

Muriel Gargaud, Hervé Martin, Purificación López-García,
Thierry Montmerle, Robert Pascal

Le Soleil, la Terre... la vie

La quête des origines



BELIN • POUR LA SCIENCE

CHAPITRE 1 La formation du Soleil et des planètes



- L'enfance protoplanétaire du Soleil 19
- Des disques aux planètes 33



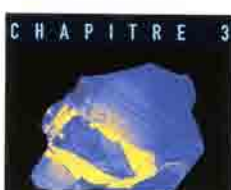
CHAPITRE 2 Formation et prime enfance de la Terre



- La différenciation rapide d'un cœur métallique : le noyau 54
- L'ouverture d'un parapluie protecteur : la naissance du champ magnétique terrestre 60
- Une Terre partiellement fondue : l'hypothèse de l'océan magmatique 61
- La naissance des enveloppes externes : l'atmosphère et l'hydrosphère 68
- Conclusion : une planète sans doute inhabitable 74



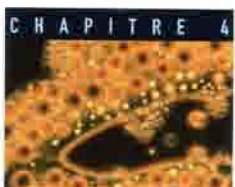
CHAPITRE 3 De l'eau, des continents, de la matière organique...



- Les deux visages de l'écorce terrestre 79
- Le fabuleux message des zircons de Jack Hills 83
- L'atmosphère entre 4,4 et 4,0 Ga : une esquisse 90
- De l'atmosphère au fond des océans : une Terre riche en matière organique ? 96
- Une niche disponible pour la vie, déjà ? 107



CHAPITRE 4 Intermezzo : la gestation de la vie et ses premiers pas



- De la chimie à la biologie 114
- L'incontournable question : qu'est-ce que la vie ? 118
- L'origine du métabolisme 121
- L'origine des systèmes génétiques 130
- L'origine des compartiments 141
- Pour conclure sur la gestation de la vie... 146
- Le dernier ancêtre commun aux êtres vivants : esquisse d'un portrait-robot 149
- Les premières diversifications du vivant 164



CHAPITRE 5 Le bombardement météoritique tardif



178

- À la recherche des impacts perdus 180
- Le bombardement tardif ou continu : deux scénarios en compétition 184
- Le bombardement tardif intense : scénario pour un cataclysme 186
- Sous une pluie de météorites : les conséquences du bombardement tardif intense 190



CHAPITRE 6 Les messages des plus vieilles roches terrestres



192

- Les reliques dispersées d'un des plus anciens continents 195
- Il y a 3,4 milliards d'années, au cœur d'un vaste continent archéen... 198
- La saga des plus vieux continents archéens 201
- Une modélisation de l'atmosphère terrestre à 3,8 Ga 214
- Les océans archéens : salés et chauds ? 218
- La machine Terre à l'Archéen : la tectonique des plaques de 3,8 à 2,5 Ga 221
- Une planète de nouveau habitable et déjà habitée 228
- Les traces de vie anciennes : données et controverses 229



CHAPITRE 7 Une planète où la vie se diversifie



242

- De la Terre primitive à la Terre moderne... 244
- Naissance, vie et mort d'un océan : le cycle de Wilson 245
- Des géants éphémères : les supercontinents et leur cycle 248
- Les conséquences cruciales du cycle des supercontinents sur l'environnement terrestre 248
- L'apparition de l'oxygène atmosphérique : révolutionnaire ! 250
- Des événements perturbateurs 254
- L'évolution des lignées procaryotes 262
- L'origine et la diversification des eucaryotes 264



- Épilogue 275
- Les grands principes de classification des roches 282
- Glossaire 288
- Bibliographie 298

Les questions relatives à l'origine de la vie sur Terre et à sa possible présence ailleurs dans l'Univers ont fasciné l'homme depuis l'Antiquité, que ce soit en sa qualité d'homme de science, de philosophe, ou tout simplement de citoyen du monde. Parvenir à élucider comment la vie est apparue sur Terre serait l'aboutissement d'une sorte de quête des origines très ancienne. Cet aboutissement constituerait de plus une avancée décisive dans la connaissance d'un processus naturel très complexe, dont le déroulement soulève de multiples interrogations. Ce sont ces interrogations, fascinantes et souvent encore sans réponse, qui sont au cœur de l'ouvrage que nous vous proposons.

Nous ne connaissons, à ce jour, qu'un seul exemple de vie : celui de la vie terrestre. Définir la vie et ses propriétés essentielles n'est une tâche simple ni pour le biologiste, qui étudie la vie, ni pour l'épistémologue, qui appréhende la manière dont l'homme conceptualise le monde qui l'entoure. Nous savons cependant reconnaître la vie comme un état d'une matière complexe évoluant dans un contexte dynamique. En tant que telle, la vie n'échappe donc pas aux lois de la physique. Bien au contraire, elle est fondée sur des mécanismes physiques et chimiques qui prennent place dans un environnement géologique spécifique : celui de notre planète. Aussi, la vie résulte d'un processus *naturel* et cela implique qu'il est fort possible que d'autres vies soient apparues ailleurs dans l'Univers, sur des fondements physiques et chimiques analogues ou différents, mais toujours contraints par l'universalité des lois de la nature.

Explorer quand et comment la vie a émergé

Est-il vraiment possible que la vie que nous connaissons aujourd'hui sur Terre soit le résultat d'un concours de circonstances unique dans l'histoire de l'Univers ? Quel est le poids relatif du déterminisme, du hasard et de la contingence dans l'émergence du vivant ? La vie est-elle le fruit d'une complexification graduelle et continue de la matière, ou bien y a-t-il eu, à un moment donné, un saut soudain de complexité conduisant à l'émergence de propriétés nouvelles – par exemple à travers la combinaison de plusieurs éléments en interaction ? Toutes ces questions restent actuellement ouvertes, mais il est très probable que l'examen des scénarios susceptibles d'expliquer l'émergence de la vie sur Terre puisse progressivement nous procurer quelques éléments de réponse. Pour autant, l'esprit et la démarche des scientifiques qui s'intéressent à ce problème sont très variables selon les disciplines.

Ainsi, l'astrophysicien cherche à savoir si d'autres objets du système solaire peuvent abriter la vie, voire s'il existe, au-delà du système solaire, « d'autres Terres » ou, à tout le moins, d'autres planètes « habitables ». Il attend de l'étude de la vie terrestre et de ses origines la détermination des conditions qui ont été nécessaires à son développement, cela afin de focaliser sa recherche sur des objets extraterrestres où des conditions analogues sont susceptibles d'être réunies – ces objets étant alors considérés comme

potentiellement habitables. Le chimiste, lui, tente de comprendre les processus d'auto-organisation et d'établissement de réseaux de réactions menant à des systèmes capables d'évoluer comme le font les êtres vivants. Il cherche ainsi à déterminer comment, sur Terre, le passage de la chimie organique abiotique à la biochimie a pu s'opérer. Le géologue s'intéresse à l'histoire de la planète et à l'impact de la vie sur son évolution, mais, surtout, il tente de définir le plus précisément possible les conditions environnementales qui ont présidé à l'émergence du vivant et favorisé son développement. Enfin, le biologiste cherche à savoir comment l'évolution biologique s'est mise en marche pour donner naissance à une extraordinaire diversité d'organismes possédant des formes, des tailles et des facultés très différentes, mais partageant tous des propriétés communes. Explorer *comment* et *quand* – deux questions cruciales – la vie a émergé dans ce petit coin de l'Univers qu'est la planète Terre, interpelle autant les uns que les autres, mais chacun ne peut répondre qu'en fonction du cadre conceptuel qui lui est inhérent.

Concernant la question « quand ? », nous verrons qu'une première difficulté est liée à la notion de temps, cette quatrième dimension difficile à appréhender et pour laquelle les scientifiques des différentes disciplines ont besoin de fixer des conventions communes s'ils veulent pouvoir parler de la même chose. Le temps est en effet mesuré différemment par l'astrophysicien, pour qui le temps s'écoule de manière absolue à partir d'un instant initial de référence t_0 – qui correspond au début de la formation du Soleil, il y a 4,57 milliards d'années (4,57 Ga) de cela – et par le géologue ou le biologiste, qui mesurent le temps à rebours, de manière relative par rapport au moment présent. Cette spécificité est bien tangible dans ce livre où, pour un événement donné, on passera d'une échelle absolue du temps exprimée en milliards d'années *vers notre présent* à partir de l'instant de référence t_0 (ce sera le cas des premiers chapitres, relatifs à la formation du système solaire), à une échelle relative exprimée en milliards d'années *vers le passé* (ou « avant le présent », soit, par convention, à partir de l'année 1950) lorsque, dans notre récit, la géologie, puis la biologie, prendront le pas sur l'astrophysique¹. Le chimiste est désorienté et troublé par ces notions de temps à grande échelle, qu'elles soient absolues ou relatives. En effet, plus que le moment historique où elles se sont produites, l'essentiel est, pour lui, la cinétique et donc la durée relative des réactions chimiques qui, pour ajouter à la difficulté, ne peuvent être appréhendées que de manière statistique (c'est-à-dire sur des populations de molécules, par opposition au destin individuel aléatoire d'une molécule unique). Quoi qu'il en soit, toutes ces disciplines doivent savoir à quelle échelle de temps commune elles se réfèrent lorsqu'elles tentent de répondre à la question « quand la vie est-elle apparue ? ». Nous verrons dans cet ouvrage que, si cette interrogation demeure sans réponse précise, on peut malgré tout définir une fourchette de temps pendant laquelle a eu lieu le passage de l'inerte au vivant.

Répondre à la question « comment ? » est plus difficile et controversé. Nous ne pourrions jamais obtenir de réponse définitive, car la vie est un processus historique, c'est-à-dire qui a évolué au cours du temps de façon irréversible. Tout au plus pouvons-nous espérer parvenir à reconstruire un scénario plausible, compatible avec les lois de la physique ainsi qu'avec les données expérimentales et les observations présentes et à venir. À ce jour, il n'y a pas, loin s'en faut, de consensus autour de cette question, et nous

1. Pour simplifier, dans la suite de l'ouvrage, nous parlerons simplement de « milliards d'années ». Ainsi, quand nous écrivons qu'un événement a lieu « à 2,7 Ga », cela signifie qu'il s'est produit « à 2,7 milliards d'années avant le présent », c'est-à-dire « il y a 2,7 milliards d'années ».

manquons cruellement de données fiables et réalistes sur les conditions physico-chimiques qui régnaient sur la Terre primitive où a émergé le vivant. En conséquence, de nombreuses hypothèses, s'excluant souvent mutuellement, ont été proposées par les chercheurs. Certaines d'entre elles, même si elles permettent d'expliquer les observations, ne pourront jamais être testées. D'autres, en revanche, sont susceptibles d'être un jour être réfutées si elles ne s'accordent pas avec le nombre sans cesse croissant de données observables. À ces difficultés structurelles, s'ajoute un paramètre humain se traduisant par le fait qu'il existe des écoles de pensée opposées, qui refusent parfois avec un certain dogmatisme de considérer et d'analyser en détail les arguments qui ne sont pas les leurs. Il faut toutefois demeurer optimiste: cette situation tend à disparaître au fur et à mesure que de nouvelles données, plus fiables, sont acquises, et que la recherche de voies alternatives, souvent intermédiaires, permet de proposer des scénarios plus solides. Nous avons choisi, dans la mesure du possible, de donner une vision ample et la plus neutre possible de ces différents modèles, préférant insister davantage sur les données existantes que sur leurs interprétations dans un contexte partisan.

Un pari original: croiser le regard de plusieurs disciplines

Le but de notre ouvrage est de présenter de façon chronologique – ou, du moins, dans la logique d'une succession relative d'événements – l'histoire de l'origine de la vie et les conditions qui ont permis son apparition sur Terre. Le pari original qui le fonde est qu'à chacun des temps qui scandent cette chronologie, les différents spécialistes que nous sommes prenons *ensemble* la parole pour lever un coin du voile, avec les approches et les questions propres à leur discipline d'origine. À l'image des questions qu'il traite, notre ouvrage est donc résolument transdisciplinaire. Ainsi, l'astrophysique et la géologie permettront de reconstituer l'histoire de la formation du Soleil, du système solaire et de la Terre. La géologie et la chimie, auxquelles la biologie imposera certaines contraintes liées à l'observation, traiteront de la mise en place des conditions suffisantes pour qu'une chimie complexe et que la vie puissent apparaître. Enfin, la biologie permettra d'esquisser les principaux traits de l'évolution et de la diversification des organismes des grands domaines du vivant, et en particulier de discuter de l'émergence des cellules eucaryotes et de leur diversification, jusqu'à l'apparition des animaux et des plantes terrestres, qui forment la plus grande partie de ce qui est observable pour un œil humain.

Nous avons décidé d'arrêter ce grand récit à l'explosion cambrienne, il y a 540 millions d'années de cela, quand les ancêtres des grandes lignées animales que nous observons aujourd'hui font leur apparition. À ce moment-là, l'évolution biologique est en marche depuis 2, voire 3 milliards d'années, et les directions multiples qu'elle va prendre par la suite – y compris l'apparition de l'homme au sein d'une petite lignée taxonomique parmi des centaines d'autres – sont de moindre importance pour notre compréhension des origines et de l'évolution primordiale de la vie sur Terre.