

BULLETIN MENSUEL
DE LA
SOCIÉTÉ LINNÉENNE DE LYON

FONDÉE EN 1822

RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE PAR DÉCRET DU 9 AOUT 1937
des SOCIÉTÉS BOTANIQUES DE LYON, D'ANTHROPOLOGIE ET DE BIOLOGIE DE LYON
REUNIES

et de leurs GROUPES REGIONAUX : ROANNE, VALENCE, etc.

Siège social et Secrétariat général : 33, rue Bossuet, 69006 Lyon

TRESORERIE :

T A R I F 1 9 7 7

Abonnement France	50 F
Membre scolaire	25 F
Abonnement Etranger	55 F
Changement d'adresse, inscription ou réintégration en sus	7 F

N.B. — Les virements à notre C.C.P. LYON 101-98 ou les chèques bancaires, doivent être rédigés au nom de la SOCIÉTÉ LINNÉENNE DE LYON.

SOMMAIRE

VIETTE P. — Nouvelles espèces de Géométrides madécasses	63
DUFAY Cl. — Désignation du lectotype de <i>Lasiocampa suberifolia</i> Duponchel (Lépidoptères, <i>Lasiocampidae</i>)	69
CAPELLANO A. — Ornementation de la spore de <i>Lyophyllum leucophaeatum</i> (Karst.) en microscopie électronique par transmission	70

Le texte qui suit est une synthèse entre la communication faite en 1976 à la Société Linnéenne de Lyon par M. Louis DAVID et le discours de réception qu'il prononça le 25 janvier 1977 devant l'Académie des Sciences, Belles Lettres et Arts de Lyon.

ORIGINE ET DEBUTS DE LA VIE SUR LA TERRE

par Louis DAVID.

Depuis que les hommes ont acquis les mécanismes de la pensée et ensuite développé une pensée de plus en plus abstraite, leur esprit s'est essayé à résoudre de nombreux problèmes parmi lesquels ceux de l'origine de l'homme et de l'origine de la vie sur la terre sont des plus fascinants. Retracer ce chapitre de l'histoire de la connaissance serait passionnant car jusqu'au XIX^e siècle (et parfois encore de nos jours) la science fut étroitement mêlée aux philosophies et aux religions. Ce serait malheureusement trop long et hors de notre propos.

Les progrès considérables et accélérés de sciences aussi différentes en apparence que l'astronomie, la biochimie et la géologie ont apporté récemment des éléments dont la juxtaposition constitue dès aujourd'hui une théorie cohérente de l'origine de la vie. Comme l'origine de cette vie remonte à un lointain passé les sciences comme l'astronomie, la biologie, la biochimie, ne peuvent fournir que des *modèles*, expérimentaux ou observés; de leur côté les sciences géologiques et en particulier la paléontologie apportent les témoins du passé donc les *preuves* qui peu à peu renforcent la théorie.

Avant d'examiner les phénomènes qui constituent les débuts de la vie sur la terre, il convient de préciser dans quel cadre ils se situent. L'unité de mesure du temps géologique est le million d'années (Ma). L'histoire de la terre est relativement bien connue du début de l'ère primaire jusqu'à nos jours; or l'ère primaire a commencé avec la période dite « Cambrien » vers — 560 Ma. Auparavant les temps plus anciens sont appelés « Antécambrien »: ils représentent les 7/8 de l'histoire depuis que la planète a commencé à se solidifier. La première croûte remonterait à — 4500 Ma car les roches les plus anciennes connues approchent 4 milliards d'années.

La connaissance de l'Antécambrien est très difficile car les roches ont toutes subi une recristallisation plus ou moins profonde (on dit un métamorphisme) qui a détruit beaucoup de leurs caractères et en particulier les traces de vie.

Par ailleurs le monde vivant (la biosphère) est composé d'organismes dont le degré de complexité est plus ou moins grand. Cette complexité structurale se hiérarchise en paliers d'organisation encore appelés « Stégies »; il y a 8 stégies depuis les organismes unicellulaires les plus simples, sans noyau, jusqu'aux végétaux vasculaires et aux animaux triblastiques coelomates.

L'histoire antécambrienne de la vie peut aisément être divisée en 6 étapes successives.

1^{re} étape : apparition des molécules organiques.

Si l'apparition de la vie semble déjà aujourd'hui avoir perdu son mystère, il n'en va pas de même de l'origine de l'univers, mais nous n'avons pas le loisir de traiter un sujet aussi captivant quoique encore bien hypothétique. Nous admettrons que la condensation de notre système solaire à partir d'un nuage de gaz et de poussières a conduit à leur concentration sous forme de proto-planètes puis de planètes : les forces de gravitation créent un gradient parmi les matériaux, les plus lourds au centre, les plus légers à la périphérie. Ainsi la terre possède ses éléments les plus denses en son noyau et elle acquiert tout naturellement une double nature : solide à l'intérieur, gazeuse à l'extérieur. Il ne faut pas oublier que cette planète reste liée au soleil selon un système énergétique ouvert.

Selon une pure estimation cette *évolution cosmique* se situerait entre — 6000 et — 4500 Ma.

La terre peut alors être comparée à un gigantesque et merveilleux réacteur chimique :

1. *la source d'énergie* est évidemment le soleil qui diffuse un rayonnement intense, de l'infrarouge à l'ultraviolet et au-delà. Quelques énergies accessoires sont représentées par la chaleur (volcans), la radioactivité des roches et les décharges électriques (éclairs).

2. *le réacteur* possède un fond, la croûte terrestre en voie de formation, et des parois fictives résultant du champ de gravitation qui retient tous les constituants de l'enveloppe gazeuse.

3. *les réactifs* sont les molécules qui constituent cette enveloppe gazeuse. Or les gaz résultent de la condensation directe du nuage cosmique et de la diffusion à partir de la partie solide qui se contracte. Dans un milieu où domine l'hydrogène ne sont stables que le méthane (CH_4), l'ammoniac (NH_3), l'eau (OH_2) et l'hydrogène (H_2) ; issus de l'écorce il devait y avoir aussi l'hydrogène sulfuré (SH_2) et peut-être des gaz carboniques (CO et CO_2). Une telle enveloppe gazeuse est appelée *pneumatosphère*.

4. *la réaction* s'effectue selon les lois chimiques connues aujourd'hui. Tout repose sur les possibilités d'ouverture et de fermeture des liaisons entre les atomes. Les radiations solaires (photons) peuvent rompre les liaisons des atomes H et donner ainsi des molécules tronquées appelées *radicaux libres*. Ceux-ci sont très réactifs : ils se recombinaient très vite entre eux en donnant des molécules plus complexes. L'expérimentation va nous renseigner sur ces molécules.

5. *les produits* de la réaction s'accumulent dans les couches les plus basses de la pneumatosphère et à la surface de la terre. Cette localisation protège les molécules des radiations qui peuvent les briser ; mais le système reste ouvert et les molécules brisées se recombinaient à nouveau : on dit qu'elles ont une stabilité dynamique. N'oublions pas que les produits de réaction puisent en eux-mêmes les facteurs de leur conservation (puisqu'il n'existe ni oxygène pour les brûler, ni êtres vivants pour les absorber).

Un tel système chimique réactif est aisé à reproduire expérimentalement. C'est à une simulation des réactions primitives dans la pneumatosphère que se sont attachés des savants aussi célèbres que MILLER ou CALVIN. A la suite de ces pionniers c'est à un véritable inventaire des produits possibles que se sont livrés TOUPANCE et ses collaborateurs. En faisant varier les proportions des composants de la pneumatosphère, en combinant les effets des diverses sources

d'énergie, les divers auteurs ont montré que deux composés seulement servaient de point de départ aux molécules organiques complexes :

l'acide cyanhydrique (méthane + ammoniac) ;
le formaldéhyde (méthane + eau).

An delà de ces deux composés apparaissent des hydrocarbures en C₂, C₃, C₄ ou C₅, des composés azotés, l'acétaldéhyde, le méthanol, l'acide acétique, quelques corps soufrés...

La liste des produits est donc relativement longue, mais aucun composé d'intérêt biologique n'existe à ce stade.

Cette première phase de l'évolution chimique ou prébiotique (dite aussi abiogène) durerait environ 500 Ma.

2^e étape : complication des molécules organiques.

La deuxième étape est consécutive à une modification précoce mais profonde de la surface de la terre : l'apparition de l'eau liquide. Lorsque la température périphérique du globe s'abaisse au-dessous de 100°, l'*hydrosphère* s'isole de l'*atmosphère*. Isolement progressif, cycle de l'eau encore rudimentaire et accéléré, « mers » occupant les dépressions d'une écorce terrestre craquelée : notre réacteur est en partie rempli d'eau.

Non seulement les eaux de pluie drainent les molécules organiques de l'atmosphère et lessivent celles de la surface terrestre mais l'eau déposée va être le milieu idéal pour les nouvelles synthèses organiques. En effet le milieu aqueux se prête beaucoup mieux que le milieu gazeux aux réactions chimiques : l'eau va renfermer des matières minérales issues de l'écorce terrestre et mettre ainsi de nouveaux ions à la disposition des réactions (alcalins : K, Na... ; halogènes : Cl...). D'autre part certains ions métalliques ont joué le rôle de catalyseurs tandis que d'autres particules (argiles) servaient de support aux molécules organiques. On a même imaginé que l'asymétrie moléculaire, caractère du monde organique, aurait été induite par l'asymétrie de certains réseaux cristallins (?).

Donc un nouveau milieu, l'hydrosphère et une date encore hypothétique : entre — 4000 et — 3800 Ma.

C'est encore l'expérimentation qui va nous fournir des modèles. En 1953 MILLER obtient des acides aminés sous l'action d'étincelles électriques ; entre 1950 et 1960, CALVIN utilisa les électrons produits par un cyclotron et obtint des acides aminés, des sucres, de l'urée et... le prix Nobel.

Depuis 15 ans chacune des expériences de très nombreux chercheurs (ORO, FOX, ORGEL, PONNAMPERUNA, STEINMANN...) a apporté un fait, une idée, une interprétation. Nous n'en retiendrons que quelques exemples significatifs :

1. des molécules qui grandissent :

Les 20 acides aminés connus chez le vivant sont ainsi obtenus par synthèse. Or Fox les a chauffés à 170° en présence de morceaux de laves : ils s'attachent les uns aux autres en longues chaînes (plusieurs centaines) qu'on nomme *protéinoïdes* pour les différencier des *protéines* du vivant ; si les séquences d'acides ne sont pas les mêmes, les caractères et les propriétés sont rigoureusement identiques.

A partir du ribose, de l'adénine et de phosphate (sous ultra-violet) on obtient l'adénosine puis l'ATP (adénosine triphosphate) identique à celle du vivant (en fait AMP, ADP, ATP, A4P). On a aussi obtenu des nucléotides et des polynucléotides par enchaînement de 5 à 200 d'entre eux : mais l'ordre des séquences est encore anarchique ; il ne correspond à aucun code de type ARN

ou ADN ; et on est loin des 5 millions de paires de nucléotides de l'ADN actuel.

2. des molécules qui prolifèrent :

Certaines molécules sont leur propre catalyseur : lorsqu'elles sont formées elles induisent la formation de nouvelles molécules identiques. C'est le cas des porphyrines dans la famille desquelles entrera la chlorophylle. Cette notion d'autocatalyse est banale en chimie mais elle conduit pratiquement au concept biologique de reproduction.

3. des molécules à énergie mobile :

Sans entrer dans le détail, il existe des molécules où les liaisons multiples (double ou triple) successives laissent des électrons disponibles et mobiles le long de la molécule. On parle de molécules conjuguées.

4. des molécules qui s'isolent de l'eau :

De nombreux corps organiques possèdent des groupements attirant l'eau (hydrophiles) ou la repoussant (hydrophobes). Les lipides ont une extrémité hydrophile et une hydrophobe, d'où leur disposition automatique en sphère ou globule dans un milieu aqueux. D'autres corps et en particulier certaines protéines ont les mêmes propriétés.

En résumé, la complication des molécules organiques peut aller très loin mais toutes ces réactions créatrices de macromolécules sont réversibles. Pourquoi donc ces macrolécules se seraient-elles accumulées dans l'eau primitive ? Parce que si elles devraient être détruites en milieu statique (système isolé), elles durent en milieu dynamique (système ouvert). Cette stabilité dynamique s'appuie, à un certain niveau de complexité, sur la conjugaison moléculaire, l'auto-catalyse qui crée plus vite que la destruction, les liaisons inter et intramoléculaires qui forcent les protéines à s'enrouler en spirale ou en globule, etc... On trouve alors une plus grande probabilité d'existence pour certaines macromolécules qui s'accumulent et se compliquent sans cesse plutôt que pour d'autres qui disparaissent : c'est une *sélection biochimique*.

On remarquera que la succession des réactions chimiques au cours des 2 premières étapes a un caractère obligatoire compte tenu des conditions de la terre primitive : ce tout début de l'évolution vers la vie n'a rien d'aléatoire.

D'autre part, ces découvertes biochimiques des 25 dernières années ont apporté une éclatante confirmation à la vision des deux précurseurs que furent OPARIN et HALDANE entre 1920 et 1930.

Cette seconde étape de l'évolution prébiotique durerait elle aussi environ 500 Ma.

3^e étape : passage au vivant.

HALDANE avait trouvé imagé de baptiser « soupe chaude primitive » le milieu aqueux où s'accumulent les molécules organiques.

Il n'est guère possible de croire que des molécules dispersées puissent atteindre le niveau vivant. OPARIN avait émis l'idée que la vie pouvait naître au sein de gouttelettes individualisées dans l'eau : les *coacervats* (ou microsphères). En dissolvant dans l'eau une protéine (albumine) et de la gomme arabique on obtient des coacervats, isolés du milieu, dont la taille varie de 2 à 500 microns (comme les cellules vivantes) ; Fox a obtenu la même chose à partir de protéinoïdes nouvellement formés placés dans de l'eau chaude salée. Ces gouttelettes sont isolées du milieu par une membrane double.

On parlera de *microgouttes* ou de *protobiontes* selon la tendance philosophique de l'auteur.

Avec ces microgouttes apparaissent des unités individuelles. Il y a désormais deux domaines distincts : le milieu intérieur et l'environnement. Il s'installe des échanges sélectifs entre ces deux milieux. La nature chimique de chaque microgoutte lui est propre : chacune pourra durer, évoluer, disparaître.

La pénétration sélective de substances à travers la membrane préfigure une « nutrition ». Les réactions chimiques internes qui se dérouleront seront fonction de la concentration en certaines molécules, de la présence d'ions catalyseurs... Il y a relation étroite entre l'organisation de la microgoutte et la nature de la réaction qui s'y déroule. Certaines réactions sont génératrices d'énergie : le système est de type hétérotrophe. Cet échange permanent de matière et d'énergie avec l'environnement est un système ouvert qui assure une existence plus ou moins longue à la microgoutte (c'est la vie et la mort). Enfin les microgouttes peuvent grossir puis se fragmenter selon des causes internes, les nouvelles gouttes n'étant pas forcément identiques : on saisit alors un devenir différent pour chacune et l'importance de ce qu'on peut appeler une *sélection* passive.

Plus la microgoutte est complexe, plus la quantité d'énergie nécessaire à maintenir son ordre est importante. L'énergie est donc apportée par les substances organiques venant du milieu extérieur et l'élévation de température devrait favoriser les réactions ; mais cette dernière détruit les édifices complexes que sont les microgouttes : d'où l'importance que prendront les activateurs (ex. ATP) et les enzymes permettant aux réactions de se dérouler à basse température.

Le glucose, excellent « aliment » organique abondant dans la soupe primitive, n'est pas assez actif pour déclencher une réaction. Mais il est activé par l'ATP également présent dans le milieu. Cet ATP cède sa propre énergie dans l'opération (ADP) et c'est la *fermentation* (combustion lente du glucose en l'absence d'oxygène) qui le recharge : c'est actuellement une suite de 11 opérations qui peut s'effectuer hors du vivant.

Les 11 opérations de la fermentation actuelle sont en fait catalysées par 11 enzymes. Les enzymes accélèrent, synchronisent et régularisent les réactions chimiques. Sans entrer dans le détail de leur action, on comprendra qu'un système possédant des enzymes lui assurant une vitesse globale de réaction 100 fois plus grande drainera à son profit la majorité des matières nutritives ; le système dépourvu d'enzymes sera éliminé. On voit se développer encore le rôle de la *sélection*.

4^e étape : premiers organismes et stégie des Protocaryotes.

Les protobiontes sont donc isolés du milieu par une membrane, ils assurent le maintien ou le développement de leur système moléculaire en puisant des composés organiques dans le milieu. C'est la première des grandes fonctions vitales : l'*auto-conservation*. Et nous avons vu quel avantage sélectif représentait la rapidité des processus catalysés.

Nous avons aussi déjà dit que les microgouttes pouvaient se fragmenter. Si l'une des microgouttes les plus performantes sur le plan de la nutrition est de surcroît susceptible de se diviser en deux parties identiques, elle acquerra un autre avantage considérable : elle écrasera ne serait-ce que par le nombre celles qui seront incapables de se diviser. C'est la fonction d'*auto-reproduction*. A ce propos signalons que même les molécules les plus complexes comme les acides nucléiques (dont l'ADN) sont capables de duplication hors du vivant (expérience Kornberg 1957).

Enfin, si les premiers protobiontes trouvaient aisément dans le milieu les pièces nécessaires à leur croissance et à leur reproduction, ceux qui ensuite furent capables de réaliser par des synthèses internes ces pièces, obtinrent un avantage considérable. Cette *auto-régulation* garantissait alors l'auto-conservation et par-delà l'auto-reproduction. On trouve en cela l'idée qu'un codage de l'information exista dès le début dans certaines microgouttes, qu'il était alors très simple et qu'il se perfectionna lentement à mesure que se compliquaient les protobiontes-organismes jusqu'à aboutir au code génétique.

De toute façon les *organismes hétérotrophes* de *première génération* prolifèrent à un rythme tel que les synthèses organiques abiotiques n'arrivent plus à les nourrir : la soupe primitive devient de plus en plus claire.

Dès ce moment, des organismes susceptibles de fabriquer leurs propres aliments à partir de molécules simples, non organiques, vont naître, entrer en compétition avec ces premiers hétérotrophes et prendre peu à peu leur relais : ce seront des *Protocaryotes*, stégie primitive représentée aujourd'hui par les bactéries et les algues bleues (Cyanophytes).

La géologie va nous faire connaître enfin des jalons de cette évolution : — 3500 Ma : passage au vivant.

— *Microflore d'Onderwacht* (Swaziland) : — 3400 Ma ; sphéroïdes et filaments dans des argilites charbonneuses ; présence décelée d'un kérogène aromatique.

— *Microflore de Fig Tree* (Swaziland) : — 3100 Ma ; premier minerai de fer rubané connu (minerai en couches alternées riches et pauvres), résultat possible de l'activité de microorganismes. Dans un chert on trouve des sphéroïdes considérés comme des Cyanophytes coccoïdes (*Archaeosphaeroides barbertonensis*) et comme un bacille (*Eobacterium isolatum*).

— *Microflore de Bulawayo* (Rhodésie) : — 2800 Ma ; des organismes étoilés qui ressemblent à des sidérobactéries oxydantes du fer ou du manganèse (*Metallogenium*) ; ils seront indubitables à — 1900 ou — 1000 et vivent encore au fond des lacs de Carélie ; il leur faut de l'oxygène mais très peu.

— *Microflore de la formation de Soudan* (Minnesota) : — 2700 Ma ; dans des nodules charbonneux à la base d'une formation ferrifère on a des bactéries isolées et en chapelet.

— *Stromatolithes* : connus depuis — 2650 Ma en Rhodésie, ils ont leur apogée entre — 1600 et — 700 et vivent encore aux Bahamas ou en Australie. Ce sont des algues et bactéries mucilagineuses qui retiennent entre les mailles de leurs masses pseudo-coloniales des précipitations de carbonate de calcium ou d'autres particules sédimentaires. Il ne s'agit donc pas de vrais fossiles mais du résultat sédimentaire de l'activité d'organismes. Ceci n'empêche pas ces concrétions carbonatées d'avoir des formes diverses, classées en 6 grands types morphologiques, et des dimensions allant de quelques millimètres à des dizaines de mètres.

— *Microflore des quartzites de Southern Cross* (Australie) : — 2600 Ma.

— *Microflore du Witwatersrand* (Afrique du Sud) : — 2200 Ma.

— *Microflore du Birrimien de Côte d'Ivoire* : — 2000 Ma.

— *Microflore de Gunflint* (Ontario, Canada) : — 1900 Ma : dans des silex associés à du minerai de fer et à des stromatolithes on a découvert un des importants jalons du monde vivant. Les formes sont nombreuses et variées : *Gunflintia* est filamenteux à structure septée ou multicellulaire (algue bleue) ; de plus grands filaments cloisonnés sont voisins des Nostocs ; *Huronispora*, *Eosphaera* sont des formes ovoïdes ou sphériques, à structure radiée ou réti-

culée ; *Eoastrion* est un disque étoilé ressemblant à une sidérobactérie ; *Kakabekia* est analogue à une bactérie actuelle capable de vivre dans une atmosphère pauvre en oxygène mais avec méthane et ammoniac. Presque chaque forme rappelle, parfois de très près, des ferrobactéries, des eubactéries, des coques, divers types d'algues bleues, etc... La matière organique conservée renferme divers acides aminés. Il y a spéciation donc un code génétique. peut-être encore sommaire mais efficace.

— *Minerais de fer rubanés du Transvaal* : — 1900 Ma.

— *Charbons de Morrison Creek* (Michigan, U.S.A.) : — 1800 Ma ; véritables anthracites.

— *Shungite de Carélie* (Finlande) : — 1770 Ma ; roche carbonée avec le plus célèbre des « vieux fossiles » : *Corycium enigmaticum*.

De — 3500 à — 1600 Ma, pendant presque 2 milliards d'années, une vie incontestable que peu à peu jalonnent des fossiles, isolés des roches par les techniques modernes. On utilise aussi le rapport entre isotopes du Carbone pour s'assurer qu'il s'agit bien de carbone organique. Les similitudes avec les formes actuelles de bactéries et de cyanophytes sont frappantes mais quoi d'étonnant pour des volumes aussi simples que des sphères, des batonnets, des filaments et leurs variations. On n'a pas le droit de se fonder sur une similitude morphologique pour conclure à une identité de mode de vie.

Que pouvons-nous connaître de la physiologie des organismes durant cette immense période ?

— les *hétérotrophes de 1^{re} génération*, dérivant des microgouttes et se nourrissant aux dépens des molécules organiques de la soupe primitive, étaient seuls au début puis ils cohabitèrent avec les protocaryotes sans qu'on puisse fixer une date pour leur extinction totale ;

— les *protocaryotes* devaient être au départ anaérobies (pas d'oxygène ou très peu) : ce furent des *autotrophes* par chimiosynthèse. La chimiosynthèse ne fut certainement pas tracée en une voie unique (aujourd'hui plusieurs chimiosynthèses fonctionnent) et divers processus durent exister, certains pouvant avoir disparu. Parmi ces chimiosynthèses une place très privilégiée fut vite occupée par la *photosynthèse* : en effet elle peut partir du CO_2 , déchet de la fermentation ; elle ne demande aucun oxygène qui se trouve en fait être son principal sous-produit. D'autre part la chlorophylle est capable de stocker de l'énergie et de la restituer sous une forme facilement exploitable : cette source d'énergie interne a dû être très efficace pour améliorer des chaînes de réactions métaboliques.

On a retrouvé des produits de dégradation de la chlorophylle (pristane, phytane) vieux de 2700 Ma environ.

— Une partie de l'oxygène peut être d'origine abiotique, par exemple par action des rayons ultraviolets d'énergie élevée sur l'eau de la haute atmosphère. Mais tout cet oxygène était automatiquement réutilisé par diverses réactions chimiques (minerais de fer rubanés) ou biochimiques (organismes chimiosynthétiques) et ne reste jamais libre.

Seul le développement de la photosynthèse va conduire à la présence de plus en plus grande d'oxygène. Non seulement il sera disponible dans l'eau mais il diffusera dans l'atmosphère : la composition de celle-ci va changer progressivement ; elle va cesser d'être réductrice pour devenir oxydante ; elle va tendre vers sa composition actuelle : N_2 , CO_2 , O_2 , H_2O .

La géologie fixe entre — 1900 et — 1600 Ma le passage au caractère oxydant

car les premières roches ferrugineuses oxydées sont de cet âge, car les minerais de fer rubanés ont disparu.

— Cet oxygène atmosphérique va de plus donner naissance à une certaine quantité d'ozone rassemblée dans la haute atmosphère : or la couche d'ozone filtre les rayons solaires et arrête les ultra-violet. Ceci a une double conséquence : stopper les synthèses organiques originelles (dont les produits sont par ailleurs oxydés donc détruits) et permettre à la vie de se développer jusqu'à la surface de l'eau (et même théoriquement de pouvoir en sortir !).

Après l'eau, la présence d'oxygène excédentaire et d'ozone dans la haute atmosphère est le deuxième évènement particulièrement important dans l'histoire de la vie sur la terre.

5^e étape : passage des Protocaryotes aux Eucaryotes.

La cellule « eucaryote », qui est celle de la très grande majorité des êtres vivants, est particulièrement complexe. Elle se définit, en regard de celle des Protocaryotes, par la concentration de l'ADN qui s'isole avec une membrane autour de lui (noyau), par la présence de plastes et celle de mitochondries.

On a cherché à voir directement le noyau de cellules eucaryotes éventuelles. Or des sphéroïdes présentent un « point noir » : celui-ci peut être interprété comme le noyau (Schopf) (ou comme un chloroplaste ce qui revient aussi à admettre la cellule eucaryote). Mais on peut aussi interpréter le point noir comme un pore ouvert dans la paroi : pore par lequel le sphéroïde émettrait un mucilage.

On a également été tenté de voir la preuve de cellules eucaryotes dans le groupement de sphéroïdes en tétrades : ceci prouverait une division cellulaire par méiose, donc la sexualité, donc le noyau. On peut objecter que le groupement de cellules est fortuit par 2, 3, 4, etc...

Mais les structures que sont les plastes et les mitochondries rappellent étroitement par leur nature, et parfois leur comportement (division des plastes d'algues vertes), des microorganismes tels des bactéries ou des algues bleues. D'où l'hypothèse déjà presque centenaire d'une symbiose originelle entre de grosses cellules de pré-eucaryotes avec noyau et soit des bactéries (devenant mitochondries), soit des algues bleues (cyanelles devenant chloroplastes).

Cette hypothèse a-t-elle un support d'observation ? Des sphéroïdes de Mauritanie montrent la naissance de parois multiples, concentriques. Or ces parois sont susceptibles d'englober de petits organismes qui se trouvaient à la périphérie du plus gros : exemple l'association d'un *Africanosphaeroides* et de petits *Metallogenium* ; d'un *Asterosphaeroides* et de petits organismes évoquant les *Nostocs*, etc... L'incorporation des petits organismes peut ne pas être périphérique mais franchement interne : cas de *Synsphaeroides*. Ces incorporations paraissant constantes ont peut parler de symbiose probable (vie commune à bénéfique réciproque). De la symbiose à l'intégration physiologique totale il n'y a qu'un pas, facile à franchir lorsqu'on sait que cela existe encore chez certaines algues vertes actuelles.

Même si d'autres hypothèses plus récentes rejettent cette idée d'association d'organismes indépendants, les mécanismes qu'elles sont obligées d'évoquer restent comparables à ceux générateurs des organismes élémentaires avant leur association. Il n'y a donc aucune discontinuité entre les diverses cellules protocaryotes et la cellule eucaryote : il n'y a que l'embaras du choix entre plusieurs mécanismes de filiation aussi plausibles les uns que les autres.

De — 1600 à — 700 Ma la période terminale de l'Antécambrien porte couramment le nom de Riphéen. Elle est particulièrement riche en gisements de microfossiles, or c'est le moment du passage aux Eucaryotes; on notera :

phytoplankton de Finlande : — 1200 Ma ; algues et leurs spores ; Acritarches c'est-à-dire Dinoflagellés, donc eucaryotes certains.

phytoplankton du Beltien (USA) : — 1100 Ma ; un eucaryote hypothétique à côté de nombreux protocaryotes.

phytobenthos de Bitter Springs (Australie) : — 1000 Ma ; les protocaryotes dominant mais il y aurait des algues vertes (Chlorococcales), peut-être des algues brunes (Pyrrhophytes) et probablement des champignons.

Richât de Mauritanie : — 1000 Ma ; sphéroïdes à point noir, groupés et composés, ces derniers étant des eucaryotes probables sinon certains.

apparition des bactéries sulfuraires (Thiobactéries) vers — 800 Ma d'après le rapport isotopique du soufre.

Il est inutile de multiplier les exemples de fossiles reconnus, directement ou indirectement, dans les dernières centaines de millions d'années de l'Antécambrien : moins métamorphiques, les roches livrent de nombreux restes dont l'étude atteste déjà la diversité du monde vivant au niveau de ses deux premières stégies : Protocaryotes et Protistes.

6^e étape : explosion de la vie.

Entre — 600 et — 400 Ma, c'est-à-dire à la fin de l'Antécambrien et au début de l'ère Primaire, durant les périodes appelées Infracambrien - Cambrien - Ordovicien, une gigantesque et rapide diversification du monde vivant se produit.

A partir des deux stégies primitives d'êtres unicellulaires se diversifièrent toutes les stégies d'êtres pluricellulaires, végétaux et animaux, autotrophes et hétérotrophes : ceci en 200 millions d'années au maximum.

Il n'est pas question ici d'entrer dans le détail de toutes ces stégies : c'est tout le monde vivant qui serait passé en revue ; mais il est intéressant de chercher la cause de cette si rapide diversification du vivant, de cette explosion de formes selon le terme consacré.

Une idée séduisante fait intervenir la prédation comme facteur déterminant de la sélection. En effet dans les écosystèmes primitifs il n'y a pas de consommateurs se nourrissant aux dépens de producteurs. Ceci n'apparaît qu'avec les *hétérotrophes de 2^{me} génération* qui ont besoin de la matière déjà synthétisée par d'autres, soit après la mort, soit du vivant et c'est la prédation.

Or sans prédateurs les producteurs sont en simple concurrence les uns avec les autres : le meilleur a tendance à subsister seul et à éliminer tous les autres ; il restent peu d'espèces. Lorsqu'un prédateur se nourrit préférentiellement de ce producteur, il limitera son extension et permettra ainsi aux autres de profiter des ressources du milieu sans être appelés à disparaître. Un système écologique dont les prédateurs sont enlevés ou absents tend à s'appauvrir.

Ce serait donc l'apparition de la prédation de type animal, à plusieurs niveaux des réseaux trophiques (chaînes alimentaires) qui aurait provoqué la diversification du vivant alors que jusque là elle était limitée mécaniquement par les ressources du milieu. C'est la mise en place des chaînes alimentaires qui s'est accompagnée de multiplication des espèces. Ce principe est remarquablement simple, logique mais il reste hypothétique.

Jusqu'en 1958 on connaissait une riche flore du Riphéen terminal, donc des autotrophes ou hétérotrophes mais peu prédateurs. Seule était reconnue

une méduse aux USA mais son âge doit être voisin de — 600 Ma. Or on a découvert en Australie, dans l'Infracambrien de la Série d'Adélaïde (Monts Flinders) une faune d'une importance primordiale : c'est le gisement d'Ediacara.

Son âge : — 680 à — 600 Ma environ.

Ses fossiles : d'abord des méduses très nombreuses, réparties en au moins 15 espèces représentant aussi bien des Hydrozoaires que des Scyphozoaires. Ensuite d'autres Cnidaires, les Pennatulides et les Rangéïdes.

On a reconnu plusieurs de ces fossiles, ou des espèces voisines, dispersés en Angleterre, en URSS, en Afrique australe...

Mais bien plus important est le fait d'avoir de vrais cœlomates c'est-à-dire la stégie la plus élevée en organisation à Ediacara :

. les Spriggina sont des annélides certains,

. les Dickinsonia sont des annélides probables mais avec des caractères très primitifs (pré-annélides).

Il y a encore mieux, c'est-à-dire 3 formes intermédiaires qu'on nomme des « nymphoïdes » car elles se présentent comme des larves géantes et adultes, toujours cœlomates :

. Precambrium serait un précurseur des Mollusques de type monoplacophore car encore segmenté ;

. Tribrachidium, connu en 40 exemplaires, serait un précurseur des Echinodermes ;

. Parvancorina, connu en 60 exemplaires, serait à l'origine des Arthropodes, c'est-à-dire des Trilobites.

Ce jalon extraordinaire du monde vivant se situe au moment de l'origine et de la diversification de la stégie des cœlomates.

On remarque que toutes ces faunes sont dépourvues de squelette : tous les animaux sont encore mous et nus. Or à partir de — 560 Ma avec le début du Cambrien, c'est l'explosion des Cœlomates avec leurs 4 grands axes : Mollusques, Arthropodes, Echinodermes, Chordés.

Tous ont des squelettes minéralisés sauf le dernier qui ne l'aura que plus tard. Il y a là un changement fondamental tirant très certainement son origine d'un changement du milieu : changement dans le cycle des carbonates, lui-même lié à un changement géologique tel que la transgression des mers sur les continents cadomiens nouvellement formés. Or les squelettes contribuent à fixer l'évolution dans des voies divergentes source de diversité.

Si pour l'instant l'explication fait défaut, la constatation s'impose : à — 560 Ma c'est l'existence généralisée de roches non métamorphiques et des milliers d'espèces reconnues. C'est presque la vie moderne puisque depuis lors aucune innovation structurale n'est intervenue. L'évolution ne fera que suivre les sentiers tracés, ce qui n'empêchera pas son déroulement d'être passionnant. Et au bout de 500 Ma nous avons la faiblesse de croire qu'il y aura une nouvelle étape de franchie : celle de l'émergence de la pensée consciente.

En forme de conclusion.

En résumé, de — 4500 à — 3500 Ma (1 milliard d'années), une évolution prébiotique imposée par les conditions de milieu de la terre primitive ;

de — 3500 à — 1600 Ma (presque 2 milliards d'années), une vie limitée à des cellules rudimentaires, hétérotrophes de 1^{re} génération puis autotrophes ; cette longue évolution biologique invente la photosynthèse et transforme radicalement les conditions du milieu terrestre (oxygène) ;

de — 1600 à — 700 Ma (encore presque 1 milliard d'années) l'hétérotrophie de 2^{me} génération profite de l'autotrophie et réalise un nouvel équilibre d'ordre biologique grâce aux cellules les plus complexes avec noyau : le cycle de la vie est en place ;

de — 700 à — 500 Ma (200 millions d'années seulement), c'est l'explosion extraordinaire des êtres pluricellulaires avec les prédateurs et les êtres à squelettes.

Selon le cheminement ainsi exposé mais seulement esquissé dans ses grandes lignes, on pu constater qu'il n'y a pas eu début absolu de la vie mais *évolution continue* depuis le gaz primitif jusqu'aux animaux et végétaux.

Cette évolution vers le vivant doit-elle apparaître comme hautement improbable, miraculeuse en quelque sorte ? C'est plutôt l'inverse : il était obligatoire qu'elle se fasse à partir des données de base de la terre primitive (éléments présents, flux d'énergie permanent...) ; c'était une nécessité, en fait c'était la seule voie possible.

Mais pourquoi cette voie particulière de l'évolution telle que nous la connaissons et pas une autre ? On peut concevoir bien d'autres chimismes plus efficaces (la chimie macromoléculaire de synthèse nous le démontre) et bien d'autres possibilités d'organisation de la matière vivante. Parce que l'évolution est un processus historique, cumulatif : aucun évènement ne peut être remplacé par un autre sans que toute la suite des évènements en soit irréversiblement modifiée. Ce sont les toutes premières synthèses organiques en milieu aqueux qui ont en quelque sorte engagé toute la suite de l'évolution.

D'autre part le milieu entier évoluait comme un tout intégré : on ne peut à aucun moment dissocier les molécules, les protobiontes ou les êtres vivants en évolution, du milieu qui les a modelés par sélection (et en retour a été modifié par eux). Chaque étape est sous la dépendance des modifications du milieu ; l'interaction est permanente entre la biosphère et l'atmosphère-hydrosphère-lithosphère.

Par voie de conséquence on peut poser valablement la question de la vie sur d'autres planètes et y répondre sans hésiter oui. Il y a probablement des millions de planètes ayant possédé les conditions physico-chimiques de la terre primitive : composition gazeuse, énergie, eau, etc... ; elles ont donc suivi une évolution chimique, puis biochimique, puis vivante inéluçtable. Mais le vivant y est-il identique à celui de la terre : certainement pas parce que de minimes variations dans la composition originelle, dans l'énergie (ex. température), dans l'histoire de la planète l'auront engagé irréversiblement dans des voies peu ou prou différentes.

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUE :

- J.-D. BERNAL. — L'origine de la vie (éd. Bordas).
 R. BUVET. — L'origine des êtres vivants et des processus biologiques (éd. Masson).
 J. MONOD. — Le hasard et la nécessité (éd. Seuil).
 A.-I. OPARIN. — L'origine de la vie sur la terre (éd. Masson).
 A.-I. OPARIN. — L'origine et l'évolution de la vie (éd. Mir).
 E.-L. ORGEL. — Les origines de la vie (éd. Elsevier).
 J. DE ROSNAY. — Les origines de la vie, de l'atome à la cellule (éd. Seuil).
 J. H. RUSH. — L'origine de la vie (éd. Payot).