

Les débuts de la vie sur Terre

Autor(en): **Remane, Jürgen**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **102 (1979)**

PDF erstellt am: **17.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-89145>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

LES DÉBUTS DE LA VIE SUR TERRE

par
JÜRGEN REMANE¹
AVEC 1 FIGURE

1. INTRODUCTION

La philosophie du Moyen Age admettait l'existence d'une force vitale appelée *vis plastica*, capable d'engendrer des organismes vivants — par exemple des mollusques — dans la vase qui se dépose au fond des mers et des lacs. Les fossiles ont alors joué un rôle important pour appuyer ces idées, car ils furent considérés comme exemples d'une telle génération spontanée mais avortée. Il fallait attendre le XIX^e siècle pour que la vraie nature des fossiles comme restes d'organismes vivants d'un passé lointain soit généralement reconnue. Sur le plan biologique il fallut les expériences géniales de PASTEUR (1864) pour prouver, d'une manière irréfutable, que tous les organismes, y compris les microbes, descendent de parents vivants de la même espèce.

Pour le sujet qui nous occupe ici, nous nous trouvons donc dans une situation paradoxale car, à première vue, on a l'air de vouloir revenir en arrière, de vouloir prouver qu'il y a eu malgré tout une génération spontanée.

Mais en réalité le problème se pose d'une manière très différente. Il n'y a aucun doute que, dans les conditions actuelles, la vie ne peut plus apparaître sur terre, entre autres, pour la simple raison qu'elle y est déjà. DARWIN a déjà fait remarquer que de la matière organique, si elle pouvait se former par des processus abiogènes, dans les conditions actuelles, serait aussitôt consommée par les organismes vivants et ne pouvait pas donner lieu à une évolution ultérieure.

Les questions qu'il s'agit de résoudre sont donc les suivantes :

1. Peut-on admettre que dans un *passé très lointain*, les conditions physico-chimiques sur terre permettaient la *formation abiogène de matière organique* ?
2. Y a-t-il une probabilité raisonnable que la matière organique ainsi formée « évolue » pour donner finalement naissance à des organismes vivants très simples ?

¹ Professeur à l'Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel ; texte d'une conférence donnée le 17 novembre 1978 devant la Société neuchâteloise des Sciences naturelles.

Cela signifie que la vie n'a pu apparaître que dans un milieu bien différent du milieu actuel. On est ainsi amené à poser une question supplémentaire : comment la vie et le milieu physico-chimique ont-ils évolué ensemble pour arriver à quelque chose qui ressemble aux conditions actuelles ?

Nous avons donc affaire à un problème historique : les processus que nous aimerions reconstituer se sont déroulés il y a très longtemps ; ils ne sont plus accessibles à l'observation et il faut alors procéder d'une manière indirecte. Dans ce genre de raisonnement on peut suivre trois voies :

1. La *simulation en laboratoire* pour vérifier si — dans les conditions physico-chimiques supposées pour l'atmosphère primitive — des molécules organiques peuvent se former sans l'intervention d'organismes vivants.
2. Essayer de faire une *extrapolation en arrière* partant des organismes actuels les plus primitifs.
3. L'étude des *documents historiques*, des roches et des fossiles les plus anciens qui soient connus.

2. UN PEU DE BIOCHIMIE

Avant d'aller plus loin, il est peut-être utile de rappeler quelques faits de biochimie qui sont essentiels pour la compréhension du phénomène vie. Deux groupes de substances jouent un rôle de premier ordre dans tous les processus vitaux : les protéines et les acides nucléiques.

Parmi les protéines on trouve les enzymes, catalyseurs indispensables pour le fonctionnement des processus chimiques dans les organismes vivants. Les acides nucléiques sont le siège de l'hérédité. Ils transmettent l'information génétique d'une génération à l'autre et dirigent la synthèse des protéines spécifiques dans les cellules.

Les protéines sont des macromolécules dont le poids moléculaire peut atteindre plusieurs millions. Structuralement ce sont des molécules en chaîne, formées par l'alignement de molécules beaucoup plus petites (souvent des milliers) qui appartiennent à la même famille chimique, celle des *acides aminés*. Il y a un très grand nombre d'acides aminés différents, mais seulement 20 participent à la formation des protéines biologiques. La nature chimique d'une protéine est déterminée par la séquence des acides aminés.

Des molécules en chaîne comme les protéines, constituées par un grand nombre d'éléments constitutifs semblables, sont appelées polymères. Les « maillons » de la chaîne sont, par contre, les monomères. La réaction chimique par laquelle les acides aminés sont assemblés en chaîne, s'appelle polymérisation. La liaison entre deux acides aminés se fait chaque fois grâce au départ d'une molécule d'eau.

Les acides nucléiques correspondent également à des macromolécules en chaîne, mais les monomères sont plus complexes : ils sont constitués

de trois molécules : 1. un ion de phosphate ; 2. un sucre-ribose ou désoxy-ribose ; 3. une base organique azotée.

Le sucre reste toujours le même sur toute la longueur de la chaîne. Il en résulte deux familles d'acides nucléiques : les acides ribonucléiques (avec ribose, abrégés RNA) et les acides désoxyribonucléiques (avec désoxyribose, abrégés DNA).

Cinq bases organiques différentes entrent dans la composition des acides nucléiques : adénine (abrégée A), guanine (G), cytosine (C) et, alternativement thymine (T, qu'on trouve dans les DNA) ou uracile (U, qui remplace la thymine dans les RNA). De nouveau les liaisons entre ces différentes molécules se font par le départ d'une molécule d'eau. On arrive ainsi à des chaînes où les sucres sont d'une part reliés entre eux par l'intermédiaire de groupes phosphate et portent, d'autre part, latéralement les bases organiques. C'est la *séquence des bases* qui détermine la nature chimique d'un acide nucléique.

Ce fait est très important parce qu'il existe une correspondance entre les séquences d'acides aminés dans les protéines et les séquences de bases dans les acides nucléiques. C'est grâce à ce *code génétique* inscrit dans la séquence des bases organiques que le DNA peut diriger la synthèse des protéines dans les organismes vivants.

La transmission de l'information génétique codée dans le DNA est possible grâce à une particularité chimique des bases organiques : chacune d'entre elles a tendance à se coupler avec une autre et, par conséquent, le DNA prend toujours la forme de deux chaînes opposées dont les séquences de bases sont complémentaires. (En réalité il s'agit de deux chaînes parallèlement enroulées en spirale hélicoïdale. Pour plus de détails voir STUTZ 1976.) Quand le noyau d'une cellule se divise en deux lors de la reproduction, les deux chaînes sont séparées par une enzyme spéciale, comme on ouvre une fermeture éclair. Avec l'aide d'autres enzymes, chaque chaîne reconstitue son partenaire et l'on retrouve à la fin deux « doubles-hélices » identiques. Ce processus permet de transmettre fidèlement l'information génétique d'une génération à l'autre, prémisses fondamentales de la vie.

La transmission de l'information génétique à travers la cellule pour diriger la synthèse des protéines repose sur le même principe. Là, c'est le RNA qui intervient. D'abord un RNA messager (mRNA) est formé parallèlement au DNA du noyau. A cause de l'affinité des bases organiques, il possède une séquence complémentaire. La molécule de mRNA transmet la « recette » pour fabriquer la protéine voulue dans les ribosomes (petits organites cellulaires dispersés dans le protoplasme).

D'autres RNA, les RNA de transfert (tRNA) interviennent alors pour amener les différents acides aminés qui seront rattachés les uns aux autres, comme sur une chaîne d'assemblage selon la séquence indiquée par le mRNA.

L'on comprend maintenant la relation étroite qui existe entre protéines et acides nucléiques. Sans l'information génétique codée dans le DNA, un déroulement ordonné des processus fondamentaux serait impossible et sans les enzymes comme catalyseurs, tous les processus

métaboliques qui caractérisent la vie seraient matériellement impossibles.

En même temps cette dépendance réciproque entre le DNA et les protéines présente un obstacle aux hypothèses sur l'origine de la vie : la vie telle qu'elle se présente actuellement ne peut exister ni sans DNA ni sans enzymes, mais : pas de DNA sans enzymes et pas d'enzymes sans DNA. Qui fut le premier : la poule ou l'œuf ?

Pour terminer il faut encore mentionner une substance particulière qui joue un rôle primordial comme transporteur d'énergie dans tous les processus biochimiques : c'est l'adénosinetriphosphate, abrégé ATP (= adénine + ribose + 3 groupes phosphates alignés en chaîne). En libérant des groupes phosphates, l'ATP libère l'énergie qui est nécessaire pour maintenir les réactions métaboliques consommant de l'énergie. On ne sait d'ailleurs pas pourquoi les triphosphates des autres nucléosides (GTP, etc.) ne sont pas utilisés par les organismes vivants.

3. UN MODÈLE PHYSICO-CHIMIQUE DE LA VIE

Un premier fait important à mettre en relief, c'est que tous les organismes vivants sont des *systèmes chimiques ouverts*. Comme illustration simple d'un tel système on peut utiliser la flamme d'une bougie : la paraffine fondue entre dans la flamme par la mèche et sa combustion est entretenue par l'oxygène de l'air ambiant. Du CO₂ et de la vapeur d'eau sont les produits finaux. Nous avons là un modèle très simplifié d'un métabolisme (KAPLAN 1978).

Mais, même avec une alimentation illimitée, on ne peut garantir la survie d'un tel système — un souffle suffit pour éteindre la flamme. En d'autres termes, parmi les systèmes ouverts dotés d'un mécanisme de régulation qui assure leur survie à court terme, seuls ceux qui ont la capacité de croître et de se multiplier ont une chance de survivre plus longtemps.

Un organisme vivant est donc obligé de synthétiser constamment les substances dont il est constitué pour pouvoir croître et se multiplier, et cela exige d'autres processus métaboliques qui fournissent l'énergie nécessaire.

D'un autre côté, seule une *reproduction identique* peut assurer la survie à long terme, car il faut bien que les générations suivantes ne perdent rien des capacités métaboliques de leurs ancêtres. Dans le monde vivant actuel, c'est le DNA qui assure la transmission de l'information génétique, mais il est encore difficile de se figurer le système génétique des premiers organismes vivants. Pour résumer en quelques mots : un système ne peut être appelé vivant que s'il possède un métabolisme et en même temps la capacité de croître et de se reproduire identiquement.

Je viens de mettre en relief le rôle important de la reproduction identique pour la survie à long terme d'une espèce vivante. Mais si la reproduction est vraiment tout à fait identique, l'espèce doit finalement

disparaître car, tôt ou tard, les conditions du milieu changeront et elle ne sera plus adaptée. Cela signifie que seule *l'évolution*, l'adaptation constante aux changements du milieu par *transformation* des espèces peut garantir la survie à très long terme, la survie de la vie tout court.

4. LES RÉSULTATS DES SIMULATIONS EN LABORATOIRE

4.1. La synthèse abiogène des monomères

Si l'on veut admettre que la vie s'est développée sur terre spontanément, à partir de la matière inanimée, il faut partir de la prémisse qu'il y a eu d'abord formation abiogène de matière organique. Il faut alors postuler que l'atmosphère primitive était dépourvue d'oxygène libre. C'est le mérite de deux chercheurs, du Russe OPARIN en 1924 et de l'Anglais HALDANE en 1929, d'avoir attiré l'attention sur ce fait.

Il fallut cependant attendre les années 50 pour qu'on essaye de vérifier cette hypothèse en laboratoire. MILLER et UREY (1953) ont exposé un mélange gazeux, composé de H_2 , CH_4 , NH_3 et d' H_2O (vapeur), à des décharges électriques (v. DICKERSON 1978). Le résultat fut assez sensationnel : il se forma tout un mélange de substances organiques y compris des acides aminés. Cela signifie que sur la terre primitive, si l'atmosphère était anoxygène, des substances organiques pouvaient se former facilement car l'énergie nécessaire était disponible sous forme de décharges électriques (orages) et de rayons ultraviolets. En l'absence d'oxygène les substances organiques ainsi formées ont pu se conserver, dissoutes dans les océans.

Les expériences de MILLER et UREY ont été refaites avec d'autres mélanges gazeux moins réducteurs, renfermant du CO et du CO_2 , toujours avec de bons résultats (DICKERSON 1978). Cela prouve que la synthèse abiogène de matière organique n'est pas liée à une composition très spéciale de l'atmosphère primitive. Cette vaste tolérance n'est d'ailleurs pas étonnante si on pense que des molécules organiques se trouvent aussi dispersées dans l'espace et dans certains météorites.

Entre-temps, la plupart des monomères essentiels pour la vie ont pu être synthétisés en laboratoire dans des conditions qu'on peut supposer identiques à celles de la terre primitive.

On a ainsi obtenu 16 ou 17 des 20 acides aminés constituant les protéines biogènes, mais aussi de nombreux autres. Pour le moment il nous est impossible de dire pourquoi les autres n'ont pas été retenus par les organismes vivants.

L'adénine, l'une des cinq bases organiques entrant dans la composition des acides nucléiques, se synthétise aussi très facilement. C'est d'autant plus important que l'ATP est la « monnaie courante » dans tous les échanges d'énergie du métabolisme des organismes vivants. La guanine est également assez facile à synthétiser, tandis que les trois autres posent encore des problèmes.

Quant à la formation abiogène des nucléosides (base organique + ribose ou désoxyribose), on ne voit pas encore très bien comment elle aurait pu se faire, parce que dans les organismes vivants, un seul type des 7 liaisons possibles a été retenu.

Pour les lipides il y a peu de problèmes : d'une part des acides gras à chaînes courtes ont déjà été obtenues dans les premiers essais de MILLER et UREY (1953); d'autre part, le CH_4 se polymérise assez facilement sous l'action de rayons ionisants.

4.2. *Le problème de la formation des polymères*

Le prochain pas, avant l'apparition de la vie sur terre, est obligatoirement la formation abiogène de polymères.

L'attention des chercheurs s'est tout naturellement tournée vers les protéines, polymères des acides aminés. Nous avons vu plus haut que la liaison de deux molécules d'acides aminés se fait par départ d'un molécule d'eau pour chaque liaison. Sans l'aide de catalyseurs remplaçant les enzymes des organismes vivants, on se figure difficilement une telle condensation dans une solution aqueuse. On est encore assez loin de la solution du problème, toutefois deux sortes d'expériences ont donné des résultats intéressants.

Le biochimiste américain FOX a attaqué le problème d'une manière très directe. Si, après évaporation d'une solution d'acides aminés, on continue à chauffer, on peut expulser l'eau des acides aminés qui commencent à se polymériser. Il a ainsi obtenu des macromolécules constituées d'environ 100 monomères qu'il a appelées « protéinoïdes » (v. FOX et DOSE 1977). Cette polymérisation a besoin de températures de 150 à 200° C, mais en ajoutant du polyphosphate on peut abaisser la température critique à 70° C, valeur qui pourrait être atteinte sous des conditions naturelles.

D'autres chercheurs ont essayé d'utiliser des catalyseurs inorganiques dans une solution froide. Les meilleurs résultats, non seulement du point de vue rendement mais aussi en ce qui concerne la ressemblance aux conditions naturelles, ont été obtenus en utilisant les capacités adsorptives de minéraux argileux, surtout de la montmorillonite.

Mais en somme cet aperçu nous montre que, malgré quelques premiers résultats encourageants, la simulation de la polymérisation prébiotique des acides aminés en protéines n'a pas encore bien réussi et nous sommes encore moins avancés en ce qui concerne les acides nucléiques.

4.3. *L'organisation des polymères en systèmes chimiques ouverts : microsphères et coacervats*

Les résultats un peu maigres concernant la formation abiogène des polymères essentiels pour la vie n'empêchent pas d'aller un pas plus loin. D'après les résultats exposés jusqu'ici on est obligé d'admettre qu'une grande diversité de substances organiques était dissoute dans les océans, avant que la vie n'apparaisse sur terre. On a appelé ce stade la *soupe*

prébiotique ; c'est très imagé ! Mais il est clair qu'une telle solution, même si elle renferme les polymères essentiels pour la vie, est encore loin d'être vivante.

Une condition préalable à l'apparition de quelque chose qu'on pourrait appeler les premiers organismes vivants, est que des systèmes chimiques ouverts mais stables s'individualisent dans la « soupe ». Deux sortes d'expériences ont donné quelques renseignements sur ce point.

J'ai déjà parlé des protéinoïdes de l'américain FOX. Redissoutes, ces substances montrent des propriétés très intéressantes : si on laisse refroidir une solution concentrée chaude de ces protéinoïdes, ils s'agglutinent spontanément en de minuscules gouttelettes de 1 à 2 μ de diamètre.

Ces *microsphères* montrent quelques caractères surprenants :

1. Sous le microscope électronique on voit quelque chose comme une double membrane.
2. Les microsphères peuvent croître en absorbant des protéinoïdes qui se trouvent encore dans la solution : la membrane doit donc être semi-perméable. A un moment donné de nouvelles microsphères s'en détachent par bourgeonnement.

FOX a même pu montrer que les protéinoïdes dans les microsphères possèdent certaines capacités catalytiques comme les enzymes : elles peuvent, par exemple, décomposer du glucose (un sucre) qu'on a ajouté à la solution.

Le Russe OPARIN a étudié des solutions de polymères *naturels* (v. OPARIN 1963, DICKERSON 1978). Dans les mélanges de deux substances, l'une de caractère acide, l'autre plutôt basique, il se forme spontanément des gouttelettes colloïdales riches en polymères dans une solution à concentration diminuée. Ces gouttelettes ont un diamètre de 1 à 500 μ et sont limitées par une sorte de membrane qui s'avère semi-perméable elle aussi. On appelle ces systèmes *coacervats*, et on peut les obtenir à partir de solutions d'histone (une protéine) et de gomme arabique (un polysaccharide) ou de deux protéines (histone et albumine). Le point le plus intéressant est que des enzymes naturels ajoutés au coacervat se concentrent dans les gouttelettes où ils fonctionnent normalement comme dans un organisme vivant.

La phosphorylase synthétise ainsi de l'amidon si du glucose-1-phosphate se trouve dans la solution. Si, en plus, de l'amylase est présente, elle redécompose l'amidon et du maltose est « sécrété ». Nous avons donc là des systèmes chimiques ouverts qui se sont individualisés spontanément dans une solution et qui se maintiennent un certain temps.

4.4. Bilan : un modèle théorique de la biogenèse

Ces simulations en laboratoire permettent de concevoir une hypothèse de travail logique sur les premières étapes de la biogenèse.

Tout d'abord formation abiogène, c'est-à-dire prébiotique de monomères organiques, entre autres ceux qui sont essentiels pour la vie.

Ensuite, formation de polymères. Puis individualisation de systèmes chimiques ouverts mais clairement délimités par des membranes semi-perméables.

Mais, à la longue, de tels systèmes, même s'ils sont basés sur des équilibres chimiques très stables et pourvus de membranes actives, ne peuvent subsister. Il faut donc l'apparition d'un mécanisme garantissant la reproduction identique. C'est seulement à ce stade qu'on peut parler de vie. On a introduit le terme protobionte pour ces premiers systèmes vivants très simples. Le terme est très bien choisi, mais naturellement on aimerait aussi savoir comment ils étaient, ces protobiontes, et là, nos idées sont encore bien vagues.

5. L'EXTRAPOLATION A PARTIR DES ORGANISMES VIVANTS LES PLUS PRIMITIFS

5.1. *Les virus*

La seconde voie de raisonnement proposée au départ était l'extrapolation en arrière à partir des organismes actuellement vivants les plus primitifs. Il est peut-être utile de bien préciser que nulle espèce ne peut traverser des milliards d'années sans évoluer. Mais certains caractères archaïques subsistent. Il s'agit de les trouver et il est logique qu'on les cherche avant tout chez les organismes vivants les plus primitifs.

Qui sont alors ces témoins d'un passé lointain ?

Il faut en tout cas éliminer les virus qui ne sont pas vivants, malgré leur capacité apparente de se multiplier. D'une part les autres fonctions vitales, le métabolisme et la croissance leur manquent. D'autre part, en regardant de plus près, on s'aperçoit que leur reproduction n'est pas autonome. Pour se dédoubler leur acide nucléique a besoin de tout l'appareil biochimique d'une cellule vivante avec ses enzymes. Ce sont des venins génétiques capables d'imposer à une cellule leur propre information génétique. Mais c'est l'hôte qui produit les virus nouveaux.

Des virus ne pouvaient donc pas exister avant l'apparition d'organismes vivants.

5.2. *Les bactéries*

Les organismes vivants les plus primitifs sont alors les bactéries. La structure d'une cellule bactérienne est très simple : le DNA n'est pas organisé en un noyau, pas localisé dans des chromosomes, comme chez les protozoaires et tous les animaux et plantes supérieures. Pour cette raison le systématicien oppose les bactéries et les algues bleues comme *Procaryotes* au reste du monde vivant, réuni sous le nom d'*Eucaryotes* parce que leurs cellules possèdent des noyaux bien individualisés, séparés du cytoplasme par une membrane nucléaire. Parmi les organites cellulaires tels que chloroplastes, mitochondries, etc., qui caractérisent les Eucaryotes, seuls les plus simples, les ribosomes se trouvent aussi — mais sous forme réduite — chez les Procaryotes.

Mais comme systèmes chimiques, les bactéries sont infiniment plus complexes que les microsphères et les coacervats. C'est donc sur le plan biochimique que se situe l'intérêt principal de l'étude des bactéries actuelles. Le premier fait surprenant est alors que de nombreuses bactéries sont des *anaérobies obligatoires*, pour qui l'oxygène est un poison. Cela fait aussitôt penser à l'atmosphère primitive anoxygène postulée pour la formation abiogène de substances organiques.

L'anaérobie paraît donc bien être un caractère très ancien qui s'est conservé jusqu'à nos jours chez certaines bactéries. C'est chez ces formes, et éventuellement aussi chez certains anaérobies facultatifs (espèces qui peuvent vivre sans oxygène tout en le supportant) qu'on peut espérer trouver les processus métaboliques les plus archaïques.

Les plus primitifs de tous sont apparemment des fermentateurs anaérobies comme on en trouve parmi les Clostridia. La fermentation qu'ils pratiquent correspond, par exemple, à une décomposition de sucres (glycolyse). Le gain énergétique de ce processus, d'ailleurs très modeste, est utilisé pour la fabrication d'ATP (BRODA 1975).

Ces formes sont incapables d'assimiler du CO_2 ; elles dépendent entièrement de matière organique fabriquée par d'autres organismes. Elles sont donc ce qu'on appelle classiquement des *hétérotrophes*. A première vue il paraît absurde d'en dériver un modèle des premiers organismes vivants, car actuellement toute vie dépend de la production de matière organique par les autotrophes, les plantes vertes. Mais il ne faut pas oublier que les premiers organismes ont dû vivre dans la « soupe prébiotique » et que la synthèse abiogène de matière organique a continué tant que l'atmosphère était faiblement réductrice.

Une prochaine étape nous est illustrée par les bactéries photosynthétiques. Ici l'énergie solaire est captée à l'aide de chlorophylle bactérienne qui diffère chimiquement de la chlorophylle des Cyanophycées et des plantes eucaryotes. Les plus primitives parmi les bactéries photosynthétiques, les bactéries pourpres non soufrées, avaient encore besoin de substances organiques comme donneurs d'hydrogène dans la synthèse du glucose. Les autres, les bactéries pourpres soufrées oxydent l' H_2S . Avec eux le stade autotrophe est atteint. Tous ces organismes sont des anaérobies facultatifs, ils ne recourent à la photosynthèse qu'en milieu anoxygène, et aucun oxygène n'est libéré par ces processus photosynthétiques.

5.3. *Interprétation évolutive de la physiologie bactérienne*

Les faits que je viens d'exposer se prêtent à l'interprétation dans le sens d'une évolution.

On peut alors admettre que les premiers organismes étaient hétérotrophes contrairement à ce qu'on attendait en considérant le monde vivant actuel. Ces hétérotrophes tiraient toute leur énergie de la fermentation de substances organiques dans la « soupe prébiotique » qui persistait encore quelque temps. Peut-être que leurs ancêtres n'avaient même pas besoin d'être fermentateurs tant qu'il y avait encore assez

d'ATP abiogène dans la « soupe ». La fermentation serait alors la réponse à une pénurie de matières premières. Les problèmes de l'humanité ne sont donc pas nouveaux.

L'invention de la photosynthèse signifie d'abord une amélioration du rendement énergétique, mais bientôt elle permettra aussi de contre-carrer la raréfaction de la matière organique. Il n'y a pas de limite nette entre les bactéries pourpres soufrées et non soufrées actuelles, le passage à l'autotrophie était donc assez facile (BRODA 1975). Mais contrairement aux formes actuelles, leurs analogues d'antan étaient probablement des anaérobies stricts.

Le tournant décisif de l'évolution de la vie sur terre est l'arrivée des Cyanophycées (algues bleues) ou plutôt de leurs précurseurs directs. L'acquisition de la chlorophylle α , comme la possèdent aussi les plantes eucaryotes, permettait d'améliorer encore une fois le rendement énergétique de la photosynthèse par l'utilisation de l'eau comme donneur d'hydrogène. Mais ce processus libère en plus de l'oxygène toxique pour les autres organismes de cette époque. L'apparition des Cyanophycées créait donc une pollution à l'échelle mondiale, une première grande crise pour la vie, une catastrophe probablement égale à celle causée par l'apparition de l'espèce humaine. C'est peut-être une consolation pour nous !

J'espère vous avoir montré, par ce petit aperçu, que l'extrapolation en arrière à partir des organismes vivants les plus primitifs, fait apparaître des aspects nouveaux fort intéressants. Elle nous fournit notamment deux arguments puissants pour le postulat d'une atmosphère primitive sans oxygène : par le fait que les bactéries vivantes les plus primitives sont des anaérobies obligatoires et surtout en nous expliquant d'où vient l'oxygène atmosphérique : de la photosynthèse des Cyanophycées et des plantes eucaryotes. D'un autre côté, chaque extrapolation a ses limites. Les organismes actuellement vivants ne nous donnent pas de renseignements sur le fameux protobionte qui reste ainsi un peu chimérique. Malheureusement cette lacune ne sera pas comblée par la documentation géologique.

6. LA DOCUMENTATION GÉOLOGIQUE

6.1. *Cadre chronologique*

L'âge de la terre et du système solaire peut aujourd'hui être estimé avec une assez bonne précision. Par plusieurs méthodes on arrive au chiffre d'environ 4,6 milliards d'années.

Les deux subdivisions principales de l'histoire de la terre sont le Phanérozoïque qui a commencé il y a environ 570 millions d'années (abrégé Ma) et le Précambrien qui comprend tout ce qui vient avant. C'est une subdivision bien déséquilibrée ; elle s'explique par le fait que les roches précambriennes sont extrêmement pauvres en fossiles, de sorte qu'on ne possède pas la possibilité d'une subdivision chronologique détaillée comme pour les roches phanérozoïques.

Dans le présent contexte, seul le Précambrien nous intéresse et, malgré sa pauvreté en fossiles, il nous fournit de nombreuses données très intéressantes.

6.2. La série du Swaziland

Les roches les plus anciennes qui sont suffisamment bien conservées pour nous donner des renseignements valables sur le milieu de sédimentation, se trouvent en Afrique du Sud, dans le Swaziland, et atteignent un âge d'environ 3500 Ma.

Je crois qu'il vaut la peine de dire quelques mots sur la stratigraphie de cette série. Les géologues locaux y distinguent trois groupes principaux qui sont, de haut en bas (ANHAEUSSER 1978) :

Moodies Group	environ 3000 m d'épaisseur ;
Fig Tree Group	environ 2000 à 3000 m d'épaisseur ;
Onverwacht Group	environ 15.000 m d'épaisseur.

Dans l'Onverwacht il n'y a guère de sédiments ; presque toute la série est constituée de roches volcaniques, la plupart basiques à ultrabasiques. On y trouve de magnifiques laves en coussin, structure d'écoulement sous-marin qu'on observe aujourd'hui encore au fond de l'Atlantique par exemple. Les rares sédiments sont tous des précipitations physico-chimiques, notamment des jaspes zonés, parfois ferrugineux, parfois charbonneux. Un seul niveau sédimentaire est un peu plus important et surtout plus constant : c'est le « Middle Marker ».

Le groupe du Fig Tree correspond essentiellement à une série de grauwackes et de schistes. Les grauwackes montrent souvent merveilleusement toutes les structures typiques, comme le « graded bedding ». Il y a aussi quelques sédiments chimiques, siliceux comme avant.

Les roches volcaniques sont subordonnées et d'un chimisme intermédiaire.

Le Moodies Group enfin est constitué de cycles sédimentaires débutant avec des conglomérats passant, vers le haut, à des grès ou subgrauwackes, et finalement à des sédiments argileux. Il y a des quantités subordonnées de roches volcaniques, de jaspilite et de minerais de fer zonés.

Toute cette succession, de l'Onverwacht jusqu'au Moodies Group, donne une bonne image des séries du type « greenstone belt » (greenstone = roches vertes, c'est-à-dire roches basiques faiblement métamorphisées). On trouve de ces greenstone-belts sur le bouclier canadien, mais celui que nous venons de voir est le plus ancien du monde.

Les roches volcaniques, qui forment les deux tiers inférieurs de la série, sont interprétés comme croûte océanique.

Les grauwackes du Fig Tree sont des turbidites déposés par des sortes d'avalanches sous-marines de boue, dans un bassin marin relativement profond. De telles séries turbiditiques témoignent d'une instabilité tectonique du fond ; dans les Alpes on trouve des séries comparables

qu'on appelle flysch. Le Moodies Group est plutôt terrestre, c'est une série de type molasse. C'est surtout dans les roches siliceuses du Fig Tree, mais aussi de l'Onverwacht, qu'on a trouvé toutes sortes de substances organiques et ce que certains chercheurs pensent être les microfossiles les plus anciens du monde. Des datations radiométriques ont été effectuées à plusieurs niveaux, notamment dans l'Onverwacht. Pour la partie inférieure de ce groupe on a obtenu environ 3500 Ma et près de 3400 Ma pour le « Middle Marker ». La partie supérieure de l'Onverwacht a donné un chiffre de 3360 Ma. Les shales du Fig Tree se situent près de 3000 Ma, en somme toute une série d'âges très respectables.

6.3. Les fossiles chimiques

Un vrai « fossile », c'est-à-dire le reste corporel d'un organisme mort qu'on trouve dans la roche, est aussi appelé *fossile figuré*. Cela peut être une coquille de mollusque, un grain de pollen ou une spore, ou n'importe quelle sorte de squelette. Mais il est clair que normalement seules les parties dures ou chimiquement très résistantes se conservent. On se figure mal des bactéries fossilisées, elles sont trop tendres.

Voilà tout le problème de la documentation fossile des premiers organismes vivants. Pour cette raison les chercheurs se sont tournés vers les *fossiles chimiques*. Même si un cadavre est entièrement détruit, la dégradation chimique des parties molles n'est pas forcément complète, il peut subsister de la matière organique diffuse dans la roche, un fossile chimique. C'est très bien connu pour les schistes bitumineux, comme par exemple les schistes carton du Jurassique inférieur. On y trouve des Ichthyosaures dont la silhouette est encore visible dans la roche, correspondant à une concentration de matières organiques diverses. De même, la concentration de matière organique est plus grande devant l'ouverture des coquilles d'ammonites, où se trouvaient les tentacules dont il ne reste pourtant plus la moindre empreinte (HELLER 1965).

On trouve en tout deux catégories de matière organique, celle qui est soluble dans les solvants habituels et celle qui ne l'est pas et qu'on appelle kérogène. Normalement on étudie la matière organique soluble, parce qu'elle donne des renseignements plus précis. Ces méthodes paléobiochimiques ont, bien sûr, aussi été appliquées aux roches précambriennes, à des shales et surtout aux jaspes et autres roches siliceuses. Le succès fut énorme : l'on trouva une grande variété de substances organiques et même pour les roches du Fig Tree, on est arrivé à dresser une liste impressionnante (KAPLAN 1978) :

1. trois acides aminés : alanine, valine et glycine qui sont thermiquement plus résistantes,
2. des n-alcanes qui pourraient dériver d'acides gras,
3. phytane et pristane, chaînes latérales de la chlorophylle des plantes actuelles.

On en a déduit que la photosynthèse chlorophyllienne typique existait déjà à cette époque, d'autant plus qu'on trouva aussi des porphyrines, même dans l'Onverwacht, qui peuvent être des produits de dégradation de la chlorophylle. Aujourd'hui on est cependant devenu beaucoup plus prudent dans l'interprétation de ces fossiles chimiques. Il y a d'abord le problème de la contamination par les eaux météoriques au cours des millions d'années. Dans une analyse de roches siliceuses quasiment imperméables et théoriquement à l'abri d'une contamination, un examen approfondi montra que la plupart de la matière organique se trouvait dans les fissures.

Ce danger n'existe pas pour les kérogènes, et l'on peut ainsi prouver l'existence de matière organique ancienne, pour ainsi dire « d'origine » dans de nombreuses roches du Précambrien ancien. Mais il ne suffit pas d'être sûr que la matière organique est du même âge que la roche encaissante. Il faudrait savoir si la matière organique est biogène ou s'il s'agit du réchauffé de la fameuse « soupe prébiotique ». La nature chimique de la matière organique ne fournit pas de critère sûr : des porphyrines ont même été trouvées dans des météorites.

Il y a néanmoins deux critères distinctifs :

1. Le nombre d'atomes de carbone dans les n-alcanes devrait être de préférence impair si les atomes dérivent de la dégradation d'acides gras biologiques. Ce test a donné des résultats positifs pour la formation du Gunflint (1900 Ma) fameuse pour ses microfossiles organiques, pour le Soudan Shale (2700 Ma), mais le résultat fut négatif pour le Fig Tree où l'on a trouvé une distribution statistique qui ne permet pas de décider si la matière organique est biogène ou non (KAPLAN 1978).
2. L'autre méthode utilise l'observation que les enzymes actifs dans l'assimilation du CO_2 montrent une légère préférence pour l'isotope ^{12}C par rapport au ^{13}C , si bien qu'il y a un petit déficit de ^{13}C dans les organismes vivants (SCHOPF 1977). En appliquant cette méthode à la série du Swaziland, on voit apparaître un déficit de ^{13}C vers la partie supérieure de l'Onverwacht (fig. 1).

En résumé, l'on peut retenir les résultats suivants : il faut être très prudent en tirant des conclusions de la nature chimique de la matière organique fossile, mais il y a des critères sûrs pour reconnaître la matière organique biogène. Or, selon les isotopes du carbone, la vie existait déjà au temps des plus anciennes roches sédimentaires non métamorphiques qu'on connaisse, il y a environ 3400 Ma (SCHOPF 1977, 1978).

6.4. Les microfossiles organiques du Précambrien

Les fossiles figurés du Précambrien qui nous intéressent ici sont tous des microfossiles organiques enfermés dans des roches siliceuses, jaspes zonés, etc. C'est le milieu le plus favorable qu'on puisse se figurer pour la conservation de restes très tendres.

On a signalé des microfossiles très simples dans les jaspes de l'Onverwacht et du Fig Tree qui seraient alors forcément les plus anciennes qu'il puisse y avoir. Les photos publiées montrent des sphérules de 10 μ environ ou de minuscules corps allongés. Si par un hasard insolite des bactéries arrivaient à se fossiliser, elles devraient sans doute se présenter ainsi. Mais il est aussi clair qu'il peut s'agir de n'importe quoi comme concentrations fortuites de matière organique biogène ou même abiogène, car des formes semblables ont été trouvées dans des météorites où il ne s'agit certainement pas de fossiles. Cela signifie que la question était, dans le fond, mal posée. Il ne faut pas chercher parmi les microfossiles organiques pour trouver les premiers organismes vivants; ils étaient forcément dépourvus de caractères distinctifs. Notons seulement que les premiers microfossiles indubitables — parce que morphologiquement plus complexes — viennent de la Gunflint-Formation en Amérique du Nord (1900 Ma, voir fig. 1). L'intérêt des microfossiles organiques du Précambrien se situe sur un tout autre plan: fixer le moment de l'apparition des Eucaryotes. On peut en effet distinguer Eucaryotes et Procaryotes par la taille des cellules. Les Procaryotes plus grands que 15 μ sont rares, tandis que les Eucaryotes sont rarement plus petits que 40 μ . Le recouvrement entre les deux n'est pas important et avec un peu de statistique on arrive facilement à des résultats sûrs.

Selon un résumé donné par SCHOPF (1978), les Eucaryotes remontent jusqu'à 1400 Ma, car depuis cette date on constate une augmentation rapide de la taille maximale des cellules dans tous les gisements.

6.5. Les stromatolithes

Parlant des traces de la vie précambrienne il faut aussi mentionner les *stromatolithes*. En réalité, il s'agit de structures sédimentaires biogènes et non de fossiles. Ce sont des calcaires finement laminés, à l'échelle millimétrique, dont les laminae peuvent montrer les configurations les plus capricieuses. Ces stromatolithes se trouvent encore dans les mers actuelles, quoique rarement bien développés. Mais nous savons ainsi qu'ils sont créés par des tapis d'algues, de véritables feutrages d'algues filamenteuses. Il y a souvent une vingtaine d'espèces qui vivent ensemble, en grande majorité des *Cyanophycées*. La présence de stromatolithes dans le Précambrien permet donc de conclure à la présence de Cyanophycées.

Pour dater leur première apparition, on connaît maintenant plusieurs gisements et l'on arrive partout à peu près à 2600 Ma, ainsi pour le groupe du Yellowknife dans le NW du Canada et probablement aussi pour la série du Steep Rock Lake de l'Ontario, tandis que le Bulawayan de Rhodésie a peut-être même un âge de 2800 Ma (SCHIDLÓWSKI et EICHMANN 1977, SCHOPF 1977).

Nous ne savons pas s'il y a eu d'autres algues bleues avant, qui n'ont pas laissé de trace, mais au plus tard 2800 à 2600 Ma de l'actuel la production d'oxygène par les Cyanophycées a commencé.

6.6. Les renseignements que nous donnent les roches précambriennes

En dehors des traces de vie, les roches sédimentaires du Précambrien peuvent nous fournir des renseignements précieux sur le milieu ambiant. On trouve ainsi dans les roches précambriennes, notamment dans le Bassin du Witwatersrand en Afrique du Sud de l'uraninite (UO_2) et des galets arrondis de pyrites (FeS_2). Les deux minéraux indiquent pour le moins une très faible concentration d'oxygène dans l'atmosphère : autrement l' UO_2 aurait été oxydé pour former de l' U_3O_8 et la pyrite n'aurait pu résister à un transport prolongé sans être oxydée elle aussi (SCHIDLOWSKI et EICHMANN 1977).

Les sédiments du Witwatersand datent de 2800-2600 Ma. Il y a d'autres trouvailles d'uraninite détritique, et ce minéral ne disparaît définitivement que peu avant 2000 Ma. Jusqu'à cette époque il n'y avait donc pratiquement pas d'oxygène libre dans l'atmosphère.

Puis on rencontre un type très spécial de roche au Précambrien : les *minerais de fer zonés* ; il s'agit de précipitations de magnétite (Fe_3O_4) en couches très fines, d'où l'aspect zoné dans une matrice siliceuse. Or, une précipitation du fer à partir d'une solution aqueuse n'est possible que s'il s'y trouvait sous sa forme réduite ; le Fe^{3+} n'est guère soluble. En d'autres termes, cette précipitation est due à l'oxydation du Fe^{2+} qui se trouvait en solution (grâce à une atmosphère non oxydante). Ces minerais de fer zonés deviennent « tout à coup » fréquents vers 2300 Ma, ce qui indique bien qu'à cette époque la production d'oxygène dans les mers devint importante. D'énormes quantités de minerai se sont formées dans la période allant de 2300 à 2000 Ma, donnant naissance à des gisements importants comme ceux qui font la richesse minière de la région des Grands Lacs. Les derniers minerais de fer zonés se sont formés vers 1800 Ma ; depuis lors les océans sont « nettoyés » du fer dissout et l'oxygène peut diffuser dans l'atmosphère.

Pour finir il faut évoquer un type de sédiment beaucoup plus familier : les grès rouges. Les grès vosgiens, par exemple, furent jadis une pierre de taille si appréciée qu'on trouve des églises néogothiques peintes dans le même rouge ! La couleur de ces grès provient du fait que les grains de quartz sont entourés d'une mince pellicule d'hématite (Fe_2O_3 , donc oxyde du Fe^{3+}) qui ne peut se former que dans un milieu oxydant, s'il y a de l'oxygène libre dans l'atmosphère. Or, il est très intéressant de constater que les grès rouges font complètement défaut dans le Précambrien ancien. Ils n'apparaissent qu'entre 2000 et 1800 Ma (SCHIDLOWSKI et EICHMANN 1977), au moment où les minerais de fer zonés commencent à disparaître.

7. BILAN

Les simulations en laboratoire nous obligent à postuler une atmosphère réductrice pour la terre primitive, autrement la formation abiogène de matière organique serait impossible. Cette hypothèse est

appuyée par le fait que les organismes vivants les plus primitifs sont des anaérobies obligatoires.

Le fameux protobionte, terme de passage entre une matière organique organisée mais non vivante et la vie sous sa forme typique, reste malheureusement un peu chimérique mais l'étude biochimique des bactéries actuelles nous permet de formuler des hypothèses raisonnables

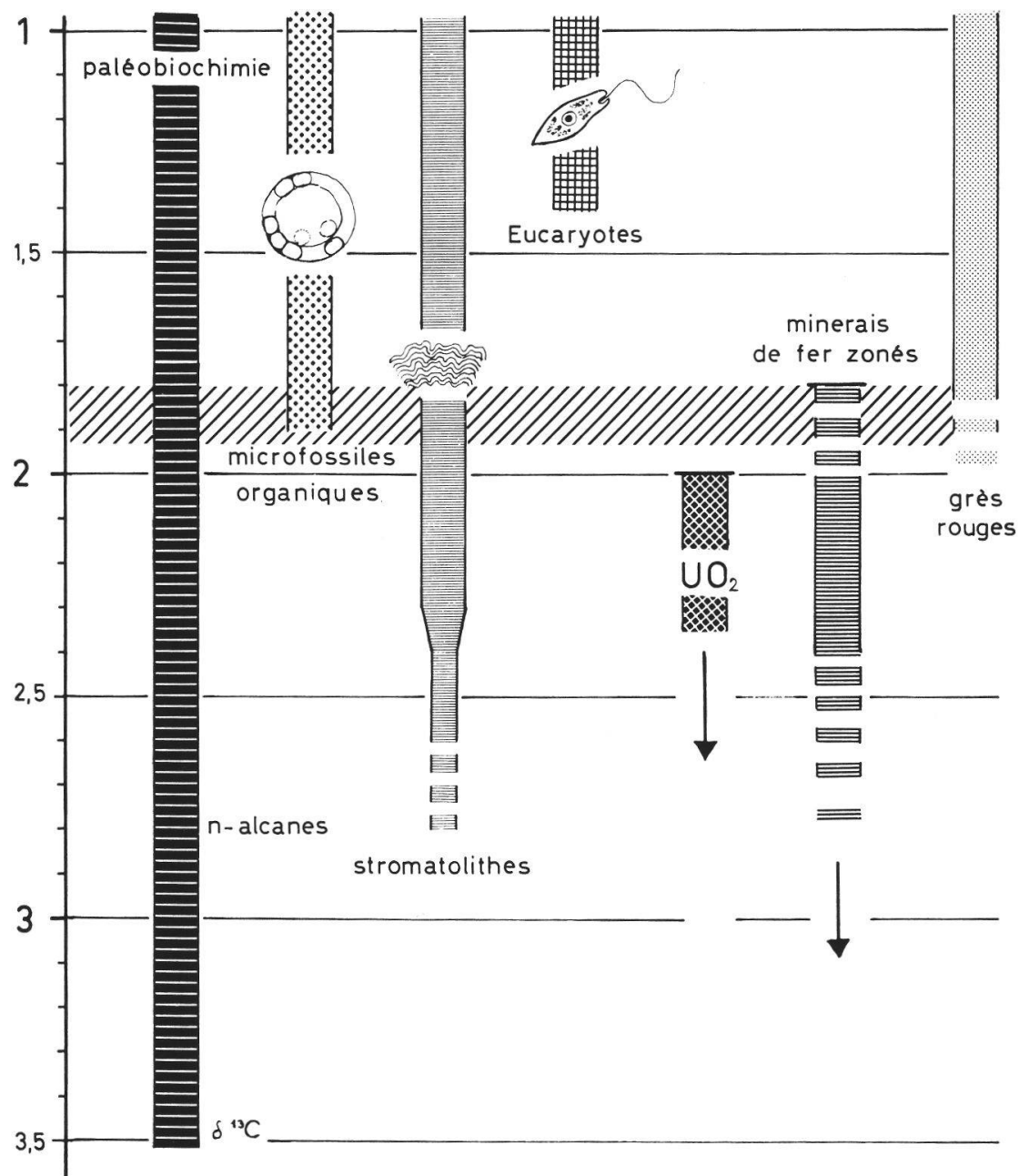


Fig. 1. Aperçu stratigraphique des événements-clés pour dater l'évolution de la vie et de l'atmosphère au Précambrien. *Eosphaera tyleri* de la Formation du Gunflint (1900 Ma) a été choisi comme exemple des microfossiles organiques précambriens. L'échelle à gauche donne les âges approximatifs en milliards d'années. Les hachures obliques indiquent la période où l'oxygène atteint des concentrations plus importantes dans l'atmosphère.

sur les premières étapes de l'évolution du monde vivant. Les premiers organismes ont ainsi dû être des hétérotrophes vivant aux dépens de la « soupe prébiotique ».

Avec la photosynthèse bactérienne, qui ne libère pas d'oxygène, le passage vers l'autotrophie est accompli, mais le tournant décisif est le changement à la photosynthèse pratiquée par les Cyanophycées. C'est une grande amélioration du rendement énergétique, mais en même temps la production de l'oxygène toxique change profondément la nature de l'environnement. Le monde vivant est non seulement arrivé à maîtriser cette crise mais encore à dompter ce poison et à utiliser l'oxygène pour la respiration, et ainsi pouvaient se développer les Eucaryotes.

Le but de cette conférence était de confronter ces hypothèses aux données géologiques. Or, il se trouve que ces hypothèses se trouvent non seulement confirmées, mais qu'on peut indiquer des âges approximatifs pour les différentes étapes de l'évolution postulée (fig. 1).

La vie est apparue très tôt sur terre, il y a 3500 Ma ou même plus. L'apparition des stromatolithes, il y a 2800 à 2600 Ma, montre que la production d'oxygène a commencé au plus tard à cette époque. Le taux de production devait être faible au départ, et c'est seulement vers 2300 Ma qu'il augmenta sensiblement. L'expansion rapide des stromatolithes et la précipitation du fer à grande échelle dans les minerais de fer zonés en témoignent. Ces minerais de fer zonés nous montrent en même temps la grande importance de facteurs non biologiques dans l'évolution de l'atmosphère terrestre, notamment l'effet tampon de l'oxydation du Fe^{2+} . Pendant plusieurs centaines de millions d'années la production d'oxygène par la photosynthèse a été ainsi piégée et rien n'a pu échapper dans l'atmosphère. De l'oxygène libre dans l'atmosphère a seulement dû s'accumuler depuis environ 2000 Ma, la disparition de l' UO_2 et l'apparition des grès rouges nous suggèrent ce chiffre.

La porte fut alors ouverte au dernier grand pas de l'évolution, l'apparition des Eucaryotes il y a près de 1400 Ma, qui culmina dans l'apparition de l'homme.

Reste à savoir si la vie passera le cap de la deuxième pollution à l'échelle mondiale qui a été ainsi causée !

BIBLIOGRAPHIE

- ANHAEUSSER, C. R. — (1978). The Geological Evolution of the Primitive Earth — Evidence from the Barberton Mountain Land. In: TARLING, D. H. (éd.): Evolution of the Earth's Crust, pp. 71-106, London, New York, San Francisco (Academic Press).
- BRODA, E. — (1975). The Evolution of the Bioenergetic Processes. Oxford, New York, etc. (Pergamon Press).
- DICKERSON, R. — (1978). L'évolution chimique et l'origine de la vie. *Pour la Science*, nov. 1978, pp. 26-45, Paris.

- FOX, S. W. et DOSE, K. — (1977). *Molecular Evolution and the Origin of Life*. New York, Basel (Marcel Dekker Inc.).
- HELLER, W. — (1965). Organisch-chemische Untersuchungen im Posidonien-schiefer Schwabens. *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, 1965/2, pp. 65-68, Stuttgart.
- KAPLAN, R. W. — (1978). *Der Ursprung des Lebens*. 2^e éd. Stuttgart (Thieme).
- OPARIN, A. I. — (1963). *Das Leben. Seine Natur, Herkunft und Entwicklung*. Jena (VEB Gustav Fischer Verlag).
- SCHIDLowski, M. et EICHMANN, R. — (1977). Evolution of the Terrestrial Oxygen Budget. In : PONNAMPERUMA, C. (éd.) : *Chemical Evolution of the Early Precambrian*, pp. 87-100, New York, San Francisco, London (Academic Press).
- SCHOPF, W. — (1977). Evidences of Archean Life. In : PONNAMPERUMA, C. (éd.). *Ibid.*, pp. 101-106.
- (1978). L'évolution des premières cellules. *Pour la Science*, nov. 1978, pp. 64-82, Paris.
- STUTZ, E. — (1976). Le génôme et le gène : analyse et manipulation. *Annales 1975-1976*, Université de Neuchâtel, pp. 204-219.

Adresse de l'auteur : Université de Neuchâtel, Institut de Géologie, rue Emile-Argand 11,
CH - 2000 Neuchâtel 7.