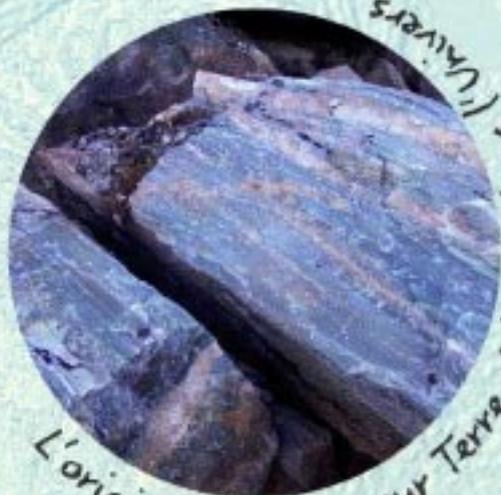


2<sup>e</sup> ÉDITION

# L'ENVIRONNEMENT DE LA TERRE PRIMITIVE

sous la direction de

*Muriel Gargaud  
Didier Despois  
Jean-Paul Parisot*



L'origine de la Vie sur Terre et la Vie dans l'Univers

L'Exobiologie a pour objet l'étude des origines de la Vie, de son évolution et de sa distribution sur Terre et dans l'Univers. Cette nouvelle discipline s'intéresse aux conditions et aux processus qui ont permis l'émergence du vivant sur notre planète, et ont pu ou pourraient le permettre ailleurs. Ce vaste domaine thématique touche à la fois l'astronomie, la géologie, la chimie et la biologie.

Ce livre original et unique en son genre est le premier d'une série consacrée à l'origine de la Vie sur Terre et dans l'Univers. Il met pour la première fois à la disposition des scientifiques et d'un public cultivé une reconstitution, en langue française, des conditions d'apparition de la Vie sur Terre, il y a plus de 3,5 milliards d'années.

Un effort important a été réalisé afin que ce livre puisse servir de référence et soit accessible aux étudiants de tous les cycles des disciplines scientifiques concernées.

De nombreux aspects y sont développés et notamment l'état du Soleil jeune, les chutes de matière interplanétaire, l'origine de l'eau, la formation et l'évolution de l'atmosphère et des océans, la géologie de la Terre primitive, la complexification de la matière - avec l'apparition des premières biomolécules puis des premières formes de Vie. Les possibilités de Vie sur d'autres planètes ou satellites de notre Système Solaire (Mars en particulier), ou autour d'autres étoiles, sont ensuite discutées en relation avec les programmes spatiaux, et en particulier ceux conduits sous l'égide du CNES.

*Muriel Gargaud et Didier Despois sont Chargés de Recherche CNRS et Jean-Paul Parisot est professeur à l'Université de Bordeaux I. Ils sont tous les trois astrophysiciens à l'Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers. Ils ont rassemblé les contributions de vingt-six spécialistes de disciplines variées (astronomie, géologie et géophysique, chimie, biochimie et biologie) qui sont tous chercheurs ou enseignants-chercheurs dans les laboratoires de l'Université, du CNRS, du CEA ou du CNES, impliqués dans le domaine de l'Exobiologie.*

Légende de la photographie de couverture :

Fuchsite, mica chromifère datée à 3,83 Ga particulièrement courant dans les roches Archéennes anciennes, associée à de la silice (chert). Cette roche est connue en bijouterie sous le nom de greenlandite. La minéralisation a envahi les formations d'Isua (Groenland) au cours des nombreux épisodes métamorphiques qu'a connus la série.

40,00 €

ISBN 2-86781-382-4



9 782867 813825

Maquette de couverture : Pleine Page, Bordeaux

---

# Sommaire

---

Préface de <b>Guy Ourisson</b> .....	11
Avant-propos <b>M. Gargaud, D. Despois et J.-P. Parisot</b> .....	13
Introduction <b>A. Brack</b> .....	17

## Partie A : Astronomie et Système Solaire primitif

Chapitre 1	La formation des étoiles de type solaire : des conditions initiales pour l'origine de la vie? <b>Th. Montmerle</b> .....	31
Chapitre 2	Les comètes, sources potentielles de molécules pour la Terre Primitive et les planètes. <b>D. Despois</b> .....	53
Chapitre 3	L'origine de l'eau dans le Système Solaire telle qu'elle est enregistrée par son rapport isotopique D/H. <b>F. Robert</b> .....	79
Chapitre 4	Evolution primordiale du Système Solaire interne et origine de l'eau. <b>A. Morbidelli, D. Benest</b> .....	91
Chapitre 5	La matière extraterrestre primitive et les mystères de nos origines. <b>M. Maurette et al.</b> .....	99

## Partie B : Climats et Atmosphères

Chapitre 6	Le climat et ses variations depuis l'origine de la Terre : une composante à l'évolution de la vie. <b>A. Berger</b> .....	131
Chapitre 7	Généralités sur les atmosphères planétaires. <b>J.-P. Parisot</b> .....	163
Chapitre 8	Etude comparée des atmosphères planétaires. <b>M. Dobrijevic</b> .....	179
Chapitre 9	Origine et évolution précoce de l'atmosphère terrestre. <b>B. Marty</b> .....	197
Chapitre 10	L'atmosphère primitive de la Terre et son évolution. <b>F. Selsis, J.-P. Parisot</b> .....	217

## Partie C : Géologie et Géophysique

Chapitre 11	Modèles géophysiques de l'évolution dynamique de la Terre au cours du premier milliard d'années. <b>Ch. Sotin</b> .....	237
Chapitre 12	Evolution géologique et géochimique de la Terre : genèse et évolution de la croûte primitive. <b>H. Martin</b> .....	263
Chapitre 13	Evolutions parallèles de la Terre et de la Vie. <b>R. Bourrouilh</b> .....	287

## Partie D : Chimie

Chapitre 14	A propos de l'origine de la matière organique sur la Terre primitive et de son évolution durant la période prébiotique. <b>J. Reisse</b> .....	323
-------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Chapitre 15	Chimie prébiotique : expériences de simulation en laboratoire et « vérité terrain ». <b>F. Raulin</b> .....	343
Chapitre 16	La Terre matrice de la Vie : émergence avant-gardiste des peptides sur les plages de l'Hadéen. <b>A. Commeyras</b> .....	361

### Partie E : Biologie et Biochimie

Chapitre 17	Les origines de la Vie : aspects biologiques et moléculaires. <b>M.-C. Maurel</b> .....	383
Chapitre 18	A la recherche des formes de vie terrestre les plus « primitives » : impasses et progrès. <b>P. Forterre</b> .....	399
Chapitre 19	Un exemple de milieu extrême sur Terre : les sources hydrothermales océaniques. <b>D. Prieur</b> .....	417

### Partie F : Exobiologie et Missions Spatiales

Chapitre 20	Le programme Exobiologie du CNES. <b>S. Léon-Hirtz</b> .....	427
Chapitre 21	Mars, la planétologie comparative et l'exobiologie. <b>J.-P. Bibring</b> .....	435
Chapitre 22	L'exploration de Mars et la recherche de la Vie. <b>F. Rocard</b> .....	445
Chapitre 23	La vie en dehors du Système Solaire. <b>J. Schneider</b> .....	459
Références et bibliographie .....		473
Glossaire de termes utiles en exobiologie .....		523
Quelques données exobiologiques .....		577
Photographies en couleur .....		599
Coordonnées des Auteurs .....		627
Index .....		635
Table des matières .....		643

# AVANT-PROPOS

Ce livre est issu de la première école d'Exobiologie « L'environnement de la Terre Primitive et l'Origine de la Vie » qui s'est déroulée à Propiano en octobre 1999.

## Qu'est-ce que l'Exobiologie?

---

L'exobiologie est une discipline récente qui a pour objet l'étude de l'origine de la Vie, de son évolution et de sa distribution, sur Terre et dans l'Univers. C'est un vaste domaine thématique qui intéresse à la fois l'astronomie, la géologie, la chimie et la biologie et qui étudie en particulier :

### LA VIE TERRESTRE ACTUELLE ET SES LIMITES

L'étude de la vie terrestre fournit une référence indispensable pour définir la Vie, aussi bien au niveau fonctionnel que structurel, pour appréhender l'étendue de son domaine, et pour extrapoler la notion de Vie à d'autres environnements.

### LES CONDITIONS ET LES PROCESSUS QUI ONT PERMIS L'ÉMERGENCE DU VIVANT SUR NOTRE PLANÈTE

L'extrapolation de la vie terrestre à la vie dans l'Univers passe obligatoirement par notre compréhension de l'origine de la vie sur Terre. Cette approche nécessite à son tour d'avoir une vision claire de l'environnement primitif terrestre, et des premières formes de vie qui y sont apparues.

### L'ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE VERS DES STRUCTURES COMPLEXES DANS L'UNIVERS

Quelles ont été les sources de matière carbonée et de petites molécules organiques sur la Terre primitive? Quels sont les mécanismes et les structures moléculaires fondamentales utilisés par cette subtile chimie dite « prébiotique » qui, combinant ingrédients carbonés et eau liquide, a permis aux premiers systèmes vivants d'apparaître sur notre planète? Pour comprendre les dernières étapes de cette évolution chimique, le passage de l'inerte au vivant, il faut disposer de modèles de vie, pouvant s'appuyer, par exemple, sur la notion

de structures dissipatives, d'auto-organisation sous flux d'énergie, et tenant compte aussi de l'existence d'un « monde ARN ».

#### LES POSSIBILITÉS D'APPARITION DE LA VIE DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Ces processus ont-ils pu se produire ailleurs ? L'exploration systématique et détaillée du Système Solaire a déjà permis d'identifier plusieurs objets d'intérêt fondamental pour l'exobiologie. On peut en distinguer deux classes :

- la première correspond à des objets extraterrestres différenciés susceptibles d'abriter ou d'avoir abrité la vie : elle comprend Mars et Europe. Leur étude pose le problème de la définition des « signatures de la vie ».
- La deuxième correspond à des objets où une chimie organique complexe se déroule actuellement, fournissant un exemple de réacteur prébiotique à l'échelle planétaire (Titan) ou d'objets ayant pu participer à la chimie prébiotique de la Terre primitive (météorites, micrométéorites, comètes).

La chimie du milieu interstellaire, par sa composante organique, et par ses implications sur la chimie de la nébuleuse protostellaire, présente aussi un intérêt analogue.

#### LA VIE DANS L'UNIVERS, SOUS TOUTES LES FORMES QU'ELLE POURRAIT REVÊTIR

Nos possibilités de recherches en dehors du Système Solaire sont plus limitées, sans être pour autant négligeables. La découverte récente de planètes extrasolaires, c'est-à-dire en orbite autour d'étoiles autres que notre Soleil, prouve qu'il y a d'autres systèmes planétaires, et suggère la possibilité d'existence d'autres Terres, Mars ou Titans. Étudier ces planètes dans toute leur diversité pour y rechercher la Vie nécessite de disposer de critères d'habitabilité. Après avoir identifié ces planètes extrasolaires éventuellement habitables, il faudra y rechercher les signatures spectrales de la vie.

## Des avancées récentes

L'ensemble de ces questions a récemment trouvé quelques éléments de réponse en raison de nombreux développements, parmi lesquels on peut citer :

- le nombre croissant de planètes extrasolaires connues (plus de 60 à ce jour). Bien que les planètes découvertes actuellement soient de tailles comparables ou supérieures à celle de Jupiter, la découverte de planètes telluriques identiques à la Terre est l'un des objectifs de l'astronomie des 10 prochaines années,
- l'exploration spatiale. Elle nous apporte des éléments de plus en plus précis sur les milieux extrêmes et sur les possibilités d'une vie présente ou passée sur d'autres planètes ou satellites du Système Solaire (Mars, Europe...) et sur la chimie prébiotique (Titan, comètes...),
- les progrès réalisés dans la connaissance de l'environnement primitif de la Terre à l'époque de la formation du Système Solaire et durant l'Archéen (période qui s'étend jusqu'à – 2,5 milliards d'années) : grâce aux travaux des géochimistes, on a des indications de plus en plus précises sur l'histoire de la croûte, de l'océan et de l'atmosphère.
- La découverte de formes de vie dans des milieux extrêmes (sources hydrothermales des dorsales océaniques).

- L'étude extensive de la matière organique dans les météorites et surtout dans les micrométéorites.
- Le paradoxe du Soleil jeune. La théorie de l'évolution stellaire prédit une augmentation de l'énergie solaire qui serait aujourd'hui 30 % supérieure à ce qu'elle était il y a 4,5 milliards d'années. Or, les températures prédites, bien en dessous de 0°C, sont en contradiction avec les rares vestiges géologiques de cette période qui prouvent que de l'eau liquide existait il y a au moins 3,85 milliards d'années.

## **Un livre, reflet d'une école pluridisciplinaire**

---

Cette convergence de connaissances et l'émergence, en France, d'une communauté pluridisciplinaire de chercheurs intéressés par le problème de l'origine de la vie en général, a donné lieu à la mise en place du programme « Exobiologie » du CNES, du Groupement De Recherche « Exobio » du CNRS et de la première Ecole d'Exobiologie « Exobio'99 ».

Cette école s'est déroulée à Propriano en octobre 1999 et a permis de regrouper un peu plus de 80 chercheurs (astronomes, climatologues, chimistes, géochimistes, biochimistes, géologues...) autour d'une vingtaine d'enseignants. Chacun d'eux a ensuite accepté d'écrire un chapitre de cet ouvrage : l'ensemble de ces chapitres ne constitue cependant pas, loin s'en faut, un traitement exhaustif de l'ensemble des questions qui peuvent se poser en exobiologie.

Chaque chapitre a donné lieu à plusieurs relectures approfondies par des spécialistes qui ont joué un véritable rôle d'arbitre, garantissant la pertinence des idées proposées. Cette entreprise a toutefois été longue et difficile, compte tenu de l'extrême pluridisciplinarité du sujet et de la difficulté de concilier des scénarios propres à chaque discipline ou auteur. De nombreux chapitres sont en effet complètement originaux : ils résument des recherches en cours, reposant sur des idées nouvelles qui ne font pas (encore?) nécessairement l'unanimité. Il en va forcément ainsi de tout domaine de recherche en évolution et c'est pourquoi le lecteur trouvera parfois des notes de bas de page, remplaçant les propos de l'auteur dans le contexte généralement admis.

Nous remercions chaleureusement les auteurs et les relecteurs d'avoir accepté de jouer ce jeu difficile, dans le seul souci de construire une image de l'environnement de la Terre primitive la plus cohérente possible en l'état actuel de nos connaissances.

## *Les origines de la Vie*

---

Guy Ourisson

Il me semble évident que, si le XX<sup>e</sup> siècle a vu se réaliser des progrès inattendus, gigantesques, dans la compréhension des mécanismes de fonctionnement des êtres vivants, le XXI<sup>e</sup> devrait commencer à chercher à répondre à deux questions lancinantes : l'origine de la Vie sur Terre, et l'extension de la Vie dans l'Univers.

Nous savons que le tournant du siècle aura été marqué sur le plan scientifique par deux événements majeurs : le déchiffrement (encore partiel certes) du génome humain, et la découverte de planètes extra-solaires. Donnez cent ans de plus aux astronomes, et il est bien probable qu'ils pourront nous en dire bien plus, sur les conditions physiques existant sur ces planètes et sur celles qu'il leur reste évidemment à découvrir, et qu'ils pourront inventer des méthodes permettant de repérer à distance celles qui abritent une forme de vie ou une autre (ce seront probablement des méthodes indirectes, optiques, sauf si des voyages intersidéraux devenaient possibles, à la *Star Trek*). Plus prochainement, il est assuré que nous irons sur Mars, et que nous pourrions savoir si Mars a abrité, ou abrite encore, une forme de vie, qu'elle soit ou ait été identique à la nôtre, voisine ou différente. Si Mars est, et a toujours été, dépourvue de vie, il faudra attendre. Si Mars est, ou a été, un biotope, alors les questions ne se présenteront plus de la même façon...

Pour l'instant, tout ce que nous savons de la vie en dehors de la Terre, c'est que les « briques de la vie », ces molécules intervenant dans les processus vitaux de tous les êtres vivants, acides aminés, nucléotides, peuvent être décelées dans les micrométéorites qui nous arrivent de l'espace, et que leurs précurseurs (acide cyanhydrique, formaldéhyde...) peuvent être décelés dans l'espace interstellaire. Mais je crois que le problème n'est pas là.

Le problème ne me semble pas être, ou ne plus être, tant celui de l'origine des briques de la vie, que celui de leur organisation, et je suis surpris de voir que ce sentiment n'est semble-t-il pas généralement partagé. Les briques de la vie (acides aminés, nucléotides, sucres, probablement polyterpènes) peuvent être obtenues par les méthodes les plus diverses : étincelles dans une atmosphère appropriée à la Miller ou Oró, jets moléculaires sur cible de carbone comme nous l'avons montré avec Marcel Devienne, réaction formose à la Eschenmoser... J'ai l'impression, sans le comprendre, qu'il faut et qu'il suffit de disposer des bons atomes, et de leur appliquer une énergie suffisante : quand ils retombent à des niveaux ordinaires d'énergie, ils forment notamment les briques de la vie (avec bien d'autres molécules!).

Par contre, un problème qui me semble beaucoup trop peu étudié est celui de l'organisation de ces briques, de l'édification, à partir d'un tas de briques informe, de cette cathédrale gothique, complexe, qu'est une cellule. Dans les discussions sur l'origine de la

vie, ce point délicat est presque toujours balayé d'une phrase, pour dire qu'il faut bien que des membranes aient été formées très tôt, pour que la suite de l'organisation se produise à l'intérieur d'une proto-cellule. Seuls quelques chercheurs, comme David Deamer, Harold Morowitz, Pier-Luigi Luisi, Fred Menger, ont un peu approfondi cette question et ont commencé à contribuer à son étude. J'ai la prétention de croire que nous avons, à Strasbourg, fait un pas important en montrant que l'auto-organisation de phospholipides, même « primitifs » comme nous pensons que le sont les phosphates de polyprényle, entraîne automatiquement une série d'étapes d'auto-complexification, en conduisant à l'émergence de propriétés nouvelles : extraction sélective dans la membrane de molécules lipophiles, orientation de ces molécules, si elles sont anisotropes, dans le milieu « fibreux » qu'est la membrane, apparition de propriétés vectorielles dues à la différence géométrique entre la surface interne et la surface externe de la membrane, condensation entre monomères par effet de concentration (comme l'ont montré Luisi et Ringsdorf), couverture externe par des polysaccharides possédant une ancre lipophile (Sunamoto et nous-mêmes), encapsulation dans la vésicule de molécules d'ADN petits (Deamer, Gilbert) ou géants, visibles au microscope (Nomura, Yoshikawa et nous-mêmes).

Nous sommes parfaitement conscients que tout ceci ne mène encore qu'à un système mort, qui ressemble à une proto-cellule comme une poupée ressemble à un enfant. Mais l'essentiel me semble être dans cette notion que, si l'on souhaite se dispenser de l'explication par l'intervention divine, par le miracle, pour expliquer la Genèse, il faut bien qu'intervienne très tôt un mécanisme d'auto-complexification fondé sur des effets physico-chimiques analysables : celui que nous avons proposé et qui peut encore se développer, surtout si nous arrivons à susciter des compétitions, ou un autre.

En conclusion à cette trop longue préface, je suis persuadé que le XXI<sup>e</sup> siècle verra se multiplier et se développer des réunions comme celle dont le livre qui suit rend compte. Je pense que leur contenu se diversifiera. Je suis convaincu qu'elles contribueront à faire avancer la compréhension de ce phénomène extraordinaire qu'a été l'origine de la vie ; j'espère qu'elles pourront aussi étudier d'autres formes de vie, présentes ailleurs !

En attendant, ce volume restera un ouvrage de référence.