faust (fr.) ; Flammarion (Garnier-Flammarion n°630), Paris, 1984.

Grundler W., U.Jentzsch, F.Keilmann and V.Putterlik, 1988, *Resonant Cellular Effects of Low Intensity Microwaves, In* : Froehlich H., Biological Coherence and Response to External Stimuli. Springer-Verlag, Berlin, New York, 65-85.

Heisenberg W., 1962, *La nature dans la physique contemporaine*, Gallimard (idées), Paris.

Idate, 1986, *Science et pratique de la complexité*, Ouvrage collectif, Actes du colloque de Montpellier, Mai 1984, La Documentation Française, Paris.

Kremer F., L.Santo, A.Poglitsch, C.Koschnitzke, H.Behrens, and L.Genzel, 1988, *The Influence of Low Intensity Millimetre Waves on Biological Systems, In* : Froehlich H., Biological Coherence and Response to External Stimuli. Springer-Verlag, Berlin, New York, 86-101.

Kuhn T.S., 1962, (1983 : fr.) *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion-Champs, Paris.

Lalande A., 1926, *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*, PUF 1985 (15è éd.), Paris.

Lamarck J.-B. de, 1809, *Philosophie zoologique*, Union Générale d'Editions, 10-18, Paris, 1968.

Li K.H., F.A.Popp, W.Nagl, and H.Klima, 1983, *Indications of Optical Coherence in Biological Systems and Its Possible Significance, In* : Frohlich H. and F.Kremer, Coherent Excitations in Biological Systems, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Mercer E.H., 1981, *The Foundations of Biological Theory*, John Wiley & Sons, New York, Toronto.

Mishra R.K., 1986, *The Physical Matrix for Self-Organisation, In* : C.W.Kilmister (ed.), Disequilibrium and Self-Organisation, D.Reidel, Dordrecht (Holland), 185-195.

Morin E., 1986, *Sur la définition de la complexité, In* : Science et pratique de la complexité, Actes du coll. de Montpellier (Mai 1984), La Documentation Française, Paris, 79-85 p.

Peacocke A.R., 1989, *An Introduction to The Physical Chemistry of Biological Organization*, Clarendon Press, Oxford.

Phelouzat M.-A., R.A.Quadri, J.J.Proust, 1995, *Apoptose et sénescence*, Médecine/Sciences, 11, 2, Fév.95, 894.

Pichot A., 1993, *Histoire de la notion de vie*, Gallimard (Tel 230), Paris.

Poincaré H., 1902, *La science et l'hypothèse*, Flammarion, 1968.

Popp F.-A., 1984, *Biologie de la lumière. Bases scientifiques du rayonnement cellulaire ultra-faible*, Marco Pietteur (Résurgence) 1989, Liège.

Popp F-A., 1986, *On the Coherence of Ultraweak Photoemission from Living Tissues, In* : C.W.Kilmister (ed.), Disequilibrium and Self-Organisation, D.Reidel, Dordrecht (Holland), 207-320.

Popp F-A. éd., 1989, *Electromagnetic Bio-Information*, Collectif, Urban & Schwarzenberg.

Pribram K.H., 1986, *Complexité et causalité, In* : Science et pratique de la complexité, Actes du colloque de Montpellier, Mai 1984. La Documentation Française, Paris, 143-157.

Schoffeniels E., 1984, *Biochimie comparée*, Masson (2è éd.), Paris.

Schrödinger E., 1935, Trad.franç. 1954 : *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil (Points-Sciences S78), Paris, 1992.

Schützenberger M.-P., 1996, « Les failles du darwinisme », *La Recherche*, 283, 86-90.

Tennenbaum J., 1987 (May), *The Geometry of « Nested » Neguentropic Processes. Hyperspherical and double hyper-spherical functions, (non publié)*. Memorandum on work-in-progress, FEF. Leesburg (USA), Paris, Wiesbaden (All.).

Wicken J.S., 1987, *Evolution, Thermodynamics, and Information, Extending the Darwinian Program*, Oxford University Press.

Zychlinsky A. et Ph.J. Sansonetti, 1994, « Les bactéries et la mort cellulaire programmée », *La Recherche*, 25, 264, 444-445.