

# LES TRACES DU VIVANT

SOUS LA DIRECTION DE

*Muriel Gargaud*

EN COLLABORATION AVEC

*Didier Despois, Jean-Paul Parisot  
et Jacques Reisse*



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, la biochimie et la biologie.

Le présent ouvrage constitue le second livre d'une collection initiée en 2001 avec la parution de *L'environnement de la Terre primitive*. Le premier livre a été très favorablement accueilli tant par les scientifiques actifs dans le domaine que par un public moins averti, intéressé par une discipline qui tente d'apporter des réponses à des questions d'importance majeure et que l'homme se pose probablement depuis qu'il est *Homo Sapiens*.

*Les traces du vivant* est construit sur le même canevas que le livre précédent : un ensemble de chapitres écrits par des spécialistes, mais rédigés de manière telle qu'ils soient compréhensibles par des non-spécialistes du domaine concerné. L'exobiologie est par essence interdisciplinaire et c'est du dialogue entre praticiens de diverses disciplines que sont nées les idées originales, les scénarios plausibles, les hypothèses à tester. Pour que ce dialogue soit fructueux, il faut que le biologiste puisse interagir avec l'astronome, que le chimiste puisse interagir avec le paléo-climatologue... Il est donc impératif pour l'exobiologie elle-même, que les praticiens de cette discipline s'expriment en faisant usage d'un langage qui réduit au maximum le caractère parfois ésotérique des modes d'expression des spécialistes. Le volumineux glossaire en fin d'ouvrage est là aussi pour que le lecteur puisse trouver aisément les définitions de termes et de concepts qui lui sont moins familiers.

*Muriel Gargaud et Didier Despois sont Chargés de Recherche au CNRS. Jean-Paul Parisot est Professeur à l'Université de Bordeaux 1. Ils sont tous les trois astrophysiciens à l'Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers. Jacques Reisse est Professeur Émérite de Chimie à l'Université Libre de Bruxelles. Ils ont rassemblé les contributions d'une vingtaine de spécialistes de disciplines variées (de l'astrophysique à la biologie, en passant par la géologie et la chimie) qui sont, tous, chercheurs ou enseignants-chercheurs dans les laboratoires de l'Université, du CNRS ou du CNES, impliqués dans le domaine de l'Exobiologie.*

ISBN 2-86781-324-7



9 782867 813245

40 €

Maquette de couverture : Pleine Page, Bordeaux

# Sommaire

Préface de <b>Jean-Marie Lehn</b> .....	11
Avant-Propos de <b>M. Gargaud, D. Despois, J.-P. Parisot et J. Reisse</b> .....	13

## Partie A : Système Solaire et Océans

Chapitre 1	Chronologie de la formation du Système Solaire. <b>Jean-Marc Petit</b> . . .	19
Chapitre 2	La formation des océans. <b>Daniele Pinti</b> .....	39

## Partie B : Évolution chimique

Chapitre 3	La chimie de l'origine de la vie. <b>André Brack</b> .....	61
Chapitre 4	Chiralité et origine de l'homochiralité. <b>Jacques Reisse et John Cronin</b> . .	83
Chapitre 5	Approche dynamique de la synthèse des peptides et leurs précurseurs sur la Terre primitive. <b>Auguste Commeyras et al.</b> .....	115

## Partie C : Évolution biologique

Chapitre 6	Le monde de l'ARN. <b>Marie-Christine Maurel</b> .....	165
Chapitre 7	Origine du code génétique. <b>Bernard Barbier</b> .....	183
Chapitre 8	L'arbre universel du vivant : du simple au complexe ou du complexe au simple. <b>Hervé Philippe</b> .....	215
Chapitre 9	Diversité des métabolismes. <b>Daniel Prieur</b> .....	243
Chapitre 10	Extrémophiles, limites du vivant. <b>Purificación Lopez-Garcia</b> .....	255

## Partie D : Les traces du vivant

Chapitre 11	Le lac Vostok : à la découverte d'un environnement sous glaciaire et de son contenu biologique. <b>Jean-Robert Petit, Michel Blot et Sergei Bulat</b> . . .	275
Chapitre 12	Le contexte géologique de l'origine de la vie et les signatures minérales de la vie fossile. <b>Frances Westall</b> .....	319
Chapitre 13	Signatures spectroscopiques de vie sur les exoplanètes. Les missions Darwin et TPF. <b>Franck Selsis, Alain Léger et Marc Ollivier</b> .....	343
Chapitre 14	La mission Cassini-Huygens et l'exploration de Titan. <b>François Raulin et Patrice Coll</b> .....	371

## Partie E : Conclusion

Chapitre 15	L'effort exobiologique français. <b>Sylvie Léon-Hirtz</b> .....	383
-------------	---	-----

Références et bibliographie . . . . .	391
Coordonnées des auteurs . . . . .	439
Glossaire de termes utiles en exobiologie . . . . .	445
Table de constantes . . . . .	487
Index. . . . .	501
Table des matières . . . . .	507

En 2001 paraissait le premier ouvrage de cette série consacrée aux origines de la Vie sur Terre et dans l'Univers. Ce premier livre, *L'environnement de la Terre Primitive*, reprenait l'ensemble des thèmes débattus lors d'Exobio'99, première école CNRS d'Exobiologie (Propriano, octobre 1999). Le succès de cette première école induisit l'organisation d'une seconde école, Exobio'01, consacrée aux *Traces du Vivant* (La Colle-sur-Loup, septembre 2001). Certains des intervenants présents lors de cette deuxième école acceptèrent de rédiger les textes qui suivent. Ils les rédigèrent dans le même état d'esprit que celui qui a présidé à l'élaboration du premier livre en destinant ces textes à des lecteurs avertis, mais non-spécialistes, des questions que l'origine de la vie et la vie « ailleurs » posent à l'astronome, au géologue, au chimiste et au biologiste.

Le terme *Exobiologie*, équivalent français d'*Astrobiology* ou de *Bioastronomy* utilisé dans le monde anglo-saxon, désigne un domaine de recherche extrêmement vaste. L'accrétion du Système Solaire et la formation des planètes, l'origine des molécules constitutives des êtres vivants et l'origine de la vie sur Terre, les planètes extrasolaires, les traces de vie présentes et passées sur d'autres corps du Système Solaire et en dehors de celui-ci, sont des sujets qui relèvent de l'Exobiologie et cette liste n'est pas exhaustive. Pour des raisons évidentes, l'Exobiologie est une discipline qui ne connaît pas les traditionnels clivages entre astronomes, chimistes, physiciens, géologues, biologistes ou encore entre expérimentateurs et théoriciens, observateurs et modélisateurs. Certes, la même personne ne peut posséder toutes les connaissances requises pour être « exobiologiste » et l'on peut même affirmer que l'Exobiologie existe comme discipline scientifique mais, qu'en revanche, il n'existe pas d'exobiologiste. Ceci étant, il existe une large communauté de scientifiques qui partagent le même intérêt pour l'étude des grandes questions posées précédemment et qui, chacun en fonction de ses connaissances et des outils théoriques ou expérimentaux dont il dispose, contribue à élucider ce vaste puzzle.

Comme souvent, sinon toujours, lorsqu'il s'agit de questions qui concernent soit le passé, soit un « ailleurs » où l'on ne peut aller et qu'on ne connaît que de manière indirecte, il faut se satisfaire de réponses qui prennent la forme de scénarios mais jamais de certitudes. En cela la démarche de l'exobiologiste s'apparente à celle de l'archéologue, à celle du paléontologue ou encore à celle du sédimentologue. Toutefois, et à titre d'exemple, il existe une différence considérable entre la démarche du chimiste qui s'intéresse à l'origine de la vie, et donc à l'évolution chimique prébiotique, et la démarche du paléontologue qui recherche les causes ayant conduit à la disparition des dinosaures. Le paléontologue dispose, de fossiles, de traces diverses qui, eux, sont des données objectives.

Rien de semblable pour le chimiste qui s'intéresse à l'origine de LUCA, ce premier ancêtre commun qui a sans doute été précédé par d'autres micro-organismes sans descendance. Comment LUCA était-il? Un procaryote autotrophe ou hétérotrophe? Appartenait-il au « Monde ARN » ou à un monde qui lui aurait précédé, basé sur des polypeptides doués d'activités catalytiques? Était-il mésophile ou était-il extrémophile? De même, il existe une différence majeure entre la démarche du sédimentologue, spécialiste de la transition Crétacé-Jurassique, et celle du planétologue qui tente de décrire la Terre durant la période de bombardement intense. Le premier dispose d'observations portant sur la teneur en iridium et en suies des sédiments correspondant à la transition K/T, observations qui lui permettent de conclure qu'il est possible qu'une chute d'astéroïde soit à l'origine de cette transition, alors que le second ne dispose que de données très indirectes basées sur l'observation des cratères lunaires et surtout sur des simulations, elles-mêmes basées sur des modèles théoriques.

Comment le scientifique réagit-il face à des scénarios qu'il sait ne pas pouvoir totalement valider? S'il est isolé, il pourrait être tenté de privilégier exagérément « son » scénario par rapport à d'autres. S'il fait partie d'une communauté, telle celle qui existe aujourd'hui au niveau mondial et qui se réclame de l'Exobiologie, il sait que son scénario sera passé au crible des autres disciplines. Il ne sert à rien pour un chimiste d'invoquer le rôle d'une réaction auto-catalytique prébiotique si les conditions nécessaires pour que cette réaction se déroule sont tout à fait incompatibles avec les conditions qui, selon les planétologues, régnaient sur la Terre primitive. Cet exemple simple illustre l'importance d'un dialogue interdisciplinaire pour qui se réclame de l'Exobiologie; des écoles comme celle de Propriano et de La Colle-sur-Loup ont contribué à renforcer ce dialogue au sein de la communauté scientifique française.

Nous espérons que ce livre, comme le précédent de la série, permettra à ceux qui ont participé aux écoles de prolonger leur réflexion et fournira à ceux qui s'intéressent à ce domaine fascinant qu'est l'Exobiologie d'approfondir leurs connaissances.

Nous espérons aussi que ce livre stimulera des vocations pour les carrières scientifiques. Nul ne peut contester en effet que les interrogations qui sont celles de l'Exobiologie font partie des grandes questions que l'homme se pose et auxquelles ces dernières décennies ont apporté des réponses scientifiques nécessairement partielles mais de plus en plus plausibles.

Muriel GARGAUD, Didier DESPOIS, Jean-Paul PARISOT et Jacques REISSE

## Remerciements

Ce livre est celui d'une communauté pluridisciplinaire qui accepte de remettre en question les connaissances fournies par sa discipline d'origine, afin d'apporter sa pierre à l'édifice complexe qu'est la recherche des origines de la vie. Cela demande une grande ouverture d'esprit et aussi d'accepter la remise en question de ses propres idées par les découvertes récentes des autres disciplines.

L'ensemble des textes qui suivent, ont été relus par nous-mêmes, qui avons alternativement joué les rôles de « rapporteur spécialiste » et « rapporteur candide », et par un ensemble de rapporteurs extérieurs. L'élaboration de ces textes a demandé des remanie-

---

ments multiples, de longues discussions, et parfois l'intervention de cinq ou six spécialistes pour trancher sur un point particulier.

Nous voudrions remercier chaleureusement :

- l'ensemble des tous les auteurs qui ont accepté ces remarques/critiques/discussions multiples, avec modestie et bonne humeur, dans le seul but de proposer au lecteur un scénario pluridisciplinaire cohérent et plausible pour l'ensemble de la communauté scientifique;
- les auteurs qui, en plus de leur propre travail de rédaction, ont accepté de jouer le rôle de « rapporteur spécialiste » pour les textes relevant de leur expertise scientifique. Nous tenons à remercier en particulier : Bernard Barbier, André Brack, Purificación Lopez-Garcia, Daniel Prieur et François Raulin;
- les « rapporteurs » extérieurs à ce livre qui par leur expertise ont contribué à la cohérence générale de cet ouvrage. Nous remercions en particulier : Alain Figureau, Patrick Forterre, Luc Jaeger, Hervé Martin, Alessandro Morbidelli, David Moreira et François Robert.

De la matière divisée à la matière condensée, puis à la matière organisée, la matière vivante et la matière pensante, l'évolution de l'Univers se fait vers une augmentation de complexité par auto-organisation.

Ainsi émerge la question fondamentale posée à la science et, en particulier à la chimie, la science de la structure et de la transformation de la matière : comment la matière devient-elle complexe? Quelles sont les étapes et les processus qui conduisent de la particule élémentaire à l'organisme pensant, l'entité présentant (actuellement!) la complexité la plus élevée?

Il s'y ajoute deux interrogations directement liées : l'une ontogénétique, comment cela s'est-il fait, comment la matière est-elle devenue de plus en plus complexe dans l'histoire de l'Univers, jusqu'à l'évolution du monde biologique? Et l'autre épigénétique, quelles autres formes et quelles formes plus hautes de la matière complexe restent-elles à produire, à créer?

La chimie fournit les moyens d'interroger le passé, d'explorer le présent et de construire des ponts vers le futur.

Le passage du moléculaire au supramoléculaire représente une étape nécessaire de la complexification de la matière où se retrouve notre propre domaine d'activité. Dans ses développements les plus récents, science et ingénierie supramoléculaires s'inscrivent dans la perspective de la compréhension, du contrôle et de la manipulation des processus d'auto-organisation, touchant ainsi aux trois questions posées ci-dessus : comment cela se fait-il? Comment cela s'est-il fait? Que reste-t-il à faire?

Le présent ouvrage met en scène à la fois l'évolution chimique et l'évolution biologique. Les auteurs établissent un état des connaissances actuelles dans leur domaine, tableau fascinant pour chimistes et biologistes, mais aussi pour quiconque se pose la question ultime, comment l'univers a-t-il produit et pu produire une entité capable de s'interroger sur ce dont elle est issue et comment (oserais-je ajouter pourquoi?) elle en est issue?