

Essai sur

LA LOGIQUE DU VIVANT

ET LA THÉORIE

DE L'AUTO ORGANISATION

Préambule aux trois essais

L'ensemble des trois essais que je présente est le produit d'une réflexion individuelle, donc forcément limitée et confuse. Ceci d'autant plus que je n'ai aucune formation scientifique.

Penser autrement, tel est le but de ma démarche. Les maux de notre société, l'échec total de l'expérience soviétique et l'insuffisance des réponses alternatives m'ont incité à chercher des réponses plus profondes qu'un simple programme alternatif. Ma première recherche a été celle d'une nouvelle logique. Je me suis, alors mis à réfléchir sur l'ensemble de connaissances humaines dans tous les domaines scientifiques, au sens le plus large, la physique, la biologie, l'éthologie, l'ethnologie, la sociologie, l'histoire, etc...

De ces nombreuses lectures j'ai dégagé, dans un premier essai " La logique du vivant et la théorie de l'auto-organisation ", un certain concept que j'ai appelé " Théorie de l'Auto-organisation ". Ce premier essai avait, avant tout, pour but de montrer qu'à partir des connaissances actuelles sur l'ensemble du vivant, il était possible de dégager une forme de " logique " (quelques principes fonctionnels) valable pour l'ensemble du vivant de la cellule à la société humaine. C'est ce qui explique la forme particulière de ce premier essai, où, à côté de nombreuses citations, j'essaie de dégager les " logiques " (principes) qu'elles sous-tendent, dans le cadre des " principes " que j'ai dégagés (théorie de l'auto-organisation, Multitude de variétés, Multitude de degrés de liberté). Je me suis aussi permis quelques premières extrapolations.

Le deuxième essai (La systémique des sociétés auto-organisées animales et humaine) est un produit un peu bâtard entre le premier et le troisième essai. Il reprend une partie de la méthodologie du premier, consistant à partir de connaissances actuelles mais en essayant d'extrapoler un peu plus à partir des principes que j'ai dégagés. Il répond aussi à la nécessité dans laquelle je me trouvais de tenter de montrer que les principes que j'avais dégagés n'étaient pas en contradictions avec ce que pouvaient dire certains des " scientifiques " contemporains.

Le troisième essai est une tentative d'extrapolation de mon travail de réflexion enrichi de ce que j'ai pu apprendre et comprendre de la pensée systémique actuelle. C'est ce qui explique la présence de ces textes sur le site de l'AFCEP.

L'ensemble de ce travail n'a d'autre prétention que de contribuer à un collectif de réflexion qui essaye de commencer à penser autrement.

Alfortville le 13/02/04

Thierry LERCH
16, rue Marcel Bourdarias
94140 - Alfortville
Tél. : Pers. 01 45 18 15 64
Trv. 01 69 08 26 73
Courriel : lerch@cea.fr

Nouvelle présentation

Cet essai à été écrit en 1996. Après avoir écrit le suivant je me suis rendu compte qu'il correspondait au stade de l'émergence d'un concept tel que je le définis dans le tableau page 22 de l'essai "La systémiqedes sociétés auto-organisées animales et humaine". Ceci correspond à l'émergence de ce que j'appelle le "concept supérieur" quand celui-ci encore confus n'a pas été "confronté" à la réalité par sa dynamique générative qui est l'objet de ce second essai. Il faut donc comprendre le texte qui suit comme l'ensemble des faits qui ont permis la naissance d'un nouveau concept dans la tête d'un individu. c'est part le partage de celui-ci avec d'autres personnes que je pourrai savoir si ce concept peut avoir un intérêt pour l'entendement du monde du vivant. Je vous demande donc d'avoir le courage de lire aussi le deuxième essai.

Je n'ai rien changé à ce premier texte je me suis contenté de repréciser la définition de la «Théorie de l'auto-organisation» suite à l'écriture du deuxième pour le situer dans la logique systémique et mieux le circonscrire. Vous pourrez lire l'ancienne version dans l'essai lui-même.

Thierry Lerch le 5 septembre 2001

Nouvelle définition du concept

La théorie de l'auto-organisation

Le monde du vivant est le monde de l'auto-organisation. Les êtres vivants sont l'expression d'un nombre incalculable d'interactions immédiates et historiques (d'un point de vue de l'évolution) entre des molécules, des cellules et des individus. C'est donc une vision systémique (voir encadré) que nous devons avoir.

Dans ce cadre, il nous faut définir ce qu'est l'auto-organisation. Le monde du vivant est caractérisé par sa capacité à se reproduire et évoluer tout « seul ». Dans ce sens, il est auto-organisé. Cependant cette auto-organisation — le type de relation qui lie les molécules, les cellules, les individus, entre-eux — peut prendre deux formes.

La première nous l'appellerons Auto-organisation Orientée (A-O). On pourrait dire que c'est la forme « hiérarchique ». c'est la catalyse, les « commandes » hormonales, neuronales ou toute forme de hiérarchie sociale au niveau des sociétés animales et humaines. C'est la forme la plus répandue dans le monde du vivant.

L'Auto-organisation Orientée est ce qui correspond d'un point de vue systémique à la dynamique de la structuration. La dépendance qu'implique sa forme hiérarchique des relations (dépendance aux chromosomes, dépendance au chef, etc.) confère au système la stabilité et sa dépendances aux conditions d'origines. Un changement de chromosome ou de chef peut perturber le système ou le faire évoluer mais toujours dans le même cadre de fonctionnement, ces lois fondamentales ne sont pas remises en cause.

La deuxième nous l'appellerons Auto-organisation Auto orientée (A-A). C'est l'auto catalyse comme celle des ARN ou de ses précurseurs. C'est la capacité propre des neurones à former

des synapses. C'est ce que nous appelons l'auto-organisations dans certains conflits, grèves ou grandes mobilisations sociales. La dynamique de cette forme d'auto-organisation est la rupture avec la « hiérarchie », l'indépendance et la création du nouveau vue dans le sens de rupture avec l'ancien.

Dans une conception dynamique et systémique du vivant, ces deux formes (A-O) et (A-A) se combinent en permanence. Si, comme nous l'avons dit, la forme (A-O) domine largement — c'est ce qui permet la stabilité du système —, au cours du développement du vivant et de son évolution la forme (A-A) à pris et prend parfois une importance décisive pour donner une autonomie du système et parfois lui permettre de rompre avec certaines lois jusqu'à là intangibles.

On pourrait dire que le vivant est le produit des formes (A-O) et (A-A), mais un produit qui n'est pas commutatif. Si ce produit est permanent la « hiérarchie » selon laquelle il se combine retrace en partie la structuration et la rupture ou l'apparition de nouvelle forme par les capacités de certaines molécules, de certaines cellules, de certains individus (sociétés) à « auto produire ».

Le vivant est une combinaison de ce produit à différents niveaux et échelles.

Telle est la définition que je peux actuellement donner de la Théorie de l'auto-organisation issue du premier concept qui avait émergé de l'essai ci-dessous (voir ci-dessous la définition précédente) et du deuxième essai « La systémique des sociétés auto-organisées animales et humaine » qui ne traite que de l'analyse des sociétés animales évoluées et humaine au travers de cette théorie. L'analyse du vivant n'est pas abordée.

INTRODUCTION

Cet essai sur la logique du vivant est le produit de plusieurs années de réflexion et de lecture. Je ne suis spécialiste en aucuns domaines scientifiques ou philosophiques. L'objectif était de mettre sur papier quelques idées sur la logique du vivant en profitant de quelques mois de chômage.

Il en est sorti un premier texte assez confus. La raison essentielle est que au cours de la rédaction de celui-ci (et encore plus après une nouvelle année de réflexion) les idées et les concepts ont évolués et se sont précisés. Une réécriture était donc nécessaire pour faire ressortir la cohérence globale.

Travaillant, actuellement, je n'ai absolument pas le temps de réécrire ce texte. Je me suis contenté de recadrer le sujet, de modifier et d'ajouter certains commentaires. J'espère qu'il en ressortira quelque chose de plus cohérent.

LES CONCEPTS DE BASE

La Multitude de Degrés de Liberté (MDL)

Ce concept est à comprendre essentiellement dans sa dimension spatiale: multitude de possibilités de mouvement, conquête de nouveaux espaces, etc...

La Multitude de Variétés (MV)

Ceci s'applique aussi bien à l'objet qu'aux conditions d'existence de l'objet. L'objet est une population.

L'Auto-organisation

Ce concept est fondamental

aujourd'hui, il a plusieurs sens:

Il a une notion de spontanéité. C'est dans ce sens que je l'utiliserai dans ce texte. Je parlerai d'Auto-organisation d'atomes ou de molécules, d'individus. Quand je parlerai d'Auto organisation d'individus, il faut le comprendre comme relation entre individus d'une même espèce. La reproduction sexuée en est le premier exemple. La relation avec les autres espèces fait partie des conditions d'existence.

Ce concept d'Auto-organisation est un concept bien trop large qui englobe plusieurs modes d'auto-organisation. Tout au plus peut-on l'appliquer, dans sa notion seule de spontanéité, à la formation de la «soupe primitive» (voir chapitre 1).

Dans la réalité vivante l'essentiel des phénomènes d'auto organisation a un caractère d'**Auto-organisation Orientée**. Il a le sens d'auto-organisation en tant que «catalyse» si l'on parle du métabolisme biologique au niveau d'un individu.

Tout le métabolisme biologique, l'essentiel des relations des individus d'une espèce «animale» et humaine sont des relations d'Auto-organisation Orientée (apprendre, commander, guider, etc.).

Il est important de différencier les conditions d'existence qui «orientent» ou plus justement qui conditionnent l'auto-organisation au sein d'une espèce, de l'Auto-organisation Orientée qui lie les individus d'une même espèce. C'est de cette dernière que je parlerai.

INDIVIDU - POPULATION

Du point de vue de l'existence nous connaissons l'individu, mais du point de vue de l'évolution nous ne pouvons raisonner qu'en tant que population. C'est elle qui, par la reproduction, produit la multitude de variétés, condition de l'évolution.

Pour l'être humain, comme j'essaierai de le montrer, l'évolution ne dépend plus de la reproduction mais de la société dans laquelle il a un rôle spécifique en tant qu'individu ou groupe d'individus.

L'OBJECTIF DE L'ESSAI

En partant des derniers ouvrages sur l'apparition et le développement de la vie, jusqu'à l'activité humaine actuelle, j'ai essayé de développer deux axes:

1) UNE «LOI» DE L'ÉVOLUTION:

l'évolution est directement «proportionnelle» à la Multitude de Variétés et à la Multitude de Degrés de Liberté.

La **Multitude de Variété** est la première condition de l'apparition du nouveau.

La **Multitude de Degrés de Liberté** est à comprendre sous un double aspect:

a) l'évolution est synonyme de conquête de nouveaux espaces.

b) les êtres les plus évolués sont ceux qui sont capables de conquérir le plus grand nombre de degrés de liberté.

2) LA THÉORIE DE L'AUTO-ORGANISATION

Le phénomène d'auto organisation défini précédemment est un phénomène général.

a) L'**Auto-organisation** des atomes et des molécules sur la terre naissante a donné ce que l'on a appelé la «soupe primitive» dans les océans.

L'Auto-organisation dans sa notion de spontanéité produit la variété.

L'Auto-organisation «d'individus» permet, aussi, l'échange «d'informations» horizontal. C'est cet échange qui produit la transformation de qualité en quantité (q en Q).

b) Ce n'est qu'avec l'**Auto-organisation Orientée** (catalyse) que des molécules complexes vont apparaître.

Il est important de noter que la notion d' Auto-organisation Orientée est liée à une notion d'isolation par rapport au milieu (soupe primitive) qui débouchera sur la naissance de «l'individu».

L' Auto-organisation Orientée sous entend l'existence d'un tiers (atome, enzyme pour l' Auto-organisation Orientée biologique, un, ou plusieurs, individus pour l' Auto-organisation Orientée «animale») qui oriente l'auto-organisation.

Ce «tiers» qui oriente appartient à la catégorie, la famille, l'espèce, la société d'objets/individus qu'il oriente. De ce fait il peut permettre une évolution de cette catégorie, etc..., mais il ne peut pas permettre leurs émancipation. Au contraire, l'évolution devient dépendante de «l'orienteurs».

C'est pourquoi la notion d' Auto-organisation Orientée est liée à celle de dépendance aux conditions d'origine.

L'Auto-organisation Orientée est liée à l'évolution dans le sens de complexification.

c) **Dans l'histoire du vivant il y a eu deux grandes ruptures ou révolutions:**

la première est le passage du minéral au biologique.

La seconde est le passage du biologique au psychique (apparition de l'homo).

Ce que je voudrais démontrer est que ces ruptures ont été possibles parce que l' Auto organisation Orientée a pris la forme d'**Auto-organisation Auto-orientée**. Pour le premier cas c'est la formation des ARN (ou leurs précurseurs) capables de s'auto-catalyser. Pour le deuxième, c'est la faculté des images, produites par les sens, du cerveau humain, d' Auto-organisation Auto-orientée.

Elle a le sens courant d'auto-catalyse ou d'auto-organisation quant on parle de comités de grève.

D'un point de vue logique l' Auto-organisation Auto-orientée est la condition de l'émancipation, de la rupture, de l'indépendance, en opposition à la dépendance aux conditions d'origine liée à l' Auto-organisation Orientée.

Dans la fin de cet ouvrage j'essaierai de montrer pourquoi le seul moyen de l'émancipation de l'être humain par rapport à la société qu'il subit est l' Auto-organisation Auto-orientée humaine.

PROCESSUS DU VIVANT

Le but de ce premier chapitre est d'essayer de dégager la logique de l'apparition de la vie sur la terre. Pour cela nous nous baserons sur les dernières découvertes sur le développement du processus du vivant sur la terre.

QU'EST-CE QUE LA VIE

"Les trois fonctions de bases des êtres vivants semblent donc être:

1. La possibilité de se **maintenir en vie**, par la nutrition, l'assimilation, les réactions énergétiques de respiration et de fermentation;
2. La possibilité de **propager la vie**, grâce à la reproduction;
3. La possibilité de se **gérer soi-même**, par la coordination, la régulation et le contrôle des réactions d'ensemble.

Pour éviter toute équivoque, et puisque les fonctions se rapportent aussi bien à la bactérie qu'à l'homme, généralisons d'avantage et appelons-les: **auto-conservation, auto-reproduction, auto-régulation**.

La structure élémentaire capable d'accomplir ces trois fonctions de base est la cellule vivante ; constituant de tout organisme vivant, qu'il soit microbe ou être humain. La cellule vivante est une société de molécules. Les trois fonctions de base de la vie seraient impossibles sans le réseau de **communication** qui les intègre et les règle. Sans les communications, à l'intérieur des cellules et entre les cellules, il n'y aurait pas de vie. Les supports de cette communication, ce sont les molécules porteuses d'**information** agissant comme des signaux, des hormones par exemple. Ces signaux sont détectés et reconnus par des récepteurs, qui, à leur tour, déclenchent des réactions permettant, par exemple, la synthèse de molécules dont la cellule a besoin, sa reproduction, ou son déplacement. Dans ce réseau de communication, les protéines occupent une place privilégiée. Certes elles jouent souvent un rôle passif, comme briques ou matériaux de construction des cellules, mais, lorsqu'elles fabriquent, transforment ou reconnaissent d'autres molécules, elles jouent un rôle actif. Elles exercent une fonction précise (une sorte de "métier"). ce sont dans ce cas des enzymes (machines-outils ou chimistes infatigables de la cellule) ou les anti-corps qui nous protègent contre les envahisseurs (microbes, virus).

Bien qu'il existe de nombreux types de cellules, leur anatomie de base comprend presque toujours: **une membrane**, qui assure leur **individualité** et les sépare sans les isoler du monde extérieur ; un cytoplasme, sorte de gelée protéique transparente renfermant les organes cellulaires (mitochondrie, chloroplastes...) ; un noyau contenant le matériel génétique.

Particule fondamentale de vie, la cellule est aussi une véritable usine à l'échelle moléculaire. Il existe environ soixante mille milliards de cellules dans notre corps, se rassemblant en deux cents familles distinctes. Tantôt associées en tissus: cellules du foie (usine chimique), cellules des muscles capables de se contracter, cellules du cœur battant à l'unisson, cellules du cerveau (neurones), agents de communication, cellules de la rétine (sensible à la lumière), cellules de la peau. Tantôt indépendantes et capables de se déplacer: globules rouge ou blancs du sang, macrophage, spermatozoïdes ou ovules, cellules sexuelles.

Ainsi notre corps peut être comparé à une société de cellules qui communiquent entre elles par les hormones, les nerfs, le système immunitaire. Dans la cellule elle-même, mystérieuse planète dans l'univers de l'infiniment petit." (A1 pages 43, 45)

"La vie est inséparable de quatre processus fondamentaux: **métabolisme, compartimentage, mémoire et manipulation**. Deux échelles différentes par leurs dimensions spatiales supportent ces processus. Ce sont des petites molécules qui correspondent aux deux premiers, et des molécules géantes qui correspondent aux deux derniers"...le fait de rassembler, dans un très petit volume,

auto-conservation

auto-reproduction

auto-régulation

information

=

**Auto-organisation
Orientée**

individu

métabolisme

=

**Auto-organisation
Orientée**

compartimentation



individu

mémoire

une **variété** chimique **considérable** sous forme d'un très grand nombre de types de molécules différentes" (A4 page 15 et 17)

variété considérable

"Parmi les caractéristiques essentielles d'une cellule vivante, on doit compter une **membrane à perméabilité sélective**, un **mécanisme** pour former les types de molécules nécessaires à la vie de la cellule et pour transmettre la génération suivante, cette **information**, ainsi qu'une source d'**énergie** pour faire se dérouler les réactions de synthèse."(A3 page 142)

échange

énergie

"En vertu de ce principe, qui exclut tout bouleversement radical au court de l'évolution chimique, nous proposons de qualifier comme vivant un système rudimentaire qui répond aux quatre conditions suivantes:

- avoir besoin d'**eau liquide** pour être opérationnel
- être capable de retenir ses constituants fondamentaux dans un volume délimité par une **enveloppe** permettant les **échanges** avec son environnement. En l'absence d'une telle enveloppe, les constituants se dispersent et le système perd son identité.
- être capable d'utiliser les molécules organiques du milieu environnant pour satisfaire ses besoins en éléments constitutifs et en **énergie**.
- être capable de **transmettre les informations** qu'il renferme en générant des systèmes qui lui sont identiques, ou presque. La marge d'erreur doit être faible mais non nulle, afin que puissent apparaître des **variants** mieux **adaptés**."(A5 page 77)

transmission

QUELQUES REFLEXIONS D'ORDRE METHODOLOGIQUE

Compte tenu des conditions climatiques difficiles qui régnaient sur la terre primitive, l'apparition de la vie peut être comparée à la propagation rapide d'un ensemble d'informations communiquées à un nombre croissant de cellules. Cette propagation n'est pas sans rappeler les phénomènes de cristallisation des composés organiques et minéraux observés en laboratoire. Placé dans des conditions particulières, le composé reste en solution bien qu'il ne soit pas soluble dans le milieu. Soudain, une poussière, un petit cristal servant de germe ou une vibration provoque la formation de cristaux. Ceux-ci croissent et entraînent toutes les molécules du composé dans le même système cristallin. Cette similitude a amené quelques chercheurs, dont Jean Scheider de l'observatoire de Meudon, à proposer des formes de vie minérale fondées sur une physiologie cristalline. Cette idée a été beaucoup développée par Cairns-Smith de l'université de Glasgow en Ecosse. Selon cet auteur, la chimie du carbone fut incapable de sélectionner les molécules organiques sophistiquées requises pour la transmission d'une information, même primitive. Le fait que la vie contemporaine utilise des molécules organiques n'implique pas obligatoirement qu'elles aient été les éléments essentiels des premiers systèmes vivants ; elles peuvent très bien constituer une étape dans l'évolution du vivant et non le point de départ. Cairns-Smith pense que **la vie primitive résultait d'une chimie totalement différente de celle du vivant que nous connaissons**. Le code génétique si complexe dans sa fonction, ne serait apparu qu'ultérieurement dans un organisme évolué utilisant un système de réplication primaire moins efficace mais offrant une possibilité d'assemblage plus grande.

Les matériaux minéraux cristallins paraissent présenter certaines propriétés requises pour **emmagasinier et transmettre des informations**. Les argiles sont des candidats particulièrement intéressants car elles se forment à température ordinaire dans l'eau à partir de roches érodées ; elles possèdent, en outre, une structure à feuillets ce qui leur permet d'**absorber de nombreuses molécules organiques** et certaines argiles manifestent des **propriétés catalytiques**. "(A5 page 111)

stocker

catalyser

"Si l'invariance et la téléonomie (transmission) sont effectivement des "propriétés" caractéristiques des êtres vivants, **la structuration spontanée doit plutôt être considérée comme un mécanisme**."(A2 page 33)

"La science dit que, parce que la tendance naturelle des papiers rangés sur mon bureau est d'occuper toute la place disponible en détruisant l'ordre que j'y avais mis, la nature physique du monde conduit spontanément au désordre. Mais la suite du raisonnement est simple, puisque j'existe, moi vivant, et que je peux définir un ordre,

auto-organisation

c'est qu'une propriété intrinsèque à la matière vivante est d'aller contre le désordre. Que voilà une bonne démonstration, déjà présente en partie dans le texte de Boltzman sur la mécanique statistique ! Or cette démonstration n'en est pas une, ce n'est qu'un regard sur le monde. **Ne peut on, au contraire, voir dans le comportement spontané de la matière, une aptitude à l'exploration et à l'invention ?** Le fait d'occuper tout l'espace disponible permet d'aller au devant d'interaction imprévues dans l'espace initial: en se mélangeant le jaune et le bleu créent le vert, y a-t-il désordre ?"(A7 page 23)

"Dans le même temps, et sans recourir au démon vitaliste, beaucoup de savants déplacent la distinction entre organique et inorganique vers le couple colloïde/cristalloïde, qui reprend des thèmes prégnants depuis l'antiquité: vivant/inerte, mou/dur, femelle/mâle, froid/ chaud ou mouvant /figé. Les fermentations, les activités diastiques sont le fait des colloïdes. Mais la cristallisation de l'ovalbumine en 1890 par l'allemand Hofmeister oblige à déplacer la dualité colloïde/cristalloïde devenue non pertinente. Curieusement nous sommes encore proche de ce temps-là, et la cristallisation d'une nouvelle protéine est toujours saluée (il est vrai qu'elle est souvent très difficile à réaliser!), même si on n'y met plus autant l'accent. C'est qu'il est probable qu'une nouvelle dualité est en train de se mettre en place. En effet il semble qu'il soit particulièrement insupportable à beaucoup d'esprits humains d'admettre la **continuité de nature entre l'inorganique et l'organique**, en raison sans doute d'une confusion courante entre science des objets (au coeur de la chimie et science des **relations entre objets ou même entre relations** (au coeur de la biologie)..."

une différence fondamentale entre l'inerte et le vivant réside en effet dans la très grande complexité apparente des édifices constituant se dernier. Aucune différence de nature n'apparaît donc, mais en revanche une très grande différence dans l'**organisation**."(A4 page24)

"...si l'on ne fait pas l'hypothèse de processus magiques, il faut nécessairement, que **les phénomènes** qui se sont déroulés et ont conduit aux être vivants soient **simples**. C'est en recherchant la plus grande simplicité que nous aurons le plus de chances de découvrir les lois de la naissance du vivant."(A4 page156)

"L'individualité est un aspect marquant de la vie et la description des objets biologiques en terme de cellules a défini un caractère essentiel de cette individualité. Ce qu'il a donc fallu expliquer en premier lieu est la naissance d'un individu, d'une cellule. Malgré la grande diversité de taille des cellules vivantes (de la bactérie à l'oeuf d'autruche), il existe un certain nombre de constantes qui définissent la forme et l'activité. Mais surtout il existe un état minimal au-dessous duquel il n'y a pas de cellule vivante: **la cellule doit abriter toute la machinerie qui contient la mémoire héréditaire, le chromosome, et la spécification des instructions qu'elle perpétue, la machinerie de traduction**."(A4 page 178)

"Depuis lors, nous savons que la cellule est en réalité très complexe, qu'elle contient de nombreux organites et que **les organismes pluricellulaires ont beaucoup plus gagné sur la taille que sur la complexité**; néanmoins, l'idée de la simplicité de la cellule persiste implicitement et doit être nuancée. Certes, si **les formes primitives** n'étaient pas pluricellulaires, elles n'étaient pas non plus cellulaires, mais bien **précellulaires**, une longue évolution ayant précédé la formation de la cellule telle que nous la connaissons.

A ce propos, on peut aussi remarquer que la Biologie enseigne que toutes les cellules actuelles sont comparables et possèdent en commun de nombreux caractères tendant à postuler **une origine monophylétique**, peut être y aurait-il à revoir cette question, comme certaines faites sur l'ADN des Ciliés supérieurs —qui serait bâties sur un modèle original par rapport à celui des autres êtres vivants— le laisse prévoir.

Nous aurions eu à l'origine plusieurs types de cellules, un seul ayant eu un grand avenir, les autres ayant disparu ou ne subsistant plus que comme reliques.

Les seuls êtres vivants actuels ayant une organisation infracellulaire sont les **virus**, mais ils sont unanimement considérés comme des **formes régressées** par le parasitisme exclusif qui est leur lot, ne pouvant subsister et se reproduire qu'à l'intérieur d'un autre être. Les formes les plus simples que nous présente la nature actuelle se

reproduction

rapporte à différents groupes.

Longtemps considérées comme représentant une organisation cellulaire incomplète, régressée par la pathologie, mais ayant, peu à peu, avec l'avancement des recherches, fait apparaître leur complexité, les bactéries ont rejoint le modèle universel. Toutefois il est certain que ce vaste groupe, par son adaptation et ces possibilités de vie dans les milieux extrême (températures élevées ou basses, milieux sursaturés ou acides, aérobiose, etc.), a joué un grand rôle dans le peuplement de la Terre aux époques primitives."(A3 page 109)

"...nous devons nous attendre à reconstituer **un arbre phylétique** (fig. 1) **dont la partie inférieure, celle dont la durée a été la plus longue, présente une structure buissonnante vers le bas** exactement à l'inverse de ce qui est figuré classiquement. Les apparitions de nouveaux taxons se faisant dans cette portion par **fusion de formes préexistantes** et non par subdivision de celles-ci."(A3 page 116)

"C'est la variabilité individuelle qui nourrit l'évolution."(A6 page 22)

"La sélection naturelle représente le résultat de contraintes spécifiques imposées à chaque être vivant."(A6 page 46)

Multitude de variétés

"La hiérarchie dans la complexité des objets a donc deux caractéristiques: d'une part, les objets qui existent à un niveau donné ne forment jamais qu'un échantillon limité de tous les possibles offerts par la combinatoire des niveaux les plus simples. d'autre part, à chaque niveau peuvent apparaître de nouvelles propriétés qui imposent de nouvelles contraintes aux systèmes. Mais ce n'est jamais qu'un surcroît de contraintes. Celles qui existent à un niveau donné s'appliquent aussi aux niveau plus complexes. Toutefois, le plus souvent, les propositions qui ont le plus d'importance à un niveau n'en ont aucune au niveau plus complexe. La loi des gaz parfait n'est pas moins vraie pour les objets de la biologie que pour ceux de la physique. Seulement elle n'a aucun intérêt pour les questions qui préoccupent les biologistes."(A6 page 59)

QUELQUES NOTIONS FONDAMENTALES

Dans cet essai, nous nous intéresserons uniquement au point de vue phénoménologique. Peu nous importe pourquoi tel atome ou molécule réagit avec tel autre. Ces phénomènes seront classés, soit dans la catégorie de l'auto organisation, soit dans la catégorie catalyse (auto organisation orientée).

Auto-organisation : réaction spontanée entre deux "objets" ne nécessitant la présence d'aucun autre à part un apport éventuel d'énergie

Catalyse : réaction entre deux "objets" activée par la présence d'un troisième, nous l'appellerons: **Auto-organisation Orientée**.

Les notions essentielles que nous aborderons, sont la notion d'information et sa **sélection, transmission, reproduction et stockage** ; les notions de **sélection, compartimentage** (membrane) et d'**échange** ; les notions de **catalyse, métabolisme** et de **mémoire**, les notions d'**auto-gestion**, auto-conservation, auto-reproduction et auto-régulation ; les notions d'**individu** et de **population**.

Nous essayerons de les définir et de montrer comment toutes ces notions s'articulent dans les dernières théories sur l'apparition et le développement du vivant sur la terre.

Comme nous n'abordons que la logique du processus du vivant, nous partons du stade de développement de la terre d'il y a environ quatre milliards d'années et de la situation "concrète" qui y régnait à cette époque.

Trois notions fondamentales vont être abordées, dans la logique du vivant, en liaison avec cette situation.

La **Multitude de Variétés de Produits (MVP)**. Il faut entendre par produit aussi bien les atomes et les molécules, que les différents êtres vivants et les variétés de ces êtres dans une même espèce.

La **Multitude de Variétés de Conditions (MVC)**. Le déséquilibre permanent qui existe dans l'univers et sur la terre a créé une multitude de conditions sur la terre: mer, terre, atmosphère et tous les accidents et les perturbations qui y règnent

La **Multitude de Degrés de Liberté (MDL)**. Notion qui exprime la liberté "infinie" de mouvement

Enfin la dernière notion fondamentale est le **temps**.

Pour expliquer de manière la plus concrète possible la logique du vivant, j'ai travaillé de la façon suivante: dans la colonne de gauche j'ai mis de longs extraits de livres des dernières théories sur le processus du vivant sur la terre. Dans la colonne de droite j'ai tenté d'en dégager une logique

LE PROCESSUS DU VIVANT

A) LES BRIQUES DE LA VIE

1)Le "Chaos" !

"Pour Oparine (in *l'Origine de la vie sur la terre* traduit en 1957) les conditions qui régnaient à l'époque de la formation de la Terre étaient tout à fait différentes de celles que nous connaissons aujourd'hui. En particulier, l'atmosphère primitive de notre planète ne contenait ni oxygène, ni gaz carbonique, ni azote, mais un mélange "inhospitalier" d'*hydrogène*, de *méthane*, d'*ammoniaque* et de *vapeur d'eau*. Ce mélange bombardé par le rayonnement énergétique intense provenant du soleil, aurait donné naissance, selon Oparine et Haldane, à une grande quantité de *molécules organique*.

Cette hypothèse permettait donc de sortir du premier cercle vicieux: les composés organiques ont pu, théoriquement, se former en *l'absence d'êtres vivants*. (A1 page 102)

"On sait que les liens électroniques qui attachent les atomes les uns avec les autres dans une molécule renferment de l'énergie ; cette énergie est libérée, par exemple, lors de réactions de combustion. Toute la chimie organique est fondée sur la possibilité d'ouverture ou de fermeture de ces liaisons entre atomes ; ce qui permet l'accrochage de morceaux de molécules et la fabrication d'une variété prodigieuse de corps organiques. Or l'ouverture ou la fermeture des liaisons chimiques est essentiellement une question d'énergie. Les radiations solaires (photon énergétique) seront capables de rompre les liens qui attachent les atomes d'hydrogène au carbone du méthane, à l'azote de l'ammoniaque ou à l'oxygène de l'eau. Certaines molécules organiques simples ont déjà commencé à se former *avant même que la Terre ne soit totalement agglomérée*. Hypothèse récemment confirmée par l'examen des comètes, l'analyse des météorites et les observations au radio-télescope.

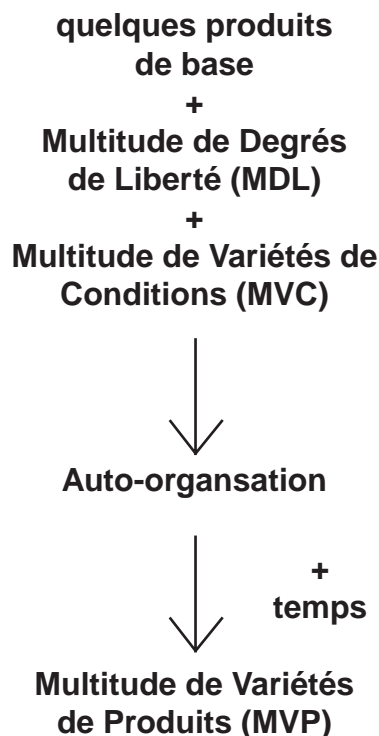
Ces "morceaux" de molécules, appelés *radicaux libres*, sont très réactifs; ils se recombinaient extrêmement vite, en donnant des molécules plus lourdes et plus complexes. Ces nouvelles molécules tombent vers la surface de la Terre et s'y accumulent en continuant de réagir les unes avec les autres.

Il est probable que le rayonnement solaire n'a pas été la seule source d'énergie: les volcans crachaient dans l'atmosphère, à de très grandes hauteurs, des matériaux et des gaz extrêmement chauds ; des éclairs déchiraient sans cesse l'enveloppe gazeuse de la Terre, entraînant en une fraction de seconde la synthèse de nombreux composés organiques. Pendant ce temps, la vapeur d'eau se condensait dans les zones supérieures plus froides de l'atmosphère et retombait en pluies."

..."Quels que fussent les corps intermédiaires formés seuls s'accumulaient sur la Terre des composés *capables de durer*.

Pendant des millions d'années, il "tombait ainsi du ciel" des composés que nous appelons "organiques" parce qu'ils font aujourd'hui partie des organismes vivants. A ce stade ce n'étaient que des substances un peu plus complexes que les autres combinaisons chimiques de l'Univers, déjà plus anciennes. Désormais deux caractéristiques de la vie sont à jamais fixées: les bases de sa composition chimiques: carbone, hydrogène, oxygène et azote, et sa source permanente d'énergie: le soleil."(A1 pages 109 à 111)

LA LOGIQUE DU VIVANT



2) LA SOUPE

La terre devait être encore très chaude à l'époque de sa formation, et les nappes de laves provenant des volcans encore mal refroidies. D'autre par, affleuraient vraisemblablement d'immenses couches de minerai capable de promouvoir et d'entretenir certaines réactions chimiques. Des synthèses de composés organiques plus complexes ont pu se produire à la surface même du sol, à proximité des zone d'action volcanique.

L'eau des pluies devait rapidement entraîner toutes les substances organiques complexes qui se formaient sur la croûte terrestre. Conduites par les cours d'eau vers des lacs, des lagunes ou des mers en formation, elles s'y déposaient. Ce "bouillon" de matière organique, riche en sels et en sucres dissous, le biologiste britannique J.B.S.Haldane le nomma "la soupe chaude primitive".

Que se passait-il dans une tel "soupe" ?

C'est dans ce milieu radicalement nouveau —à ce stade de l'évolution cosmique— que va se poursuivre et s'accélérer la transformation chimique de la matière organique.

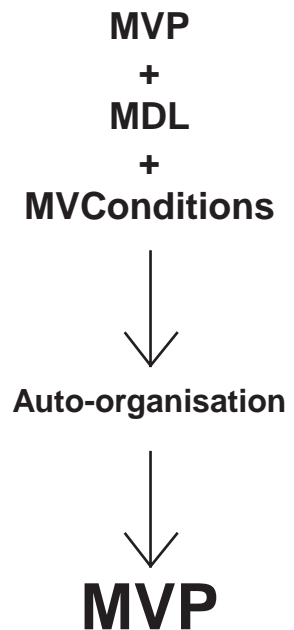
L'eau , en effet est un solvant universel. Elle dissout de nombreux composés organiques et minéraux, ce qui favorise les rencontres entre molécules individuelles et augmente les chances de réactions chimiques.

Cependant, les molécules organiques, qui réagissent et se complexifient, ne s'accrochent pas les unes aux autres en n'importe quel endroit: elles portent dans leur structure chimique certains groupements d'atomes plus réactifs que d'autres. On les nomme groupements fonctionnels. L'accrochage de deux molécules résulte le plus souvent du choc entre deux groupements fonctionnels. Cependant, dans la "soupe primitive", les probabilités de rencontre au "bon" endroit étaient extrêmement faibles car les chocs se répartissent au hasard. Au contraire dans les organismes vivants, les réactions vitales se déroulent en quelques fractions de seconde, les parties réactives des molécules étant maintenues en position, jusqu'à ce que la réaction se fasse, par des catalyseurs organiques: les enzymes." (A1 page 124)

"Ainsi, depuis la première publication de l'expérience de Miller, les travaux qui ont été développés sur cette chimie prébiotique élémentaire ont conduit à deux résultats majeurs.

D'une part, les études relatives à la chimie organique en solution aqueuse de composés simples tels que HCN, HC3N ou HCHO suggèrent que la plupart des briques essentielles du vivant peuvent être obtenues avec un nombre très limité de molécules différentes ou de leurs polymères. Ces ingrédients ont une propriété commune: ils possèdent dans leurs structures des liaisons multiples réactives. C'est là même qu'est stocké l'énergie qui va leur permettre , après dissolution dans l'eau, d'évaluer spontanément (c'est à dire sans apport d'énergie supplémentaire). Cette évolution fait intervenir des étapes successives d'addition de la molécule sur elle même, puis sur ces produits, jusqu'à l'apparition de composés complexes, incluant des molécules d'intérêt biologique.

De nombreux problèmes subsistent. Ils concernent, entre autre, les conditions nécessaires pour que ces voies dites prébiotiques soient effectivement suivies. De plus ces travaux ont été généralement développés sans tenir compte des interactions possibles entre les composés de départ. Dans la plupart des cas, le "chimiste du prébiotique" se limite à l'étude —déjà suffisamment compliquée— d'un seul ou de quelques composés. Or la soupe primitive a dû contenir simultanément tous les ingrédients, certain d'entre eux pouvant littéralement empoi-



sonner les chemins réactionnels menant aux molécules d'intérêt biologique."

..."La tâche majeure des scientifique est de comprendre comment, de la complexité de cette soupe primitive, a pu être sélectionné un nombre réduit de molécules différentes, en concentration suffisamment grande pour jouer un rôle central dans l'évolution chimique et permettre la formation des macromolécules du vivant." (A5 page 73)

"En tout état de cause, la soupe primitive ne pourrait qu'être extrêmement diluée et très complexe, tout en ne contenant qu'une partie des molécules essentielles à la vie d'aujourd'hui."

..."Depuis quelques années un chimiste anglais, spécialiste de la chimie minérale, Graham Cairn-Smith? s'attache aussi et surtout à montrer que le problème d'un scénario d'origine plausible repose non pas sur la facilité à imaginer la synthèse des molécules organiques variées, mais plutôt sur la faculté de comprendre comment en faire de peu de types différents, des bons types. En effet, si l'on fait l'hypothèse de la formation spontanée et universelle de matières organiques (ce que l'on observe, ne serait-ce que par l'étude de la formation de telles molécules dans la matière interstellaire), on se trouve en face d'une variété immense qu'il paraît impossible de maîtriser. Contrairement à ce que l'on imagine le plus souvent, nous venons de le voir, il n'est pas difficile de produire des molécules organiques (les atomes essentiels, carbone, hydrogène, oxygène, azote... sont très abondants dans l'Univers et assez réactifs dans les conditions qui prévalent sur la Terre), ce qui est difficile c'est d'en produire de types suffisamment peu variés, et qui soient apparentées à celles que l'on connaît aujourd'hui. C'est que le problème du tri, de la sélection (déjà ! penserait-on avec Darwin) est crucial." (A4 page 68)

LA LOGIQUE DE CETTE PREMIERE PHASE

Pour résumer, nous avons vu que, à partir de quelques molécules de base, la Multitude de Variétés de Conditions sur la Terre combinée avec la Multitude des Degrés de Liberté de ces molécules dans l'atmosphère, provoque des phénomènes d'auto-organisation générant (avec le temps) une Multitude de Variétés de Produits (molécules diverses). Ce phénomène ne fait, dans cette première phase, que s'amplifier. L'apport des molécules cosmiques, la Multitude de Variétés de Conditions sur la Terre (volcans, lagunes, variations de températures etc.), le ruissellement ramène tous ces produits vers les mers. Celles-ci vecteurs de la Multitude de Degrés de Liberté, accroissent le processus d'auto-organisation et augmentent la Multitude de Variétés de Produits: c'est "la soupe primitive".

Mais comme le constatent, aujourd'hui, tous les scientifiques, cette "soupe" contient presque tous les ingrédients de la vie en même temps que ces poisons.

La question de fond est donc comment va se faire la **sélection** ?

On peut dire que, la "soupe primitive" contenait toute l'**information** nécessaire à la vie en même temps que la **désinformation**.

Je vais introduire un nouveau concept, celui d'**image**.

L'**image** est le produit de tout phénomène d'auto-organisation. Toutes les molécules produites sont à ce stade les images de l'auto-organisation terrestre et cosmique. les images peuvent s'auto-organiser pour produire d'autres images. La somme des ces «images» constitue toute l'information des phénomènes d'auto-organisation. Toute image existe par elle-même indépendamment des processus qui l'ont créée (l'histoire se perd bien souvent). (Ce concept est secondaire. C'est un reste de la première version)

3) De la sélection à la mémoire

"Ce que nous retenons à présent du chapitre précédent est que l'hypothèse d'un bouillon de culture dans lequel serait née la vie semble réfutable pour plusieurs raisons, d'abord, ce bouillon produirait une variété empoisonnée et, ensuite, des molécules essentielles, les nucléotides et les lipides en particulier, manquent à l'appel. Enfin, elle ne sait pas expliquer l'origine de la **mémoire héréditaire**. Il faut tenter de tenir compte de ces objections afin de proposer un scénario qui soit plus plausible. Il semble donc nécessaire à la fois d'imaginer comment produire une relative variété de molécules à squelette carboné et de comprendre comment s'opère un **tri** qui ne retient que certaines d'entre elles. Ensuite, il faut nécessairement trouver les conditions où la concentration de ces molécules initiales soit assez grande pour permettre leur évolution au cours d'un laps de temps pas trop long. De plus il faut qu'elles puissent rencontrer des contraintes physico-chimique particulières qui favorisent la *polymérisation*, de certaines d'entre elles tout au moins (acides aminés et nucléotides); et cela alors qu'on a vu que la mise en solution avait très probablement tendance à favoriser la dépolymérisation... Enfin, il conviendrait mais peut-être est-ce une gageure, de proposer des conditions physico-chimiques plausibles pour la formation de molécules de bases essentielles, absentes des scénarios de la soupe prébiotique, les coenzymes, les nucléotides et les lipides des membranes.

La surface des pierres

La collection des molécules qui font les êtres vivants, malgré sa grande variété, est très loin d'être infinie. Et si l'on écarte, pour un instant, la considération des molécules géantes —les macro-molécules— qui sont au coeur de la vie telle que nous la connaissons, il ne reste plus qu'un nombre assez restreint de molécules de petite taille (quelques dizaines d'atomes au plus) à squelette carboné, qu'on trouve universellement. Au total ces molécules sont en nombre sensiblement inférieur à un demi millier.

D'où proviennent-elles ? J'ai mentionné comment des expériences anciennes ont montrée que certaines d'entre elles sont faciles à obtenir, dans des conditions proches de celles qui devaient prévaloir sur la Terre encore dans sa jeunesse. Et j'ai dit aussi qu'on trouvait dans ces expériences une majorité de substances qui n'existent pas aujourd'hui, ou très rarement et qui jouent alors le rôle néfaste de poisons. J'ai rappelé, enfin, qu'au moins deux classes essentielles de molécules, les nucléotides qui sont les éléments de base des acides nucléiques, et les lipides, qui forment les membranes cellulaires, sont absentes des schémas proposés: on n'a pas imaginé, à l'heure actuelle, comment ces molécules pourraient se trouver formées dans une "soupe originelle".

C'est donc de cette difficulté apparente que je vais partir, en insistant à nouveau sur le fait qu'elle est bien réelle et qu'elle réfute donc le modèle de la soupe prébiotique. Nous venons de voir que de très nombreux auteurs, Cairns-Smith en particulier, ont montré depuis longtemps que l'idée du bouillon de culture, si propice à la multiplication de la vie *aujourd'hui*, était certainement très difficile à mettre en place dans les scénarios d'origine. Et cela pour deux raisons: d'abord parce que cela suppose une concentration élevée de molécules organiques et que l'on voit difficilement comment elle peut se réaliser en dehors d'endroits très isolés et par là-même incapables de rassembler les ingrédients nécessaires à la synthèse du bouillon. Ensuite, et c'est sans doute plus grave, les réactions chimiques en solution produisent sans cesse une plus grande variété, en raison de la très grande liberté de mouvement (qui entraîne une absence de sélectivité) et de réactivité des molécules. Et cette variété empoisonne alors littéralement les possibilités futures d'évolution.

tri — sélection

Auto-organisation

Multitude de variétés

**Multitude de Degrés
de Liberté**

Il est donc nécessaire de concevoir une mécanique qui écarte ces deux objections et qui puisse donc:

- concentrer les métabolites intéressants au cours de leur élaboration;
- diminuer les possibilités de réaction, ne permettant la synthèse que d'un petit nombre de composés.

C'est d'ailleurs ce que réalise la cellule aujourd'hui:

- la membrane, séparant l'intérieur et le milieu extérieur, maintient une concentration élevée de métabolites intermédiaires dans toutes les synthèses;

- les enzymes, réduisant la liberté de mouvement des substrats qu'ils reconnaissent, permettent la formation d'un nombre de produits restreints, et de cela seulement.

Il paraît alors clair que ces conditions fondamentales ne peuvent être réalisées en solution, du moins dans de vastes espaces. Comme il n'existe pas d'autres possibilités de localiser les réactions chimiques qui sont à l'origine du vivant que de les considérer à l'interface entre les milieux aqueux et les surfaces qui les bordent, nous nous trouvons conduits à envisager, comme le fit Bernal, ce qui se passe à la *surface des solides*, roches cailloux ou poussières, présents dans l'eau des mers, des rivières, des lacs et des lagunes.

Il se trouve que la chimie, industrielle en particulier, utilise aujourd'hui de façon généralisée et très efficace la formation d'interfaces de ce type pour mettre en place des réactions spécifiques (en général dans des solutions non aqueuses, il est vrai, mais cela ne changera rien au raisonnement qui suit). c'est ce qu'on appelle la catalyse hétérogène. On connaît donc assez bien —quoique encore imparfaitement— ce qui se passe à la surface d'un catalyseur plongé dans un liquide où sont dissoutes des molécules que l'on veut voir évoluer chimiquement.

La surface d'un liquide a la particularité de limiter fortement les possibilités d'orientation relative des molécules qui s'y absorbent. Par ailleurs, les propriétés chimiques de l'environnement y sont évidemment particulières; des charges électriques locales permettent aux électrons des atomes proches de la surface de se délocaliser transitoirement et de passer d'une molécule à l'autre. On trouve donc à la surface d'un catalyseur les ingrédients nécessaires à l'accélération de nombreuses réactions chimiques (en facilitant les migrations des électrons d'un point à l'autre) et à leur spécification (en ne permettant que certaines architectures). Cela est vrai non de toutes les surfaces —il existe des surfaces pratiquement inertes— mais de beaucoup de celles qui sont électriquement chargées. Or la croûte terrestre est très riche en toutes sortes de surfaces chargées, faites de l'association de groupes oxygénés chargés négativement (anions de l'alumine, de la silice...) et d'ions métalliques positifs, essentiellement des ions multivalents (porteurs de plusieurs charges électriques), formant souvent des composés insolubles dans l'eau (cations calcium, aluminium, magnésium...), qui orientent les molécules qui s'y associent selon des architectures plus ou moins régulières (octaèdres, cubes...). On y trouve aussi des associations un peu plus rares, mais cependant très fréquentes, où le cation métallique —souvent le fer— est un ion dont la structure électronique permet non seulement d'orienter les molécules qui s'y lient selon des directions privilégiées, spécifiques de l'ion considéré, mais aussi de nombreux types de transferts électroniques "...Bien sûr il existe aussi des composés beaucoup plus rares, à la base de cuivre, de manganèse, de nickel ou de zinc, qui peuvent avoir un rôle dans la chimie primordiale, en permettant la formation de structures originales, ou des transferts d'électrons très spécifiques."

..."La chimie observée, cependant, ne sera pas la chimie habituelle, celles des solutions, ce sera une *chimie de surface*. Le problème de la concentration des molécules qui y seront absorbées sera donc très différent du problème analogue en solution: la surface réduit dans des proportions immenses le volume aqueux que nous aurons à considérer, qui ne correspond qu'à une très mince couche de molécules d'eau situées immédiatement au voisinage de la surface. Mais pour que ces molécules —les

**trier
isoler**

Auto-organisation Orientée

**Auto-organisation
Orientée**

**Multitude de Variétés
de Conditions**

seules que nous pourrions retenir— restent en surface, il faudra qu'elles possèdent un caractère électrique qui les y maintienne. Ainsi, en raison des charges positives portées par les cations plus ou moins régulièrement disposés sur cette surface, les molécules importantes initialement, capables de s'y associer, sont des molécules chargées négativement.

Leur disposition formera un pavage irrégulier de la surface, et les interactions, orientées par la structure, vont favoriser l'évolution locale des molécules présentes en stabilisant certaines formes, en éliminant d'autres et en fabriquant de nouvelles. Il apparaît aussitôt que les molécules qui n'ont pas une charge électrique appropriée n'auront en général aucune raison de se trouver particulièrement souvent au voisinage de la surface et qu'elles seront donc très vite diluées dans la solution, où elles vont disparaître. Au contraire, une charge appropriée négative, fera que les molécules qui les portent resteront absorbées à la surface, piégées comme dans une nasse, et n'auront que très peu tendance à disparaître par dilution dans l'océan de la solution qui baigne la surface; sauf bien sûr si tous les sites de liaisons possibles sont déjà occupés par des molécules de ce type. Elles se dilueront dans la solution et auront tendance à coloniser les surfaces chargées encore vierges susceptibles de les recevoir. Ainsi des innovations locales pourront avoir tendance à envahir peu à peu les frontières solides des mers et des océans. En quelque sorte, il est nécessaire à ce stade que les molécules considérées possèdent des "pattes" qui les retiennent contre la surface en restreignant la diffusion à l'extérieur. Il s'agit là d'une forte contrainte sélective qui limite beaucoup la variété initiale, tout en laissant une large place à la genèse de nouvelles molécules, pour peu qu'elles gardent cette contrainte." (A4 page 82 à 86)

"Dans une première phase de l'évolution moléculaire, il est très probable que des catalyseurs minéraux aient joué ce rôle (des enzymes). Certaines surfaces minérales ou certains ions métalliques ont en effet la propriété de fixer des molécules organiques et de les disposer dans un ordre qui facilite le déclenchement des réactions d'accrochage chimique. Des ions présents dans l'eau tels les ions magnésium, zinc, calcium ou cuivriques, peuvent orienter des molécules d'acides aminés, par exemple, en structures ordonnées. Ils rapprochent certains groupements réactifs et jouent ainsi un rôle catalytique. On trouve les ions métalliques dans la plupart des coenzymes, éléments associés aux enzymes et essentiels à leur fonctionnement. Dans ces zones localisées, que le Physicien britannique J.-D. Bernal a appelées des unités "subvitales", il va donc régner une grande activité chimique. Des couches d'argiles, de sable, ou de lave, ont pu jouer le rôle de surfaces activantes. En 1970, A. Katchalsky, du Weisman Institute (Israël), a fait ressortir le rôle de certains types d'argile comme la montmorillonite dans la condensation d'acides aminés en chaînes polypeptidiques, ce qui a été confirmé en 1978 par N. Lahan puis en 1980, par Leslie Orgel pour les acides nucléiques. Il est possible comme l'a encore suggéré Bernal, que l'action catalytique des argiles ou des quartz ait conduit, dès ce stade, à la formation de molécules dissymétriques, caractéristiques de la matière vivante. Comme le dit A. Dauvillier, "l'asymétrie moléculaire, base de la vie aurait été ainsi conditionnée par l'existence préalable de l'asymétrie du réseau cristallin et ceci est bien en harmonie avec l'évolution géologique".(A1 page 125)

Compte tenu des conditions climatiques difficiles qui régnaient sur la Terre primitive, l'apparition de la vie peut être comparée à la propagation rapide d'un ensemble d'informations communiquées à un nombre croissant de molécules. cette propagation n'est pas sans rappeler les phénomènes de cristallisation des composés organiques et minéraux observé au laboratoire. placé dans des conditions particulières, le composé reste en solution bien qu'il ne soit pas soluble dans le milieu. Soudain, une poussière, un petit cristal servant de germe ou une vibration provoquent la formation des cristaux. Ceux-ci croissent et entraînent toutes les molécules du composé dans le même système cristallin. Cette similitude a amené

isoler

Auto-organisation Orientée

sélection

Auto-organisation Orientée



métabolisme

Auto-organisation Orientée



spécification

quelques chercheurs, dont Jean Scheider à l'observatoire de Meudon, à proposer des formes de vie minérale fondée sur une physiologie cristalline. Cette idée a été beaucoup développée par Cairns-Smith à l'université de Glasgow en Ecosse. Selon cet auteur la chimie du carbone fut incapable de sélectionner les molécules organiques sophistiquées requises pour la transmission d'une information, même primitive. **Le fait que la vie contemporaine utilise des molécules organiques n'implique pas obligatoirement qu'elles aient été les éléments essentiels des premiers systèmes vivants; elles peuvent très bien constituer une étape dans l'évolution du vivant et non pas le point de départ.** Cairns Smith pense que la vie primitive résultait d'une chimie totalement différente de celle du vivant que nous connaissons. **Le code génétique, si complexe dans sa fonction, ne serait apparu qu'ultérieurement dans un organisme évolué utilisant un système de réplication primaire moins efficace mais offrant une probabilité d'assemblage bien plus grande.**

"Bien sûr, pour qu'il y ait évolution de la chimie de surface, il est nécessaire que des réactions d'association, de dissociation, de condensation ou de polymérisation puissent se produire. Il est nécessaire que se constitue un **métabolisme**. Et cela nécessite des cofacteurs particuliers, molécules qui doivent, elles aussi, rester présentes à la surface et donc porter des charges électriques appropriées. Comment imaginer ces cofacteurs ? La biochimie d'aujourd'hui nous en donne une idée: en dehors des métaux déjà mentionnés (magnésium, calcium, zinc, fer...), chargés positivement, intercalés dans la matrice semi-cristalline de la surface et doués de la capacité d'attirer les électrons par leur charge propre, selon des chemins **orientés spécifiquement**, les réactions faites sur les enzymes sont souvent le résultat de la coopération entre la surface de l'enzyme et un cofacteur à la structure plus ou moins compliquée, appelée coenzyme " A4 page 88)

"Le rôle des coenzymes comme le pyridoxal phosphate est crucial à ce stade: il peut, fixer sur la surface, transférer des groupes aminés, des groupes carboxylate ou des groupes phosphate d'une molécule à l'autre, pourvu que ces molécules se présentent architecturalement de la même manière au voisinage de la surface. Le rôle du coenzyme est de permettre une classe de modification architecturale spécifique d'un contexte donné. De façon plus générale, des classes de modifications, par des substrats différents, mais ayant des propriétés chimiques localement semblables, peuvent aussi être favorisées: une molécule donnée pourra donc se trouver modifiée en un point précis par tout une série de dérivés." (A4 page 99)

"Mais s'il est aisé de concevoir des protéines primitives, ce qui peut avoir un certain intérêt du point de vue de l'évolution des propriétés catalytiques, puisque les principaux catalyseurs de la vie sont les protéines (enzymes), il n'en est pas de même des acides nucléiques. La première difficulté est d'ailleurs d'imaginer la synthèse des nucléotides. Ces molécules formées d'un sucre phosphorylé associé à une base aromatique, n'ont jamais été retrouvées dans les diverses expériences de mise en place d'une "soupe" prébiotique et, de toute façon, elles seraient très instables par rapport aux conditions géologiques. La catalyse de surface paraît bien plus propice à leur synthèse, mais elle reste cependant assez difficile. Pour cette raison, Wächtershäuser imagine un scénario intéressant, qui reprend l'idée de Cairns-Smith d'une **relève**, mais, dans le cas présent **métabolique**, plutôt que génétique. Cette idée est la suivante: lorsqu'on observe aujourd'hui un phénomène capable de se perpétuer, on a tendance à penser qu'il est né tel quel, comme Athéna naissait toute armée de la cuisse de Zeus. Cependant, en fait, il est parfaitement raisonnable d'imaginer qu'il s'agit du résultat d'une évolution et que **après la naissance du processus que nous connaissons aujourd'hui, celui qui l'a engendré c'est éteint**. La permanence de la garde est assurée par la relève.

Wächtershäuser imagine donc que les ancêtres des acides nucléiques sont des molécules différentes, qui polymérisent comme les premiers peptides, en surface. Et il propose que ces molécules sont des maillons qui

Auto-organisation Orientée

ressemblent aux nucléotides, tout en étant d'un autre type chimique, plus ancestral. C'est le sucre qui diffère: au lieu de ribose (sucre à cinq atomes de carbone dont on sait l'instabilité), Wächtershäuser propose qu'il s'agisse d'une association de trioses-phosphate, dont on a vu l'importance au coeur du métabolisme de surface. Le paradoxe de la naissance disparaît donc en même temps que naît leur association avec le métabolisme. Ces ATN (acides triose-nucléiques, ancêtres des ARN et des ADN) vont pouvoir se convertir en ARN, par réaction de polymérisation interne des trioses-phosphate, dès que des catalyseurs appropriés seront présents, et leur dégradation donnera aussitôt lieu aux nucléotides, eux-mêmes très importants comme ancêtres de coenzymes évolués, retrouvés dans un très grand nombre de réactions du métabolisme. Ainsi se boucle une première étape, ou se trouvent associées les quatre contraintes de la vie naissante: membrane, métabolisme, protéines et acides nucléiques." (A4 page 106)

LA LOGIQUE DE CETTE DEUXIEME PHASE

Dans la première phase nous avons vu comment s'était constitué la "soupe primitive". Dans un deuxième stade, la **Multitude de Degrés de Liberté** va permettre à cette **Multitude de Variétés de Produits** d'être "soumise" à une **Multitude de Variétés de Conditions**. Ceci va aboutir à deux phénomènes fondamentaux: la **sélection** et la compartimentation (isolation), condition de l'**Auto-organisation Orientée** (catalyse, métabolisme).

Sélection: la Multitude de Variétés de Conditions va permettre un **tri** dans la "soupe primitive" **l'information** va en quelque sorte se trouver **classée** (bien-sûr de manière aléatoire).

Compartimentage: cette notion, qui sera surtout développée dans la prochaine "phase" avec l'apparition de la membrane, exprime essentiellement une isolation partielle.

Dans toutes les citations, les argiles sont données comme l'agent et/ou le lieu qui aurait catalysé (ou permis la catalyse) des molécules indispensables de la vie. Même si d'autres roches on pu jouer un rôle, ou certaines conditions spécifiques (comme l'échauffement de certaines mares etc.), les argiles sont présentées comme le vecteur principal. Les argiles sont le produit de la décomposition des roches, en quelque sorte, elles sont la "soupe primitive rocheuse". Elles renferment donc une Multitude de Variétés de Produits (ions métalliques de toutes sortes, quartz, etc. On pourrait dire une multitude d'informations compartimentées). Cependant, comme il n'existe pas la Multitude de Degrés de Liberté, va se produire un formidable tri et de multiples Auto-organisations Orientées. Les argiles ont, de plus, la propriété de catalyser leur propre synthèse, elles vont donc exister en grandes quantités.

Cette deuxième phase pré biologique représente l'apogée de la phase minérale. Sur la Multitude de Variétés considérables de molécules de la «soupe», une multitude va se trouver piégée dans les argiles. Là, vont pouvoir se dérouler **une Multitude de Variétés d'Auto-organisation Orientée (catalyse)**. **Celles-ci isolées vont permettre la création de molécules plus complexes.**

Les réactions dans l'argile permettent d'isoler le produit du poison. Mais en même temps, les possibilités d'échanges et d'interactions sont très limités. La formation de la membrane, que nous verrons dans la phase suivante, permettra de redonner une MDL en même temps maintiendra l'isolation avec une sélection des échanges.

Dans cette phase tout est encore minéral, même si les briques du biologique sont pratiquement construites. Elles sont «éparpillées» et **dépendantes du métabolisme minéral.**

D'un point de vue logique, **l'Auto-organisation simple, comme processus dominant qui a produit la «soupe primitive», cède le pas à l'Auto-organisation Orientée, comme processus dominant. C'est ce qui permet de produire des molécules plus complexes.**

4) La membrane ou le compartimentage

"Une des étapes essentielles de l'évolution prébiotique a été l'intégration et la coordination —au sein de minuscules gouttelettes de matière organique— de réactions chimiques et de molécules fondamentales, présentes dès la formation de notre planète.

C'est au cours de l'évolution de ces gouttelettes prévivantes qu'ont sans doute été sélectionnés les processus de base du métabolisme et le code génétique commun à tout les êtres vivants.

les Hypothèses d'A.I. Oparine permettent, à partir de deux constatations, de franchir le fossé qui sépare les macro molécules des premières cellules:

- La vie n'est pas dispersée dans l'environnement. Tout être vivant est un **individu autonome, séparé** du monde extérieur par une **membrane** ou une peau.

- Les réactions chimiques qui se réalisent au sein de la "soupe primitive" étaient désordonnées, anarchiques. Or la vie présente des suites coordonnées et synchronisées de réactions se succédant en séquences rigoureusement ordonnées dans l'espace et dans le temps.

Pour Oparine c'est la preuve que les propriétés caractéristiques de la vie ont dû apparaître graduellement dans des **systèmes très simples et microscopiques, mais néanmoins complets, séparés du monde extérieur par une membrane** protectrice et assujettis pendant des millions d'années à la sélection naturelle. **De ce fait, les systèmes capables de s'auto conserver —et donc de survivre— se sélectionnaient d'eux mêmes.**

Voici comment on peut envisager aujourd'hui la formation naturelle de ces prototypes de cellules.

Au sein de la "soupe chaude primitive", riche en substances organiques, dans des zones riches en argiles, certaines molécules sont capables de grandir rapidement, sous l'effet d'une source extérieure permanente d'énergie et de catalyseurs minéraux. Parvenues à une taille suffisantes, ces macromolécules en solution ont la propriété de s'agglomérer les unes aux autres pour former des agrégats complexes, de deux cent à mille fois plus gros qu'une macromolécule isolée. Ce phénomène est celui de la **coacervation**. Les agrégats formés s'appellent de coacervats.

..."Grâce à la coacervation, toutes les macromolécules qui se trouvaient auparavant dispersées dans la masse liquide, se concentrent en des points localisés.

Mais il est également possible, comme l'a suggéré S.W. Fox, que des molécules géantes se soient constituées à la surface de la Terre chaude et sèche et non au sein de la "soupe primitive". Ces macromolécules ont pu être entraînées par les pluies, et transportées dans les mers où elle se sont accumulées sous forme de myriade de petits globules creux, de la taille d'une bactérie.

..." On distingue généralement les modèles obtenus en laboratoire (microsphères, coaservats) des systèmes naturels primitifs que l'on nomme éobiontes ou protobiontes. Pour simplifier, nous les appellerons: microgouttes.

Les microgouttes possèdent déjà des propriétés qui ressemblent à celles des cellules vivantes.

- Les microgouttes sont des individualités distinctes du milieu environnant. Jusqu'alors, l'évolution de la matière organique était fondue dans celle du milieu primitif. Avec les microgouttes apparaissent, pour la première fois, de **unités individuelles**.

- Il y a formation d'un milieu intérieur. Les réactions chimiques disséminées dans tout le volume aqueux vont se produire désormais entre deux domaines distincts: l'intérieur des microgouttes et l'environnement.

- Il se crée des **échanges sélectifs** de substance à travers la membrane rudimentaire.

- La structure chimique interne de chaque microgoutte lui est propre.

compartimentage

individu

Auto-organisation
Auto-orientée

individus

isolation

échanges

- Par conséquent, chacune pourra avoir, dans le temps, une destinée différente de celle des voisines. Chaque système pourra ainsi durer, évoluer ou disparaître." (A1 page 143 à 146)

"L'étude microscopique des météorites a révélé que la plupart des substances organiques qu'elles contiennent existent sous forme de "microvésicules", de minuscules corps creux en forme de bulles. On les trouve incluses dans la substance minérale de la roche météorique ou incrustées par cette même substance; elles contiennent souvent dans leur vacuole des minéraux métalliques à grains fins typiques de la météorite.

Des microvésicules semblables ont été isolées à plusieurs reprises à partir de la poussière cosmique, qui s'est amassée en plus grandes quantités sur la terre. Manifestement, cette poussière naît essentiellement de la destruction des corps-mères des météorites, un processus qui, selon toute vraisemblance, se produit de temps à autre dans l'espace interplanétaire. On peut, de manière synthétique, reproduire en laboratoire des structures comparables aux vésicules météoriques."

..."Comme on peut le déduire de l'ensemble des expériences, les microvésicules peuvent être interprétées comme étant les produits d'une synthèse chimique d'origine cosmique.

Liposomes

Un liposome est constitué en grande partie de phospholipides, c'est à dire de substances grasses, qui se constituent à partir de carbures d'hydrogène, des alcools et des composés de phosphore. Elle forme une barrière entre la cavité cellulaire et le monde extérieur et règle l'échange de substances dans les deux directions. De cette manière, le milieu cellulaire reste hors d'atteinte des variations des influences extérieures. Un organisme dépourvu de membrane cellulaire n'est pas concevable. Inversement, toute formation de membrane n'est pas nécessairement d'origine biologique.

Il est aisé de fabriquer des liposomes en laboratoire, par exemple à partir de pellicules de lipides, qui se forment facilement à la surface de contact entre l'air et l'eau. Sous certaines conditions, elles se transforment en petites bulles à double parois qui, en principe, correspondent à une membrane cellulaire.

Il faut noter que l'on peut trouver la présence de tous les corps simples de liposomes dans les roches météoritiques. Il apparaît donc possible que des phospholipides ainsi que des liposomes aient pu se former dans un milieu météoritique, lorsque de l'eau libre était disponible. Normalement dans l'univers l'eau est fixée sous forme de glace. Mais il semble que dans l'histoire des météorites, il y ait eu des époques où les températures étaient modérées et l'eau liquide, conditions qui étaient nécessaires à la formation des liposomes.

C'est ce que montrent les analyses radiométriques et minéralogiques. Une phase précoce de réchauffement s'est manifestement produite à une époque située entre 4500 et 4600 millions d'années environ. Elle suit directement le processus de formation au cours duquel les corps-mères des météorites se sont constitués à partir d'un nuage de gaz et de poussières. Dans les "météorites carbonées", on trouve toujours une sorte d'argile organique, telle qu'elle se dépose, de manière caractéristique, dans les eaux sous forme de limon. La stratification fine et les structures fluviales révèlent que les eaux courantes doivent avoir été actives et présentes dans ce milieu, au moins temporairement.

De même, certains minéraux comme le gypse, les carbonates et la magnétite —cette dernière sous des formes précipitées en grappes ou lamelleuses typiques— étayant l'hypothèse de la formation dans l'eau.

Dans les pores et les fentes emplies d'eau de la roche, des liposomes auraient donc pu naître. Théoriquement il apparaît même possible que l'un ou l'autre ait poursuivi son développement jusqu'à atteindre une forme

d'organisation supérieure, pouvant aboutir à un organisme vivant.

Quoi qu'il en soit, il semble aujourd'hui fort probable que l'évolution pré-biologique se soit déroulée à l'intérieur des liposomes. Car, dans un milieu comme celui-ci, régulateur et protégé du monde extérieur, les étapes évolutives ont pu se réaliser plus facilement qu'au dehors. **Le rôle principal est dévolu à la membrane lipidique aux multiples propriétés: elle réagit aisément avec les protéines pour donner des complexes protéino-lipidiques.**

Parmi ceux-ci, quelques-uns pénètrent en tant que soutien dans la membrane et contribuent à la stabilisation mécanique. D'autres, les protéines et les polypeptides enzymatiques, ont des propriétés catalytiques très nettes et peuvent amorcer un métabolisme. **En effet, une telle membrane est perméable d'une manière sélective**, c'est à dire qu'elle laisse passer certains ions et molécules, et pas d'autres.

Il est donc plausible de supposer que l'évolution a démarré à partir des vésicules de lipides." (A3 page 96 à 100)

"La formation des membranes

Comme je l'ai dit, les conditions habituellement proposées pour la formation d'une soupe prébiotique ne permettent pas la synthèse de longues chaînes aliphatiques (longues suites composées de carbone et d'hydrogène), du type de celles que l'on trouve aujourd'hui dans les membranes. On pourrait proposer, comme je l'ai fait naguère, que s'est l'évolution au sein des sédiments comprimés et réchauffés d'un mélange organique primitif qui aurait produit, comme aujourd'hui dans les pétroles, des molécules de ce type. Mais ce n'est pas très convaincant et c'est de toute façon très lent. Wächtershäuser, à nouveau, recherche dans le métabolisme contemporain ce qui dans la synthèse des lipides paraît anormal du fait de la présence de groupes de charges négatives, là où les chimistes n'auraient pas envisagé leur présence. Et il remarque que la synthèse des dérivés d'une molécule à cinq atomes de carbone, l'isoprène (le précurseur du caoutchouc naturel), se fait à partir de motif de base, terminé par un groupe pyrophosphate. On se trouve donc de nouveau en présence d'une de ces structures de molécules à "pattes" qui leur permettrait de rester accrochées à leur support solide. Peut-on, alors, envisager l'évolution, en surface, de molécules de ce type ? Wächtershäuser le pense, et il propose qu'une conséquence de cette structure est la polymérisation d'un certain nombre de ces groupement isoprène, utilisant comme source d'énergie la présence de pyrophosphate qui, par ailleurs, assure le maintien de la molécule en cours de condensation sur la surface. *(suit, alors, une démonstration du procédé chimique et catalytique de la formation des lipides)*

Mais ces lipides ont, à leur tour, une particularité significative. Non seulement ils peuvent rester associés à la surface par leur groupe phosphate, mais surtout ils sont fortement insoluble dans l'eau. Cela tend à favoriser leur agrégation et leur propension à rester collés à la surface où ils vont s'accumuler, comme on l'observe aujourd'hui des dépôts gras qui s'attachent facilement aux surfaces. Mais cette évolution naturelle produit des conditions physico-chimiques tout à fait nouvelles: jusque-là, les molécules importantes devaient pouvoir être solubles dans l'eau et posséder des groupements négatifs. La mise en place de couches hydrophobes à la surface de particules solides crée un nouveau milieu, capable de dissoudre de nombreuses molécules insolubles dans l'eau. Par ailleurs, cela altère significativement la nature du support solide et change ces propriétés chimiques. Mieux, comme le remarque Wächtershäuser, cela signifie que les liaisons de groupements phosphates entre eux comme le pyrophosphate ou les triphosphates, qui sont la base de la conservation et de l'échange de l'énergie chez les êtres vivants, sont stabilisées: il s'agit donc à la fois d'un mécanisme **auto-catalytique**, puisque les précurseurs des lipides considérés sont des pyrophosphates, et d'un mécanisme qui favorise l'enregistrement de l'énergie chimique sous forme de molécules phosphorylées.

Mais il n'y a pas raison de supposer que cette synthèse n'évolue pas.

**Auto-organisation
Auto-orientée**

Elle tend donc à produire des molécules lipidiques à chaîne hydrophobe de plus en plus longue. Il arrive alors un point de rupture où l'interface solide/liquide/eau est instable. Les têtes phosphorylées restent bien en contact avec les charges positives du solide, mais les longues queues hydrophobes ne peuvent plus trouver un équilibre stable en présence d'eau. Des molécules à tête hydrophile, mais ayant perdu leur caractère chargé négativement, vont pouvoir se trouver associées à celles qui restent en contact avec le solide par leur queue hydrophobe. A nouveau, en raison du deuxième principe de la thermodynamique, l'augmentation de l'entropie du système va tendre à créer une structure nouvelle, dans laquelle les queues hydrophobe vont se retrouver tête-bêche, exposant alors leur groupement hydrophile vers l'eau. Or cette structure en "bicouche" lipidique est précisément celle qu'on retrouve dans toutes les membranes biologiques, comme l'ont montré, en 1935, Danielli et Dawson."

..."On se trouve alors confronté à une situation radicalement nouvelle. Des feuillet lipidiques viennent entourer les grains de matière solides et, par là, séparer un milieu intérieur, siège de la catalyse de surface du milieu extérieur. Cela commence à ressembler à un embryon de cellule, où métabolisme et membrane, deux des contraintes fondamentales de la vie généralement totalement oubliées de ceux qui s'interrogent sur son origine, se retrouvent naturellement réunis.

LOGIQUE DE CETTE TROISIÈME PHASE

Les fonctions de la membrane

La membrane, comme l'ont expliqué tous les biologistes va avoir plusieurs fonctions indispensables à la vie:

- 1) isolation mettre à l'abri
- 2) échange permettre la sélection de l'échange
- 3) transport augmenter la MDL

Cette troisième phase, qui n'en est pas une car elle est parallèle à la phase précédente et à la suivante, décrit la formation de la membrane. Il est fondamental de noter que cette formation (micro gouttes) correspond à un phénomène d'**Auto-organisation Auto-orientée, ce qui permet à la membrane de s'émanciper du métabolisme minéral.**

B) Le mécanisme du vivant

Dans la première partie, pour une nécessité théorique, nous avons différencié la formation des molécules de base de la membrane de celle des molécules de base qui vont servir à la reproduction et au métabolisme. Dans cette deuxième partie, nous allons différencier deux fonctions, la reproduction et l'auto gestion, bien qu'elles soient étroitement liées dans le processus du vivant.

1) La reproduction

"L'apparition d'un mécanisme de mémoire moléculaire **fondée sur la duplication**, avec un minimum d'erreurs, d'un type d'architecture chimique initial a sans conteste un rôle de premier plan dans la genèse de la vie. Cela est fondamental si l'on remarque que toutes les (macro)molécules, si complexes et douées de propriétés catalytiques exceptionnelles fussent-elles, ne pouvaient que se dégrader avec le temps. Les échelles temporelles de la vie sur la Terre —des centaines de millions d'années—, d'ailleurs, nous forcent à considérer en priorité cet aspect de la stabilité des molécules organiques. Il est donc nécessaire d'imaginer au seuil de la vie une mémoire, engrangée dans ce type de moléculaire particulier, **qui puisse se conserver, au moins de façon dynamique**. On sait qu'aujourd'hui se sont les acides nucléiques qui jouent ce rôle, mais on sait aussi que les acides nucléiques ne sont pas de nos jours en mesure de se reproduire eux-mêmes. Ils ne le font fidèlement qu'avec l'aide de protéines, qui elles-mêmes sont le résultat de l'expression de caractères spécifiques portés par les acides nucléiques. C'est le paradoxe de l'oeuf et de la poule."..."Mais les découvertes récentes viennent brusquement de changer les données du problème: **des acides nucléiques, ARN en particulier, sont doués d'activité catalytique; mieux, il semble qu'ils soient, dans certains cas, aptes à se reproduire eux-mêmes, sans le secours d'aucunes enzymes**. Le paradoxe s'effondre par là-même et donne un rôle de premier plan aux acides ribonucléiques. Ce que nous allons voir à présent.

Mécanique répllicative

Des (macro)molécules, si elles existaient, capables de contrôler assez leur environnement pour produire d'elles-mêmes des répliques fidèles pouvaient avoir un avenir. Et, comme le remarque Graham Cairns-Smith, cela devait leur conférer un avantage tel qu'elles ne pouvaient alors qu'envahir la planète, jusqu'à effacer la mémoire des systèmes moléculaires qui les aurait précédés. Comprendre leur origine est donc une étape préalable nécessaire à toute enquête sur la naissance de la vie.

L'une des caractéristiques de la vie est bien sa capacité à se reproduire. A l'échelle moléculaire, reproduction signifie répllication de quelque chose que, faute de mieux, on peut appeler l'information génétique, du patrimoine transmis héréditairement de génération en génération. Les cellules réalisent aujourd'hui cette répllication au travers d'un jeu compliqué d'échanges et d'interactions entre les protéines et les acides nucléiques. C'est cette observation qui conduit habituellement au paradoxe de l'oeuf et de la poule: qui ont été les premiers, les protéines ou les acides nucléiques ? **Ce qui crée le paradoxe est la séparation physique, constatée aujourd'hui, entre la mémoire et la fonction.** A quelques exceptions près, les acides nucléiques jouent le rôle de mémoire de l'hérédité et servent de matrice — ou plutôt de plan, de patron codé — à la fabrication de protéines qui, elles, sont douées des fonctions catalytiques essentielles à la vie, y compris à la mécanique de sa répllication. Cette séparation qui fonde l'image usuelle de la cellule comme une usine

**Des ARN
capables de se
reproduire eux-mêmes
=
Auto-organisation
Auto-orientée**

qui se construit à partir de ses propres plans, qu'elle élabore elle-même, était comprise comme la conséquence inévitable des propriétés chimiques des acides nucléiques et des protéines. Bien que, dans les deux cas, il s'agisse de molécules à structures linéaires (un enchaînement de motifs de base d'une même famille, comme les lettres de l'alphabet à la queue leu leu constituent un texte), on pensait que seules les protéines pouvaient se replier dans l'espace selon une architecture qui puisse se prêter à la formation de sites catalytiques. La découverte récente que **certains types de molécules d'ARN peuvent avoir aussi un rôle de catalyseur**, en plus de leur rôle habituellement considéré de mémoire de l'information génétique, **a rendu les ARN susceptibles de résoudre ce paradoxe** apparent."

..."Dans le deuxième scénario, se sont les acides nucléiques qui sont les premiers. Il se répliquent spontanément, sans l'aide de protéines, qu'ils ont inventées par la suite. Dans un troisième scénario encore, on peut penser que les protéines et les acides nucléiques sont le résultat d'une évolution concertée et n'ont jamais été séparés. Enfin, bien sûr, on trouve l'hypothèse de Cairns-Smith de la "relève génétique" où la répllication d'une matrice minérale a été suivie de la répllication des acides nucléiques, qui en a effacé la mémoire. Mais Wächtershäuser a bien montré la difficulté inhérente à toutes ces hypothèses. Elles impliquent toujours l'existence d'un mécanisme plus ancestral, sans répllication d'une matrice, jusqu'à son invention.

Cependant, il arrive un moment du scénario où il faut penser que la réplique commence, et c'est là qu'apparaît une découverte récente qui permet d'avancer beaucoup plus dans la plausibilité des hypothèses: les acides nucléiques, **les ARN (et peut être aussi les ADN eux-mêmes), peuvent, à l'instar des protéines, être doués d'activités catalytiques, y compris être capables d'assurer leur propre répllication. Revenons sur cette découverte.**

Les gènes morcelés

..."jusqu'alors il était bien établi, en effet, qu'il existe une relation de colinéarité entre un gène — une suite de nucléotides (ou séquence) d'ADN — son produit immédiat, un ARN "messenger" et son produit de traduction, au moyen de la règle du code génétique, la protéine. **Ainsi chez les cellules qui ont un noyau, les séquences "codantes" (celles qui peuvent être traduites en protéines) sont bien souvent interrompues par des fragments d'ADN, "non codant", dont on ne trouve pas de trace dans le produit final:** la protéine codée par un gène interrompu par un de ces introns n'est nullement marquée par la présence dans le gène, de même que les articles de la revue, coupés par les encarts publicitaires, n'en sont en général pas marqués.

En pratique ces introns sont transcrits, en même temps que les régions codantes qui les encadrent (les exons), sous forme d'un grand ARN précurseur. **Un processus chimique particulier permet alors l'excision des introns présents dans l'ARN précurseur et l'épissage (la liaison) des exons adjacents.** On distingue aujourd'hui trois grandes classes d'épissage suivant la nature des mécanismes biochimiques qui les permettent." (A4 page 111 à 117) (suit une description de ces trois classes)

..."Tom Cech étudiait la synthèse des protéines chez un protozoaire, une sorte de paramécie, *Tetrahymena thermophila*. En cherchant à reconstituer en tube à essai la maturation d'un composant du ribosome (le support universel de la synthèse des protéines), un ARN qui contenait un intron de quatre cent treize nucléotides, **il découvrit que l'excision de l'intron situé à l'intérieur de la molécule d'ARN ribosomique pouvait se faire spontanément, sans le secours d'aucune enzyme.** C'est comme si au cours de la lecture de votre journal favori, vous voyez disparaître les encarts publicitaires et les colonnes des articles se mettre bout à bout ! " ... "Il est ensuite apparu qu'il ne s'agissait pas là d'une découverte anecdotique, car **on retrouvait ce même phénomène d'excision spontanée**

Auto-organisation Auto-orientée

Les gènes morcelés

auto-épissage

d'un fragment intérieur dans le cas de beaucoup d'autres ARN."

..."On découvre aussi que les introns pouvaient exister non seulement dans les précurseurs des ARN messagers mais aussi dans les précurseurs des ARN de transfert ou dans les ARN ribosomiques.

Pour amorcer la réaction d'excision-épissage de l'intron découvert chez un ARN ribosomique de *Tetrahymena*, il fallait seulement ajouter de petites quantités d'un nucléoside (la guanosine) dans un extrait cellulaire (contenant par conséquent, toutes sortes de protéines), cherchant à simplifier les conditions de la réaction, Cech tenta de la reproduire en omettant successivement divers éléments du mélange initial; dans une expérience cruciale il devait ajouter une enzyme qui a la propriété de dégrader les protéines en les réduisant en tout petits fragments, détruisant en principe l'ensemble des activités enzymatiques présentes dans le mélange. Et, à sa grande surprise, **il devait constater que l'épissage avait toujours lieu et que seule l'addition de guanosine était requise**, sous réserve de respecter les conditions physico-chimiques appropriées (température, sels, etc...) qui permettent le repliement sur soi de l'ARN. Elle était inmanquablement suivie des réactions de coupure et d'excision de l'intron et la liaison des extrémités se faisait alors spontanément. Il s'agit là d'une dynamique propre à certaines molécules d'ARN, caractérisées par des particularités structurales communes, qui l'a conduit à les classer ensemble (sous le nom de groupe I).

La réaction correspondante fait penser à une **autocatalyse**, puisque c'est la molécule qui agit sur elle-même (bien qu'il y ait en fin de compte destruction de la molécule initiale). Cette première classe d'intron est très répandue. On la trouve dans l'ADN des mitochondries de champignons, dans le noyau des protozoaires, dans le génome des chloroplastes et même dans certains gènes de virus bactériens."

..."Mais ce que Cech et ses collaborateurs ont montrés ensuite, c'est que cette réaction, ou plutôt une réaction dérivée de celle-ci, pouvait être considérée comme une véritable catalyse, et non plus seulement comme une auto catalyse. En effet dans le modèle initial, la molécule d'ARN, contrairement à ce qui définit un catalyseur, à savoir sa conservation au cours de la réaction qu'il favorise, ne se trouve pas intacte à la fin, puisqu'il y a excision d'un fragment intérieur. **Mais si l'on étudie maintenant ce que devient ce fragment et la façon dont il peut évoluer et agir sur d'autres ARN, on s'aperçoit qu'il est capable à la fois de dégrader séquentiellement certains ARN comme le poly C (un enchaînement répété de nucléotides C) et de les polymériser en créant de longues molécules d'ARN, et cela sans que la molécule initiale soit altérée: ainsi un ARN devient un véritable catalyseur."**

..."Ainsi on en vient à découvrir que les ARN eux-même peuvent avoir, comme les enzymes, des activités catalytiques. On comprend donc que les études sur l'origine de la vie puissent en être complètement renouvelées. A long terme, il restera à comprendre le détail des mécanismes de la catalyse médiée par les ARN " (A4 page 119 à 122)

Les enzymes à cofacteur ARN

L'étude du devenir des ARN et de leur maturation à partir des transcrits primaires obtenus normalement in vivo en a révélé l'existence d'au moins une activité catalytique clairement établie, mais moins bien comprise du point de vue physico-chimique que celle des introns. Les ARN de transfert par exemple ARN courts dont nous reparlerons un peu plus loin, sont synthétisés à partir de précurseurs qui possèdent le plus souvent des séquences de nucléotides supplémentaires dans leur région amont. On savait depuis longtemps que la coupure permettant d'engendrer la molécule finale était très spécifique et nécessitait en apparence la présence d'une protéine. Mais Altman et ses collègues de l'université de Yale ont établi en 1978 que l'activité correspondante, appelée ribonucléase P, nécessitait la présence d'un cofacteur ARN de quatre cents nucléotides environ. Après la découverte par Cech et ses collègues du pouvoir **autocatalytique** d'un intron en l'absence de protéine, Altman et ses collègues tentèrent de

**Auto-organisation
Auto-orientée**

**Auto-organisation
Auto-orientée**

reconstituer un système de maturation des ARN de transfert, en présence de l'ARN ribonucléase P et sans protéine. Cette expérience fut couronnée de succès, même si l'activité ainsi mise en évidence était considérablement plus lente (cent fois plus lente) que l'activité observée en présence de protéine. Il était ainsi démontré à nouveau, dans le cas d'un système tout à fait différent, que **des ARN pouvaient posséder une activité catalytique intrinsèque.**

L'identification des ARN composant des nucléases homologues, isolées d'un grand nombre d'organismes très peu apparentés d'un point de vue évolutif, a mis en évidence quelques grands traits d'une architecture commune. Mais comme dans les cas des enzymes, leur forme générale manifeste une très grande divergence au cours de l'évolution. Là encore, même si l'on ne comprend pas aujourd'hui la mécanique fine du processus catalytique sous-jacent, l'analogie avec les protéines est frappante: nous sommes en présence d'un enchaînement de motif de base (des nucléotides, par opposition aux acides aminés des protéines) qui se replie dans l'espace en une architecture complexe permettant à la fois la reconnaissance spécifique d'un substrat particulier et la catalyse d'une réaction chimique mettant en jeu ce substrat.

Ainsi il n'est plus nécessaire d'imaginer qu'au cours des événements qui ont précédé l'apparition de la vie le passage par une première étape protéique devait obligatoirement précéder la mise en place des acides nucléiques. **Le fait de trouver maintenant des acides nucléiques capables, par eux-même, d'avoir une activité catalytique tournée sur eux-même, impose une modification radicale de cette façon de voir, même s'il paraît toujours certain que toutes les activités catalytiques qui sont le fait des protéines ne pourraient pas être réalisées par des acides nucléiques.** Et il reste toujours extrêmement difficile de comprendre comment les premiers acides nucléiques ont pu être fabriqués, "...on est conduit à penser que l'origine de la vie est très liée à l'origine des acides nucléiques. En fait **cette origine apparaît comme multiple ou, comme le résultat d'une co-évolution entre une origine protéique et une origine nucléique, le rôle particulier des acides nucléiques dépassant largement celui que l'on connaît de nos jours, être le support de la mémoire qui forme le programme héréditaire.**

L'idée qui semble la plus prometteuse pour comprendre cette co-évolution et l'origine des ARN est que c'est à l'origine du métabolisme intermédiaire qu'il faut chercher la genèse et des acides nucléiques et des protéines, au travers d'un mécanisme synthétique qui, comme on le verra, à peu donner naissance à la mécanique originale de la traduction (le passage de la mémoire, sous forme d'acides nucléiques, à la fonction sous forme des protéines). ".(A4 page 127 à 130)

Les ARN de transfert

Les acides nucléiques ne sont pas restés longtemps seuls, d'ailleurs ils ne l'ont sans doute jamais été, car les maillons qui les constituent, les nucléotides, sont bien trop compliqués pour être nés d'emblée, je viens de le rappeler. **Les ARN coexistaient donc avec de nombreuses molécules, formant un métabolisme primitif mais efficace,** le tout à la surface des pierres et des poussières. Cette coexistence supposait des interactions et une chimie commune. **L'hypothèse que nous allons examiner est que se sont des ARN particuliers, les ARN de transfert, qui semblent avoir constitué ce lien.**

Un processus central de la vie, le processus central, devrais-je dire, est le passage des acides nucléiques aux protéines, par une mécanique complexe qui s'organise sur des particules ribonucléoprotéiques, les ribosomes. Ce sont les molécules d'ARN originales qui permettent ce passage, en servant d'adaptateurs entre le message génétique, sous la forme d'un ARN messenger, copie fidèle du gène (mais débarrassée de ses introns, comme on l'a vu) qu'il s'agit d'exprimer en un lieu donné de la cellule et à un moment donné de son développement, et la protéine qu'il spécifie. Ces molécules sont appelées ARN de transfert, précisément pour

Auto-organisation Auto-orientée

Auto-organisation Auto-orientée

co-évolution

Les ARN coexistaient donc avec de nombreuses molécules, formant un métabolisme primitif mais efficace.

exprimer ce rôle d'intermédiaires. Elles sont donc elles aussi, des éléments essentiels pour comprendre l'origine de la vie."

..."Mais il est cependant difficile de déterminer avec certitude les relations évolutives qu'elles ont entre elles. Pourtant, **plusieurs hypothèses permettent de comprendre comment elles se sont perfectionnées et peut être construites à partir de blocs élémentaires répétés à la suite les uns des autres, comme l'a proposé par exemple, il y a quelques années, Philippe Marlière. En effet en comparant deux classes d'ARN de transfert dont on connaissait des exemples issus de toute une gamme d'organismes différents, Marlière a montré qu'il était possible de les imaginer comme dérivant de répétitions et de permutations circulaires d'un motif initial, AGCUCG. Cette organisation permettait en particulier de retrouver assez facilement celle de la molécule repliée en feuille de trèfle. Elle démontrait aussi, point sur lequel je reviendrai longuement dans le dernier chapitre, qu'il est déraisonnable de penser que les acides nucléiques sont des enchaînement aléatoires de nucléotides. De même que les premières molécules organiques sélectionnées pour produire la vie étaient en petit nombre, de même il est raisonnable de faire l'hypothèse que les motifs de base qui ont permis la genèse des acides nucléiques tels que nous les connaissons aujourd'hui étaient en petit nombre.** Une étude détaillée des ARN de transfert devra, dans les années qui viennent, répondre à cette hypothèse."

..."Mais regardons de plus près ces molécules et leurs fonctions. De nos jours, elles assurent la traduction de l'ARN messenger, copié, transcrit, à partir du gène, en protéine. Chaque ARN de transfert assure la correspondance entre une suite de trois nucléotides du messenger, un codon, et l'acide aminé qui lui correspond. **Chaque ARN de transfert est donc amené à porter, à l'une de ses extrémités (son extrémité 3'OH), un acide aminé spécifique. Cela implique donc une relation fonctionnelle entre la synthèse des acides aminés (au moins à leur dernière étape, celle qui précède l'incorporation d'une chaîne polypeptidique) et la synthèse des protéines. Comme on ne peut penser que les réactions chimiques qui ont présidé à la naissance de la vie furent d'emblée aussi compliquées qu'elles le sont de nos jours, il nous faut imaginer que les ARN de transferts ont possédé une autre fonction générale que la traduction, antérieure et sans doute à l'origine de la synthèse des protéines.** Or on doit remarquer que ces ARN sont loin d'être des molécules ordinaires: alors qu'on s'attendait à ce qu'ils soient formés d'un simple enchaînement de nucléotides, des quatre types usuels (A,U, G, et C), on observe qu'en réalité un nombre très important des nucléotides de la molécule sont modifiés. **Cela signifie qu'après avoir été copié à partir du gène correspondant, un ARN de transfert est soumis à un très grand nombre de modifications chimiques. Ainsi un cinquième, et parfois plus, des nucléotides qui constituent leur séquence portent des modifications chimiques variées.** Tout se passe comme si les ARN de transfert jouaient le rôle de support d'une partie du métabolisme intermédiaire. On interprète généralement ces modifications comme les indications d'une recherche très fine de la spécificité de la correspondance entre un ARN de transfert et l'acide aminé qu'il porte, mais dans la plupart des cas, il a été impossible d'identifier la fonction exacte de ces nombreuses modifications et l'on en reste donc aux spéculations. Parmi les différentes hypothèses possibles, **il est légitime de penser que les ARN de transfert ont été impliqués initialement dans de tout autres réactions que la traduction des ARN messagers en protéines, par exemple dans le métabolisme intermédiaire lui-même. Ils auraient pu être des supports métaboliques, ce qui aurait pu les conduire depuis la synthèse des acides aminés à la synthèse des protéines.**

Substitution de surface: les macromolécules

Si le métabolisme intermédiaire est un métabolisme de surface, son évolution vers la mise en solution a nécessité une étape spécifique de rem-

**pas d'enchaînements
aléatoires**

**un petit nombre
de motifs de base**

**on ne peut penser que les
réactions chimiques qui ont pré-
sidiées à la naissance de la vie
furent d'emblées aussi compli-
quées qu'elles le sont de nos
jours**

**modification
de la fonction
des ARN**

placement de la matrice solide par d'autres types de matrices, jusqu'à la solution aujourd'hui adoptée, celle de la matrice protéique des chaînes polypeptidique des enzymes. La capacité catalytique des ARN analogues aux introns sont sans aucun doute bien trop faibles pour permettre la plupart des réactions essentielles au métabolisme, et **il faut donc considérer que ce qui précède l'apparition des premières cellules possède déjà un métabolisme remarquablement développé. Ainsi les coenzymes à nucléotides devaient précéder les acides nucléiques**, peut être sous la forme de tribonucléotides. Ce qui importe donc est d'associer désormais la formation des acides nucléiques au maintien d'un métabolisme intermédiaire très bien développé.

Or il est vraisemblable, nous l'avons dit, que l'évolution chimique du métabolisme ait été concomitante de phénomènes de polymérisation. Et si l'on adopte le point de vue que les acides ribonucléiques (ou les ancêtres tribonucléiques) sont parvenus assez tôt, **on se rend compte que leur structure semi-périodique, d'ailleurs organisée comme telle sur la matrice solide semi-cristalline qui les supporte, ressemble à cette dernière. En un sens ces polymères peuvent être amenés à remplacer la matrice solide et, ce faisant, à en permettre la mise en solution. Je vais donc supposer à présent que c'est bien ce qui s'est produit. Cela implique que toute la mécanique que nous avons décrite au cours des chapitres précédents puisse avoir lieu sur ces matrices ATN ou ARN, y compris la synthèse, la liaison des coenzymes et leur auto-reproduction.**"

..."Il convient donc d'imaginer qu'à un moment de l'histoire de la polymérisation de surface, des molécules assez grosses pour jouer le rôle de support, assez rigides pour permettre les réactions spécifiques du métabolisme, sont venues se substituer à la surface. La taille minimale de ces molécules serait importante à connaître."..."Si l'on choisit un nucléotide, par exemple, comme molécule de base, un support qui serait constitué d'un cube ayant pour côté une dizaine de nucléotides correspondrait parfaitement à notre propos."..."cela signifie la formation d'une molécule comportant de cinquante à cent nucléotides. Cela correspond exactement aux dimensions des molécules d'ARN de transfert. C'est aussi, nous le retrouverons plus loin, la dimension minimale habituelle des protéines, des enzymes en particulier.**La diffusion impose donc le concept de macromolécule et l'échelle correspondante (l'existence de plusieurs niveaux pertinents dialoguant entre eux est une caractéristique essentielle de la vie).**

Nous pouvons noter ici que cette contrainte historique, qui a conduit au **remplacement d'un métabolisme à support solide par un métabolisme en solution**, crée de facto l'un des caractères propres à la vie, une organisation hiérarchique. Elle permet la création de plusieurs niveaux d'architecture et la constitution d'entités macroscopiques. Elle permet aussi un usage original des contraintes thermodynamiques de la solution en transformant des réactions chimiques intermoléculaires (entre molécules isolées, séparées) en réaction intramoléculaires (à l'intérieur d'une même molécule)."

..."On a longtemps pensé que c'étaient des protéines du ribosome qui catalysaient la formation du lien peptidique, mais on sait aujourd'hui qu'il n'en est rien. C'est la juxtaposition orientée par les ARN ribosomiques, de deux ARN de transfert, le premier porteur de la chaîne polypeptidique en croissance et le second chargé par l'acide aminé qui doit s'y ajouter, qui suffit à la réaction. En effet, la liaison de l'acide aminé à l'ARN de transfert est en elle-même suffisamment réactive pour permettre ce transfert. Le rôle du ribosome est essentiellement d'apporter l'architecture rigide qui permet les rapprochements nécessaires à la réaction. Le ribosome se comporte ainsi visiblement comme un substitut aux grains solides ancestraux qui favorisaient la catalyse de surface."

..."**Et découvrir que la formation des liens peptidiques au moyen d'acides aminés chargés sur des ARN de transfert, peut se faire sans machinerie de traduction (messager, code génétique) permet de pen-**

Cela implique que toute la mécanique que nous avons décrite au cours des chapitres précédents puisse avoir lieu sur ces matrices ATN ou ARN, y compris la synthèse, la liaison des coenzymes et leur auto-reproduction."

..."Il convient donc d'imaginer qu'à un moment de l'histoire de la polymérisation de surface, des molécules assez grosses pour jouer le rôle de support, assez rigides pour permettre les réactions spécifiques du métabolisme, sont venues se substituer à la surface.

ser que cette étape a pu précéder le processus de traduction et lui donner naissance. Ainsi les ARN supports, porteurs d'acides aminés, sont capables dans des conditions appropriées de mettre bout à bout des acides aminés, en formant des liens peptidiques. **Par conséquent, l'hypothèse d'un support ARN se substituant à la matrice solide initiale rend parfaitement compte de l'apparition d'une étape cruciale à l'origine des êtres vivants, la formation de chaînes peptidiques au moyen d'ARN de transfert.** Une autre découverte, très récente celle-là, donne à nouveau une fonction aux ARN de transfert dans la genèse de l'appareil de traduction. David Schlessinger et son groupe de l'Université de Washington à Saint Louis, viennent en effet de montrer que la formation des ARN ribosomiques, à partir de leurs transcrits précurseurs, nécessite la présence d'un ARN de transfert en queue de transcrit précurseur. De même on sait que de nombreux virus se répliquent à partir d'une amorce qui n'est autre qu'un ARN de transfert et certains virus végétaux portent même à leur extrémité une structure qui peut se replier en feuille de trèfle, comme n'importe quel ARN de transfert, et même se charger avec un acide aminé ! **C'est là encore un rôle bien différent du rôle unique (mais non fondamental) généralement attribué à ces molécules, celui de "décoder" les ARN messagers.**" (A4 page 134 à 146)

..."l'ARN messenger (ARNm) n'a qu'un seul brin et il est rapidement dégradé dans la cellule. **L'intermédiaire ARNm existe dans tous les organismes, ce qui veut dire qu'il a été sélectionné au cours de l'évolution, avant la séparation des espèces actuelles.**

Un ARNm est la copie exacte d'un fragment d'ADN, écrite dans un alphabet de même nature à quatre nucléotides. l'étape la plus complexe de l'expression génétique est la traduction de la séquence nucléotique ARNm en séquence d'acides aminés. Les principes de la traduction ont été décrits au milieu des années soixante en particulier par le groupe de Khorana à Madison aux Etats Unis. D'abord, il existe une règle de correspondance entre alphabet à quatre lettres et à vingt lettres: chacun des vingt acides aminés est codé par un groupe de trois nucléotides consécutifs appelés triplet ou codon. C'est ainsi que le codon AUG dans l'ARNm veut "dire": acide aminé "méthionine". Ensuite, l'ordre des codons le long de la molécule d'ARNm dicte l'ordre des acides aminés dans la protéine. Enfin certains triplets ont valeur de ponctuation. Ainsi, le point de départ de la séquence de codage d'une protéine est toujours le triplet AUG, codant la méthionine. Ce premier codon AUG détermine de facto la nature des codons suivants, ce qu'on appelle le cadre de lecture. Enfin des triplets dits de terminaison (UAA, UGA, et UAG) ne codent pas pour un acide aminé mais servent de signal d'arrêt à la traduction. **Le code génétique que nous venons de définir dans ses grandes lignes est essentiellement universel.** Ainsi chaque acide aminé d'une protéine est-il directement associé au codon correspondant dans le gène: des acides aminés consécutifs sont déterminés par les codons consécutifs dans l'ADN et dans l'ARN. En d'autres termes, les protéines et les gènes sont dits colinéaires. La colinéarité est un principe classique de la biologie moléculaire.

Ces notions ont été acquises en 1962-1963 à partir de résultats obtenus surtout chez les bactéries. Dès que l'on a pu passer à l'étude des organismes supérieurs vers le milieu des années soixante dix, il devint évident que le principe de colinéarité y subissait une entorse. En effet, la séquence nucléotidique de nombreux gènes des organismes supérieurs est interrompue par des segments appelés introns et qui ne codent apparemment pour rien. Les gènes sont dans un premier temps transcrits en une grande molécule d'ARN dit pré-messager. Les introns en sont ensuite retirés. Cela conduit à un ARNm qui ne contient plus que la séquence susceptible d'être traduite en molécules. Donc dans ces gènes "morcelés", l'ARNm reste rigoureusement colinéaire à la protéine, en revanche, l'ADN du gène n'est plus rigoureusement colinéaire à la protéine: des triplets très éloignés, séparés par un intron dans l'ADN, peuvent coder des acides aminés adjacents dans la protéine. C'est ainsi que **le gène humain de la**

Auto-organisation
Auto-orientée



indépendance
par rapport
au métabolisme
minéral



Auto-organisation
Orientée



métabolisme
biologique

distrophine, protéine musculaire dont l'inactivation est à l'origine de la myopathie de Duchenne, **mesure plus de 2 millions de nucléotides, alors que son ARNm n'est long que d'un peu plus de 10 000. Seul 0,5% du gène est utilisé pour la fabrication de la protéine !** Cependant, ce qui reste encore valable du dogme de la colinéarité est qu'il existe dans l'ADN un codon pour chaque acide aminé et que ces codons se suivent dans l'ordre, même si ils ne sont pas adjacent dans le gène. En d'autres termes, l'existence de gène morcelés n'était qu'un coup de canif dans le dogme de la colinéarité.

OU L'ON MONTRE QU'UN JEUNE ETUDIANT EN BIOLOGIE PEUT ENCORE FAIRE UNE DÉCOUVERTE RÉVOLUTIONNAIRE

Le coup de poignard est venu de l'étude des mitochondries des trypanosomes. Les trypanosomes sont des parasites responsables de pathologie humaine et animale sérieuse comme la maladie du sommeil. Les mitochondrie sont quant à elles des organites intra cellulaires spécialisées dans la production d'énergie utilisable par la cellule. Elles possèdent un minichromosome dont l'ADN contient de dix à vingt gènes qui codent pour les protéines mitochondriales. En 1985, Just Brakenhoff, un étudiant de notre laboratoire de l'université d'Amsterdam, déterminait la séquence nucléotidique de l'ARNm issu de la transcription du gène d'une sous unité de l'enzyme cytochrome oxydase mitochondriale (dite *cox2*) du trypanosome *trypanosoma brucei*. A sa grande surprise, il découvrit autour du nucléotide 520 de l'ARNm, quatre "U" qui n'étaient pas présents dans le gène. Comparant la séquence de l'ARNm à celle de la protéine, Brakenhoff constata que ces U surnuméraires conféraient à l'ARN un cadre de lecture codant les acides aminés corrects. L'ARN copie conforme du gène que nous connaissions aurait été bien incapable de le faire. Existait-il donc deux versions du gène *cox2* dans les mitochondries, une bonne et une mauvaise ? Malgré nos efforts, nous n'avons trouvé aucune autre version du gène. En 1986, nous avons donc publié que les mitochondries des trypanosomes utilisaient un mécanisme nouveau dans l'expression génétique, que nous avons appelé **"editing de l'ARN"**. **Nous l'avons défini comme des "modifications de la séquence nucléotidique de l'ARN" qui ne sont pas directement codées par le gène, et qui modifient le sens du message génétique.** En d'autres termes il n'y avait plus dans ce cas de colinéarité. Cette découverte montre en outre que nous ne connaissons pas tous les aspects de l'expression génétique et qu'il reste encore une chance aux étudiants de faire des découvertes révolutionnaires.

Cette observation n'est pas restée longtemps isolée. Depuis 1987, de nombreux exemples d'editing d'ARN ont été trouvés dans les ARNm des trypanosomes. Les modifications n'y sont pas mineures, puisque dans la cas de l'ARNm codant pour la sous unité III de la cytochrome oxydase, J.E. Feagin à l'institut de recherche biomédicale de Seattle, a découvert que 55% de la longueur totale de l'ARNm consistaient en u ajoutés après la transcription ! "...En 1989, ce fut dans la mitochondrie des plantes ainsi que chez les virus comme les paramyxovirus agents de la rougeole et des oreillons. En 1991 enfin, des editing d'ARN ont été découverts chez les champignons *Physarum polycephalum*, les chloroplastes des plantes et dans les cellules du cerveau humain. Certains des processus d'editing découverts sont de "type insertion" comme dans le cas du trypanosome: il s'agit des insertions de C trouvées dans l'ARNm mitochondrial du champignon *Physarum polycephalum*, ou bien les résidus G supplémentaires présents dans certains ARNm de paramyxovirus. Ces insertions de nucléotides ont des conséquences remarquables. Nous avons rappelé plus haut que l'élément du code est le codon, une succession de trois nucléotides. Supposons la séquence ...AGACCAUC..., qui code donc pour ...ArgProSetr..., l'insertion d'un seul U, donnant ...AGUACCAUC ..., va avoir deux conséquences. Elle modifie l'identité d'un codon, Arg devient Ser. Mais surtout, elle introduit un décalage dans les codons qui la suivent. En aval (c'est-à-

dire à droite) du site d'insertion, tous les codons sont modifiés et donc la séquence de la protéine devient ici: ...SerThrIle....

Dans les autres formes connues d'editing, ce sont des substitutions de nucléotides qui se produisent, sans décalage de codon."... Cette forme d'editing peut entraîner la modification d'un seul acide aminé dans la séquence de protéine. Cela paraît mince, mais il faut se souvenir que la modification d'un seul acide aminé peut avoir des effets importants sur les propriétés de la protéine.

A ce point, nous pouvons conclure que tous les processus d'editing modifient les séquences d'ARNm codant une protéine —parfois aussi l'editing se produit dans des séquences non codante, et cela sans en avoir apparemment reçu l'ordre de la séquence du gène lui-même. On doit alors se demander comment opère ce mécanisme qui ne peut pas se faire au hasard puisque le résultat, c'est à dire la séquence des protéines est toujours la même. De plus, comme ce mécanisme peut être hérité dans la mesure ou la capacité de codage des protéines se transmet de génération en génération, l'editing de l'ARN doit également faire l'objet d'un codage génétique. On doit enfin se demander à quoi cette complication peut bien servir."

..."Les anciennes règles de l'expression génétique ne s'appliquent désormais plus à ces ARN panédités, puisque la séquence finale des codons est entièrement déterminée grâce au processus d'editing. Peut on s'imaginer qu'il s'agit d'un mode simple de réglage de l'expression génétique ?"

..."comme l'editing d'ARN est reproductible et précis, les transformations ne peuvent pas être laissées au hasard. **Dans tous les cas, la précision de la modification et sa spécificité sont difficilement explicables si l'on ne fait pas intervenir un appariement spécifique entre le transcrit primaire à éditer et un autre ARN, qui fournirait l'ensemble (lieu et contenu) de l'information nécessaire à l'editing.** Cette hypothèse implique qu'il existe "ailleurs" dans le génome mitochondrial, des séquences d'ADN correspondant à ces séquences guides d'editing. Beat Blum, chercheur au Larry Simpsons laboratory de Los Angeles, nous a suggéré, en 1990 une première solution possible. En étudiant systématiquement les séquences nucléotidiques de l'ADN mitochondrial, il se rendit compte qu'il existait bel et bien des séquences complémentaires aux séquences d'ARN édité, dans l'ADN maxi-cercle de *L.tarentolae*. Ces régions complémentaires sont très petites, de 14 à 55 nucléotides, et comportent des appariement exotiques tels que G:U à coté des appariements traditionnels G:C et U:A. Blum montra également que les régions d'ADN comportant ces séquences étaient transcrites en ARN longs de 70 à 80 nucléotides. **Il supposa alors que ces petits ARN (qu'il appela ARN "guide", ARNg) transmettaient l'information nécessaire à l'editing des ARN. Sur la base des règles de l'appariement entre brins complémentaires d'acides nucléiques, il a supposé qu'un ARNg forme un double brin avec l'ARN à éditer au voisinage du site d'editing, grâce à de petites séquences exactement complémentaires connues sous le nom de séquences d'ancrage. L'ancrage définirait ainsi le choix du site d'editing. Quand au mécanisme de l'editing lui-même, on suppose qu'une fois l'ancrage réalisé, l'insertion et/ou la délétion de nucléotides s'effectuerait par copie de la séquence guide dans l'ARN à éditer, au sein des hybrides ARNg:ARNm. L'editing s'arrêterait lorsque la zone d'appariement parfait entre l'ARNg et l'ARN édité est maximale.**

Le mécanisme exacte des processus d'insertion et de délétion est encore inconnu. A l'heure actuelle deux modèles différents sont en vogue. Dans l'un d'entre eux les étapes successives de coupure, d'addition ou de délétion de U puis de ligation de l'ARN sont réalisés par des enzymes. La source d'uridine proviendrait alors d'uridine triphosphate (UTP) libre dans la cellule. Dans le second modèle plus récent, le processus d'insertion/délétion se produit via une réaction de transestérification dirigée par un ARN. Les U proviendraient alors de l'extrémité poly-U que la plupart des ARNg semblent posséder. **Selon cette vision, un parallèle apparaît entre l'editing et l'épissage de l'ARN. Ce dernier est également réalisé par une réac-**

tion de transestérification dirigée par un ARN".

...(Dans un autre cas)"l'editing se ferait alors par encrages successifs: l'editing effectué par un premier ARNg créerait la séquence sur laquelle l'ARNg suivant pourrait s'attacher afin d'effectuer son editing et ainsi de suite. Le scénario prévoit que non seulement l'editing est le résultat de l'action successive des ARNg, mais aussi que ce processus s'effectue dans un sens déterminé par la progression de l'editing lui-même. Un tel schéma exige une coordination parfaite entre synthèse d'ARN intermédiaires, pré-messagers, et expression des ARNg, car si un ARNg manque, le système se bloque, l'ARNg suivant n'ayant pas la séquence nécessaire pour éditer. Cela dit, bien que très complexe, cette logistique rappelle celle de la traduction de l'ARNm en protéines, dont la progression dépend ainsi de l'action séquentielle de petits ARN (les ARN dits de transfert dans ce cas). Il reste évidemment à prouver ce modèle."

..."**Chez les mammifères, l'editing des ARN sert également à produire des protéines différentes comme dans la cas des virus décrits plus haut.** En 1987, L.M. Powel et S.H. Chen ont découvert que les deux apolipoprotéines (B100 et B48) impliquées dans le transport des lipides chez le lapin et l'homme étaient codées par le même gène et produites par editing du transcrit primaire. La plus grosse protéine est synthétisée dans le foie à partir de l'ARNm non édité, alors que la plus petite protéine est produite dans les cellules de l'intestin à partir d'un ARN dans lequel le nucléotide C à la position 6666 a été transformé en U: de ce fait, le codon CAA (glutamine) se trouve modifié en codon-stop UAA. La traduction du messenger s'arrête en ce point. Bien que la protéine B48 soit bien évidemment semblable à la première moitié de la protéine B100, leur fonction et leur localisation dans l'organisme diffèrent. Cet exemple est une parfaite illustration de l'importance des processus d'editing dans le fonctionnement cellulaire. Comment ce C est-il choisi et quel est le mécanisme de la transformation ? D'après les travaux du groupe de J Scott, à Harrow en Grande Bretagne, une mutation dans une petite séquence de 11 nucléotides en aval de C6666 diminue beaucoup ou abolit in vitro la conversion C/U. Des mutations dans d'autres régions ont beaucoup moins d'effet. La réaction n'implique pas la coupure du brin d'ARN: le C serait remplacé in situ par un U grâce à une enzyme."

..."Ces transformations ont été identifiées à la fois chez les monocotylédones comme le blé ou le maïs et chez les dicotylédones comme les pétunias. Elles affectent dans certains cas plus de 10% des codons d'un ARNm, ce qui entraîne non seulement la substitution des acides aminés codés mais aussi la création de nouveaux codons d'initiation ou d'arrêt de la traduction. De plus, les séquences ainsi créées codent pour des protéines plus proches de leurs homologues d'autres organismes que les séquences des gènes de départ. Nous n'avons pas réussi à comprendre pourquoi telle séquence plutôt que telle autre avait été choisie pour être éditée. De plus, nous n'avons trouvé aucune preuve de l'existence d'ARNg. Il nous semble plus logique de supposer que les transformations de C en U dans le système mitochondrial végétal s'effectue suivant un schéma similaire à celui de l'apolipoprotéine B des mammifères, mais rien n'est encore prouvé. Nous attachons une importance particulière au cas des mitochondries végétales car l'existence d'un editing des ARN enterre une vieille controverse sur le code génétique utilisé dans ces organites, que l'on avait supposé différent du code universel."

..."s'il est une chose peu imaginable pour un biologiste moléculaire, c'est que le même code définisse deux acides aminés différents. L'editing d'ARN a résolu l'énigme: là où il y a un tryptophane, le CGG du gène est remplacé par UGG dans l'ARN édité. Le code redevient ainsi universel. Cela ne nous dit d'ailleurs pas quel est le rôle de cette forme d'editing.

Ainsi les séquences de certains gènes dans l'ADN des chromosomes non seulement comportent des signaux d'excision-épissage, mais aussi des signaux qui entraînent des modifications ultérieures des séquences codant la protéine. Ces signaux d'editing peuvent être des séquences sur lesquelles un ARNg va appairer des bases, des séquences qui permettent

un mouvement en arrière de l'ARN naissant ou bien encore des séquences qui ont pour rôle d'aider une enzyme à choisir un C donné pour le transformer en U (ou vice versa) ou encore changer un A en G. Quoi qu'il en soit le message génétique est modifié avant sa traduction. Cependant, si l'on formule le dogme central de la biologie moléculaire comme "l'ADN engendre l'ARN qui engendre la protéine", ce dogme tient toujours puisque les signaux d'editing sont codés dans le génome. Seulement, l'expression génétique n'est plus aussi simple qu'auparavant et les signaux d'editing se superposent au code génétique, au moins dans certains cas et dans certains organismes. Il reste que la correspondance entre ADN des chromosomes et protéines devient plus difficile à établir, et il faudrait sans doute y regarder à deux fois avant d'affirmer que tel gène est réellement inactif parce qu'il contient un codon-stop qui interromprait sa traduction.

SYSTÈME DE RÉGULATION RÉCENT OU TRACE D'UN MÉCANISME ANCESTRAL ?

Le pourquoi de l'existence d'un editing des ARNm est aussi passionnant. La réponse à cette question n'est cependant pas simple. Nous sommes simplement en mesure d'observer les conséquences des différents processus d'editing et de spéculer sur la raison d'être du phénomène. Ainsi, un des avantages de l'insertion de G chez le paramyxovirus pourrait être qu'un gène unique code plusieurs protéines. Comme le génome des virus semble devoir être le plus petit possible, ces organismes utilisent fréquemment des processus de gain de place parmi lesquels l'editing d'ARN est une possibilité supplémentaire. Mais le manque de place n'est pas un problème pour **les mammifères chez lesquels 95% de l'ADN chromosomique ne code apparemment pour rien**. La transformation de C en U dans l'ARN de l'apolipoprotéine B n'a pas de raison d'être évidente, même si, ici également, un seul gène fabrique deux protéines agissant dans des organes différents. Du fait que ces deux protéines sont identiques pour leur partie terminale, on peut supposer que cette identité est essentielle et que l'editing constitue la plus fiable et la meilleure façon d'y parvenir. On aboutirait à une théorie du même résultat par duplication d'une partie du gène combinée à une expression différentielle des deux gènes dans les deux tissus; mais il serait plus difficile de conserver ces deux séquences identiques car elles seraient indépendamment sujettes aux mutations.

On peut aussi se demander pourquoi les cellules de mammifères ont plutôt recours à d'autres stratégies, comme l'épissage alternatif qui permet de jouer avec le nombre d'exons utilisés dans les ARNm dérivés d'un même transcrit primaire pour obtenir le même résultat: plusieurs protéines différentes à partir d'un même gène. L'editing d'ARN dans les végétaux et les trypanosomes pourrait aussi, tout du moins en théorie, permettre de fabriquer plusieurs protéines à partir d'un seul gène. Mais dans ces organismes, l'editing d'ARN permet surtout probablement de mieux régler l'expression génétique. Comme nous l'avons déjà expliqué, sans editing, aucune séquence codant une protéine n'a de sens et souvent les signaux indiquant le début et la fin de la traduction manquent. Cela dit, il n'est pas facile de comprendre pourquoi un niveau supplémentaire de régulation a été sélectionné au cours de l'évolution chez les organismes.

Car la raison d'être des différents processus d'editing est bien entendu étroitement liée à leur contexte d'évolution respectifs. Une question importante est en effet de savoir si l'editing est "âgé" ou "jeune" en termes d'évolution. La même question peut être posée pour les autres mécanismes d'expression génétique. **La conclusion est qu'au vu de leur similitude dans des organismes aussi totalement différents qu'un colibacille et un éléphant, la plupart des mécanismes d'expression génétique doivent être des processus anciens, sélectionnés avant la séparation des grandes familles biologiques, il y a quelques milliards d'années.** Les choses ne sont pas du tout aussi nettes pour les processus d'editing d'ARN. D'abord plusieurs types de mécanismes totalement différents semblent co-exister, qui doivent relever de "moteurs" évolutifs différents.

**les mammifères chez lesquels
95% de l'ADN chromosomique
ne code apparemment pour rien.**

**la plupart des mécanismes
d'expression génétique doivent
être des processus anciens,
sélectionnés avant la séparation
des grandes familles biologiques
(Auto-organisation
Orientée = dépendance aux
conditions d'origine)**

Ensuite, ils ne sont pas ubiquitaires, même pour les protéines mitochondriales, puisqu'il ne semble pas y avoir d'editing des gènes mitochondriaux chez les mammifères. Il est ainsi fort probable que ces différents types se soient développés indépendamment les uns des autres et aient connu une évolution différente. On pense en effet, que si certains sont anciens, d'autres semblent être des acquisitions récentes de la machinerie de l'expression génétique. **Si l'editing du trypanosome et l'épissage ont un principe de fonctionnement commun, ils pourraient avoir une origine évolutive commune, et donc être anciens.** Le chapitre de l'évolution de ces mécanismes doit attendre beaucoup de données supplémentaires avant de pouvoir être écrit... Dans l'état actuel de nos connaissances, un grand nombre d'organismes, nombre qui va néanmoins en décroissant, n'éditent pas du tout leur ARN, cela signifie que les problèmes ordinaires d'expression génétique peuvent être abordés sans recours à l'editing d'ARN. Un des grands défis des recherches à venir sera de comprendre pourquoi ce n'est pas toujours le cas. (La Recherche N° 245 page 848 à 854)

Si l'editing du trypanosome et l'épissage ont un principe de fonctionnement commun, ils pourraient avoir une origine évolutive commune, et donc être anciens.

Une première fonction: l'auto-reproduction

Comme nous l'avons précisé dans l'introduction du chapitre B, même si il y a toujours eu co-évolution (polynucléotides, coenzymes, sels, etc...) nous allons différencier les fonctions.

Toute théorie, et bien plus encore toute logique qui peut en être déduite, a un caractère spéculatif, même si elle essaie de partir de la connaissance des objets et des faits.

Comme A. Danchin, dans son livre Une Aurore de Pierres (A4), nous allons supposer qu'une matrice d'ATN ou d'ARN (avec les coenzymes, etc...) a pris la relève de la matière minérale, et ceci à l'intérieur d'une membrane.

Les dernières découvertes nous enseignent que les molécules d'ARN sont douées d'une capacité d'auto reproduction, donc peuvent se multiplier par elles même (**Auto-organisation Auto-orientée**). Aujourd'hui, les polynucléotides sont multiples: les ADN, les ARN pré-messager, les ARN messenger, les ARN de transfert, les ARN guides, etc..., et les très nombreuses association ARN/protéines. Or, A. Danchin (Cech, etc.) souligne justement que "on ne peut penser que les réactions chimiques qui ont présidées à la naissance de la vie furent d'emblée aussi compliquées qu'elles le sont de nos jours.", et il poursuit:"il nous faut imaginer que les ARN de transferts **ont possédé une autre fonction** générale que la traduction, antérieure et sans doute à l'origine de la synthèse des protéines". Nous pensons qu'il faut aller jusqu'au bout de ce raisonnement.. Si à l'origine, il y a les molécules d'ARN (ou d'ATN le principe est le même), on peut penser que, dans un premier temps, il n'existe qu'un seul type d'ARN avec un petit nombre de motifs de base pour chaque polynucléotides (du à leur origine minérale). On aurait donc des chaînes polynucléotiques à très fortes redondances, du moins au début, ce qui n'empêche pas, compte tenu de la diversité et/ou hétérogénéité des argiles mères, que les motifs redondants puissent être variés: poly U, poly C poly G, poly A, avec toute sorte de poly-alternatives possibles.

La différenciation des ARN va être le produit du **mécanisme de l'évolution qui va modifier les fonctions. L'Auto-organisation Orientée va reprendre son rôle dominant, mais comme métabolisme biologique indépendant du minéral. C'est ce qui va permettre la complexification du métabolisme minéral.**

Quel est le scénario proposé ?

Dans un premier temps, la fonction essentielle des ARN va être l'auto-reproduction (Auto-organisation Auto-orientée). Ces molécules vont donc se multiplier en grande quantité par un métabolisme «auto-suffisant» (indépendant de l'Auto-organisation Orientée minérale). "Emprisonnées" dans les membranes primitives, il va y avoir, grâce à la Multitude de Degrés de Liberté, un grand mélange qui va se produire. Si l'on peut penser que les motifs de base des polynucléotides sont redondant, la Multitude de Variété des argiles est capable de produire une Multitude de Variétés de redondances (Produits).

Comment peuvent inter-agir les chaînes de polynucléotides qui vont se retrouver "mélangées" au sein d'une même enveloppe ? Elle peuvent soit se mettre bout à bout pour former une grosse molécule, soit inter-agir entre elles (en parallèle) dans des réactions auto-auto-catalytiques (Auto-organisation Auto orientée). Les grosses molécules ainsi formées jouaient ,alors, la fonction essentielle de matrice. La présence et l'association de coenzymes puis de protéines qu'elles seront capable de produire va devenir le facteur de plus en plus déterminant. C'est ce mécanisme —que nous étudierons dans les prochains chapitres— qui va aboutir aux changements de fonctions et à "l'oubli" de des fonctions primitives principales: l'auto-reproduction et matrice. Grâce à l'Auto-organisation Auto-orientée les nouvelles fonctions ne seront plus dépendantes du métabolisme minéral. Le métabolisme minéral qui a permis ce processus passera au oubliettes.

2) le métabolisme: l'Auto-organisation Orientée

... "Les différents enzymes qui agissent sur chaque étape peuvent être comparés à des ouvriers travaillant à la fabrication d'une importante molécule sur plusieurs chaînes de montage intégrées dans un réseau. Chaque ouvrier effectue un travail précis: il assemble des pièces qui lui arrivent d'un côté; il les passe de l'autre, à l'ouvrier suivant. On conçoit que non seulement la vitesse de travail de chaque ouvrier soit importante, mais aussi la synchronisation de cette vitesse avec celle de tous les autres ouvriers de la même chaîne. Et ce n'est pas tout: la vitesse d'assemblage dans une chaîne de montage devra aussi être synchronisée avec celle de toutes les autres chaînes parallèles. En effet, si un seul ouvrier ne travaille pas assez vite, le produit semi-fini ne pourra être traité au même rythme par toutes les chaînes suivantes. Il s'accumule. Il y aura engorgement.

Cette image peut être transportée dans la cellule, au niveau moléculaire. Là, des milliers de réactions s'effectuent simultanément sans retard ni engorgement.

Le rôle des enzymes est d'accélérer, de synchroniser et de réguler cet ensemble de réactions.

Le centre fonctionnel de l'enzyme, où se déroulent les réactions chimiques, est le site actif. En cet endroit particulier du "corps" de l'enzyme, les réactifs sont maintenus en place, à la bonne portée des "outils chimiques" du site actif. Cela permet à la transformation de se faire à une très grande vitesse, par simple réaction de voisinage entre deux groupements fonctionnels (plutôt que par choc désordonné) et sans une trop grande dépense en énergie d'activation.

Mais les enzymes sont très spécialisés. Chacun d'eux ne "sait" catalyser généralement qu'un seul type de réactions. Comment fait-il pour "reconnaître" et "trier" les molécules qu'il transforme habituellement ?

On a récemment démontré que les enzymes et leur substrat (les molécules sur lesquelles ils agissent) "communiquent" en échangeant de l'information par une sorte de "langage moléculaire". Le support de ce protolangage n'est autre que la forme géométrique des molécules. Les enzymes "reconnaissent" les informations qui les concernent, car ils en portent la "mémoire" inscrite dans le site actif. Une serrure constitue aussi une sorte de "mémoire" qui conserve "en creux" la forme de la clef. Un enzyme particulier possède également "en creux", dans la structure chimique de son site actif, la forme des molécules sur lesquelles il agit: l'un et l'autre sont complémentaires.

Le substrat retrouve sa place complémentaire sur le site actif. La réaction de coupure se réalise dans un temps très court. Les nouvelles molécules quittent le site actif. L'enzyme libéré est prêt à réagir de nouveau (la même réaction peut se faire à l'envers).

Une fois la molécule détachée du site actif, l'enzyme inchangé, est — comme tout catalyseur — prêt à agir de nouveau. Si le site actif est perturbé, l'enzyme devient inactif; il ne "reconnaît" plus son substrat; en revanche dans un tube à essai, un enzyme intact peut catalyser indéfiniment une réaction chimique identique à celle qui se déroulerait dans l'organisme.

La plupart des enzymes possèdent plusieurs sites pouvant se lier à des molécules de formes différentes. Ces molécules jouent le rôle d'activateurs ou d'inhibiteurs du site actif proprement dit. Sous l'effet de ces molécules — ou l'effet "d'excitations" diverses (électrons ou photons) amplifiées par conjugaison électronique — les enzymes modifient mécaniquement leur configuration spatiale: ils se contractent ou changent de forme et de propriétés chimiques. **L'enzyme reçoit et intègre ainsi plusieurs informations en même temps. Il n'agit pas comme un interrupteur qui n'aurait que deux positions: ouvert ou fermé. Il répond de manière plus souple aux modifications de son environnement en modulant son activité.**

Ainsi les enzymes sont capables de mémoriser des informations,

Auto-organisation Orientée

de modifier mécaniquement leur structure en fonction d'informations reçues, ou de restituer des informations modifiées. On pourrait les comparer à des micro-ordinateurs biologiques. Comment ces automates moléculaires, produit d'une lente évolution, ont-ils été sélectionnés ?

En se fondant sur les propriétés d'auto-organisation des protéinoïdes et les mécanismes de sélection des microgouttes, on peut esquisser un dessin d'ensemble. Une fois de plus le facteur déterminant va être la vitesse des réactions.

Les composés chimiques qui participent, dans un même système, à des réactions parallèles, sont transformés dans la direction où ils peuvent réagir le plus rapidement. Il y a en effet, une immense différence entre deux réactions de même nature, mais qui se feraient l'une en quelques millièmes de secondes et l'autre en dix ans ! Dans un organisme vivant ou pré-vivant, la réaction qui se fait lentement ne joue aucun rôle dans le métabolisme. Cette règle fondamentale se répercute sur tout le système. Dans un milieu fermé ou des myriades d'organismes primitifs coexistent et sont en compétition passive, le flux de matière et d'énergie le plus important traversera le système le plus dynamique, c'est à dire celui qui possédera la plus grande vitesse globale de transformation chimique interne.

Si leur dynamique est compatible avec leur auto-conservation, ces systèmes vont ainsi drainer à leur profit une grande quantité de matière organique nutritive "affamant" littéralement les "concurrents" à métabolisme plus lent. Ces concurrents ne tarderont pas à être éliminés. Seuls les organismes les plus dynamiques, possédant par conséquent les catalyseurs les plus efficaces, ont été conservés par la sélection naturelle." (A1 page 156 à 159)

..."Théoriquement, on aurait donc pu s'attendre à ce que les édifices chimiques qui se constituaient sur la Terre ou dans la soupe primitive se détruisent à la vitesse même à laquelle ils se construisaient. Or; il n'en fut rien, la complexité de la matière prébiologique augmentait sans cesse.

Une fois de plus le facteur essentiel va être la **stabilité dynamique** de ces édifices. Cette stabilité est due à l'apparition de propriétés nouvelles qui ne se manifestent qu'à partir d'un certain niveau de complexité. Voyons quelques-unes de ces propriétés:

- Les liaisons intermoléculaires, ou intramoléculaires, qui forcent par exemple, les protéines à s'enrouler en un "ressort" (ou à se plier en globe) stabilisent l'édifice tout entier.

- Si une molécule complexe est capable de catalyser la synthèse d'une autre molécule de forme identique, le nombre des individus de cette espèce moléculaire particulière peut augmenter à un taux plus rapide que celui qui correspond à leur vitesse de destruction.

- Si des réactions d'autocatalyse ou de catalyse en chaîne se trouvent incluses dans des cycles et des réseaux étroitement interdépendants, l'ensemble est doté d'une plus grande stabilité dynamique que les éléments indépendants.

La conjugaison stabilise les molécules et les rend à la fois plus solides et plus réactives. Comme nous l'avons vu pour les premiers composés organiques, la stabilité dynamique confère aux molécules une plus grande probabilité d'existence, et donc un plus grand avantage évolutif. Les macromolécules ou les molécules conjuguées, s'imposent, par auto sélection, à toute la suite de l'évolution.(A1 page 139)

De l'Auto-organisation Orientée à l'auto régulation

L'Auto-organisation Orientée est une réaction chimique spécifique (auto-organisation) qui ne se produit qu'en présence d'un tiers facteur sans que celui-ci ne soit modifié par la réaction même: c'est la catalyse. Le catalyseur est bien souvent un enzyme, qui est une protéine particulière.

Presque toujours, ces enzymes sont activés ou inhibés par d'autres molécules. Ils vont donc avoir deux fonctions possibles: catalyseur et/ou régulateur qui est un catalyseur dynamique

L'Auto-organisation Orientée dynamique est le mécanisme de l'auto régulation

Le processus du vivant

C) Les proto-cellules

1) La naissance de la mémoire

"Voici comment on peut illustrer l'évolution progressive des systèmes de codage et les mécanismes de traduction de l'information biologique.

1. Dans la soupe primitive ou sur les argiles, Les bases nucléiques fabriquées par synthèses abiotique s'assemblent en courtes chaînes d'ARN primitif (ayant probablement une structure chimique plus simple). A leur tour, ces premières chaînes catalysent la formation de nouvelles chaînes plus longues, au cours des cycles successifs d'assèchement et de réhydratation des zones où elles se trouvent.

2. Par suite de recombinaison entre chaînes et mutations chimiques, **de nouvelles fonctions naissent**. Les lois de la sélection naturelle peuvent jouer, par exemple, au sein des microgouttes. Walter Gilbert a fait remarquer que ces combinaisons par éléments transposables entre plusieurs chaînes d'ARN (on les appelle des transposons) peuvent être considérées comme l'équivalent moléculaire de la reproduction sexuée chez les animaux.

3. La relation entre la forme des acides aminés et celles des "creux" et des "bosses" formés dans les chaînes d'ARN conduit peu à peu à la sélection des premières "lettres" et "mots" du code génétique: une relation spécifique entre une succession des bases des acides nucléiques et une succession d'acides aminés.

4. l'activité enzymatique des chaînes d'ARN se perfectionne par association avec des éléments extérieurs (ions métalliques, transporteurs d'électrons). Les chaînes d'ARN peuvent alors catalyser la formation de chaînes de protéines, d'abord directement, puis par l'intermédiaire de courtes chaînes d'ARN auxquelles se sont liés des acides aminés (précurseurs des ARN de transfert) et qui "alignent" les acides aminés dans un ordre facilitant les réactions de polymérisation.

5. Les protéines fabriquées plus rapidement qu'au cours des synthèses "au hasard" sur les matrices catalytiques minérales, se révèlent progressivement meilleurs catalyseurs biologique que les chaînes d'ARN. La variété des réactions qu'elles accélèrent s'accroît. Ainsi les premiers enzymes s'auto sélectionnent et relèguent les ARN au second plan.

6. Enfin les chaînes d'ARN, aidées par les enzymes, donnent naissance à la double hélice d'ADN présentant des avantages décisifs pour le codage de l'information biologique: plus grande stabilité, mécanique de correction des erreurs permettant cependant mutations et recombinaisons. L'ARN est relégué à la fonction d'intermédiaire qu'il occupe aujourd'hui dans les systèmes vivants.

Un cercle vicieux est brisé et un dogme tombe: les protéines (enzymes) ne sont pas nécessairement à l'origine de la vie puisque l'ARN peut être à la fois support de l'information génétique et catalyseur, non seulement de son propre assemblage, mais aussi de l'assemblage des chaînes de protéines. **Le code génétique est sans doute né des interrelations successives entre ARN, ARN de transfert, protéines, puis ADN, au sein de systèmes autonomes en évolution (microgouttes) soumis à la sélection naturelle.**

G. Schramm a proposé un modèle ingénieux, capable de servir de base de recherche et d'aider à mieux comprendre les mécanismes de sélection naturelle au niveau moléculaire. Certaines molécules comme l'ARN peuvent catalyser leur propre formation. Mais il se peut également qu'une telle catalyse soit réciproque et s'exerce sur deux et même trois systèmes distincts.

En effet, une chaîne d'ARNt en croissance dans le milieu primitif accélère la formation d'une autre chaîne complémentaire; celle-ci, en retour, accélère des millions de fois la formation de la chaîne initiale. Il y a catalyse réciproque. Si maintenant une matrice moléculaire est capable d'infor-

La logique du vivant

**Auto-organisation
Orientée
(fabrication des briques)**

**Auto-organisation
Auto-orientée
(indépendance)**

**métabolisme
biologique**

**Multitude de Degrés
de Liberté**

**Multitude de Variétés
de Produits**

**apparition du langage
génétique**

apparition de la mémoire

**modification
des fonctions**

**création de
l'information subjective**

**Auto-organisation
Auto-orientée**

mer un catalyseur organique (une protéine, par exemple) qui, à son tour, contrôle la synthèse de la matrice de départ..., il y a alors catalyse réciproque, portant sur trois édifices moléculaires différents, chacun étant indispensable à l'exercice des deux autres. L'auto-organisation dans de tels réseaux conduit à l'auto-sélection.

Ces trois systèmes étant irréversiblement liés l'un à l'autre, seuls les systèmes de codage et de catalyse les plus efficaces seront conservés par la sélection naturelle.

Un tel processus a pu se produire au sein des microgouttes. Quand ces systèmes primitifs grossissaient puis éclataient, ceux qui héritaient d'une information codée —aussi rudimentaire fut elle— avaient de plus grandes chances de survivre. **L'origine de ces processus ne peut donc être comprise que dans le cadre d'une approche intégrée, considérant des "systèmes prébiotiques". De tels systèmes résultent de l'inter dépendance de plusieurs facteurs: transfert de l'énergie, transfert d'information, matrices catalytiques minérales puis organiques, auto-réplication moléculaire, présence d'argiles et ions métalliques, rôle des microgouttes contenant les molécules et jouant un rôle protecteur qui favorise la sélection naturelle.**

On peut penser avec N.H. Horowitz, **que les premiers organismes capables de se reproduire trouvaient dans le milieu environnant les pièces "nécessaires à leur construction"**. Il leur suffisait de les assembler. Quand une de ces pièces disparaissait, les seuls organismes capables de se reproduire furent ceux qui, par des synthèses internes de plus en plus élaborées, fabriquèrent les pièces nécessaires à leur reproduction. Les autres étaient éliminés. Ces organismes primitifs parvinrent finalement à se refaire en entier dans un environnement qui ne comportait plus aucuns des éléments de construction originaux."(A1 page 166 à 169)

"La synthèse des protéines

L'innovation apportée par la remarquable versatilité des formes issues des chaînes polypeptidiques leur a certainement donné un avantage sélectif tel que le couplage de leur synthèse avec la réplication des ARN primitifs devait rapidement prendre l'importance cruciale qu'il a dans la vie actuelle. **La mécanique de la traduction, qui marque le passage codé des acides nucléiques aux protéines, était nécessairement au coeur des premiers être vivants.**

Des ARN de transfert, chargés par quelques-uns de ces acides aminés et modifiés par homéotopie, devait participer à la synthèse des premières protéines. D'autres ARN, sans doute, ont eut la fonction qu'ont les échafaudages en architecture, permettant d'accélérer cette construction par la disposition correcte des groupes qui doivent interagir. Il y avait là l'ancêtre de la machinerie de traduction: des ARN de transfert et des ARN ribosomiques. D'autres ARN encore, éventuellement présents à l'intérieur des ARN ribosomiques (comme certains introns actuels), en permettaient la réplication.

Les premières cellules contenaient alors de quoi accomplir les principales étapes du métabolisme, de quoi construire les protéines nécessaires à la production d'énergie par oxydoréduction, des ARN capables de se répliquer et sans doute impliqués dans la production et l'utilisation de l'énergie des liaisons phosphate. **La reproduction des cellules se faisait alors par scission spontanée lorsqu'elles avaient atteint une taille critique. Les transferts horizontaux, par fusion de cellules entre elles, devaient être fréquents et répandre les innovations, tout en rendant homogène le contenu métabolique général.** La reproduction de leur matériel génétique, confondu avec les ribosomes ainsi qu'une collection d'ARN (qui étaient formés de répétitions plus ou moins exactes de motifs de base, comme on en trouve encore des traces aujourd'hui) au moyen de ribosomes, selon le scénario décrit dans le chapitre précédent. Les principales réactions métaboliques avaient lieu sur ces ribosomes au moyen des ARN de transfert et les réactions de capture de l'énergie se faisaient au moyen de protéines de la famille des rédoxines, liées aux membranes."

des ARN qui se spécifient en plusieurs fonctions

Multitude de Degrés de Liberté

+

Multitude de Variétés de Produits

+

Multitude de Variétés de Conditions

+

membrane

Auto-organisation



nouveau

... "La réplique des ARN, quand à elle, suppose l'existence, on l'a vu, de séquences-guides, complémentaires selon les règles de correspondance A/U, C/G. Il est donc bien possible que la réplication des ARN de transfert passe par des structures complémentaires, selon cette même règle. Cela impose un certain nombre de contraintes à la structure des ARN de transfert ainsi qu'à celle des ARN messagers qu'ils auront à décoder. **Ce qu'on voit aujourd'hui est le résultat de plus de trois milliards d'années d'évolution et bien des caractères primitifs se sont sans doute effacés.**"

... "**Mais l'étape cruciale, celle qui va réellement créer qualitativement la vie, est l'établissement de la correspondance entre un ARN messenger et la protéine qu'il spécifie.** La plupart des auteurs ont cherché à établir d'abord une correspondance entre l'anticodon (la boucle de l'ARN de transfert qui s'associe au codon de l'ARN messenger selon la loi de complémentarité) de l'ARN de transfert et l'acide aminé qu'il porte. Soit pour y trouver une loi physique, qui l'aurait rendue inévitable, soit pour l'imaginer accidentelle. **J'ai montré en quoi les ARN de transfert pouvaient jouer un rôle essentiel dans la constitution du métabolisme cellulaire, en prenant la place du support solide initial.** Cette fonction de maintien ("pince-étau") n'avait au départ pas de relation directe, à priori, avec les molécules élémentaires qui lui correspondaient et il paraît naturel de penser qu'après un certain temps d'évolution une correspondance, un étiquetage en quelque sorte, s'est établi entre le support et la molécule supportée. Avant le code génétique, donc, il pouvait exister un ensemble d'étiquettes marquant les différents composants du métabolisme supporté par les ARN de transfert. On s'accorde aujourd'hui pour penser qu'il n'y avait pas de nécessité à priori pour associer tel codon à tel acide aminé, mais que dès qu'un premier choix, arbitraire, a été fait, les autres ont suivi en respectant un certain nombre de contraintes préservant la stabilité fonctionnelle de l'ensemble. C'est ce qui explique la cohérence apparente du tableau du code génétique tel que nous le connaissons: des écarts dans l'attribution d'un codon à un acide aminé donné se traduisent souvent par la conservation d'une fonction. Très schématiquement, les codons possédant un U central spécifient des acides aminés hydrophobes alors que les codons possédant un A central spécifient des acides aminés hydrophiles. Il me semble que l'on pourrait tout aussi bien, nous le verrons un peu plus loin, imaginer une structure de codage primitif en postulant trois classes d'ARN: ceux qui lient l'homosérine-phosphate (avec ses dérivés) et ceux qui lient les acides aminés dicarboxyliques (et leurs dérivés).

Mais ce qui est bien plus important est de comprendre la correspondance entre le messenger et la protéine. En effet, le plus souvent la protéine est douée —aujourd'hui— d'une fonction catalytique. Cela suppose un grand nombre de contraintes dans sa structure et dans l'enchaînement de ses acides aminés. Doit-on imaginer pour cela un retour de la structure de la protéine vers celle de l'acide nucléique, tout au contraire du paradigme qui est au cœur de la biologie moléculaire ?

Je ne le crois pas. Et la raison principale en est la suivante: **ce qui est retenu du messenger est la suite de codons, c'est à dire une caractéristique unidimensionnelle. Au contraire, ce qui est important dans la protéine, spécifiée par la séquence des acides aminés, est une architecture donc une caractéristique tridimensionnelle.** Or, de même qu'il est facile de passer d'un espace à une dimension vers un espace à trois dimensions (le premier est simplement une ligne plongée dans le second), il est difficile, sinon impossible, de faire le chemin inverse (l'image d'une sphère sur une droite se réduit à un segment: tout ce qui caractérise la sphère, ou presque, y a disparu); de même il paraît difficilement concevable, sauf par un acte magique, que la protéine puisse spécifier son message. **Nous sommes donc contraints de ce fait à imaginer que certains ancêtres des protéines ont été, d'emblée, implicitement présents dans la séquence d'ARN primitifs.**

Il s'agit là d'une contrainte très forte, si forte qu'on peut penser, malgré l'hypothèse d'une relève toujours possible, qu'elle est encore visible de nos jours dans la structure de certaines protéines (sinon de la plupart d'entre-

**modification des fonctions
des ARN**

**naissance
de la mémoire**

elles). Or, on en sait un peu plus. Si l'on considère le ribosome primitif comme le lien central du métabolisme cytoplasmique et qu'on remarque que ce métabolisme permettait la production de chaînes peptidiques, par le contact et le transfert des acides aminés portés par des ARN de transfert voisinant sur la surface, on remarque que les ARN qui ont joué le premier rôle de messagers sont les ARN ribosomiques eux même. Et certains auteurs ont justement remarqué que la suite de leurs nucléotides, si on lui applique la règle du code génétique, donnerait naissance à des protéines donc la position est voisine de celle des protéines qu'on trouve sur le ribosome. Une autre matrice possible était la séquence complémentaire de la séquence des ARN de transfert eux même. Crick et ses collègues ont d'ailleurs imaginé sur ce thème un scénario astucieux où les ARN de transfert primitifs auraient engendré leurs messagers, ainsi que des éléments de la structure du code, obtenus par des messagers à la structure répétitive RRY RRY RRY RRY

Le code génétique

Les premières cellules étaient donc formées d'une membrane permettant des échanges avec le milieu extérieur, d'une source d'énergie continuellement renouvelable et d'un mécanisme de synthèse de quelques protéines essentielles (en particulier aux transformations énergétiques). Cette synthèse utilisait l'association entre des ARN de transfert et un support qui pouvait jouer le rôle de matrice, selon une règle de correspondance entre les nucléotides et les acides aminés. **Il s'était d'abord établi une règle d'étiquetage entre les ARN de transfert et les acides aminés qu'il portaient (et dont ils assuraient les interconversions). Par ailleurs, une deuxième règle, formellement indépendante, devait permettre la synthèse de peptides, grâce à une correspondance spécifique entre une partie de chaque ARN de transfert "étiquette", son anticodon et un élément d'une matrice ARN fonctionnellement associée au peptide formé.** Une hypothèse intéressante à ce stade serait d'imaginer que ce qui a établi la règle du code génétique —la deuxième correspondance par conséquent— est précisément cette adéquation entre la matrice, support général de la synthèse peptidique, et les polypeptides qui pouvaient s'y associer. **On peut penser qu'initialement —j'y reviendrai— cette correspondance était quelque peu floue et qu'il s'agissait plus d'une spécification de classes d'acides aminés que d'acides aminés particuliers.** On peut y voir trois classes principales, celles qui régissent le métabolisme des transformations homéotopiques: les variants de sérine-phosphate, les acides aminés dicarboxyliques et les variants de l'homosérine-phosphate." (*une description des dérivés probables actuels de ces trois classes*)

..."Ce code permet la synthèse de classes de protéines où il existe une relative variabilité dans le type d'acides aminés présents à chaque position spécifiés par le message. Cela introduit un nouveau et très important mécanisme de sélection, qui va tendre à limiter les possibilités de flou du premier code génétique. En effet, une chaîne polypeptidique a tendance à prendre en solution un certain nombre de conformations spécifiques, qui dépendent de la suite des acides aminés qui la composent. L'alternance hydrophile-hydrophobe, par exemple, conduit à la formation de feuillets β , une alternance un peu plus compliquée conduit aux hélices α et certaines répartitions constituent des tours β . Or, c'est la combinaison de ces formes élémentaires **qui spécifie l'architecture finale et donc la fonction.** Il s'en suit que seules seront fonctionnelles les chaînes qui, tout en tolérant une certaine variation locale nature exacte de chaque acide aminé, auront respecté les règles permettant la formation de l'architecture appropriée. Le degré de flou permis sera donc fixé par la proportion des architectures correctes.

Il peut donc exister à ce stade, comme Wong l'a remarqué dès 1975, une correspondance entre la genèse des différentes étapes du métabolisme intermédiaire impliquées dans la synthèse des acides aminés et la

nature du code génétique (via la classe des ARN de transfert correspondants). En effet, les ARN de transfert initiaux sont les porteurs des acides aminés soumis aux transformations homéotopiques, dont ils sont aussi les étiquettes. **Mais comme par ailleurs la correspondance entre codons et anticodons s'est établie à partir d'une matrice initiale, de façon à respecter des règles d'affinités appropriées, les codons auxquels ils vont se trouver associés seront fonctionnellement reliés. D'une manière générale, cette hypothèse suppose qu'il y eu exploration, par essais et erreurs, de nombreux anti codons, jusqu'à ce que naissent les correspondances actuelles.**"(A4 page197 à 206)

..."La synthèse des premières protéines se fait sur des organites principalement composés d'ARN, des ribosomes, où se déroule aussi une partie du métabolisme, en particulier la charge des ARN de transfert par les amino-acides correspondants.

La mémoire héréditaire se confond alors avec un ensemble d'ARN, formant les ribosomes, les ARN de transfert et les matrices qui servent à la fois à leur reproduction et à spécifier la synthèse des premières protéines. A ce stade l'évolution se fait par altération de l'environnement et fusion/scission de cellules qu'on pourrait appeler des progénotes, en conservant la terminologie en usage. Comme on le verra au cours du dernier chapitre, on trouve, encore aujourd'hui, la trace de ces catalyses au sens large, en ce que de nombreux enzymes de la biosynthèse des acides aminés, qui effectuent désormais des actions indépendantes et très spécifiques, descendent sans doute d'un ancêtre commun (qui avait donc la capacité de réaliser l'ensemble de ces réactions, et non une seule, comme le requiert la situation présente).

Dans cette situation floue, **la multiplication cellulaire se produit par la scission plus ou moins spontanée des cellules dès qu'elles ont atteint un certain volume et la fusion de cellules isolées entretient une homogénéisation horizontale des expériences produites par le métabolisme local, permettant ainsi la propagation rapide de l'innovation.** Cette situation est évidemment éminemment instable et c'est dans l'invention de plus de rigueur et d'une meilleure protection contre les multiples variations de l'environnement que va se poursuivre et se consolider la vie.

L'invention de l'ADN

Il est nécessaire dans cette phase encore très floue, où chaque cellule est une entité mal définie, que s'installe le mécanisme de la transmission fidèle de la mémoire héréditaire pour qu'on puisse parler de cellules vivantes au sens où nous l'entendons actuellement parmi les différents mécanismes catalytiques qui ont évolué à partir du métabolisme primitif, la chimie des ARN a joué certainement un rôle privilégié, nous l'avons montré. **Des molécules d'ARN, comme on l'a vu, ont pris le relais des supports solides pour permettre le déroulement d'un métabolisme analogue à celui qui avait lieu à la surface,** par transformation homéotopiques des métabolites réactifs qu'ils portent en particulier à l'une de leurs extrémités (dans le cas des ARN de transfert). Ce sont plus spécialement des acides aminés chargés négativement, comme l'acide aspartique, l'acide glutamique, l'homosérine ou la sérine (phosphorilées), qui peuvent réagir les uns avec les autres et produire des polypeptides primitifs (eux-même désormais capables de lier les cofacteurs présents dans le milieu). **Mais ces ARN sont aussi, du moins pour certains d'entre eux, de nouveaux types d'ARN, doués d'activités catalytiques. Cela leur permet à la fois de créer de nouveaux types d'ARN, d'en explorer les possibilités chimiques et de reproduire ceux qui existent déjà.** Ainsi se constitue une première machinerie génétique, composée de quelques ARN susceptibles de se répliquer sans trop d'erreurs, de quelques polypeptides et d'un support solide, lieu de certains mécanismes catalytiques du métabolisme des petites molécules, **ceux qui n'ont pas pu être pris en compte par les ARN et qui n'ont pas encore été remplacés par l'action des protéines.**

**Multitude de Degrés
de Liberté
=
échange**

**auto-organisation
inter individu**



**propagation rapide
de l'innovation**

substitution des fonctions

modification des fonctions

C'est cet assemblage qui va constituer la machinerie de traduction, celle qui produit les premiers enzymes. A cette étape nous ne sommes en présence que d'une collection d'individus, plus ou moins apparentés, et **c'est en fait leur population qui évolue de façon significative**. Nous nous trouvons devant ce qu'on pourrait appeler un "protodème". Il est possible sinon probable, que la perpétuation de cette population demande la coopération de nombreuses cellules élémentaires, par **conjugaison des divers mécanismes catalytiques qu'elles peuvent receler**. Or **les ARN qui constituent alors la mémoire génétique, tout en assurant certaines fonctions catalytiques, sont —et c'est bien la cause de ces dernières— des entités très réactives. C'est un avantage puisque cela leur permet d'effectuer leur propre réplication, ainsi que la création sans cesse renouvelée de nouvelles formes, mais c'est aussi un inconvénient, puisque les variations concomitantes ont pour conséquences de conduire très souvent à des molécules qui ont perdu les fonctions qu'elles avaient auparavant**.

La réactivité des ARN provient de deux particularités: les fils qu'ils forment sont aptes à se replier sur eux-même, et la position 2'OH du ribose, laissée libre malgré la formation de la liaison phosphodiester (qui mobilisent les positions 3'OH et 5'OH), est particulièrement réactive. Il est donc probable que la découverte de structures analogues aux ARN, mais constituées de nucléotides dépourvus d'oxygène à la position 2'OH du ribose (des désoxyribonucléides), pouvait cristalliser une partie de la fonction des acides nucléiques et leur permettre de constituer une mémoire pure et séparée des espèces réactives et de leurs aptitudes fonctionnelles."

..."**On peut donc penser qu'assez tôt les cellules ont contenu deux classes d'acides nucléiques, une classe réactive, faite d'ARN et impliqué dans ce qui est fonctionnellement actif, et une classe sans doute parasite initialement, qui était formée de copies des ARN, selon la règle toujours valide A/U, G/C, sous la forme non réactive de molécules d'ADN**. Ces ADN originels ont donc été recopiés à partir d'ARN, comme c'est d'ailleurs encore le cas aujourd'hui au cours de la réplication de certains virus, lorsqu'ils s'intègrent au génome de leur hôte. L'avantage conféré par la séparation de la mémoire d'avec la fonction, et la possibilité correspondante qu'elle avait alors de fixer les innovations, s'est encore accru par la modification ultérieure d'une des bases, l'uracile de l'ARN devenant thymine dans l'ADN par addition d'un groupe méthyle, rendant ainsi l'ADN plus rigide et peu réactif. La première cellule était née." (A4 page 211 à 215)

l'évolution vers la vie

En préalable, je dois insister sur l'importance de la naissance de l'individu (qu'il soit mono ou pluri cellulaire).

Nous aurons deux niveaux d'Auto-organisation:

- le premier interne c'est le métabolisme biologique
- le second celui des relations au sein d'une même espèce

Dans le chapitre B, nous avons vu comment la Multitude de Variétés des Argiles et la multitude de molécules de la «soupe» avaient permis, au moyen de l'Auto-organisation Orientée, la création des "briques" du vivant (les "images" de base): des ARN capables de s'auto-réplicuer et la formation des membranes lipidiques. Ces deux phénomènes ont permis, grâce à l'auto catalyse (Auto-organisation Auto-orientée), de devenir le support du métabolisme biologique indépendant du minéral. Les molécules d'ARN vont assurer la relève de la matrice minérale. Les membranes vont permettre la relève de "l'isolation".

Que dit Antoine Danchin: "la reproduction des cellules se faisait alors par scission spontanée lorsqu'elles avaient atteint une taille critique. Les transferts horizontaux, par fusion de cellules entre elles, devaient être fréquents et répandre les innovations, tout en rendant homogène le contenu métabolique général"(Auto-organisation inter individus).

que peut on en déduire:

- il faut une quantité prodigieuse de "cellules" (microgouttes, coacervats, etc...).

- une Multitude de Variétés de "cellules" (Produits) due à la Multitude de Variétés des Argiles (information), même si les motifs de base des ARN sont redondants

- apparition d'une deuxième fonction de la membrane: le rôle de véhicule. C'est la possibilité qu'offre l'eau d'une Multitude de Degrés de Liberté.

On a donc une Multitude de Variétés d'ARN (pour l'instant à la fonction non différenciée, seulement l'auto-réplication) associée à d'autres molécules avec une Multitude de Degrés de Liberté (les "véhicules" dans l'eau des mers, rivières, océans). Mais, cette fois ci, grâce à la membrane, le produit de l'échange restera clôturé dans une membrane, donc "isolé", et en "compétition" pour la vie.

Or les ARN sont très réactifs, et, de plus, comme le souligne M.H. Horowitz: "les premiers organismes capables de se reproduire trouvaient dans le milieu environnant les pièces nécessaires à leur construction". On peut donc supposer, comme nous l'avons fait à la fin du chapitre B, que le mélange (Auto-organisation) des molécules variées des ARN va produire la différenciation des ARN.

Ceux-ci peuvent se mettre bout à bout pour former une Multitude de Variétés de matrices (Produits), supports du métabolisme interne. Ce sont elles qui deviendront les molécules d'ARN pré-messager puis d'ADN. En liaison avec des coenzymes primitifs, qui seront ensuite remplacés par des protéines produites, plusieurs classes d'ARN, travaillant en parallèle, vont se mettre en place progressivement, à "coup d'essais successifs": ceux qui vont faire fonction d'épissage (et d'editing), les ARN messagers, les ARN de transfert, les ribosomes, et d'autres donc les fonctions seront relevées par des enzymes.

C'est la première révolution de l'évolution du vivant : l'Auto-organisation Auto-orientée va permettre l'indépendance, la modification des fonctions des ARN va donner naissance à la mémoire et donc à la vie.

Au départ, nous avons donc quelques motifs de base (4 ou 3) redondants capables de se s'auto-répliquer (Auto-organisation Auto-orientée). Grâce à la Multitude de Degrés de Liberté il va se former une Multitude de Variétés de motifs (Produits) par association bout à bout qui joue, au départ, le rôle de matrice. Par le phénomène d'Auto-organisation Orientée (complexification) de nouvelles classes d'ARN vont apparaître et permettre la formation des premières protéines capables de se substituer aux enzymes primitifs qui avaient participé à la naissance de ce premier cycle fondamental que nous allons appeler la mémoire.

La mémoire (voir schéma p. 39) est un processus dynamique. C'est le résultat de la relation de l'individu (population) avec l'environnement. Ces relations sont permises par la production de fonctions. Ces fonctions sont le produit d'un processus d'Auto-organisation Orientée bouclé commandé par le génotype (matrice originelle) dont la variabilité est le produit de la reproduction (auto organisation inter individus).

Grâce à la relève minérale par les matrices d'ARN, il y a la relève catalytique des coenzymes primitifs par la production des protéines. La relève des mécanismes primitifs de la fourniture de l'énergie nécessaire au métabolisme va aussi être une des premières nécessités de la survie.

Quel est le mécanisme de la mémoire et quelles sont les différentes fonctions des ARN ?

L'échange inter-individus permet un double mécanisme. D'une part, un échange (grâce à la Multitude de Degrés de Liberté) de l'information, donc, d'un certain côté une "uniformisation" (tout le monde est au courant de tout) (n'oublions pas que nous raisonnons sur des centaines de millions d'années). D'autre part, la Multitude de Variétés de Conditions, la Multitude de Variétés de métabolismes et mutations et la multitudes d'échanges "sélectifs" avec l'extérieur, loin d'uniformiser, augmentent la variété dans la classe de métabolisme (Multitude de Variété de produits). En fait, on arrive à une uniformisation de la classe de métabolisme (dépendance aux conditions d'origine) et à une diversification des possibilités de cette classe (Auto-organisation).

Comme la vie se produit au sein d'une enveloppe, dès qu'une de ces "cellules" est capable de se développer plus vite et plus longtemps et de se reproduire plus vite et plus fidèlement; elle va, à cause du mélange inter-individus (Auto-organisation, «reproduction»), contribuer à faire évoluer l'ensemble de la population. C'est pour cette raison, ce "bricolage", que vont apparaître, grâce à leur capacité auto-catalytique, les différentes classes d'ARN : épissage (editing) puis traduction en protéine par l'intermédiaire des ARN de transfert et des ribosomes. On assiste à la production des premières protéines qui vont se substituer aux coenzymes primitifs venus du métabolisme minéral ou de la "soupe primitive". C'est la naissance du langage qui est l'expression du mécanisme de la mémoire. On doit bien-sûr avoir en permanence à l'esprit, qu'au début, ces mécanismes étaient bien moins fiables et bien plus hésitants qu'aujourd'hui («moin orientés»). Ce qui ne pouvait qu'augmenter la diversité.

Nous devons donc supposer que très rapidement les différents mécanismes: épissage (editing ?), puis le mécanisme de traduction, se sont mis en place et chaque fois avec plus de précision. L'épissage (et l'editing) est fondamental, car c'est lui qui va modifier la fonction de la molécule d'ARN. De fonction initiale de matrice, elle va devenir l'information subjective (l'ADN).

D'un coté, l'épissage permet de choisir sur la matrice l'information nécessaire et seulement celle là. En même temps, ce choix ne peut être fait qu'à partir de la matrice car c'est elle qui en se dédoublant peut reproduire cette information subjective.

Information subjective parce qu'elle est spécifique à l'espèce et différente chez chaque individu.

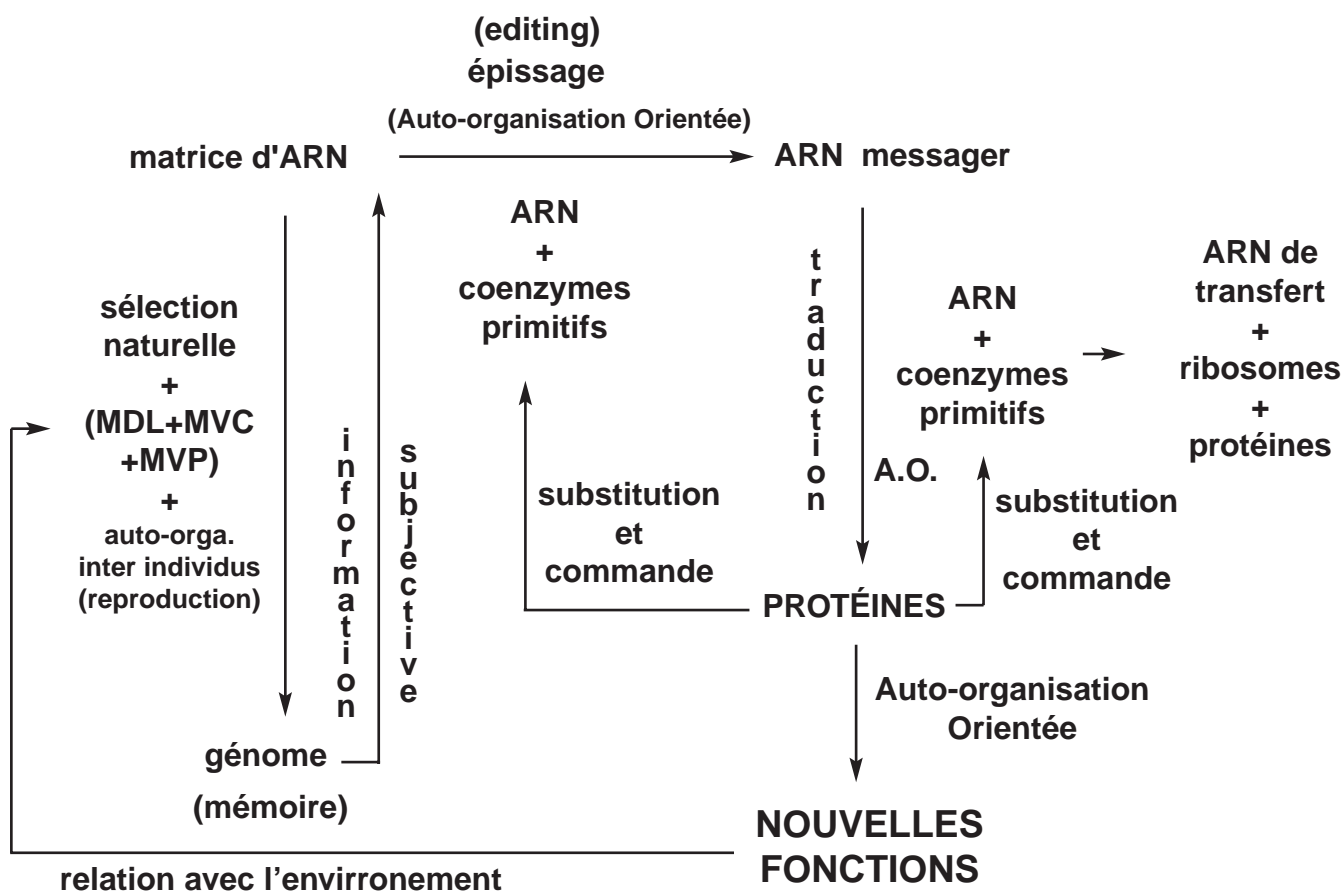
Une fois le mécanisme de l'épissage (editing) mis en place, une modification aléatoire de l'information subjective peut modifier la fonction produite, mais elle ne sera retenue par la vie que si elle est "profitable" à longs termes à celle-ci. C'est donc bien la fonction qui crée l'information retenue par le processus du vivant.

Grâce à ce mécanisme de rétro-programmation, la substitution, des enzymes primitifs par les protéine produites par la mémoire à partir de l'information subjective, le matériel de base nécessaire à la reproduction sera très réduit: les ADN plus un minimum de matériel pour démarrer le processus.

Il est en effet bien évident que, même si les premières fonctions d'épissage ont été permises par la présence de coenzymes primitifs, ce mécanisme même a dû être "rétro-programmé", de façon à respecter un ordre de déroulement du processus qui ne peut venir que de la fabrication d'enzymes" donneur d'ordre" et de fonctions.

LA MEMOIRE

Le mécanisme de substitution et la rétro-programmation



Le processus du vivant

2) Les premières cellules

Des coaservats ou des particules microsphériques de formes très variées ont pu être formés, mais la plupart auraient disparu à cause de leur instabilité. Les plus viables ont pu être les "protobiontes" qui ont combinés des ARN et des polypeptides simples et interdépendants. On peut imaginer qu'il se soit développé, tôt ou tard, un coacervat protobionte qui contenait quelques composants lipidiques pour constituer une membrane et des molécules d'ARN capables de se répliquer et de diriger la synthèse de quelques enzymes simples pour métaboliser des molécules organiques prises de l'extérieur. La croissance dépendait de l'absorption de molécules pouvant, soit participer à l'édification des composantes spécifiques de la cellule primitive, soit être dégradées en produisant l'énergie nécessaire aux activités chimiques de la cellule. Un organisme ancestral de ce type un "progénote", doit dépendre de la disponibilité des molécules organiques présentes dans la soupe primitive. Il doit appartenir à la classe des organismes appelés hétérotrophes dont l'énergie provient de la dégradation de molécules organiques absorbées de l'extérieur. Il est vraisemblable qu'à ces stades de l'évolution de la vie une grande variété d'organismes primitifs ait existé et que leur évolution ait été relativement rapide, par manque de stabilité et de raffinement dans leurs mécanismes biochimiques, permettant la réalisation facile d'une grande diversité d'expériences biochimiques.

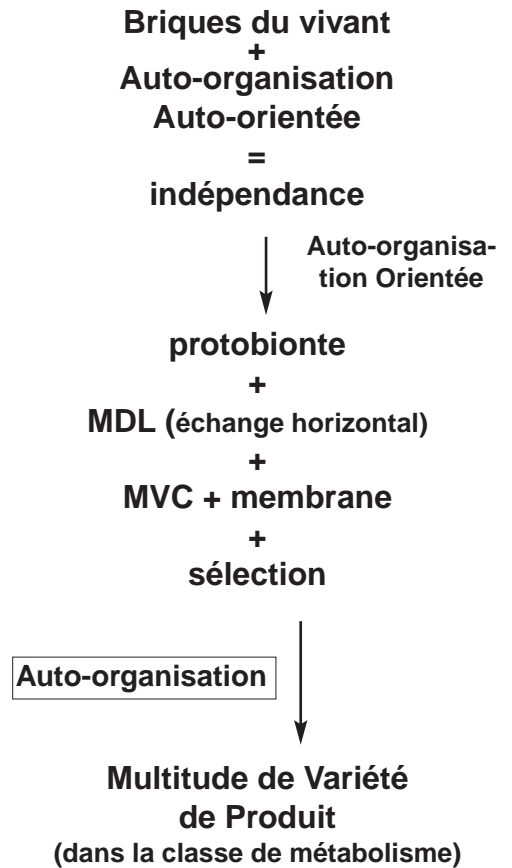
Un danger constant pour ces organismes primitifs aurait été l'irradiation U.V. dont l'énergie est absorbée par beaucoup de molécules, en particulier les acides nucléiques et les protéines, avec des effets néfastes sur leur intégrité. L'héritage des caractères favorables dépend de la stabilité des molécules porteuses d'information, les acides nucléiques. L'ARN est peut-être moins stable que l'ADN puisque dans ce dernier les doubles hélices de chaînes complémentaires sont appariées; si une des chaînes subit un dommage, l'autre chaîne garde sa configuration de moule, permettant à la chaîne rompue d'être réparée correctement. Parmi les progénotes, ceux qui avaient adopté l'ADN comme molécule de stockage d'information et de réplication, passant des instructions à l'ARN pour la synthèse protéique, ont par conséquent eu un avantage sur ceux à ARN seul et ont réussi à survivre.

Ces simples organismes progénotes ont pu devenir de plus en plus complexes, en améliorant leur compétitivité par la synthèse progressive d'autres variétés de molécules organiques et en devenant plus diversifiés dans leurs activités biochimiques. Ces organismes étaient des procaryotes avec un appareil nucléaire simple, mais une organisation biochimique variée dont nous percevons le développement dans la diversité des bactéries actuelles. Certains d'entre eux ont pu développer des méthodes de synthèse à partir de composants simples à proximité, utilisant, peut-être, le gaz carbonique pour synthétiser des sucres et puisant l'azote de l'atmosphère pour la synthèse des acides aminés. Toutefois, ces réactions demandaient des quantités croissantes d'énergie, et la fourniture de composés organiques (synthétisés lentement par des procédés non biologiques et consommés pour produire de l'énergie) s'est avérée insuffisante en regard de la demande. Par conséquent il y a eu compétition intense entre ces organismes primitifs en vue de la capture des molécules organiques de l'environnement ou de l'exploitation d'autres et nouvelles sources d'énergie récupérée à partir de ces molécules dans la soupe primitive.

La photosynthèse et ses conséquences

La surface terrestre reçoit des irradiations sur une large gamme spectrale et beaucoup de molécules organiques absorbent l'énergie à des longueurs d'ondes spécifiques. Si un organisme pouvait se servir d'une molé-

La logique du vivant



cule pour absorber l'énergie lumineuse sans que la molécule subisse de dégâts et s'il savait utiliser cette énergie pour faire se dérouler des réactions chimiques utiles, contribuant par là même à une partie de ses besoins énergétiques, cet organisme aurait eu un avantage précieux pour sa survie. L'amélioration des systèmes d'absorption d'énergie lumineuse et de sa récupération au service des réactions de synthèse a, par la suite, rendu ses organismes totalement indépendants de molécules organiques produites non biologiquement dans l'environnement. Avec le temps ces autotrophes ont créé des quantités importantes de matières organiques dont l'origine était entièrement biologique et dépendait de l'énergie solaire absorbée par les molécules organiques situées à l'intérieur des cellules. Ce développement dramatique est d'importance, non seulement parce que ces organismes photosynthétiques ont eux-mêmes prospéré, mais aussi parce qu'il y avait beaucoup de nourriture pour les hétérotrophe (*et le fait que cette nourriture provienne d'un métabolisme ou plutôt catabolisme d'un organisme dont le fonctionnement était proche —par exemple la chiralité et le fonctionnement global— devait rendre cette nourriture bien plus facilement absorbable et utilisable*). Ceci a dû accélérer la diversification des hétérotrophes, y compris celles des bactéries qui absorbent les produits de dégradation des organismes vivants ou en voie de décomposition, et aussi des organismes cellulaires qui sont capables d'absorber d'autres cellules (phagositoses), une propriété caractéristique de l'ancêtre eucaryote - l'ucaryote.

Le grand essor de la photosynthèse oxygénique: Les premiers organismes qui étaient capables de compléter leur ressource d'énergie en utilisant l'énergie lumineuse ont dû être peu différents des bactéries purement hétérotrophes à leur voisinage. Les atomes d'hydrogène nécessaires à la production, à l'aide de l'énergie lumineuse, des composés réduits, ont dû être prélevés dans la masse des molécules organiques produites par la synthèse non biologique. Avec le développement de systèmes pigmentaires plus perfectionnés (bactériochlorophylle) pour l'absorption de l'énergie lumineuse, davantage d'énergie devenait disponible et l'hydrogène pouvait être prélevé du sulfure d'hydrogène, comme c'est le cas chez les sulfobactéries vertes et pourpres d'aujourd'hui. Le développement plus avancé des vraies chlorophylles, qui peuvent acheminer encore plus d'énergie vers la photosynthèse, a permis le prélèvement de l'hydrogène de l'eau, une matière beaucoup plus abondante que l'hydrogène sulfuré. Une longue période d'évolution était nécessaire pour développer les organismes procaryotes qui pouvaient décomposer l'eau et obtenir de l'hydrogène pour la photosynthèse; cependant, l'apparition de ces organismes, représentés aujourd'hui par les algues bleu-vert (Cyanophycées ou Cyanobactéries) a conduit aux changements qui ont totalement bouleversé les conditions de vie sur la Terre. Tout en produisant des composés organiques dans leurs cellules, ce type de photosynthèse a généré de l'oxygène moléculaire et le grand essor de cette photosynthèse oxygénique a fini par produire d'énormes quantités d'oxygène, libéré dans l'environnement.

L'atmosphère oxydante: Au début, cet oxygène était rapidement consommé par l'oxydation des composés réducteurs présents sur la surface terrestre, comme en témoignent, en géologie, les dépôts de fer rubané, datés d'environ 2 000 millions d'années. Après une période d'environ 100 millions d'années, il y avait suffisamment d'oxygène pour qu'il s'en échappe dans l'atmosphère, changeant progressivement les conditions de l'état réducteur de la Terre primitive à l'état oxydant que nous connaissons aujourd'hui. Ceci a arrêté la synthèse abiologique de composés organiques et accéléré l'oxydation de matières organiques non incorporées dans les organismes vivants. L'oxygène absorbe l'irradiation U.V. pour être transformé en ozone, de sorte qu'avec la production de l'oxygène dans l'atmosphère il y a eu aussi la formation d'ozone, qui s'est accumulée sous forme d'une couche dans la haute atmosphère. L'ozone aussi absorbe la lumière U.V.,

idépendance par la relève de fonction

relève du métabolisme minéral

substitution et relève

du métabolisme minéral

et la couche d'ozone constitue un bouclier atmosphérique autour de la Terre, en réduisant sérieusement la pénétration de l'irradiation U.V. jusqu'à la surface de celle-ci. Des organismes qui, pour échapper aux effets destructeur de la lumière U.V., ont vécu dans les profondeurs de l'eau, ont pu venir à la surface et sur la terre ferme avec moins de dangers d'irradiations nocives.

En effet, l'oxygène libre provoque des dégâts à plusieurs systèmes biochimiques intracellulaires, de sorte que les organismes qui vivent dans l'air (des organismes aérobies) ont développé des mécanismes pour se protéger contre les effets toxiques de l'oxygène. Ces organismes protecteurs font défaut chez les organisme anaérobies, qui ont survécu à ce jour dans des endroits comme la boue de certains marécages où l'oxygène libre a été consommé dans la décomposition de matières organiques, par des bactéries principalement.

La respiration: Cependant, dans le cas des organismes qui avaient développés une tolérance à la présence d'oxygène, la disponibilité de l'oxygène en abondance dans l'environnement a rendu possible l'amélioration de l'efficacité de la respiration, processus par lequel des composés organiques sont dégradés avec la libération d'énergie pour la production de l'ATP. Dans des conditions d'anaérobiose, le substrat respiratoire courant, le glucose, n'est transformé que jusqu'à l'éthanol, avec la synthèse de deux liaisons phosphate pour l'ATP par molécule de glucose. Par contre, lorsque le glucose est dégradé complètement jusqu'au gaz carbonique et l'eau dans la respiration aérobie, 36 liaisons phosphate pour l'ATP sont formées par chaque molécule de glucose transformée. La différence réelle des rendements est quelque peu inférieure à ce que suggèrent ces chiffres, parce que les cellules peuvent souvent utiliser l'éthanol. Le fait que des organismes aérobies peuvent mobiliser des quantités supérieures d'énergie en dégradant la même quantité d'aliments organiques rend ces organismes des concurrents plus efficaces dans la lutte pour l'existence, et les développements postérieurs de l'évolution ont concerné surtout ces organismes aérobies.

L'évolution des propriétés nouvelles chez les cellules eucaryotes

Les cellules procaryotes, dont l'évolution a été décrite précédemment, n'ont jamais développé de complexité structurale significative. Beaucoup de procaryotes formaient des colonies, le plus souvent des chaînes ou des filaments de cellules identiques ou similaires, la différenciation la plus remarquable était, peut être, chez les cyanobactéries, où certains filaments peuvent contenir des cellules hétérocytes à parois épaisses impliquées dans la fixation d'azote, comme des cellules reproductrices au repos et des cellules photosynthétiques normales. La diversification la plus significative chez les bactéries se relève dans la gamme étendue d'activités biochimiques exercées par différentes espèces. **Plus de complexité structurale mais moins de diversité biochimique sont apparues chez les eucaryotes, dont les cellules sont arrivées à développer une forte différenciation fonctionnelle et une interdépendance chez les animaux et les plantes multicellulaires d'aujourd'hui.** Voyons ci-après, les changements qui ont rendu cela possible.

Les changements qui ont abouti aux eucaryotes d'aujourd'hui ont eu lieu avec une extrême lenteur. La vie sur Terre était dominée par les organismes procaryotes issus de l'apparition des premières cellules, il y a environ 3500 millions d'années, jusqu'à ce que les cellules eucaryotes deviennent importantes, environ 2000 millions d'années plus tard. Pendant plus de la moitié de l'histoire des organismes vivants, **l'aspect le plus marquant de l'évolution fut la diversification des bactéries en vue d'exploiter les modes de vies très variés, autotrophes et hétérotrophes.** Cependant, en même temps, des cellules eucaryotes phagocytaires avaient évolué pour devenir des eucaryotes et, il y a environ 1500 millions d'an-

**transformation de
qualité (photosynthèse)
en quantité (atmosphère)**



**la Terre est "isolée
du cosmos par
une "membrane" filtrante
l'atmosphère**



entité Terre

nées, des organismes reconnus eucaryotes laissent des traces fossiles significatives. Au début, ces organismes étaient unicellulaires ou en filaments simples formés de cellules identiques, mais bientôt des colonies étaient nées et la différenciation cellulaire, qui caractérise les eucaryotes supérieurs, a commencé à se développer, probablement il y a environ 700 ou 800 millions d'années.

La phagocytose, une caractéristique essentielle des eucaryotes antérieurs.

Des bactéries hétérotrophes absorbent des molécules organiques en les captant au travers de leur membrane superficielle, souvent par suite de digestion des matériaux par des enzymes sécrétés par des bactéries. Cette méthode de digestion des matières organiques externe n'est pas très efficace, car elle implique le partage des produits de digestion avec d'autres cellules dans les environs. La phagocytose — qui est le processus par lequel la matière organique à digérer est prise, à l'intérieur de la cellule, dans une vacuole entourée de membrane, dans laquelle sont sécrétées des enzymes digestives et de laquelle peuvent être absorbés les produits de la digestion — est donc potentiellement plus bénéfique à l'organisme concerné. De telles nutritions phagocytaires ne semblent pas exister chez les procaryotes actuels, mais ont pu se développer chez les eucaryotes, qui ont évolué en parallèle avec des procaryotes. Les eucaryotes vivaient vraisemblablement en engouffrant des corps de procaryotes, vivants ou morts, à l'intérieur de vacuoles digestives; leur évolution aurait pu être limitée par la faible densité des proies jusqu'à ce que la photosynthèse ait été développée et des organismes aliments aient été disponibles en nombres croissant. Il est possible que ceci ait conduit au développement de cet ensemble de propriétés, cytoplasmiques et nucléaires, qui ont marqué l'évolution de l'eucaryote vers l'eucaryote.

La phagocytose a pu être, à l'origine, la capture des particules élémentaires sur la surface cellulaire pour la digestion, suivi du repli de l'aire de la membrane où s'est logée la particule de façon à créer une invagination dans laquelle la digestion pouvait se faire. Un meilleur contrôle de la digestion, et l'absorption subséquente des molécules de petites tailles formées, pouvait être assurée par l'isolement complet de la particule alimentaire à l'intérieur d'une vacuole fermée. Des mécanismes se sont développés pour assurer l'invagination de la membrane et la formation d'une vacuole complète à partir de la membrane de la surface cellulaire, puis le transport de la vacuole vers l'intérieur de la cellule. Ces mécanismes ont mis en jeu des éléments contractiles —faits de fibre protéiques associées aux membranes— qui pouvaient déplacer des composants cellulaires les uns par rapport aux autres.

La capture efficace des particules élémentaires (en particulier des organismes proies) de l'environnement pouvait être facilitée par le mouvement de la cellule elle-même. Beaucoup de bactéries-proies vivent attachées aux surfaces et d'autres flottent librement sur l'eau ou nagent en faisant tourner des flagels hélicoïdaux simples, qui sortent de leur membrane vers l'extérieur. Des organismes proies attachés aux surfaces peuvent être capturés si les cellules phagotrophiques rapaces glissent sur les surfaces en engouffrant les proies rencontrées. Une forme amiboïde est bien adaptée à cet exercice et les changements de formes associés aux mouvements amiboïdes pouvaient employer des systèmes de fibres protéiques associées à la membrane, analogues à ceux utilisés pour la formation des vacuoles.

Alternativement, la capture d'une proie flottante ou nageante pouvait être améliorée par l'extension donnée à la surface projetée formant un filet ou un filtre au travers duquel s'écoule l'eau. L'efficacité peut encore être améliorée par pompage actif de l'eau au travers du filtre; ceci est réalisé par des ondulation d'une, ou de plusieurs, projections appelées flagelles ou par des groupes de cils qui, tout en ayant une structure analogue à celle des flagelles, ont un mouvement plus spécialisé. Le mécanisme qui est à l'origi-

modification de fonctions



nouvelles espèces de cellules

l'échange horizontal (Auto-organisation) n'est plus possible avec n'importe quelles cellules



symbiose parasitisme etc...

MDL (actif) =

fonction de mobilité

ne des battements flagellaires et ciliaires dépend aussi des fibres protéiques internes.

Bien qu'il y ait quelque groupes d'eucaryotes chez lesquelles on ne voit pas de phagocytose aujourd'hui, on sait qu'elle a été une propriété fondamentale des eucaryotes ancestraux. Ceci parce que deux organelles qui caractérisent les cellules eucaryotes, la mitochondrie et le chloroplaste, ont probablement leur origine dans des procaryotes engouffrés par phagocytose, qui ont échappé à la digestion et sont demeurés viables à l'intérieur du cytoplasme, en symbiose avec la cellule phagocytaire. **Ces associations symbiotiques ont eu des implications très importantes pour l'évolution de cellules et d'organismes eucaryotes.**..."

Mitochondries, chloroplastes et sources d'énergie

Les ucaryotes et les eucaryotes anciens, chez lesquelles ont évolué les aspects cytoplasmiques et nucléaires mentionnés dans les paragraphes précédents, étaient des anaérobies, et donc leur capacité à utiliser l'énergie des molécules organiques était limitée à ce qui était possible en respiration anaérobie. A cause de cela, et parce que c'étaient des cellules plus grandes et plus complexes avec un besoin élevé d'énergie, ils ne pouvaient probablement pas concurrencer avec succès, en milieu pauvre, les procaryotes hétérotrophes. L'évolution des procaryotes photosynthétiques a beaucoup augmenté les ressources alimentaires et aussi enrichi l'atmosphère en oxygène, ce que certains procaryotes ont exploité en développant des enzymes pour la respiration aérobie. Les eucaryotes ont développé une tolérance envers l'oxygène, mais, apparemment, n'ont pas développé pour eux-même la respiration aérobie; au lieu de cela, ils semblent avoir développé une relation de symbiose avec des procaryotes aérobies.

Les eucaryotes phagotrophiques, à ce jour, contiennent une large gamme d'autres organismes, procaryotes pour la plupart, qui demeurent en permanence à l'intérieur de leurs cellules, vraisemblablement dans un état de symbiose mutuellement bénéfique. On suppose que de tels procaryotes ont été engouffrés à l'intérieur des vacuoles-alimentaires par les eucaryotes, ont échappé à la digestion en se faisant de quelque façon reconnaître par l'eucaryote et se sont établis de manière permanente dans le cytoplasme en créant une chimère. Parmi les organismes ainsi engouffrés par les eucaryotes phagotrophiques anciens, il y avait peut-être des procaryotes aérobies. Si un tel procaryote pouvait bien s'installer à l'intérieur d'une cellule eucaryote et fournir à la cellule-hôte de l'ATP supplémentaire en échange de la nourriture et de l'abri, l'eucaryote-hôte aura acquis un avantage compétitif. Les procaryotes aérobies qui se sont installés en symbiose avec les eucaryotes anciens sont reconnus aujourd'hui comme étant les mitochondries. Celles-ci peuvent être considérées comme des symbiontes à l'intérieur des vacuoles; chaque mitochondrie comprend une membrane extérieure (celle de la vacuole) renfermant une membrane intérieure du symbionte aérobie avec sa propre boucle procaryote d'ADN, des ribosomes et des enzymes respiratoires. Des substrats respiratoires passent de la cellule-hôte au symbionte, et les produits de la respiration, y compris l'ATP, passent dans le sens inverse, du symbionte à l'hôte.

Avec le temps, le symbionte mitochondrial s'est définitivement établi en tant que composant permanent et indispensable des cellules eucaryotes vivant dans les conditions d'aérobies; il se reproduit à l'intérieur du cytoplasme-hôte et pour beaucoup, quoique pas pour tous, des gènes pour des protéines mitochondriales sont arrivés à se loger dans le noyau de l'hôte, quittant la boucle d'ADN mitochondrial. Les symbiontes mitochondriaux transmettent un mécanisme respiratoire efficace aux cellules-hôte aérobies mais beaucoup d'eucaryotes qui vivent dans des conditions d'anaérobies ne possèdent pas de mitochondries, et il est possible que les plus primitifs de ces eucaryotes descendent des ancêtres qui n'avaient jamais acquis de mitochondries.

La nourriture de ces eucaryotes phagotrophiques comprenait aussi des procaryotes photosynthétiques, et l'on croit que des organismes autotrophes variés sont devenus des symbiontes stables à l'intérieur des cellules eucaryotes. De tels symbiontes photosynthétiques pouvaient obtenir de la cellule-hôte le gaz carbonique et d'autres matières premières pour la photosynthèse, et lui céder des molécules. Ceci rendit l'eucaryote indépendante de toute source d'énergie, exceptée la lumière, et lui donna un avantage certain sur d'autres organismes, spécialement s'il avait aussi des mitochondries pour la respiration aérobie. Ces symbiontes photosynthétiques sont devenus des chloroplastes de types variés que l'on trouve dans les cellules des algues et des plantes supérieures. Comme les mitochondries, les chloroplastes ont deux membranes, qui peuvent représenter: une membrane vacuolaire de l'hôte et une membrane intérieure du symbionte qui entoure le cytoplasme contenant des ribosomes et une ou plusieurs boucles d'ADN.

En outre, les chloroplastes contiennent des sav membranaires aplatis (thylakoïdes), de la chlorophylle et d'autres pigments qui sont incorporés dans ces membranes. Des variations dans le détail de l'arrangement des membranes autour des chloroplastes et dans le contenu en pigment de leurs thylakoïdes suggèrent que des eucaryotes ancestraux différents avaient acquis des symbiontes photosynthétiques de types différents et que l'établissement de symbioses stables ont eu lieu à plusieurs reprises. Il n'est pas sûr qu'il y ait eu des origines multiples du symbionte mitochondrial.

Eucaryotes photoautotrophiques et procaryotes photosynthétiques.

L'acquisition par la plupart des eucaryotes des symbiontes mitochondriaux et de symbiontes chloroplastes par les plantes a fait des eucaryotes des concurrents privilégiés par rapport aux procaryotes préexistants. Dans la plupart des habitats, des eucaryotes photoautotrophiques ont gagné sur les procaryotes photosynthétiques et sont devenus les producteurs primaires dominants de la matière organique, fournissant la nourriture pour la plupart des hétérotrophes sur Terre qui, aujourd'hui, dépendent presque tous de l'énergie du soleil. Il est évident que le mode d'organisation cellulaire eucaryote était capable de produire des cellules plus grandes et plus adaptables que ne le pouvait le mode procaryote. Le moment venu, les eucaryotes unicellulaires ont développé des colonies et, plus tard, les cellules, dans ces colonies, se sont différenciées pour remplir différentes fonctions et ont progressivement acquis plus d'indépendance. Sur cette route de l'évolution eucaryote, des branches latérales ont donné naissance aux différents groupes spécialisés d'organismes unicellulaires et aux différentes formes d'algues, champignons, plantes vertes terrestres, animaux invertébrés et vertébrés, en utilisant des composants cellulaires mentionnés ici et en suivant une grande variété de voies spécialisées." (A3 page144 à157)

L'écosystème Terre

Les espèces

Dès que le mécanisme global de la reproduction et de la mémoire génétique (support de l'évolution) ont été globalement défini, la Multitude de Variétés de Conditions va produire des différenciations cellulaires. L'échange horizontal (auto organisation) se fera par famille (espèce), par la reproduction sexuée, puis ses familles se diviseront en espèces. Tout un réseau de convivialité va se créer, de vie en parallèle, en symbiose, en parasite, en "concurrence". C'est la naissance de l'écosystème. Deux grande famille d'eucaryotes vont se créer, les autotrophes et les hétérotrophes.

Les fonctions

Les fonctions (mécanismes) de la vie se mettent en place. Au début la membrane était indépendante du métabolisme qu'elle enveloppait. Petit à petit, sous la pression de la sélection naturelle, une troisième fonction (après isolation et véhicule) va apparaître, celle de régulation de l'échange. La production de protéines va permettre une coordination et une commande de ce processus: filtrage, absorption, rejet, vie en symbiose avec des bactéries, etc. Le mécanisme de phagocytose apporte une autre combinaison possible la symbiose interne. La fourniture de l'énergie sera réalisée par des organismes, vivant en symbiose dans la cellule.

Pour ce qui concerne la production de l'énergie, l'arrivée de l'oxygène est la condition du développement de la vie. au début, cet énergie est fournie par l'adénosine triphosphate ou ATP (une brique du vivant) qui, en perdant un phosphate devient de l'adénosine diphosphate ou ADP, libère une grande quantité d'énergie qui est immédiatement utilisable par la cellule. Plus tard, avec l'absorption de glucose, la décomposition partielle de celui-ci par l'ATP doublera le rendement. Enfin l'oxygène, qui va permettre une décomposition totale du glucose, décuplera le rendement ouvrant la voie à une vie développée et complexe. Dans ce cas, il ne s'agit pas d'une substitution mais plutôt du prolongement du processus de dégradation (catabolisme). Il ne s'agit pas là d'un processus d'Auto-organisation Orienté, mais d'un simple processus d'Auto-organisation Bien sur la régulation et la distribution de cette énergie va nécessiter tout un mécanisme assuré par les fonctions des protéines

L'entité Terre

La photosynthèse va amener un bouleversement sur la Terre. La production massive d'oxygène va oxyder les composants réducteurs (ions métalliques, etc.), appauvrissant d'un côté le métabolisme minéral, accélérant de l'autre la respiration par une meilleure utilisation de l'énergie U.V.. L'atmosphère va jouer le rôle d'une membrane filtrante, isolant la terre des rayonnements et des bombardements nocifs (transformation de quantité, en quantité, en qualité). La relève par le métabolisme biologique est définitivement assurée.

C'est l'aboutissement de la substitution du métabolisme biologique sur le métabolisme minéral comme phénomène dominant sur la Terre.

LE PROCESSUS DU VIVANT

D) L'ÉVOLUTION DU VIVANT

"1. Le pré-vivant est apparu il y a plus de 4 milliards 800 millions d'années sous forme de protobiontes capables d'un métabolisme très élémentaire (sans doute utilisation directe de l'ATP formé dans la soupe).

2. Ayant acquis une membrane et un chromosome, ces protobiontes ont donné les premières cellules hétérotrophiques. Elles devaient vivre en utilisant directement les molécules organiques (et en particulier le glucose né spontanément dans le milieu, ce qui leur permettait de recycler leur ATP). Ces formes correspondent à des procaryotes sphéroïdes qui, si l'on en croit les vestiges les plus anciens, pourraient s'apparenter aux bactéries actuelles du type clostridium ou bien à des types encore plus primitifs"....

3. Les premières cellules bactériennes douées de la photosynthèse apparurent il y a trois milliards d'années. Elles étaient capables de synthétiser les grosses molécules organiques à partir de petites molécules minérales grâce à l'énergie solaire. Cette autotrophie les libérait de la dépendance des matières organiques présentes dans un milieu en voie d'appauvrissement. Elles prirent le relais des organismes hétérotrophes qui les avaient précédées. Leur photosynthèse était encore du type anaérobie. Elles ne rejetaient pas d'oxygène. Ces bactéries devaient vivre sous la forme de colonies encroûtantes situées dans les eaux peu profondes et bien éclairées."...

4. A la suite de nouvelles mutations, quelques bactéries acquièrent la photosynthèse aérobie. Cette innovation dut intervenir au milieu du précambrien, il y a 2 milliard 300 millions d'années. Elle était lourde de conséquence. Ces nouvelles cyanophycées rejetaient de l'oxygène moléculaire qui, après avoir saturé tous les corps réducteurs présents dans les océans commença à se répandre dans l'atmosphère. L'oxygène était toxique pour les bactéries anaérobies (*celles qui subsistèrent furent rejetées dans des localisations bien particulières*)."

5. Ultérieurement, certaines bactéries acquièrent le pouvoir d'utiliser activement l'oxygène pour pousser plus en avant la dégradation des sucres et en tirer ainsi une quantité d'énergie plus importante. Ce fut le passage de la fermentation en aérobiose à la respiration en aérobiose. Nous avons dit l'immense progrès apporté par cette modification". (A9 page 111 et 112)

" Les protistes qui vivaient en autotrophes appartenait indiscutablement au type végétal. Mais équipé d'un petit nombre de chloroplastes, leur pouvoir de synthèse devait être modeste. De plus ils étaient mobiles, tels les phytoflagellés actuels qui représentent sans doute des formes très voisines et sont pourvu d'un flagel moteur puissant. Ils étaient doués d'une certaine sensibilité. Beaucoup de phytoflagellés possèdent un stigma sensible à la lumière. Ainsi les premiers végétaux étaient pourvus de fonctions sensorielles et motrice qui les apparentaient aux animaux. En vérité, ces prostites se trouvent à l'origine des deux règnes qu'ils engendrèrent tour à tour en développant dans chaque cas des facultés qui, si elles n'avaient pas été séparées, eussent été incompatibles.

En effet:

Dans la lignée végétale: le rendement de la photosynthèse n'est pas élevé. Pour compenser cette faiblesse, les plantes pluricellulaires eurent tendance à augmenter leur surface d'insolation: d'abord sous forme de thalle (algue), puis sous forme de systèmes foliaires. **Ce faisant, les végétaux se condamnaient à la fixation. Se vouant à l'immobilité définitive, ils perdirent les facultés sensori-motrices** présentes chez les premiers eucaryotes autotrophe dont l'équipement sensori-moteur, on l'a vu, ne différait en rien de celui des prostites hétérotrophes d'où parti le règne animal. Et **les végétaux n'eurent plus aucune fonction de relation: leur mode de vie les orienta vers une activité consacrée exclusivement à la croissance et à la reproduction. Ils ne sentirent plus, ne marchèrent plus, ne "choisirent plus**; ils se contentèrent désormais de fabriquer

La logique du vivant

Les briques du vivant:

ARN — lipides
enzymes primitifs
ATP — glucose

↓ Auto-organisa-
tion Orientée

naissance des fonctions
primitives du vivant:
reproduction et échange sélectif
(Auto-organisation)

↓

début du processus
de substitution du métabolisme
organique/minéral

↓

entité Terre

achèvement du processus
de substitution

Le métabolisme minéral a produit des fonctions. Celles-ci se sont substituées au métabolisme minéraux par Auto organisation Auto orientée.

Le vivant c'est autonomisé

La survie du vivant ne dépend plus du métabolisme minéral mais de la relation du vivant (individu) avec son environnement terre et autres vivants

L'évolution du vivant est l'évolution de la relation vivant/environnement.

C'est donc l'évolution des fonctions, produit des mutations et des échanges de l'information subjective du génotype (auto organisation inter individu).

pas de fonction de relation

↓

**fonctions minimum:
reproduction et croissance**

des sucres, des protéines et accessoirement des graisses. **Le règne végétal devint une immense usine d'organo-synthèse** utilisant l'énergie du soleil, mais il ne fut que cela. Dans ce domaine, sa réussite fut remarquable: car le manteau végétal, sorti de l'océan, finit par envahir tous les milieux de la biosphère. Toutefois la participation directe des végétaux au grand mouvement de l'évolution, dite progressive, est à peu près nul. En fournissant aux animaux une grande quantité de matière organique immédiatement utilisable et en allant la leur offrir jusque dans les endroits les plus reculés, **les végétaux ont créé d'innombrables niches et permis la poursuite du processus évolutif à travers le règne animal. Ils lui ont apporté l'essentiel des ressources énergétiques indispensables, mais n'y ont guère contribué génétiquement. Malgré sa "réussite écologique", le règne végétal très fortement spécialisé, constitue un cul-de-sac.**

Pour la lignée animal: le "sacrifice des végétaux n'aura pas été vain puisque c'est sur eux que se sont fondés le développement et la diversification du règne animal. Libérés de la lourde contrainte que représente les synthèses élémentaires, ayant accès à des ressources nombreuses et largement réparties dans toute les zones habitables, **les animaux ont conservé une disponibilité et une liberté de mouvement qui allaient leur permettre d'exploiter activement toutes les niches ouvertes par les plantes.** Si les animaux furent des pionniers, ils ont toujours été devancé dans leur conquête par le manteau végétal. Sans lui, tout milieu demeurerait inhabitable. Voici une vérité fondamentale que nos contemporains devraient méditer." (A9 page 120 et 121)

A l'aube de l'histoire naturelle: la naissance des eucaryotes

Noyau et sexualité

Les premières cellules, qui ressemblaient à nos bactéries et aux cyanophycées, portaient un seul brin d'ADN "flottant" en liberté au milieu du cytoplasme, lui-même assez pauvre en formations spécialisées. Leur équipement génétique élémentaire ne devait pas leur permettre de disposer d'autre chose que de programmes simples. Aussi leur possibilités évolutives étaient-elles limitées.

Pour aller plus loin la nature "inventa" les eucaryotes, êtres vivants infiniment plus complexes et doués de potentialités multiples. Les eucaryotes ont un équipement génétique riche: formés de nombreux chromosomes, le plus souvent allant par paires (cellules diploïdes) et séparés du cytoplasme par une membrane nucléaire délimitant le noyau. Les eucaryotes sont capables de se reproduire par mitose (réplication de chaque chromosome par autocopie et partition de la cellule mère en deux cellules filles portant exactement le même stock chromosomique). Mais en outre, la plupart d'entre eux présentent **de vrais phénomènes sexuels**, avec formation de gamètes haploïdes lors de la méiose et reconstitution d'un zygote (oeuf diploïde) au moment de la fécondation. **C'est le cycle vital qui assure le brassage des combinaisons génétiques à chaque génération.**"(A9 page 111 à 113)

"La mutation et la recombinaison en tant que facteur d'évolution

L'examen de toutes les espèces vivantes, des plus simples aux plus complexes, démontre que le polymorphisme est un facteur indispensable à la survie et à l'évolution de tous les groupes. Toutefois les mécanismes qui l'assurent sont différents chez les êtres supérieurs et chez les organismes inférieurs.

Au premiers stades de la vie, représentés aujourd'hui par les formes bactériennes, c'est la mutation qui joue le rôle essentiel dans le maintien du polymorphisme. Les bactéries mutent fréquemment; et leur **équipement chromosomique très simple** (un seul chromosome) fait que les phénomènes de dominance et d'hétérostase n'existent pratiquement pas. **Aussi chaque mutation peut-elle avoir une expression phé-**

fonctions passives sans degrés de liberté actifs



pas d'évolution de fonction très forte spécialisation: la reproduction de l'énergie

spéciation du vivant autotrophe hétérotrophe

Multitude de Degrés de Liberté active



évolution de fonctions

reproduction sexuée = échange d'information subjective horizontale (Auto-organisation)



Multitude de Variétés d'informations (subjectives)

notypique immédiate. De plus, une mutation favorable a la possibilité de diffuser très vite dans la colonie, par suite de la reproduction rapide de ces organismes (quelques minutes). Aussi, dans le monde bactérien, l'élimination d'une mutation par la sélection naturelle n'a-telle rien de catastrophique: elle a toute les chances de réapparaître dans un délai relativement bref. "...deux bactéries peuvent s'accoler et échanger un segment chromosomique, ce qui entraîne une recombinaison partielle de leur matériel génétique. C'est la conjugaison que l'on interprète aujourd'hui comme une ébauche de la sexualité." (A8 page 129)

"Nous avons vu que les facultés adaptatives de chaque groupe, et donc leur potentiel évolutif, étaient liées au polymorphisme génétique et à l'aptitude à le modifier au cours des générations, grâce à la sexualité; Ainsi les eucaryotes acquièrent des possibilités d'innovation qui étaient inconnues chez les bactéries dont le polymorphisme dépend uniquement des mutations et, à un certain degré, des échanges de segments chromosomiques survenant au cours de la conjugaison."

...A partir d'un certain stade, la reproduction, et donc l'évolution, empruntent exclusivement la voie sexuée. Il n'en existe point d'autres. Ceci explique la différence de vitesse du mouvement évolutif qui se déroule très lentement pendant tout le temps des procaryotes. En trois milliards d'années, les choses changent peu sur le plan de la morphologie et de l'organisation: une bactérie du précambrien doit ressembler comme une soeur jumelle à sa lointaine descendante de la fin de l'ère. Certes, pendant cette longue durée, de nouveaux processus métaboliques se mettent en place; les conséquences en seront lourdes pour l'avenir: mais leur apparition est lente et progressive, rien de tel avec les eucaryotes qui montre un accroissement notable de leur vitesse d'évolution. Dès le stade protiste, **la nature innove à tour de bras, et l'on rencontre très vite une extrême diversification des lignées qui contraste beaucoup avec la monotonie bactérienne.**

En un milliard et demi d'années, on passe des modestes cyanophyses à l'homo sapiens." (A9 page 114)

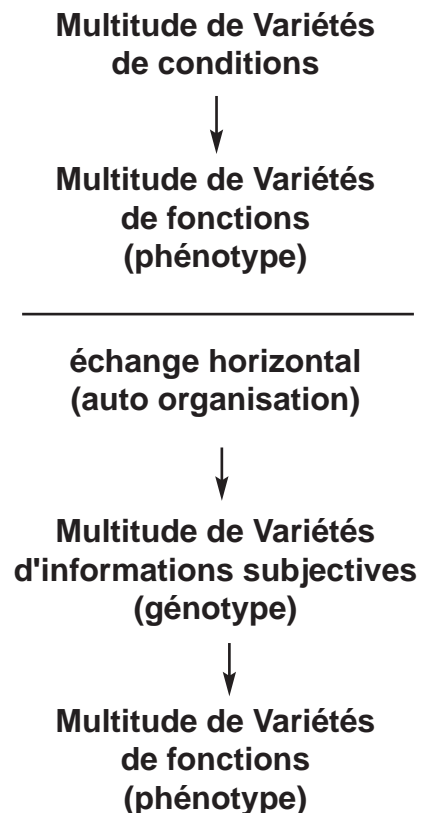
...Dans tous les cas, le phénotype le plus avantageux correspond à des génotypes variés. C'est pourquoi la sélection n'est pas nécessairement uniformisante. A chaque génération la reproduction sexuée remet en cause les combinaisons génétiques pré-existantes et crée de nouvelles combinaisons. Ce mécanisme entretient en permanence un fort polymorphisme au sein duquel la sélection opère son choix, en triant les phénotypes favorables ou seulement acceptables. **Car se sont les phénotypes et non les génotypes qui se heurtent à la pression sélective.**

Les phénotypes admis à cet "examen de passage" correspondent presque toujours à un nombre élevé de génotypes différents. Aussi contrairement à ce qu'avaient pensé les néo-darwiniens, **une forte sélection est parfaitement compatible avec un polymorphisme génétique étendu. Mais ce polymorphisme et plus le fait de recombinaisons des génotypes que l'apparition de mutations nouvelles. Ce jeu sans fin permet aux gènes "anciens" comme aux nouveaux venus de passer de la dominance à la récessivité, de l'épistasie à l'hypostasie, c'est à dire de l'expression au silence et vice versa.** Au prix de l'élimination de certains individus, il fait l'économie de l'élimination définitive de certains gènes qui, dans leur expression phénotypique, se révéleraient inutiles et dangereux. **"Réfugiés" dans des combinaisons qui leur permettent de rester silencieux, ils se tiennent en réserve et pourront s'exprimer au moment ou des des conditions d'environnement les rendrons acceptables. Ils constituent le "fardeau génétique" présent dans toute population naturelle".**(A8 page 128)

L'avantage sélectif de l'état pluricellulaire

les conditions bioénergétiques suffisantes étant acquises, l'apparition des métazoaires était douée d'une forte valeur sélective. En effet:

1. Si l'on considère les fonctions une par une, il apparaît clairement que



le métazoaire développe dans chaque cas des performances beaucoup plus grandes que les prokaryotes. L'être unicellulaire est obligé de faire face à toutes les nécessités de la vie: alimentation, reproduction défense, etc. Sollicitée de tous les côtés, **la cellule du prokaryote, "bonne à tout faire", n'offre qu'un rendement limité pour chacune de ses fonctions. Au contraire, une fois différenciée, la cellule d'un métazoaire présente un rendement bien plus élevé pour la fonction privilégiée que lui confère sa spécialisation."**...

2. De par sa taille et ses moyens de régulation qui se perfectionnent dans le courant de l'évolution, le métazoaire tend à se libérer de plus en plus des contraintes de l'environnement..." **Les métazoaires deviennent capables d'organiser et d'exploiter les niches écologiques les plus variées, infiniment mieux que ne le faisaient les prokaryotes...."**

La différenciation cellulaire chez les métazoaires

Chez les métazoaires, et singulièrement dans les groupes les plus évolués, la spécialisation cellulaire est encore plus poussée. Elle répond à deux processus:

1) la différenciation cellulaire proprement dite, déjà évoquée, qui fait que des cellules issues d'un même oeuf vont donner des éléments morphologiquement et fonctionnellement très différents (cellules osseuses, musculaires hépatiques, nerveuses, etc.). **Comme toutes portent, à l'origine, le même patrimoine héréditaire, il faut admettre l'existence d'une série d'inhibitions/activations ne laissant fonctionner dans chaque lignée cellulaire que la fraction de l'équipement génétique utile à sa spécialisation, et elle seule.** Le reste n'est pas perdu puisque, chez certaines espèces, des cellules déjà très spécialisées peuvent faire retour au type ancestral, tout au moins dans des conditions particulières.

Au départ, toutes les cellules d'un même organisme, même les plus éloignées morphologiquement et fonctionnellement, possèdent le même stock génétique. Par la suite, ce qui les différencie, c'est la partie de ce stock qui est en activité: c'est à dire la fraction du DNA qui sera effectivement traduite en m-RNA, puis en chaînes peptidiques.

Le "polymorphisme phénotypique" qui affecte nos tissus ne remet pas en cause leur profonde identité génétique. Celle-ci explique l'efficacité des phénomènes d'intégration. Pourvu du même équipement de DNA, chaque cellule demeure capable de percevoir les signaux venus des autres cellules du même organisme. Elles "parlent la même langue" et sont sans cesse aptes à "comprendre" les ordres d'activation ou de répression qui en émanent. Sauf pour quelques cellules hautement spécialisées, la plupart peuvent, dans certaines conditions, remettre en marche des gènes réprimés et retrouver certaines potentialités ancestrales. Cette différenciation vers l'état primitif, qui doit mobiliser l'ensemble du génome, se constate soit dans des conditions physiologiques (régénération, cicatrisation), soit dans des conditions pathologiques (métaplasie, cancer).

La régulation génétique

Les systèmes répresseurs:

c'est un système qui agit directement sur la programmation enzymatique lorsque il y a surproduction. Le surproduit se combine avec l'apréresseur pour bloquer la RNA polymérase indispensable à la programmation

Régulation par feed-back

Dans le type de régulation que nous venons de décrire, le blocage de la chaîne de production se situe à la source-même de la synthèse

Auto-organisation
Orientée

Auto-organisation
Orientée

enzymatique, puisqu'elle est liée à la non-transcription du DNA en RNA, par suite de l'arrêt de l'arrivée de la RNA polymérase au niveau du gène de structure. Un tel mécanisme peut entrer dans ce que les physiologistes appellent une réaction structurelle, bien plus rigoureuse et économique qu'une réaction conjoncturelle qui consisterait à neutraliser et à éliminer les enzymes fabriqués en excès. Ce dernier type de réaction, qui a pour seul avantage celui de la rapidité, existe néanmoins: c'est la régulation par feed-back. La régulation par feed-back est un complément de la régulation générique.

Les systèmes inducteurs (ou activateurs)

Les système inducteurs impliquent généralement des gènes responsable des processus cataboliques, c'est à dire des systèmes capables de "casser" de grosses molécules, presque toujours pour en retirer de l'énergie (métabolisme de dégradation des chaînes bio-énergétiques). Le mécanisme de l'induction est comparable à celui que nous venons de décrire pour la répression, mais alors que dans le système répressur c'est l'accumulation du produit fini (c'est à dire le résultat de l'activité des gènes) qui assure la répression, dans le système inducteur, c'est la présence du produit à métaboliser qui active la chaîne.

La première divergence: dépositives et suspensives

1. les dépositives qui vivaient sur les fonds marins près des côtes. Ils se nourrissaient de particules déposées sur le sol et devaient avoir une forme aplatie qui leur assurait un maximum de contacts avec la surface et leur permettait de se déplacer facilement..."

2. Les suspensives constituent la deuxième lignée des métazoaires primitifs. Ils devaient flotter dans la masse d'eau, à une faible profondeur, aussi bien près des côtes qu'en haute mer. Ils se nourrissaient d'une foule de proies, d'algues unicellulaires, de petits organismes pluricellulaires, nombreux dans cette zone où ils constituent le plancton, point de départ de la chaîne de nourriture des animaux marins"...

..."Pour faire mieux, la nature dû mettre en place une structure rigide sur laquelle pouvait s'insérer les muscles, où viendraient s'accrocher les organes. Dès le précambrien, l'évolution "inventa" un système semi rigide: le coelome, cavité close plus ou moins hermétique."...

ainsi, le coelome constitue non seulement un squelette hydrostatique conférant à l'animal une plus grande force dans ses mouvements, mais il assure tout un système d'échange entre les tissus, accroît l'efficacité des fonctions et facilite la reproduction."

La métamérisation: métamères et oligomères

Le coelome primitif constitue un sac d'une seule venue, autour duquel s'organisent les différents appareils (en particulier: tube digestif et glandes génitales). Plus tard se sac va se diviser en segments, ce qui entraîne le découpage de tout le corps de l'animal. Au début ces segments ou métamères sont identiques les uns aux autres (sauf le premier qui porte la tête et le dernier qui porte la queue ou telson). C'est la segmentation ou métamérisation homonome: celle du ver de terre ou du mille pattes. Par la suite, les segments se diversifient en se spécialisant dans diverses fonctions. C'est la métamérisation hétéronome des crustacés ou des insectes." (A9 page 135)

La squelettogénèse

L'apparition, au début du cambrien, d'un squelette solide, beaucoup plus dur que le système hydrostatique représenté par le coelome, constitue une innovation fondamentale qui a ouvert des voies nouvelles à l'évolution. En effet:

1. il permet l'accroissement de volume et le perfectionnement des

Auto-organisation Orientée

Auto-organisation Orientée

différenciation relationnelle
avec l'environnement
donc
fonctionnelle

MDL actif



évolution fonctionnelle

organes en jouant le rôle de charpente de soutien;

2. il assure l'insertion des muscles sur des points fixes, ce qui améliore beaucoup la rapidité, la puissance et l'efficacité des mouvements, assurés désormais par de véritables leviers;

3. il protège l'individu dans un monde qui n'est plus exclusivement herbivore, et où la prédation commence à se manifester comme un maillon important des chaînes de nourriture.

Le squelette accroît les performances de l'animal, qui peut se déplacer mieux et aller plus loin, en toute sécurité. Ses chances de survie augmentent. Pouvant se mouvoir plus facilement, il recherche son partenaire sexuel et aménage son site de nidation dans de meilleures conditions. La présence du squelette majore donc la probabilité de survie du groupe. " ...**Le vivant peut répondre à de nouvelles "offres écologiques". Il accède à plus de ressources. C'est pourquoi les groupes à squelette subiront vite une intense évolution diversifiante génératrice d'un grand nombre d'espèces nouvelles.**

Quelle est l'origine physiologique du squelette? Certains y voient un processus incomplet d'expression du calcium, qui, déposé dans quelques tissus, serait avantageusement utilisé à des fins mécaniques. Toutefois beaucoup de squelettes jouent un rôle actif dans le métabolisme, au moins en tant que réserve de calcium et, dans les squelettes phosphates, en tant que réserve de phosphore: ainsi peuvent-ils être périodiquement remaniés durant la vie de l'animal; **Nous avons vu et nous verrons encore comment la nature s'empare parfois d'un processus physiologique en apparence secondaire, où d'un organe jouant un rôle discret, les développe, s'il se révèlent utiles, pour satisfaire une exigence nouvelle.** De véritables reins d'accumulation, condamnés à "enranger" des déchets, et qui constituaient les tissus calcifiés ont pu devenir une charpente squelettique sur laquelle allait s'appuyer muscles et viscères. Plus tard, ce type de "bricolage" amènera les fentes branchiales, organes filtrant l'eau de mer et permettant à l'animal de se nourrir, à assurer une fonction respiratoire... avant de donner encore autre chose chez les vertébrés supérieurs." (A9 page 140)

Le mécanisme de mise en place des grands phylums

D'après ce qui vient d'être dit, l'évolution phanérozoïque paraît s'être poursuivie en trois phases:

1. apparition des êtres pluricellulaires et premières bifurcations (pré-cambrien supérieur);
2. autonomisation des différents phylums (charnière précambrien:cambrien);
3. disparition de certains de ces phylums; éclatement de ceux qui restent en lignées spécialisées.

Un fait demeure certain, au milieu du cambrien, la faune est déjà très diversifiée: quelques 35 phylums ont été autonomisés dont 26 existent encore. Les autres ont disparu sans laisser de successeur.

Ainsi tous les grands phylums que nous connaissons à l'heure actuelle étaient déjà en place il y a quelque 500 millions d'années. Par la suite, et durant tout le phanérozoïque, l'évolution ne créera plus de nouveau type d'organisation. Elle engendrera d'innombrables lignées, adaptées à tous les milieux disponibles, mais selon les mêmes schémas de base.

Pourquoi dans la suite du phanérozoïque, n'a-t-on jamais plus observé de typogénèse? sans doute parce que l'apparition d'un nouveau type d'organisation suppose, l'existence d'une série de territoires encore libres. C'est dans un monde presque vide que beaucoup de nouveautés majeures purent survenir. Aussi l'évolution transphylétique devint impossible à partir du moment où les habitats du monde marin furent occupés, ce qui se produisit assez vite au cours du cambrien. **Dés lors, l'évolution se cantonne dans la spéciogénèse; elle n'innove vraiment plus.** Même pas au moment où les grandes extinctions libéreront des places. En effet, des types existent alors qui vont s'adapter très vite aux

augmentation de la Multitude de Degrés de Liberté "active"

+

Multitude de conditions



diversification

espaces devenus vacants, à la fin du secondaire, quand les grands reptiles disparaissent, on pourrait imaginer qu'un nouveau phylum de "post vertébré" va occuper la scène.

En réalité se sont les petits mammifères, encore bien modestes, qui subiront une remarquable explosion diversifiante et iront s'emparer aussitôt des ressources disponibles. Ils ne laissent aucun habitat libre, qui aurait provoqué la naissance d'un phylum différent.

"Apparition des poissons

au cours du silurien, les vrais poissons font leur entrée, à la faveur de deux acquisitions importantes:

1°) une mâchoire, qui se forme par transformation du premier arc branchial, et engage tout le groupe dans le domaine de la macrophagie. Tous les poissons sont des Gnathostomes.

2°) Des nageoires paires fonctionnelles qui représentent des membres locomoteur et assurent à l'animal un déplacement beaucoup plus rapide."

Avantage du passage de la microphagie à la macrophagie

..."Cette transformation lui ouvre une niche écologique nouvelle, riche en ressources. Le macrophage qui capture, avale et digère une proie volumineuse, animale ou végétale, reçoit en un temps bref une ration énergétique infiniment plus importante que le microphage qui filtre du plancton sans discontinuer. L'ingestion d'un seul petit poisson par un gros poisson carnivore doit représenter, énergiquement, l'équivalent du plancton présent dans des milliers de litres d'eau de mer, ou plus encore. La macrophagie est donc très favorable. C'est vers elle que pousse la sélection naturelle. Elle entraîne la mise en place de puissants moyens mécaniques (broyage) et biochimiques (enzymes de digestion), et donc l'organisation d'un système digestif complexe devenu presque toujours prédateur, le macrophage doit pouvoir se déplacer assez vite pour rechercher ses proies, les neutraliser, les capturer. D'où l'apparition de nageoires puissantes et la perte des plaques externes, déjà évoquées. En outre, le macrophage acquiert les facultés psychiques qui lui permettent de mettre au point des stratégies de recherche, d'attaque et de protection. Aussi, arrivé à ce stade évolutif, toute modification organique conduisant à un accroissement du psychisme est doué d'une valeur de sélection hautement positive." (A9 page 164 et 165)

Les causes de l'invasion terrestre

A partir du moment où le groupe des Actinoptérygiens se constitue, son adaptation au milieu aquatique est telle qu'il règne en maître sur toute les niches marines et fluviales.

Les Crossoptérygiens sont trop mal armés pour s'opposer victorieusement à cette concurrence. Ils n'ont alors que trois issues possibles:

La première est de se réfugier dans les habitats excentriques, à faible compétition. C'est ce que fit le Coelacanthe, en **occupant une zone relativement profonde et limitée** au canal du Mozambique. nous avons vu que ce "comportement de refuge" avait permis à beaucoup d'espèces archaïques, mais plus ou moins spécialisées, d'arriver jusqu'à nous.

La deuxième éventualité fut de disparaître: triste sort de la plupart des représentants de ce groupe, peu à peu privés des ressources indispensables à leur subsistance.

La troisième possibilité, la plus heureuse pour nous, fut de subir quelques transformations leur permettant d'aller occuper un milieu encore vierge, ou tout au moins à faible compétition. C'est ainsi que certains s'installèrent sur la terre ferme. Leur organisation et en particulier **la possession de nageoires plus ou moins utilisables pour la marche et la disposition d'un poumon même très élémentaire, les y engageait**. Cette conquête, bien modeste au début, fut réalisée par une lignée de Crossoptériens, les Rhipidistiens, qui avaient acquis en outre des narines internes (chaones)." (A9 page 168 et 169)

faible Multitude de Degrés de Liberté active



faible Multitude de Variétés de Conditions



Faible Multitude de Variété d'informations subjectives



pas d'évolution

changement de fonction (qualitatif)

"Nous venons de voir comment, depuis les premiers temps de la vie, la transformation des espèces était allée de pair avec l'organisation de niches écologiques nouvelles. Cette diversification procurait un supplément de ressources et diminuait la compétition.

Ces deux facteurs: augmentation des ressources et diminution de la concurrence, sont doué d'une forte valeur de sélection positive. Ils rendent compte de la dynamique permanente du mouvement évolutif."(A9 p. 170)

..."C'est au prix de ces perfectionnements, souvent complexes(dispositifs de régulation thermique etc.), que ces animaux qui pourront survivre à l'air libre. Mais une fois franchi cet "examen de passage", après avoir acquis l'équipement qui leur permet de résister aux grands contrastes de l'écologie terrestre, ils accèdent à un monde nouveau d'une extrême richesse et d'une grande variété, ce qui a constitué un puissant facteur de spéciation." (A9 page 175)

Cette aptitude des reptiles à coloniser la plupart des biotopes terrestres fut liée, en grande partie, à leur faculté de se reproduire hors du milieu aquatique, grâce à la structure amniotico-allantoïdienne de leurs oeuf. c'est elle qui leur permet de " pousser des reconnaissances" dans toutes les zones de la terre ferme, y compris les plus sèches, et d'entreprendre la colonisation du milieu aérien." (A9 page 201)

"fondamentalement, l'apparition de la classe des Oiseaux tient à la conquête d'une nouvelle zone écologique très singulière: l'espace aérien. Les oiseaux typiques volent; Munis d'un puissant bréchet sur lequel s'insèrent les muscles alaires qui peuvent battre vite et longtemps, ils forment le vaste groupe des carinates (du latin carina: carène). Mais les oiseaux n'en sont pas restés là; en vertu d'une puissante dynamique évolutive, ils ont tenté de coloniser, souvent avec succès, des habitats périphériques. Deux sont à retenir: l'habitat aquatique et l'habitat terrestre." (A9 page 220)

Origine de la substitution de l'acquis à l'inné

L'apparition progressive de comportements acquis semble tenir au fait que, chez les Oiseaux et les Mammifères, les adultes doivent s'occuper des jeunes, au moins pendant un temps. Un têtard qui vient de naître, une jeune tortue qui sort de l'oeuf, n'attend rien de ses parents. Les adultes ne la reconnaissent pas. Dans ces groupes, le jeune qui arrive au monde doit se "débrouiller" tout seul. Pour cela, il porte dans son patrimoine génétique tous les programmes qui lui permettent de répondre aux exigences de la vie. Il "sait" rechercher sa nourriture ou se protéger par la fuite d'une façon aussi précise que celle qui le conduit à utiliser son glucose ou à respirer. **Rien de tel chez un oisillon ou chez un petit mammifère qui, séparé de ses parents à la naissance, n'a aucune chance de survie. Pour se tirer d'affaire, il doit rester auprès des adultes pendant la première période de son existence, afin de recevoir chaleur, nourriture, protection et exemple. C'est pendant cette phase de jeunesse et de croissance que l'individu se révèle particulièrement sensible à tout ce qu'il perçoit dans son environnement. Il enregistre, s'attache imite, fait et refait les geste des adultes qui l'entourent. Ainsi sur un fond de comportements innés inclus dans le patrimoine génétique, vient se fixer une série de comportements appris qui peuvent varier au gré des besoins.**(A9 page 229)

"Ainsi ce qui caractérise les sociétés de vertébrés supérieurs où les comportement innés ne sont pas seuls à intervenir mais se doublent de comportement acquis, c'est leur plasticité et leur aptitude à s'adapter sans cesse aux conditions de l'environnement. N'étant pas piégés dans des programmes rigides, comme les sociétés d'insectes, elles gardent la faculté de modifier à tout moment les relations entre individus pour les ajuster aux variations des contraintes écologiques.

**diversification
=
adaptation relationnelle
(fonctionnelle)
à une niche**

**Multitude de Variétés
de Conditions (relationnelles)**



**Multitude de Variété
de Produits (fonctinnels)**

**les trois grands espaces:
la mer, la terre, l'espace aérien**

**apprentissage
=
Auto-organisation Orientée
inter individus
(d'une espèce)**

Elles peuvent aussi changer leur structure et leur effectif dans le sens qui convient le mieux aux situations rencontrées. Et au sein même du groupe, chacun peut changer de position suivant les circonstances. Cette faculté de l'adaptation permanente de l'individu à l'intérieur même du cadre social fait qu'il conserve à tout moment sa faculté d'optimiser son rôle en fonction de ses capacités et des besoins de la collectivité. " (A9 page 241)

Le comportement territorial

..."le cantonnement de chaque couple dans une aire bien délimitée diminue les chances de rencontre et donc de conflit entre individus."

"En outre, le fait d'occuper un même territoire pendant une durée assez longue permet de bien le connaître, d'en explorer efficacement les ressources, d'en mieux apprendre la topographie, mise à profit pour se protéger des prédateurs et fuir de manière efficace en cas de besoin." (A9 page 233)

La socialisation du groupe et la hiérarchie

"Dans ces groupes (Oiseaux, et nous le verrons plus loin, Mammifères), l'individu a une tendance innée à s'intégrer dans une "pyramide sociale". Il conçoit l'existence de "supérieurs" et d'inférieurs qui l'encadrent et le sécurisent. Sans eux, il est perdu. Mais l'hérédité ne lui indique pas quels sont ces "chefs" et ses "subordonnés". Seule une expérience individuelle, véritable apprentissage social, le lui apprendra"...

"La hiérarchie qui assure l'ordre et évite les conflits sanglants et le gaspillage constitue un avantage pour tout le groupe." (A9 page 240 et 242)

la spéciation

la spéciation apparaît aujourd'hui comme un phénomène quasi continu, affectant toutes les lignées. Son succès, sa diversité dépendent avant tout du nombre de niches disponibles au moment où le phylum "jeune" vient au monde. Certains groupes rencontrent des circonstances favorables et explosent en rameaux multiples. D'autres au contraire arrivent dans une conjoncture beaucoup moins accueillante: ils tentent de persister soit sous la forme du type primitif, soit à la faveur de quelques adaptations secondaires.

Ce schéma, maintenant admis par la plupart des populationnistes, est le plus satisfaisant, même si l'on doit avouer que tous les facteurs qui provoquent l'ascension, l'explosion, ou l'extinction de certaines lignées ne nous sont pas connus.

Il permet d'entrevoir le point unissant micro et macro-évolution. Toutes deux ressortent du même mécanisme: celui de la spéciation continue, qui tend à exploiter sans cesse des niches nouvelles. Mais la micro évolution caractérise des groupes voisins, séparés depuis peu, qui ont conservé une grande partie d'informations génétiques communes et ne se singularisent que par quelques menus détails adaptatifs. Elle s'applique à des espèces regroupées dans des niveaux taxonomiques inférieurs: c'est à dire appartenant à un même genre, une même famille, voire une même classe. La macro-évolution ne diffère pas de nature, mais d'ampleur. Elle caractérise des groupes depuis longtemps séparés, qui ont subi chacun une "cascade de spéciation" dans des directions différentes et présentent une portion commune d'informations génétiques beaucoup plus réduite. L'ancienneté même de cette divergence explique son ampleur. Elle rencontre du fait que beaucoup de stades intermédiaires, qui pourraient nous révéler la manière dont on est passé d'un type d'organisation à l'autre, sont pour nous à jamais perdus. Ils s'enfouissent trop loin dans le passé." (A9 page 74)

**spéciation relationnelle sociale
inter-animale**

hiérarchie

=

Auto-organisation Orientée

spéciation

=

**adaptation relationnelle à
une niche spécifique**

Le sens de l'évolution transpécifique

Le sens de ce que l'on appelait naguère la micro-évolution apparaît clairement: c'est la tendance à une meilleure adaptation à la niche écologique et, éventuellement à l'organisation de nouvelles niches. Nous venons de voir que la macro-évolution, ou typogénèse n'était pas fondamentalement différente, puisqu'elle se résout en micro-évolutions étalées sur de longues périodes.

Toute fois, si l'on considère l'ensemble du règne animal, l'évolution présente, à long terme, un sens très précis: celui du développement régulier du système nerveux et de l'accroissement du psychisme. Ce phénomène a été d'abord noté chez les vertébrés: mais on l'observe à tous les niveaux. Il n'y a aucune commune mesure entre le psychisme d'une huître ou d'un escargot et celui d'un céphalopode, un poulpe par exemple, pourvu d'un véritable petit cerveau enfermé dans une boîte crânienne cartilagineuse, qui rend l'animal capable de reconnaître des figures géométriques et d'adopter des comportements compliqués. Les mêmes changements se retrouvent chez les arthropodes dont les derniers représentants terrestre, les insectes, s'organisent en sociétés complexes (abeilles, termites, fourmis). Mais ils sont encore plus nets tout au long de l'embranchement des vertébrés: ils culmine chez les hominiens, pourvus de facultés mentales très développées.

Même les prostites à l'autre bout de l'échelle, montre une tendance identique. Ceux-ci, réduits à une seule cellule, ne possèdent pas de système nerveux à proprement parler. Mais ils portent des formations cytoplasmiques (organites et organelles), qui en tiennent lieu et assurent des fonctions sensorielles ou motrices. Ce sont de petits granules reliés par des filaments de communication faits d'un épaississement du cytoplasme. Les plus évolués, les ciliés, présentent à leur surface des franges de cils capables de battre de façon synchrone en donnant des ondulations qui permettent à l'individu de se déplacer rapidement. Et ces déplacements ne se font pas au hasard, mais en fonction de certains stimulus (chaleur, lumière, vibrations). On a pu dresser des ciliés, en associant par exemple un éclair lumineux à un choc électrique, ce qui déclenche une réaction de fuite et peut, à la longue, créer un réflexe conditionné (le cilié continue à fuir sous l'effet de l'éclair, en l'absence de tout choc électrique). **Ces prostides sont doués d'une certaine mémoire associative.**

Si l'on considère l'ensemble du règne animal, le développement du psychisme suit un double mouvement:

1°) **Un mouvement quantitatif:** en se perfectionnant, le système nerveux permet à l'animal d'accumuler des comportements de plus en plus nombreux et de plus en plus précis. Nous avons vu que les caractères comportementaux se situent à l'interface individu/environnement et sont les premiers à s'exposer à la sélection naturelle. Confronté à une exigence nouvelle, l'animal tend d'abord à adapter son comportement. Les autres modifications, qui portent sur le caractère physiologique ou morphologique, interviennent plus tard, si la réponse éthologique se révèle insuffisante. C'est d'abord grâce à des comportements appropriés que le milieu peut être exploité de façon efficace. D'où leur importance.

2°) **Un mouvement qualitatif:** en se développant, les comportements changent de nature. Au début (et surtout chez les invertébrés), ils obéissent à des programmes génétiques. Ils sont le fruit de la sélection naturelle et inscrits dans le patrimoine héréditaire, au même titre qu'un organe ou une fonction. Dès un certain seuil, franchi surtout par les vertébrés homiothermes, certains comportements tendent à devenir acquis. Ils ne dépendent plus de combinaisons génétiques nouvelles, mais de l'expérience. Ils ne sont pas dictés par un programme, mais emmagasinés dans la mémoire. Ce relaiement de l'inné par l'acquis représente un temps essentiel de l'évolution et mérite que l'on s'y arrête un moment.

**Auto-organisation Orientée
inter fonctions relationnelles**



mémoire vivante

**évolution relationnelle
avec l'environnement
(Multitude de Variétés
de conditions)**

êtres pluricellulaires



**Multitude
de Degrés
de Liberté
active**

**commandes à distances:
système nerveux, hormonale,
etc...**



**Auto-organisa-
tion Orientée**

mémoire vivante

Conséquence du développement du système nerveux

Dans un monde voué à la loi de la lutte et de la prédation, où l'individu oscille sans cesse entre la situation de "mangeur" et la situation de "manger", les espèces qui sont le mieux renseignées sur le monde extérieur sont les plus avantagées: dans une situation donnée, elles peuvent réagir efficacement et vite. En définitive, ce sont les animaux dotés des organes sensoriels les plus développés (les meilleurs capteurs), de systèmes d'intégration capable de "choisir" la décision la plus juste et de déclencher le comportement le plus adapté, qui ont la plus grande chance de survie.

Le système nerveux s'accompagne toujours de la différenciation des organes d'intégration et de régulation, ce qui libère l'animal des contraintes de l'environnement. Il devient plus disponible, acquiert des comportements moins rigides, plus souples, et donc mieux ajustés. L'homéothermie n'est qu'une forme de l'homéostasie: elle libère en partie oiseaux et mammifères des contingences climatiques et saisonnières, auxquelles reptiles et batraciens demeurent étroitement soumis. (A11 page 58)

Dans le mouvement évolutif, le système nerveux se comporte assez différemment des autres organes. D'une manière générale, l'hypertrophie d'un appareil (et de la fonction correspondante) se traduit toujours par un certain degré de spécialisation qui a pour résultat d'adapter plus étroitement l'individu à un certain milieu et à un certain mode de vie. On l'a vu: cette tendance spécialisante constitue l'une des bases fondamentales de la micro-évolution. Mais **le système nerveux est le seul appareil qui puisse subir un développement considérable sans impliquer la spécialisation organique de l'individu.** Accroissement du système nerveux et du psychisme constituent le fondement même de la macro-évolution. Disons, en schématisant à peine, que la macro-évolution n'est qu'une spécialisation vers le psychisme. (A11 page 33)

La loi du relaiement

cette tendance au relaiement, que l'on croyait naguère propre aux vertébrés supérieurs, est observée, au moins à l'état d'ébauche, dans de nombreux groupes. Mais elle est surtout marquée chez les oiseaux et les mammifères et culmine chez les hominiens. Elle constitue un avantage sélectif certain.

En effet, les comportements innés, liés à un programme génétique, sont rigides et difficilement modifiables puisque leur changement implique la remise en cause des fréquences de certains allèles, voire même l'apparition de nouvelles combinaisons. Cette transformation, qui suit la voie de la reproduction sexuée, exige de multiples générations et s'étale sur un temps très long. On devine tout ce qu'elle suppose d'aléatoire.

Les comportements appris sont de nature et de portée très différentes.

A partir d'un certain niveau de psychisme, l'animal peut concevoir lui même la réponse à donner et modifier aussitôt son comportement dans le sens voulu. Il devient capable de s'adapter très vite à tout changement de situation, sans attendre la mise en place, longue et problématique, de systèmes génétiques triés par la sélection. Et si l'ambiance varie encore, l'animal qui vit dans le domaine de l'acquis modifie à nouveau ses caractères éthologique. Il n'est prisonnier d'aucune contrainte organiques. Certes, les comportement acquis sont fragiles: ils peuvent s'en aller aussi vite qu'ils sont venus. Mais cette fragilité même fait leur valeur. Dans un milieu qui fluctue sans cesse, cette non fixité leur confère une efficacité exceptionnelle.

une fonction qui informe (à distance) de la relation avec le monde extérieur et qui coordonne ces informations

échange d'information horizontal entre les fonctions relationnelles

Comportements acquis et société

Le développement mental entraîne l'apparition de facultés de communication, grâce auxquelles les individus peuvent quitter le statut de solitaire et s'organiser en groupes sociaux. Nous avons étudié l'avantage immense conféré par le statut social. **Alors que l'animal solitaire doit faire face à toutes les nécessités de la vie (nourriture, aménagement de l'espace, défense, reproduction) l'individu social se consacre presque toujours à une activité préférentielle, pour laquelle il présente un rendement bien plus élevé que celui vivant isolé.** Nous verrons que l'ouvrière d'un essaim récolte infiniment plus de nourriture qu'un insecte seul: car elle ne cherche pas unique ment à couvrir ses besoins, ce qui serait vite fait, mais à satisfaire ceux de toute la ruche. Par contre, elle n'a pas à s'occuper de la reproduction: la reine s'en charge pour elle. **Ainsi l'animal social n'est plus livré à ses propre ressources: il profite de l'activité de l'ensemble du groupe.** Un babouin n'est pas renseigné sur le monde extérieur uniquement par se yeux et ses oreilles; il reçoit des informations perçues par les autres. Un cris d'effroi poussé par un seul membre de la troupe est compris de tous et les met aussitôt en alerte. **Si les avantages sociaux sont toujours considérables, la nature de la société et la porté du fait social diffèrent beaucoup selon qu'elle réunit des individus à comportement innés (insectes sociaux) ou des individu qui ont au moins en partie, des comportement acquis (oiseaux, mammifères).**

En effet, les sociétés du premier type réalisées chez les insectes (abeilles, termites, fourmis) constituent des systèmes rigides, cimentés par des liens organiques, au sein desquels chaque sujet ne jouit d'aucune liberté, ne dispose d'aucun choix. La ruche ou la termitière figure une sorte de super-organisme, dans lequel chaque participant est aussi rigoureusement programmé que les cellules intervenant dans la programmation de l'animal. Certes, on a signalé parfois un changement de statut pouvant intervenir au cours de la vie d'un même sujet: chez certaine guêpe par exemple. mais cela constitue l'exception et ne répond à aucune décision "volontaire". Il n'en est pas ainsi à partir du moment où les vertébrés supérieurs commencent à substituer des comportement acquis aux comportements innés; la nature du ciment social change. **Désormais, l'animal n'est plus condamné à accomplir toute sa vie les même gestes, comme l'ouvrière qui butine. Il n'est pas prisonnier de ses comportements qu'il peut modifier pour les adapter aux circonstances. Il le fait en fonction de ses expériences passées, mais aussi de ce qu'il voit autour de lui. Il mémorise et apprend. Il change se méthodes, oriente et affine ses stratégies. Et, à son tour, il communiquera ses propre inventions aux autres, qui pourront les adopter par l'exemple et l'imitation.**

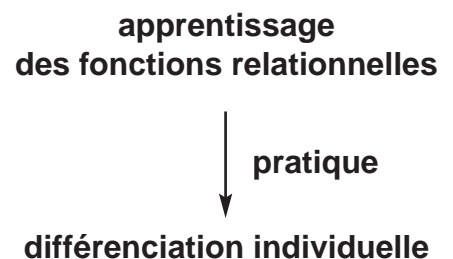
Désormais, chaque membre du groupe a une histoire qui lui est propre, faite de toutes les expériences qui lui sont connues, et qui lui confèrent une personnalité. Au polymorphisme génétique s'ajoute un polymorphisme culturel. A ce stade, l'être vivant est devenu un véritable individu. Contrairement au termite, à l'abeille ou à la fourmi, il n'est plus interchangeable avec son voisin. Sa vie constitue une aventure unique, sa mort crée un vide irréparable.

De plus, dans une société à comportement acquis, une situation n'est jamais définitive. Un individu n'est pas piégé dans le même statut, ou la même caste pour la durée de son existence. Il peut en changer au gré des circonstances et de sa volonté. Dans une troupe de babouin, un mâle dominant, qui jouit de l'exclusivité des accouplement (ou presque) n'est pas sur de conserver se privilège toute sa vie.

....La souplesse de la société à comportement acquis n'intéresse pas seulement l'individu; elle affecte aussi les structures.

L'organisation de la ruche ou de la termitière n'a sans doute pas changé depuis des dizaines de millions d'années. En moins d'un demi-

Auto-organisation Orientée



siècle, les français ont connu cinq constitutions, trois républiques, une dictature (Pétain), un régime provisoire; sans compter les retouches constitutionnelles.

Chez les vertébrés supérieurs —oiseaux et mammifères—, la somme des comportements acquis transmis par l'exemple de génération en génération, modifiés et enrichis au cours des temps, constitue la protoculture. Elle devait exister déjà chez quelques-uns des derniers reptiles du secondaire qui vivaient probablement en groupes plus ou moins socialisés. Son volume augmente chez l'homme ou elle constitue la culture, différenciée en civilisations. (A9 page 79 à 84)

L'évolution biologique

Ce chapitre traite du développement et de l'extension de l'évolution biologique sur la Terre. Tout le développement du métabolisme interne est basé sur l'Auto-organisation Orientée. Il y aurait beaucoup à dire sur la différenciation cellulaire et le mécanisme d'expression des gènes, comme de toute façon la logique reste la même (Auto-organisation Orientée), je ne développerai que trois thèmes:

- 1) la loi de l'extension de la vie
- 2) la naissance du Système Nerveux Centralisé, la production des images cérébrales et la mémoire vivante
- 3) la socialisation de la vie animale

1) la loi, que j'ai définie en introduction, est que l'extension du vivant est directement «proportionnel» à la MDV et à la MV. La reproduction sexuée (auto-organisation) a contribué à augmenter la Multitude de Variété. Le développement de la vie est l'histoire de la conquête de la terre par le biologique et les animaux les plus évolués (les mammifères) sont ceux qui ont une MDL active la plus développée. Ceci s'accompagne d'un génotype plus riche. Au contraire les espèces plus spécialisées à une niche ont un génotype moins riche et donc en plus une moindre capacité d'évolution.

C'est l'individu qui est confronté à l'environnement mais c'est la reproduction sexuée qui assure la transmission horizontale de l'information génétique, la Multitude de Variété d'Information subjective (et donc le polymorphisme) et la transformation de qualité en quantité des nouvelles fonctions. Le mécanisme de la spéciation, qui est résumé page 59, explique l'apparition des grands phylums et la division des ces phylums en espèces etc... C'est la logique de la dépendance aux conditions d'origine (liée à l'Auto-organisation Orientée) qui explique cette division arborescente.

Il est facile de comprendre que toute spéciation trop importante limite la capacité évolutive parce qu'elle implique une spécialisation de la Multitude de Variété de l'information génétique. Pour l'illustrer on pourrait dire : il existe une infinité de nombres entre 1 et 5 de même entre 3 et 7 ou entre 9 et 15, mais si l'on considère ces nombres comme des informations, il est facile de comprendre qu'entre 1 et 15 il y a plus d'information disponibles qu'entre 3 et 7 par exemple et donc une capacité d'évolution plus importante et/ou d'adaptation plus importante, donc un MDL actif plus développé.

Toute spécialisation à une niche bien précise limite le MDL actif. Rien d'étonnant à ce que certains singes, qui justement n'étaient pas contraints à une niche très spécifique soient nos ancêtres. Les singes «savent faire beaucoup de choses» mais ne sont» spécialistes en rien»,. en plus, ce sera abordé plus tard, ils ont une vie sociale importante.

2) la naissance du Système Nerveux Centralisé (SNC)

Dès l'apparition de la spécialisation cellulaire, une coordination centralisée de l'Auto-organisation Orientée du métabolisme va devenir indispensable (d'ailleurs même chez les animaux uni cellulaires).

Le propre du développement animal est sa relation active avec l'environnement. C'est pourquoi pour développer une MDL active, la spécialisation cellulaire va de paire avec le développement des sens et avec un outil indispensable à la coordination (Auto-organisation Orientée) inter sens: le SNC

C'est la seule possibilité d'une réponse immédiate à l'environnement. Le SNC va permettre, grâce à la structuration des synapses (voir chapitre suivant), la formation de la mémoire vivante.

3) La vie sociale

Cette capacité de mémoire vivante va permettre l'apprentissage et une structuration (hiérarchie) sociale. Le SNC va permettre de passer, de la simple auto-organisation inter individus basée essentiellement sur la

reproduction, à l'Auto-organisation Orientée inter individus.

Je suis entièrement d'accord sur l'amélioration adaptative considérable que permet le SNC: apprentissage, vie sociale, etc. Mais je pense que ceci est l'évolution logique (l'apogée) du métabolisme biologique d'Auto-organisation Orientée de molécules producteur de fonctions. Je ne pense pas, qu'à ce stade l'on puisse parler de substitution de l'acquis sur l'inné (qui pour moi n'apparaîtra qu'avec l'homo).

La production des ARN n'est pas en soit la substitution du métabolisme biologique sur le minéral. Il en est de même avec le SNC et la substitution sur l'inné.

A ce stade, pour évoluer, conquérir de nouvelles niches, l'évolution passe encore par la spéciation. Ce n'est qu'avec l'homo que se fera la rupture acquis/inné par un fonctionnement différent du cerveau. C'est ce que j'essaierai de montrer dans le prochain chapitre

On peut dire, qu'au moment de l'apparition des primates (65 à 70 millions d'années) toute la Terre était envahie par la vie et que toutes les principales espèces existaient. Le développement biologique d'un point de vue de la création des fonctions relationnelles avec la Terre avait donc atteint son seuil maximal. Il n'y aura plus de grande évolution d'un point de vue de création de fonctions biologiques même si de nouvelles espèces se sont créées. C'est au niveau du fonctionnement du cerveau que l'évolution deviendra révolution.

MDL active maximale (de tout le vivant) —————> Multitude de Variétés de Fonctions biologiques maximales (de tout le vivant)