

# DES ATOMES AUX PLANÈTES HABITABLES

SOUS LA DIRECTION DE

Muriel Gargaud,  
Philippe Claeys,  
Hervé Martin



Troisième volume d'une série réalisée dans le cadre des écoles thématiques d'exobiologie du CNRS, ce livre s'intéresse aux divers environnements susceptibles d'être ou d'avoir été favorables à l'apparition de la vie. Les auteurs, issus d'une large communauté pluridisciplinaire, analysent les stratégies et les moyens à mettre en œuvre afin de déceler les traces de la présence de la vie. La question des tout premiers instants de notre planète est abordée à partir de la disponibilité des éléments biogènes et de la chronologie précise des événements astronomiques majeurs ayant conduit à la mise en place de l'environnement terrestre primitif et de la vie.

La présence d'eau liquide apparaît dans l'état actuel des connaissances, indissociable de la vie. Mars ou l'eau liquide a existé au début de l'histoire de la planète et Titan, dont l'atmosphère et/ou la surface pourraient représenter un « laboratoire de chimie prébiotique », constituent des cibles potentielles pour la recherche des traces d'activité biologiques. L'existence des briques élémentaires nécessaires à l'émergence de la vie est abordée successivement du point de vue de la modélisation théorique des molécules astrophysiques présentes dans les nuages interstellaires, du point de vue de la régulation de la vie par l'environnement planétaire, et de façon plus abstraite, mais ô combien révélatrice de la complexité de l'essence même de la vie, du point de vue virtuel.

Enrichi d'un glossaire de 910 mots, *Des atomes aux planètes habitables* est un ouvrage qui s'adresse aussi bien à un public averti que curieux des questions soulevées par l'origine de la vie et par la possibilité de vie « ailleurs ».

*Muriel Gargaud, chargée de recherche au CNRS, est astrophysicienne à l'Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers (Bordeaux). Philippe Claeys et Herve Martin sont respectivement géologue et géochimiste et professeurs à la Vrije Universiteit Brussel (Belgique) et à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand.*

ISBN 2-86781-364-6



40 €

9 782867 813641

Maquette de couverture : Pleine Page, Bordeaux

## Table des matières

<i>Préface</i> de Pierre Léna. ....	11
<i>Avant-propos</i> de Muriel Gargaud, Philippe Claeys, Hervé Martin .....	13
Chapitre 1 : <i>Nucléosynthèse stellaire</i> . Nicolas Prantzos .....	15
Chapitre 2 : <i>Chronologie de la formation du Système Solaire : les informations données par les météorites</i> . Marc Chaussidon .....	57
Chapitre 3 : <i>La formation de la croûte et du manteau des planètes telluriques, et l'environnement minéral de l'apparition de la vie</i> . Francis Albarède .....	79
Chapitre 4 : <i>Les impacts d'astéroïdes et de comètes, et l'évolution de la Terre</i> . Philippe Claeys .....	103
Chapitre 5 : <i>Vers une régulation planétaire</i> . Philippe Bertrand .....	135
Chapitre 6 : <i>Les océans dans le Système Solaire</i> . Christophe Sotin .....	155
Chapitre 7 : <i>Eau et climats sur la planète Mars</i> . François Forget .....	169
Chapitre 8 : <i>Les comètes, Titan et Mars : exobiologie et projets spatiaux</i> . Hervé Cottin et Yves Bénilan ...	185
Chapitre 9 : <i>Le point sur les exoplanètes</i> . Marc Ollivier .....	237
Chapitre 10 : <i>Astrochimie quantique : la simulation numérique comme alternative aux expériences</i> . Yves Ellinger et Françoise Pauzat .....	271
Chapitre 11 : <i>L'analyse au laboratoire de la matière organique terrestre : la problématique et les développements récents pour l'analyse des petites molécules à l'état de trace en milieu complexe</i> . Odile Vandenabeele-Trambouze, L. Garrelly, M. Dobrijevic .....	323
Chapitre 12 : <i>Habitabilité : le point de vue d'un astronome</i> . Franck Selsis .....	357
Chapitre 13 : <i>Habitabilité : le point de vue d'un biologiste</i> . Purificación López-García .....	375
Chapitre 14 : <i>Le dernier ancêtre commun</i> . David Moreira et Purificación López-García .....	389
Chapitre 15 : <i>La vie artificielle ou la dissection digitale</i> . Hugues Bersini .....	399
<i>Annexes</i> .....	449
<i>Quelques données exobiologiques</i> .....	467
<i>Glossaire de termes utiles en exobiologie</i> .....	489
<i>Références et bibliographie</i> .....	543
<i>Présentation des auteurs</i> .....	587
<i>Index</i> .....	593
<i>Table des matières</i> .....	599

# BON DE COMMANDE

## *Des atomes aux planètes habitables*

par Muriel GARGAUD, Philippe CLAEYS et Hervé MARTIN  
dans la collection « L'origine de la Vie sur Terre et la Vie dans l'Univers »

est disponible chez votre libraire au prix de 40 €

ou, à défaut, au

**CID**

131, bd Saint-Michel 75005 Paris  
Tél. 01 43 54 47 15 — Fax 01 43 54 80 73

Nom et prénom .....

Adresse .....

Commande :

*Des atomes aux planètes habitables* ..... x 40 € = .....

Dans la même collection :

*Les Traces du Vivant* ..... x 40 € = .....

Frais d'expédition :

4,30 € pour le premier ouvrage .....

1,3 € pour les suivants .....

Total .....

## MODE DE PAIEMENT

- Chèque bancaire ou postal à l'ordre du CID
- Virement bancaire : Crédit industriel et commercial, succ. D  
2, boulevard Raspail, 75007 Paris, France
- Compte n° D 16 213 76
- Virement postal CCP Paris 6 798 17 M
- Mandat
- Carte de crédit (rayer les mentions inutiles)  
Bleue/Visa/Mastercard
- Valable jusqu'au :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Les particuliers doivent joindre leur règlement à leur commande à moins qu'ils ne demandent un débit sur leur carte de crédit.

Date et signature

Ce livre est le troisième volume d'une série consacrée aux origines de la vie sur Terre et dans l'Univers. Il fait suite à *l'Environnement de la Terre primitive* et aux *Traces du vivant* – parus en 2001 et 2003 – dont les objectifs principaux étaient d'une part de recenser et de discuter les paramètres et conditions ayant permis l'émergence de la vie et d'autre part de déterminer quelles pouvaient être les signatures caractéristiques du vivant, non seulement sur Terre mais aussi ailleurs dans l'Univers.

Comme les précédents livres, celui-ci est le fruit de travaux et de discussions réalisés dans le cadre d'une école thématique d'exobiologie organisée par le CNRS. L'exobiologie est dans un premier temps, un domaine de recherche supradisciplinaire qui étudie les conditions bio-géo-physico-chimiques nécessaires à l'émergence, au développement puis à l'évolution de la vie sur Terre. Dans un second temps, à partir des données et contraintes ainsi établies, elle évalue la possibilité de l'existence d'autres formes de vie – actuelle ou passée – dans notre Système Solaire (Mars, Titan, Europe, etc.) mais aussi dans le reste de la Galaxie et de l'Univers (recherche d'exoplanètes).

Si les deux premiers volumes de cette série avaient pour objectif de poser les bases de la discipline, le présent ouvrage est plus prospectif : dans de nombreux textes, les auteurs analysent et discutent les divers environnements (terrestres, extraterrestres ou même purement virtuels) susceptibles d'être ou d'avoir été favorables à l'apparition de la vie, et dans d'autres textes, ils envisagent les stratégies et moyens à mettre en œuvre afin d'y déceler les traces de la présence de la vie. Cette problématique est abordée sous forme de réflexions sur la détectabilité de la vie et l'habitabilité d'une planète à partir des contraintes astronomiques, géologiques et biologiques.

Les récentes données de la géologie et en particulier la découverte des zircons archaïques de Jack Hills en Australie ont montré que certaines des conditions nécessaires à l'apparition de la vie ont probablement été réalisées très tôt sur Terre (dès 4,4 Ga) après l'accrétion planétaire. Cette question des tout premiers instants de notre planète est abordée, tant en ce qui concerne la disponibilité des éléments biogènes que la chronologie précise des événements astronomiques majeurs ayant conduit à la mise en place de l'environnement terrestre primitif. Les premiers chapitres de ce livre ont donc pour but de :

– déterminer où et comment ont été produits, synthétisés et distribués la plupart des éléments lourds (C, O, Si, Ca, Fe...) importants non seulement pour la formation des planètes de type terrestre mais aussi pour l'émergence de la vie;

– préciser autant que faire se peut, la chronologie des événements qui depuis l'accrétion planétaire jusqu'à la différenciation d'une croûte ont successivement permis l'établissement d'un environnement favorable à l'apparition de la vie. Les données permettant d'établir cette chronologie découlent principalement de l'étude des systèmes isotopiques

mesurés sur différentes phases minérales dans les météorites et de l'analyse des impacts d'astéroïdes et de comètes.

– analyser et discuter les données fournies par les récentes explorations de Mars et de Titan afin de déterminer si un contexte environnemental favorable à l'apparition de la vie existe (ou a pu exister) ailleurs dans le (ou en dehors du) Système Solaire. Cette approche planétaire permettra en retour de mieux comprendre certaines conditions ou étapes préliminaires ou concomitantes au développement de la vie sur Terre.

La présence d'eau liquide apparaît dans l'état actuel des connaissances, indissociable de la vie. D'un côté l'existence plus que probable de l'eau liquide en surface de la planète Mars depuis plusieurs milliards d'années, pose la question du maintien de la vie, et par là même de l'extinction complète de cette dernière lors de l'évolution géologique d'une planète. D'un autre côté, l'étude de Titan, dont on pense que l'atmosphère et/ou la surface pourraient représenter un « laboratoire de chimie prébiotique », montre que les planètes océans sont certainement plus complexes qu'on ne l'avait imaginé. Dans tous les cas, planètes ou exoplanètes, le problème fondamental qui se pose est l'identification et la détermination des marqueurs incontestables de la présence d'une vie actuelle ou passée. Cette démarche se heurte toutefois au fait que des notions apparemment simples comme celle de l'habitabilité d'une planète ne sont pas nécessairement identiques pour l'astronome et le biologiste.

Ce volume aborde toutes ces problématiques et présente aussi les développements récents dans le domaine de la détection des plus infimes traces de vie. Cette détection, nécessite, tant pour la Terre primitive que pour d'autres objets célestes, la mise au point et le développement de techniques (ou plus exactement de microtechniques) analytiques extrêmement sophistiquées et variées.

Enfin, et bien qu'un environnement planétaire favorable soit une condition indispensable, mais non suffisante à l'apparition de la vie, il faut aussi que les briques élémentaires nécessaires soient disponibles. Cet aspect est abordé dans les trois derniers chapitres successivement du point de vue de la modélisation théorique des molécules astrophysiques présentes dans les nuages interstellaires ou dans les atmosphères planétaires, du point de vue de la régulation de la vie par l'environnement planétaire, et de façon plus abstraite, mais ô combien révélatrice de la complexité de l'essence même de la vie, du point de vue virtuel.

Les textes qui suivent s'adressent à un public averti, curieux mais pas nécessairement spécialiste des questions que l'origine de la vie et la possibilité de vie « ailleurs » posent aux astronomes, géologues, chimistes, biochimistes ou biologistes. Ceci rend cet ouvrage accessible aussi bien à l'homme cultivé qu'à l'étudiant ou à l'enseignant, qui, si nécessaire, trouveront en appendice quelques rappels de base classés par discipline ainsi qu'un grand glossaire de 910 mots.

Ce livre résulte de longues discussions passionnées et animées au sein d'une large communauté pluridisciplinaire – de l'astrophysique à la biologie, en passant par la géologie, la chimie et l'informatique – qui cherche à mettre en place un ou (plusieurs) scénario(s) cohérent(s) des origines de la vie et dont chaque membre accepte de remettre en question certaines bases de sa propre discipline et d'intégrer à sa réflexion les bases spécifiques des autres domaines disciplinaires. Cette démarche demande à la fois une solide dose d'enthousiasme et beaucoup de modestie face à des problèmes dont la complexité s'accroît au fur et à mesure de l'avancée des recherches et des découvertes. C'est pourquoi nous remercions chaleureusement l'ensemble des auteurs qui ont contribué à poser une pièce dans ce puzzle pour l'instant quasi inextricable ainsi que les rapporteurs extérieurs dont l'expertise a permis de valider ces textes.

# PRÉFACE

S'il faut encore démontrer que c'est aux frontières entre disciplines que progresse la science, cet ouvrage, dans la lignée de ses deux solides prédécesseurs, en apporte une nouvelle et superbe preuve. Comme les précédents, il poursuit l'exploration du champ de la toute jeune *exo-biologie*, cette science aussi dénommée *bio-astronomie*, rassemblant de jeunes et brillants chercheurs qui, tout en maîtrisant parfaitement leur spécialité, ont accepté de risquer leur temps pour relever le défi d'une des questions aujourd'hui parmi les plus brûlantes. Il s'agit de la vie, de son émergence dans notre Système Solaire, de sa vraisemblance à la surface d'autres planètes, des moyens d'observation qui en permettraient la détection.

Ce défi intellectuel, qui ne date pas d'hier, est longtemps resté de l'ordre de la spéculation. Des arguments de nature scientifique ou parfois métaphysique plaidaient avec conviction, tantôt en faveur de la singularité de la vie terrestre, tantôt pour son universalité, mais des chaînons essentiels manquaient : or, depuis une décennie, les voici qui se mettent progressivement en place. La connaissance de la chimie complexe sur laquelle s'organisent les édifices moléculaires du vivant ou du pré-vivant, l'accès aux traces rares de l'émergence de la vie terrestre, l'exploration fine de la surface d'autres corps du Système Solaire, la découverte enfin depuis 1995, par dizaines puis par centaines, d'autres systèmes planétaires dans notre Galaxie ont enfin ouvert de multiples chemins à l'expérimentation et à l'observation. Dans ceux-ci s'engagent avec enthousiasme astronomes, géologues et géophysiciens, chimistes, biochimistes ou biologistes, ces explorateurs qui palpent inlassablement « cette étoffe du monde dont les rêves sont faits ». Nulles conclusions encore, mais une méthodologie scientifique rigoureuse, dont cet ouvrage livre bien des clefs. La communauté scientifique française, appuyée sur ses partenariats européens et enracinée dans la tradition d'une culture où brillent Fontenelle, Laplace et Pasteur, fait ici preuve, malgré la relative modestie des moyens dont elle dispose, d'une extraordinaire vitalité qui la place au meilleur rang dans le monde.

Rien ne dit que cette quête aboutira demain, mais il est peu d'exemples en science où la mobilisation autour d'une question profonde et bien posée ne conduise à un déploiement de découvertes, le plus souvent déroutantes face aux scénarios imaginés. Le XX<sup>e</sup> siècle nous en a offert une magnifique démonstration par la vision qu'il a construite des instants lointains de l'Univers, de l'émergence progressive de son organisation en galaxies et étoiles. À mes yeux, le sujet de ce livre, en cette orée de siècle, est un nouveau lever de rideau, touchant cette fois à l'émergence de la vie et à la multitude des planètes susceptibles de la porter. Que le lecteur – qu'il soit étudiant, chercheur, enseignant ou simple promeneur

de science – en soit reconnaissant aux auteurs, comme aux trois coordinateurs qui ont pris cette féconde initiative.

Que nos élèves et étudiants, fascinés sans peine par ces questions, comprennent que la science désormais demande de briser les vieilles barrières entre disciplines et de porter sur la nature un autre regard, dont ils comprendront vite la fécondité et sauront communiquer l'enthousiasme!

Meudon, 13 juin 2005

Pierre LENA