

Astrobiologie : origine et évolution de la Vie.

Vassilissa Vinogradoff¹, Beatriz García², Rosa M. Ros³

1. CNRS, Aix-Marseille Université, PIIM laboratory, Marseille, France.

2. ITeDA and National Technological University, Argentina

3. Technical University of Catalonia, Spain

Résumé

L'exobiologie n'est pas une discipline mais un regroupement interdisciplinaire autour de la question de l'Origine et de l'évolution de la vie sur Terre et de sa possible présence ailleurs dans l'Univers. L'exobiologie englobe tous les domaines s'intéressant à cette question, depuis l'astronomie jusqu'à la biologie, en passant par la géologie et la chimie, mais aussi l'histoire et la philosophie des sciences. Les objectifs sont multiples et englobe en particulier : définir la Vie, déterminer son origine, rechercher ses plus anciennes traces, comprendre ses mécanismes d'évolution sur Terre mais aussi rechercher la vie dans l'univers ¹. Par ces recherches, l'Exobiologie tente de déterminer si la vie pourrait exister ailleurs dans l'univers et si oui sous quelle forme, afin d'essayer de répondre à une question existentielle : sommes-nous seuls dans l'univers ? Il est apparu évident depuis quelques dizaines d'années que tant que l'apparition de la vie n'avait pas été comprise sur Terre, tant que nous ne pouvions déterminer s'il s'agissait d'un hasard ou d'un phénomène reproductible dans certaines conditions et environnement précis, il nous était alors impossible de trancher sur une possible vie ailleurs dans l'univers, bien qu'elle soit activement recherchée, jusqu'ici sans succès.

Ces questionnements ont émergé avec le développement de la chimie organique dès le 19ème siècle, l'exploration spatiale au 20ème (dès 1969 avec les missions Apollo) et la quête humaine de trouver de la vie ailleurs (exemple des missions martiennes). L'Exobiologie désignait alors la recherche et l'étude de la vie en dehors de notre planète. Désormais et après des avancées majeures dans la thématique depuis les années 1990, ce terme réunit tout ce qui a trait à la question de l'origine et l'évolution de la Vie sur Terre ou ailleurs dans l'Univers.

Définition courte de l'Exobiologie

L'Exobiologie concerne la recherche des origines et de l'évolution de la vie sur Terre, et de sa possible présence ailleurs dans l'Univers ². Ce vaste domaine regroupe des recherches

¹ Gargaud, M., Claey's, P., & Martin, H. (Eds.). (2005). *Des atomes aux planètes habitables* (Vol. 3). Presses Univ de Bordeaux.

² Gargaud, M., Montmerle, T., Pascal, R., Lopez-Garcia, P., & Martin, H. (2009). *Le Soleil, la Terre... la vie: la quête des origines* (p. 304). BELIN: POUR LA SCIENCE.

interdisciplinaires portant par exemple sur les traces de vie anciennes sur Terre à partir de l'analyse des plus anciennes roches ; les conditions physico-chimiques dans lesquelles se trouvaient la Terre primitive il y a 4.5-4 milliards d'années au moment de l'apparition de la vie ; la diversité de la matière organique disponible dans ces environnements qui aurait mené au développement d'une chimie prébiotique ; le passage de l'abiotique au biotique par l'émergence de systèmes chimiques sélectionnés pour faire un système vivant ; l'évolution des premières entités sur Terre jusqu'à notre dernier ancêtre commun en passant par l'étude des organismes extrémophiles tels les Archéobactéries ; la recherche de vie ailleurs par les missions spatiales dans le système solaire, sur les exoplanètes et dans l'Univers en général ; et pour finir sur la définition de la vie elle-même et de ses implications philosophiques.

Une profonde interaction et de l'interdisciplinarité entre les différentes disciplines de physique, chimie, biologie, géologie, biochimie, planétologie, informatique, philosophie et épistémologie est donc nécessaire pour le développement et l'avancement de l'Exobiologie. Bien que chaque chercheur soit spécialisé dans une discipline précise, il est essentiel aujourd'hui d'être à l'écoute des autres disciplines et des avancées réalisées dans les autres champs de recherche quand il s'agit d'appréhender la question des Origines de la vie et de parler d'Exobiologie.

Histoire de la question des origines de la vie

Etonnement, la question de l'Origine de la vie n'est pas une question que l'homme se pose depuis la nuit des temps. En effet, jusqu'au début du 19^{ème} siècle, la théorie de la génération spontanée, décrivant que la vie puisse apparaître spontanément dans n'importe quel milieu, était communément acceptée. Cette théorie, adoptée par de nombreux grands scientifiques de l'époque, a même été validée par des expériences comme celle de Jean-Baptiste Van Helmont décrites dans plusieurs ouvrages dès 1648. Cette expérience montrait qu'il était possible de voir « apparaître » des souris dans un bocal rempli de farine de blé, scellé par une chemise de femme (sale), disposé au fond de la cave dans le noir (des variantes parlent de couvertures et autres linges sales). Considérées aujourd'hui comme de la contamination, ces expériences et la théorie de la génération spontanée sont restées en vigueur jusqu'au début du 19^{ème} siècle.

Il a fallu attendre l'avènement de la chimie organique et des premières synthèses de molécules pour démontrer que les composés organiques suivent les mêmes lois que les composés inorganiques et n'étaient donc pas liés forcément au vivant. L'une des premières synthèses mémorables fut réalisée par Friedrich Wöhler en 1828 qui réussit la synthèse de l'urée, une molécule identifiée dans le foie des animaux et considérée comme seulement d'origine biologique par des chimistes comme Jöns Jacob Berzelius. A la même époque, Charles Darwin (1809-1882), naturaliste et paléontologue anglais, mène pendant plusieurs années des observations et des travaux sur les espèces qui vont révolutionner notre vision de l'évolution du vivant. En 1859, il publie la première édition de son livre « *Origins of species* ». Bien qu'il ne soit pas question de l'origine de la vie dans son ouvrage, la théorie de l'évolution fait notion que toute espèce vivante dérive et provient d'ancêtre commun. Le postulat tombe :

nous sommes tous liés à un ancêtre commun, dont la forme de vie est beaucoup plus simple que nôtre vie actuelle.

L'origine de la vie est donc repoussée à un passé lointain, mais la théorie de la génération spontanée demeure pour ces premiers êtres vivants. Quelques années plus tard (1861), c'est Louis Pasteur, fervent opposant de la théorie de la génération spontanée qui donne le coup de grâce en soutenant que ce sont des microorganismes, appelés germes à l'époque, présents dans l'air et autres matières, qui engendrent la formation de nouveaux organismes. Il démontre avec son expérience du « col du cygne », que lorsque l'air et le milieu sont correctement stérilisés, aucune production de microbe n'est observée. A partir de ce moment-là, la théorie de la génération spontanée est peu à peu abandonnée.

A la fin du 19^{ème} siècle, la science est alors dans une impasse, d'un côté Charles Darwin propose que toutes les espèces ont une origine commune, et de l'autre côté Louis Pasteur nous démontre que la génération spontanée n'existe pas. Certains grands scientifiques de l'époque comme Berzelius, ou Lord Kelvins proposent alors que la vie existe partout dans l'univers et qu'elle est venue d'ailleurs. Elle pourrait avoir été apportée sur Terre par des spores contenues dans les météorites ou comètes. C'est la théorie de la panspermie. A noter qu'à l'heure actuelle, aucune trace de vie, de bactérie ou autre spore n'a été trouvée dans ces objets extraterrestres, seulement des molécules organiques. Néanmoins cette théorie (encore soutenue et modélisée par certains scientifiques à l'heure actuelle) persiste et est considérée comme la seule explication plausible pendant quasiment un siècle, jusqu'à la parution en 1924 d'un livre d'Alexander Oparin³. Biochimiste soviétique, Alexander Oparin, qui mène alors des travaux sur le métabolisme, a une seconde passion, à savoir formuler des hypothèses sur l'origine de la vie. Dans la continuité des travaux des chimistes du XIX^{ème} siècle, qui réfutent de plus en plus la limite entre l'inorganique (le minéral) et l'organique en synthétisant en laboratoire des molécules comme des sucres ou des acides aminés, Alexander Oparin propose une continuité entre les deux. Il décrit dans son livre que la matière a évolué dans nos océans, en suivant les lois de la physique et de la chimie, transformant des composés simples en des molécules plus complexes qui, dans la « soupe primitive » permettront ensuite de former des agrégats de matière et par complexification aboutiront à la production de cellules. Ce concept est aussi proposé par un généticien britannique, J.B.S Haldane, au même moment et indépendamment. Bien qu'attrayante, cette hypothèse sur l'origine de la vie reste à confirmer.

Quelques années plus tard, en 1953, un chimiste du nom de Stanley Miller, doctorant de Harold Urey, réalise la première expérience de chimie prébiotique qui testera la proposition d'Oparin. Il simule l'environnement de la terre primitive et démontre que, dans un environnement de vapeur d'eau, des molécules gazeuses exposées à une source d'énergie peuvent se transformer pour produire des composés organiques complexes, tels des acides aminés, indispensables à toute forme de vie terrestre.

³ Oparin, A. I.; The origin of life on the Earth. 1957 No.3rd Ed pp.xviii + 495 pp.

Depuis 1953, les expériences de chimie prébiotique se sont multipliées et contribuent chaque jour un peu plus à comprendre comment il est possible de former les molécules de bases du vivant, à savoir des protéines, de l'ADN (acide désoxyribonucléique) (ou ARN-acide ribonucléique) et des lipides.

Etymologie : Exobiologie et Astrobiologie

Dès le début des années 1960, la course à l'espace est lancée, et avec elle les premières missions d'exploration lunaire et martienne. Le risque de contamination biologique apparaît dans le langage autant dans le sens de transporter des microbes terrestres vers les autres astres que de ramener sur Terre de la vie extraterrestre. Joshua Lederberg, microbiologiste et généticien (Prix Nobel de Médecine 1958) suit alors de près la question de la contamination et permet la mise en place de protocoles stricts de décontamination des vaisseaux spatiaux. La NASA sollicite Joshua Lederberg pour développer des protocoles d'analyses biochimiques d'échantillons lunaire et martien, en prenant en compte notre propre contamination. A noter que dans les années 1960, il était présumé improbable par les scientifiques que des microbes résistent aux conditions de l'espace. Nous savons aujourd'hui que ce n'est pas le cas et par exemple les Tardigrades, une des espèces vivant sur Terre, sont capables de résister à des conditions extrêmes et même à celles de l'espace. Le cas des Tardigrades n'est pas isolé et d'autres espèces vivantes comme des bactéries peuvent aussi être résistantes à un environnement extrême.

Joshua Lederberg, adepte de la théorie de la Panspermie, crée alors en 1960 le terme Exobiologie, suite à une présentation scientifique au COSPAR (Comité de recherche spatiale)⁴. Il pose les bases de cette nouvelle science, alors définie comme seulement la recherche de vie ailleurs, qu'il nomme Exobiologie. L'alliance de l'exploration spatiale en plein boom à partir de ce moment-là, du livre d'Alexandre Ivanovitch Oparin sur la question de l'origine de la vie⁵ et de l'expérience pionnier de Miller-Urée dans le domaine de la chimie prébiotique, font de l'Exobiologie la nouvelle discipline clé pour chercher les origines de la vie via l'exploration spatiale. Avec l'astronome Carl Sagan et le physicien Elliott Levinthal, Joshua Lederberg s'intéresse au potentiel de contamination martienne. Ils feront tous trois partie des équipes scientifiques des missions Viking, qui ont atterri et permis d'étudier Mars dès 1976. Convaincu de la présence de vie sur Mars, ces missions devaient confirmer sa présence. Ces expériences d'Exobiologie embarquées ont contribué aux premiers développements d'expériences *in-situ* sur les objets du système solaire.

Conjointement, une communauté de chercheurs se crée autour de la question de l'origine de la vie, avec les savants qui dès les années 1950 ont commencé les études de chimie pour la

⁴ Lederberg, J. 1960, Science, 132 (American Association for the Advancement of Science), 393

⁵ Oparin, A. I.; The origin of life on the Earth. 1957 No.3rd Ed pp.xviii + 495 pp.

synthèse des premières molécules prébiotiques (cf l'expérience de Miller-Urey, Figure 1). En 1973, est fondée une société savante internationale regroupant différentes disciplines sur ces questions de l'origine de la vie, l'ISSOL (International Society for the Study of the Origin of life : <https://issol.org/>).

En 1982 l'Union Astronomique Internationale (IAU)- crée la commission "Bioastronomy: Search for Extraterrestrial Life" , renommée simplement Bioastronomy en 2006, puis « Astrobiology » en 2015⁶ .

L'ISSOL ainsi que la commission IAU-Astrobiology sont toujours actives et organisent régulièrement des conférences internationales regroupant les chercheurs travaillant sur la question des origines et de l'évolution de la vie, ainsi que de sa présence ailleurs dans l'Univers.

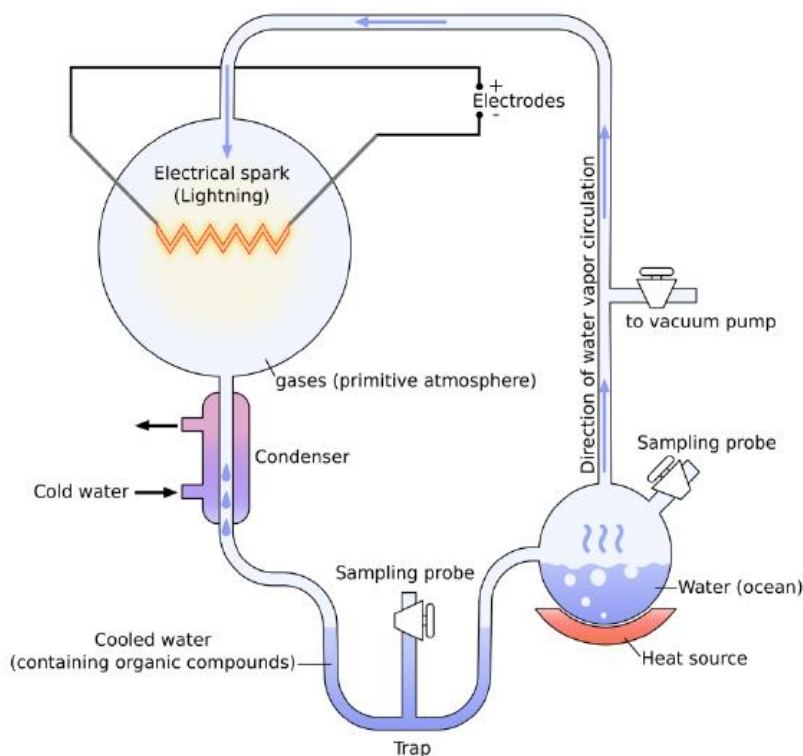


Fig. 1 Illustration de l'expérience Miller-Urey pour simuler l'environnement primitif de la Terre et la formation de molécules organiques complexes dans les océans (Crédit : La Barre, Stéphane. (2014). Biodiversité marine et chimodiversité : les trésors du futur.)

La différence entre les termes Exobiologie, Bioastronomie et Astrobiologie est désormais historique : le terme Exobiologie utilisé en France est synonyme du terme Astrobiologie utilisé ailleurs dans le monde.

⁶ https://www.iau.org/science/scientific_bodies/commissions/F3/

Définir la vie

Donner une définition de la vie, ou du moins du vivant est un des challenges les plus compliqués de l'Exobiologie même si un jour on trouve son origine. Au fil des découvertes et des années, on découvre que le vivant est si complexe, qu'il est très difficile d'en donner une définition la plus complète possible. Cette question fait appel à des arguments scientifiques mais est aussi un questionnement philosophique rendant toute définition relativement non-objective et orientée suivant le domaine scientifique de l'auteur. L'entrée écrite par Georges Canguilhem sur la Vie⁷ dans l'encyclopédie reprend les concepts et événements majeurs de cette recherche sur la définition de la vie jusqu'aux années 1990.

Au cours des temps, différents savants et personnalités scientifiques ont proposé des définitions de la vie. L'une des plus anciennes remonte à Aristote (~300 av. J.C.) et était assez basique : « Nous entendons par vie, le fait de se nourrir, de croître et de dépérir par soi-même ». Puisque l'origine de la vie n'avait pas d'intérêt pendant des siècles, sa définition était restée très factuelle.

L'avènement de la science et des grandes découvertes en chimie organique et biologie dès le 17ème siècle ont apporté des éléments nouveaux et la question de la définition de la vie s'est posée. Une des définitions les plus utilisés aujourd'hui est le fruit d'un groupe de travail à la NASA, dont Gerald Joyce faisait partie et a qui est souvent attribué cette définition dû à ses propres travaux scientifiques sur les systèmes auto-répliatif : « La vie est un système chimique auto-entretenu capable de subir une évolution darwinienne. ». Dans les interviews, G. Joyce réfute de porter à lui seul cette définition, puisqu'il s'agit en fait d'un groupe de travail du programme Exobiologie de la NASA qui l'a proposé vers 1995. Il met néanmoins l'accent sur « l'importance du système (composé de molécules chimiques) en tant qu'entité avec une mémoire moléculaire qui permet l'évolution darwinienne »⁸.

Lors des études sur la définition du vivant on s'aperçoit alors que chaque définition est le point de vue du scientifique par rapport à ses propres connaissances et domaine scientifique et qu'il faudrait éventuellement coupler toutes ces définitions pour approcher au mieux une définition. Mais d'ailleurs, en faut-il absolument une ? Pourquoi sommes-nous tant obnubilés par une définition de toutes choses, ce sont des interrogations de philosophes et autres épistémologistes qui font partie des thématiques de l'Exobiologie. Au vu de l'état des connaissances actuelles sur son origine et évolution, la vie est difficilement définissable, mais définitivement omniprésente partout sur Terre.

⁷ Georges CANGUILHEM, « **VIE** », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 28 juillet 2022. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/vie/>

⁸ <https://www.space.com/22210-life-definition-gerald-joyce-interview.html> (consulté en juillet 2022)

Diversité du vivant et recherche des plus vieilles traces de vie sur Terre

La vie terrestre étant jusqu'ici le seul exemple de vie connue, L'Exobiologie concentre une grande partie de ses efforts à étudier la vie terrestre, dans tous les environnements, en particulier les plus extrêmes, comme les sources hydrothermales sous-marines, les lacs de saumures ou les sites glacés. Ce type d'environnement pouvant être de bon analogues à des lieux extraterrestres. Afin de mieux comprendre les limites du vivant et les mécanismes mis en jeu dans les environnements extrêmes, les scientifiques cherchent à déterminer la diversité phylogénétique et métabolique des organismes vivants.

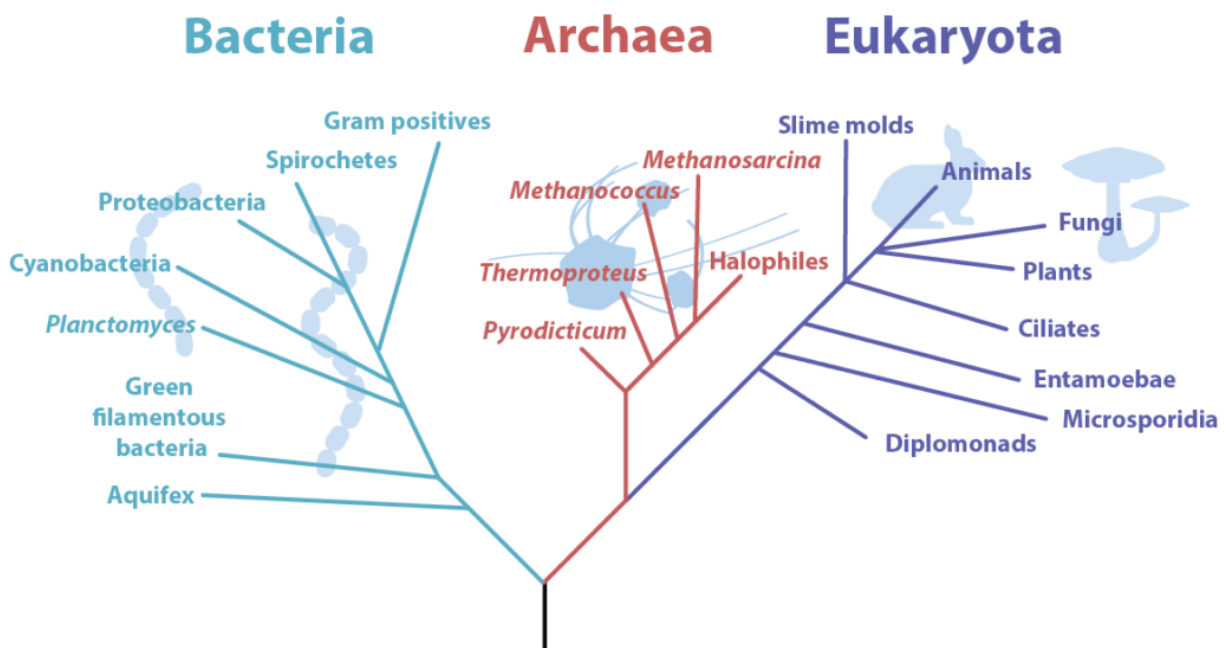


Fig. 2 Arbre phylogénétique simplifié des organismes vivants, représentant les trois groupes d'organismes vivants : les eucaryotes dont nous faisons partie, les bactéries qui sont des procaryotes unicellulaires ou multicellulaires, et les archées qui sont des micro-organismes unicellulaires distincts des bactéries (Crédit : <https://open.oregonstate.edu/generalmicrobiology/chapter/archaea/>)

Une des branches qui intéresse particulièrement les exobiologistes est la branche des archéobactéries⁹ (ou archées) (Figure 2), distincte des bactéries procaryotes par leur séquence ARN ribosomique et particulièrement adaptés pour des environnements extrêmes (en terme de pression, température, salinité, nutriments...). La spécificité des archéobactéries a été mise en évidence tardivement, en 1977, lors de la découverte de bactéries dans des sources hydrothermales, et ce grâce à l'avancée des techniques d'analyse (ici le séquençage ARN). Les archées forment ainsi un troisième groupe d'êtres vivants sur Terre dont l'étude apporte des

⁹ P. Forterre, C. Brochier & H. Philippe, « Evolution of the Archaea », in *Theoretical Population Biology*, 61, 2002

informations primordiales sur la compréhension des limites de la vie sur Terre et la recherche de nos origines. Les avancés en métagénomique ont permis par exemple d'isoler en 2015 un nouveau groupe d'archées, nommé les archées Asgard, qui sont proposées comme étant de potentiel ancêtres direct des Eucaryotes. Ce type d'organismes est une cible de choix pour étudier de possibles formes de vie ailleurs, dans des environnements comme Vénus, Mars, ou encore les satellites glacés autour de Jupiter et Saturne qui ont un océan sous leur surface.

Cependant, les procaryotes sur Terre ont eu des milliards d'années pour évoluer, s'adapter à leur milieu et mettre en place des systèmes biochimiques capables de supporter par exemple des pressions ou des températures extrêmes. Il faut noter également que sur Terre, il a fallu environ 1.5 milliard d'années aux microorganismes de type bactérie ou archée pour coloniser les océans et produire suffisamment d'oxygène qui s'est ensuite volatilisé dans l'atmosphère et a permis le développement d'organismes utilisant l'oxygène comme source d'énergie. A moins d'une même évolution sur une autre planète dans les mêmes conditions et avec les mêmes contingences terrestres (par exemple en termes de météorologie, de tectonique des plaques...), il est quasiment improbable de trouver ces mêmes entités en dehors de la Terre. Mais leur étude ouvre le champ des possibilités de vie dans des environnements a priori inappropriés.

La recherche des plus anciennes traces de vie sur Terre est un des axes de l'Exobiologie qui pourrait permettre de combler nos lacunes sur nos ancêtres à tous ¹⁰. Ces études rencontrent de nombreuses difficultés dues à la préservation difficile des fossiles au cours des temps géologiques.

La première difficulté est que la terre est une planète « vivante » (tectonique des plaques, érosion) qui a beaucoup évolué depuis sa formation il y a 4.5 milliards d'années, et par exemple il ne reste plus aucune roche datant de la première ère géologique, l'Hadéen. La recherche de fossiles se focalise donc sur la période après 4 milliards d'années, au temps de l'Archéen (4-2.5 milliards), où il reste sur Terre des roches sédimentaires, qui ont néanmoins évolué. Un fossile peut se présenter sous différentes formes, soit il est possible de retrouver des débris ou empreintes de végétaux ou animaux (coquilles, traces), soit si la structure du fossile n'existe plus, il s'agira d'identifier des signatures physiques (structurelles) ou chimiques (en particulier les rapports isotopiques du carbone). Dans tous les cas, il est maintenant établi, basé sur la généalogie des espèces, que les premiers organismes vivants devaient être des êtres unicellulaires de type bactérie.

Ainsi, la seconde difficulté dans la recherche de traces de vie ancienne, est que ces organismes devaient être microscopiques. Les plus anciennes traces de vie avérées sur Terre sont datées de 3.48 milliards d'années, découvertes en Australie. Ce sont des stromatolites (concrétion calcaire formée par des filaments bactériens), dont la forme indique qu'il y avait des bactéries, sans que celles-ci n'aient été retrouvées. Bien que de nombreuses propositions de traces de vie soient étudiées et publiées régulièrement par les scientifiques, aucune à ce jour n'a été totalement confirmée par la communauté, et actuellement toutes traces plus anciennes que

¹⁰ Gargaud, M. (2003). *Les traces du vivant*. Presses Univ de Bordeaux.

3.5 milliards d'années sont controversées, même si la limite de 3.8 milliard d'années semble probable.

La 3eme difficulté réside dans l'interprétation et la comparaison avec des systèmes abiotiques, qui auraient pu former des traces similaires à des signatures ou des morphologies biologiques. L'avancée des techniques analytiques depuis les années 1990, comme la microscopie électronique et les analyses isotopiques, permet souvent d'aider à trancher sur la controverse, en complément d'expériences avec des systèmes abiotiques. La recherche de traces fossiles est donc à l'interface entre la biologie, la chimie et la géologie, et demande des études extrêmement rigoureuses, avec plusieurs méthodes d'investigations pour augmenter la probabilité d'une origine biologique et non seulement abiotique.

Chimie prébiotique et le passage du non-vivant au vivant

Aujourd'hui, dans toutes les espèces vivantes sur Terre, parmi toute la diversité existante, il existe des briques élémentaires faites de C, H, N, et O que nous possédons tous. Ces briques se sont les protéines, à la base de la réplication, l'ADN (acide désoxyribonucléique) porteur de l'information génétique, et des amphiphiles, constituant des parois cellulaires pour la compartimentation. Ces briques sont en fait des enchaînements de molécules « simples », comme des acides aminés pour les protéines, des assemblages de sucres et bases azotées avec du phosphore pour l'ADN, et des lipides pour les membranes. L'élément qui ne fait pas partie des atomes abondants de l'univers mais qui pourtant est un pilier de notre chimie du vivant, c'est le phosphore. De nombreuses études cherchent donc à déterminer pourquoi le phosphore a été « choisi » comme élément clé dans l'ADN et l'ARN (acide ribonucléique) et quelle est son origine (inorganique ou organique). Les briques élémentaires que toute espèce vivante sur Terre possède, sont donc cinq types de molécules (qui sont parfois nommées briques de la vie), les acides aminés, les bases azotées, les sucres, le phosphore, les lipides (ou acides gras). Ces éléments sont indispensables à la vie terrestre et l'étude de leur origine nous permet de donner plus de contraintes à l'origine de la vie elle-même. Naturellement, et de manière abiotique, ces molécules ont pu être formées dans l'atmosphère terrestre, comme démontré par l'expérience de Miller-Urey mais aussi dans les sources hydrothermales. Une autre hypothèse propose que ces molécules aient pu être apportées par les objets célestes (les météorites). Ces derniers, provenant des astéroïdes et des comètes, intéressent beaucoup les scientifiques car les météorites se sont révélées d'une grande richesse organique (4-5 pourcent en masse). En tombant sur Terre, ces cailloux de l'espace auraient pu apporter sur Terre une partie de l'eau et des éléments sidérophiles se trouvant à sa surface après la différenciation il y a 4.5 milliard d'années. Aucune forme de vie dans ces objets n'a été à l'heure actuelle trouvée, mais ils contiennent de nombreuses molécules, des milliers de molécules pour les météorites carbonées, aussi diverses et variées que la synthèse abiotique est capable de le faire. Des acides aminés en grand nombre sont par exemple observés dans les météorites, ainsi que des sucres et de nombreux précurseurs organiques pour la formation des autres briques de la vie définie précédemment.

Ces découvertes, qui datent du XXI^e siècle, questionnent sur la possibilité de vie ailleurs puisque les briques de base peuvent être synthétisées dans l'espace. Mais ces objets nous informent aussi de la genèse du système solaire, de son origine et de sa complexité qui en comparaison avec les systèmes exo-planétaires pourrait être assez unique. La compréhension actuelle des phénomènes ayant potentiellement mené à la vie tendrait à dire que la Terre a eu des conditions particulièrement favorables pour l'apparition de la Vie, liées intimement à la formation du système solaire, à la Terre elle-même, et à toutes les contingences attenantes (même la présence de la lune s'est révélée primordiale).

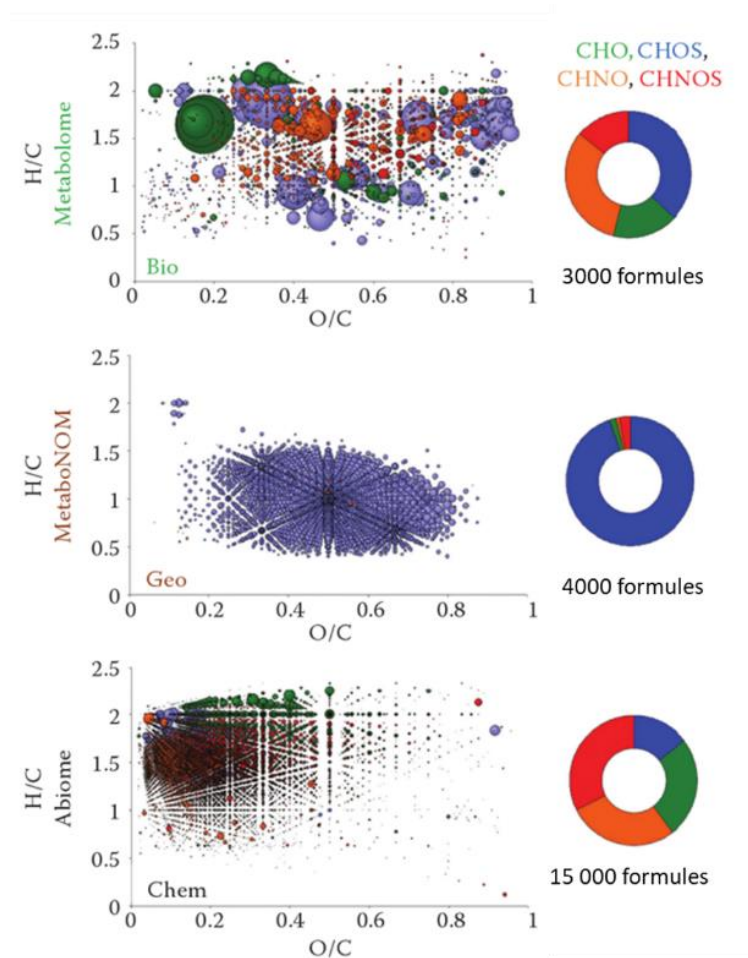


Fig. 3 Analyse

détaillée par spectrométrie de masse à haute résolution de molécules organiques présentes dans trois types de matière, représentées dans un diagramme de Van Krevelen des relations atomiques H/C vs O/C : en haut la composition moléculaire d'un métabolome biologique (échantillon biologique), en haut la composition moléculaire d'un métabolome biologique (échantillon biologique), au milieu la composition des eaux de surface de la rivière (échantillon géologique) et en bas la composition de la matière organique abiotique d'une météorite. On observe que les compositions de chaque matériau sont très différentes, que ce soit en termes de nombre de formules ou de familles de molécules (CHO vs CHOS vs CHNO vs CHNOS). La matière biologique a sélectionné une diversité de molécules plus limitée que la matière abiotique. (Kolb, 2014)

La question, qui est peut-être la plus importante en Exobiologie, c'est la compréhension du passage du non-vivant au vivant tel qu'il a pu se faire sur la Terre primitive il y a environ 4 milliards d'années. Il s'agit donc de déterminer le passage entre une chimie du non-vivant, c'est-à-dire l'abiotique, représentée par toute matière organique et minérale présente à la surface de la Terre au moment opportun, vers une chimie du vivant, étant le biotique, représentée par les premières espèces vivantes. Cette transition est dénommée chimie prébiotique. La différence majeure entre les deux, entre la chimie du vivant et du non-vivant, c'est la sélectivité. Les systèmes biologiques ont sélectionné des molécules organiques pour leur fonctionnement, ont sélectionné des propriétés particulières (comme la chiralité), alors que la chimie abiotique recèle tout ce qu'il est possible de former en chimie organique. Cette observation est vérifiée par l'analyse des météorites, qui recèle des milliers de molécules très diverses, distribuées aléatoirement et partout sur des diagrammes H/C vs O/C par exemple (Fig. 3). Avec la même méthode analytique, les analyses de la chimie biotique montrent au contraire des concentrations de molécules dans des zones bien définies, avec des familles chimiques qui ont été sélectionnées, et une diversité beaucoup plus réduite (Fig. 3) ¹¹.

Pour faire cette chimie prébiotique, deux grandes approches sont étudiées à l'heure actuelle : une approche top-down qui consiste à étudier les systèmes vivants et à essayer de les synthétiser, ou une approche bottom-up, où l'on va s'intéresser à la chimie abiotique et à sa possible évolution vers de la chimie biologique dans un environnement défini.

Le vivant utilise trois entités chimiques majeures pour fonctionner : les protéines qui constituent le métabolisme et permettent la réplication et l'activité catalytique, l'ADN qui porte l'information génétique et permet de coder les informations, les membranes lipidiques qui forment un compartiment protecteur et échangeur d'informations permettant ainsi la réplication. Comme ces entités sont indissociables à l'heure actuelle de nos connaissances du vivant, l'approche top-down consiste à déterminer laquelle serait apparue en premier, pourquoi et comment. Des systèmes de réactions chimiques très ciblés et catalysés par des minéraux sont étudiés afin de déterminer si en laboratoire il serait possible de former de l'ADN, des protéines et des lipides similaires au vivant dans une même soupe.

L'approche bottom-up remet en cause ces entités nécessaires au vivant actuellement et essaie plutôt de rassembler les éléments et les conditions favorables et existantes sur la Terre primitive afin de comprendre comment un système chimique pourrait évoluer. Le premier élément indispensable à toute forme de vie est la présence d'un solvant, le plus évident et le plus abondant dans l'univers, étant l'eau. Le second élément indispensable est la matière organique, une matière diverse et plus ou moins complexe comme celle analysée dans les météorites. En troisième élément, on mentionne souvent la nécessité d'une source d'énergie capable d'organiser la matière en molécules plus complexes et surtout permettant la non-réversibilité des réactions chimiques. Cette propriété devrait permettre une auto-organisation de la matière avec peut-être la mise en place de systèmes autocatalytiques. Cette énergie peut provenir des photons du soleil, de la température et de pression générées par l'énergie interne d'un corps planétaire, ou encore de processus d'oxydo-réduction avec des minéraux.

¹¹ Kolb, V. M. (Ed.). (2014). *Astrobiology: an evolutionary approach*. CRC Press, in Chapitre 4.

Il est proposé que de tels systèmes chimiques, hors équilibre, en créant de l'entropie et en étant alimentés en permanence par de la matière, de l'énergie, peut-être aussi grâce à des cycles sec-humide, soient capables de mener à une sélectivité chimique, des propriétés d'auto-catalyse et de réplication chimique. Une fois ce système mis en place, il est possible que la chimie prébiotique ait fini par former un système avec des propriétés vivantes.

Il n'y aurait donc pas de séparation stricte entre un système abiotique et le biotique mais plutôt une continuité passant par l'intermédiaire d'une chimie prébiotique (Fig 4). La question de l'émergence de la vie reste malgré tout la question exobiologique la plus complexe et les voies chimiques possibles sont tellement nombreuses qu'il n'est pas évident qu'un jour la réponse soit trouvée.

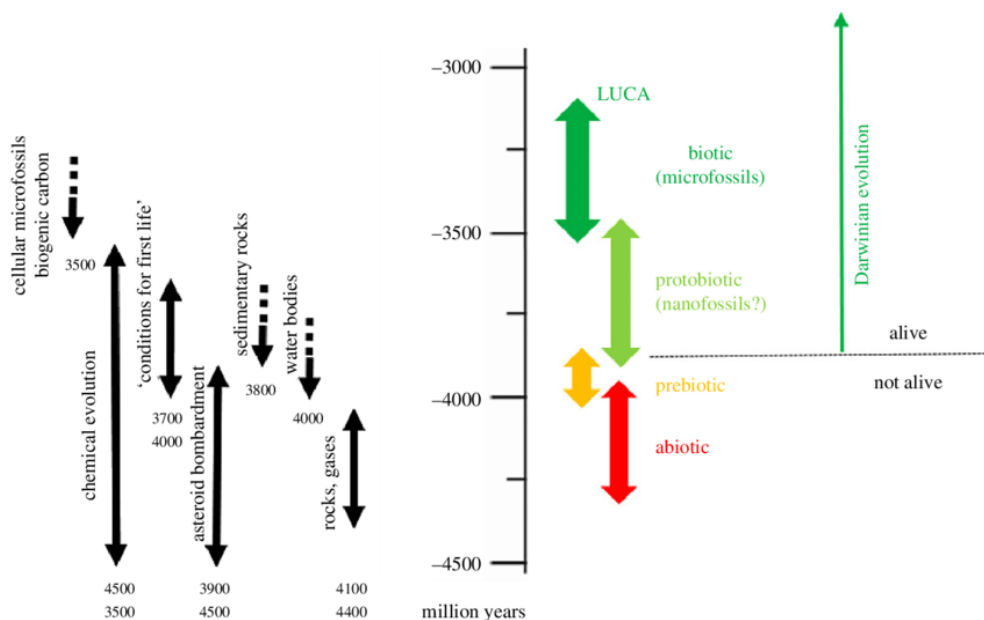


Fig. 4 Origine de la vie en tant que phénomène planétaire. Données de synchronisation géologique à gauche. La progression de l'abiotique au biotique est décrite avec des démarcations temporelles spéculatives et quelque peu arbitraires, avec quelques justifications détaillées dans le texte. La démarcation entre vivant et non-vivant, mais qui devrait être un continuum, se situe entre entités prébiotiques et protobiotiques, définie par l'émergence de la réplication et de l'évolution. (Crédit : Lancet, Doron & Zidovetzki, Raphael & Markovitch, Omer, 2018).

Rechercher la vie ailleurs

Pour chercher la vie ailleurs, il faut savoir quoi rechercher, et l'une des bases de l'Exobiologie mais aussi sa faiblesse, c'est la recherche de vie biologiquement similaire à la nôtre¹². La distribution chimique des atomes dans l'Univers a dirigé de manière indéniable l'utilisation du carbone, de l'azote et de l'oxygène par la Vie terrestre (Fig. 5). Il serait logique que ces atomes

¹² Muriel Gargaud, Hervé Martin, Purificación López-García, Thierry Montmerle, Robert Pascal, Le Soleil, la Terre... la vie. La quête des origines, Belin, 2009, p. 30

soient les mêmes pour d'autres formes de vie dans l'univers, mais avec une structuration des molécules organiques possiblement différentes de la vie sur Terre.

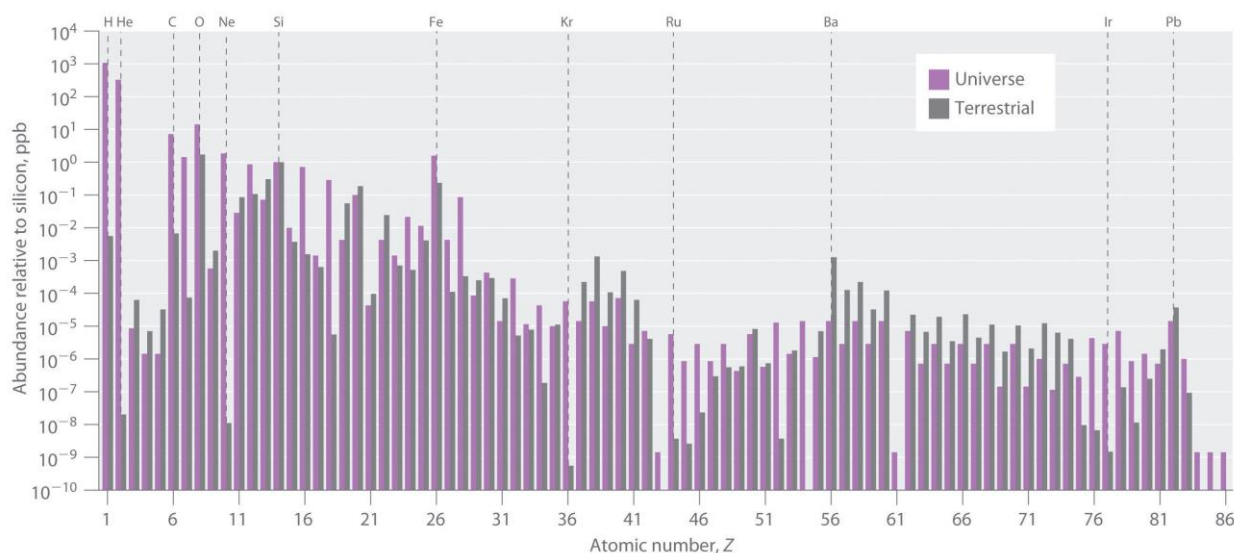


Fig. 5 Abondance d'éléments chimiques sur Terre et dans l'Univers (échelle logarithmique). Les éléments les plus abondants après l'hydrogène et l'hélium sont l'oxygène, le carbone et l'azote, en plus du gaz inerte, le néon, suivis de près par le fer et le nickel.

Malgré une recherche active depuis les premières missions Apollo, l'exploration de nombreuses planètes et quelques retour d'échantillons (lunaires dès 1969, cométaires en 2006 et astéroïdes en 2010) il n'a pas à ce jour été trouvé de trace de vie évidente (macroscopique) dans notre système solaire. La communauté exobiologie a donc repensé et a joint ses connaissances pour déterminer dans quels environnements il serait possible de trouver des signes de vie microscopique. Les recherches en chimie prébiotique définies précédemment apportent par exemple des contraintes, basées sur la vie terrestre. Un nouveau terme a été défini pour conceptualiser cet aspect d'environnement propice, il s'agit de la notion d'habitabilité. Il a d'abord été proposé qu'un corps planétaire soit habitable à partir du moment où il contient de l'eau liquide. Dans chaque système planétaire, il va alors être possible de définir une zone habitable où l'eau liquide pourra être présente à la surface des corps, en fonction de la taille de l'étoile, de la distance du corps planétaire à l'étoile et de la stabilité de son orbite pour rester dans la zone habitable (Fig. 6). Ces dernières années, la définition de la zone habitable a été revue et considérablement élargie avec la découverte des immenses océans d'eau liquide sous la surface glacée des lunes de Jupiter et Saturne (Encelade, Europe, Ganymède, Titan, Callisto) (Fig 6). La notion d'habitabilité fait à l'heure d'aujourd'hui référence à un corps habitable qui, en plus de l'eau liquide, contiendrait de la matière organique (C, H, N, O...), de l'énergie (solaire ou thermique-activités géologiques) et une certaine stabilité dans le temps pour permettre une vie à sa surface. La recherche de vie ailleurs commence donc par rechercher d'abord ces environnements habitables. De plus, les études en phylogénie et biologie terrestre ont aussi apporté des contraintes sur les recherches

à mener si une vie macroscopique n'est pas visible, par exemple une vie microscopique (bactérienne) ou des traces chimiques (briques élémentaires) ou fossiles (coquilles, empreintes) d'une possible existence actuelle ou passée. La notion d'habitabilité est un terme débattu au sein de la communauté Exobiologique, car sa définition est liée aux conditions ayant permis l'émergence et l'évolution de la seule vie (terrestre) que nous connaissons et rien ne nous dit qu'on cible les bons objets habitables en considérant seulement ces conditions. L'extension de la zone habitable aux environnements en sous-sol (comme imagé dans la figure 6), est un des exemples de notre recherche sur la possibilité, dans le système solaire, de vie dans ces environnements

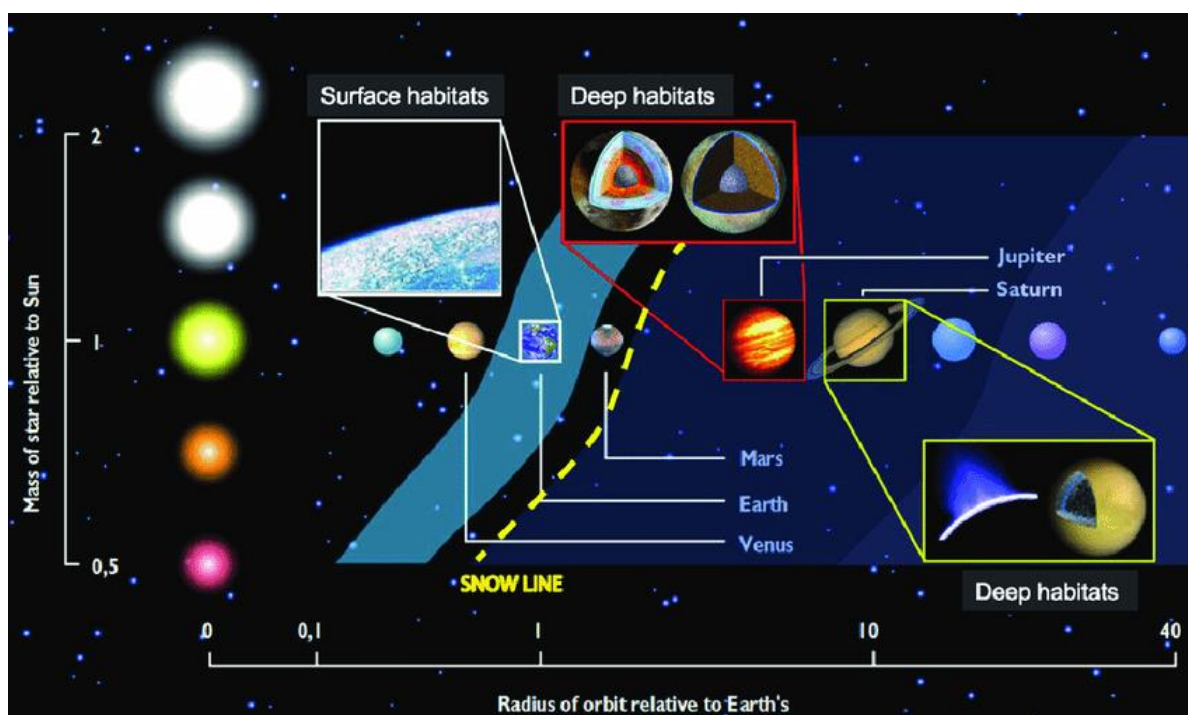


Fig. 6 Représentation schématique des zones habitables du système solaire. La zone habitable est définie là où se trouve de l'eau liquide : cette zone dépend de la masse de l'étoile et de la distance du corps à l'étoile pour que l'eau soit stable en surface ou en dessous. Avec cette définition et dans notre système solaire, la Terre se trouverait en plein milieu de la zone habitable alors que Mars est à la limite. Les satellites de glace de Jupiter et de Saturne seraient également des corps habitables du fait de la présence d'eau liquide sous leur coquille de glace (Crédits : Neal Powell, Imperial College, Londres).

Petit tour des corps planétaires de notre système solaire et leur intérêt exobiologique

Mercure, la plus proche planète du soleil est beaucoup trop chaude et avec trop peu d'atmosphère pour avoir réuni les conditions nécessaires au développement de la vie. Vénus,

notre « planète sœur » présente au contraire une chimie organique relativement complexe, avec des molécules soufrées et phosphorées dans une atmosphère extrêmement dense et composée à plus de 96% de CO₂. Cependant elle n'est pas dans la zone habitable du système solaire car elle manque d'un composant essentiel, l'eau. Ayant bénéficié d'apports exogènes comme la Terre après sa formation, il est proposé que Vénus ait pu avoir de l'eau liquide à sa surface et une atmosphère riche en eau il y a 4.5 milliards d'années. Mais à l'heure actuelle la surface de Vénus n'est que volcanisme actif avec des températures avoisinant les 460 °C. Si de la vie s'est développée sur Vénus au moment le plus propice, il est proposé qu'elle ait subsisté sous forme de microorganismes dans les nuages de son atmosphère, bien plus clémente en termes de température (~75°C). Plusieurs missions spatiales ont étudié Venus depuis les années 1960 et malgré des propositions d'existence de microorganismes extremophiles dans les nuages de Vénus, aucune preuve n'a été formellement observée jusqu'ici.

Mars, la quatrième planète du système solaire a souvent été proposée comme meilleur site dans le système solaire pour avoir eu, ou avoir encore une possibilité d'existence de vie. Mars a suscité l'engouement pour la recherche de traces de vie très tôt dans l'histoire de l'exploration du système solaire car des astronomes britannique et italien (William Rutter Dawes et Giovanni Schiaparelli) avaient déclaré avoir vu des canaux d'irrigations gigantesques en observant la surface de Mars en 1860-1870. Ces canaux interprétés comme reliant des zones habitées, auraient permis l'acheminement de denrées entre eux. Malgré le développement des télescopes et la multiplication des observations, notamment par Percival Lowell (1855-1916), il aura fallu attendre les années 1940 pour taire ces observations grâce à des nouvelles données d'observations, moins floues et définissant mieux les contours des cratères et vallées de Mars. Les survols par les sondes américaines Mariner dans les années 1960-1970 démontrent définitivement la non-existence de canaux à la surface de Mars. Néanmoins, l'intérêt Exobiologique pour la planète Mars perdure, car Mars présente des caractéristiques pertinentes qui rendent légitime la possibilité d'une vie martienne. L'existence d'une vie microbienne a été envisagée réellement dans les années 1970 lors de la préparation de la mission Viking. Les deux atterrisseurs étaient alors équipés d'instruments capables d'effectuer trois expériences destinées à mettre en évidence de la vie martienne, en détectant par exemple une activité photosynthétique biologique, ou en fournissant des nutriments aux bactéries martiennes. Les trois expériences ont donné des réponses positives mais toutes interprétables par des processus abiotiques, comme l'oxydation de la surface menant à la décomposition de la matière et le dégazage de O₂. La mission Viking a cependant confirmé la présence d'eau liquide dans le passé de Mars, en observant des lits de rivières, des fleuves asséchés ou encore des vallées dendritiques, confirmant que la planète a été, au moins dans le passé, habitable. Plus tard, des roches hydratées ne pouvant se former que dans un milieu aqueux, comme des argiles ou des sulfates, ont été observées par les sondes en orbite et les véhicules à la surface.

Dès les premières missions spatiales, et grâce à l'observation de traces comme des écoulements, des deltas, ou encore des signes de tsunamis au bord de côte, il a été découvert que Mars avait bien eu un océan et des lacs à sa surface. D'après les modèles géophysiques, Mars aurait pu avoir de l'eau liquide pendant au moins 1 milliard d'années à sa surface. Cette

eau, encore présente dans les minéraux qui recouvrent actuellement la surface de Mars, a été identifiée par les sondes en orbites et les robots à la surface. A l'heure actuelle, de la glace d'eau est présente au pôle dans les calottes glaciaires et il est fortement soupçonné que de l'eau soit présente en plus grande quantité dans la croûte martienne (probablement sous forme de glace mélangée avec les minéraux). La pression à la surface de Mars est actuellement beaucoup trop faible pour maintenir une eau liquide (6 mbar). Dans le passé cependant, et dû à la présence d'un champ magnétique aujourd'hui éteint Mars a pu avoir une atmosphère beaucoup plus dense. Le handicap majeur de Mars est d'être une planète trop petite qui n'a pas eu suffisamment d'énergie interne pour maintenir une activité géologique engendrant le champ magnétique indispensable au maintien de son atmosphère face aux vents solaires. Mars est considérée comme une planète morte géologiquement depuis longtemps mais sur laquelle la vie aurait pu se développer à la même période que sur Terre et peut-être persister en sous-sol. Trouver de la vie sur Mars apporterait beaucoup de réponses sur l'apparition de la vie sur Terre. De plus, si la vie est apparue sur Mars, même sous forme de microorganismes, et puisque la planète a arrêté d'être active géologiquement, il devrait être possible de la trouver, sous forme de traces fossiles en surface ou même d'espérer qu'elle ait survécu en sous-sol.

Aujourd'hui l'atmosphère de Mars, beaucoup trop fine et très riche en CO₂, a laissé pénétrer les rayons du soleil et les rayons cosmiques qui après des milliards d'années ont rendu la surface très oxydante et totalement sèche. C'est grâce à l'atterrisseur de la mission Phoenix (2008) que ces oxydants (comme du perchlorate et des peroxydes) ont pu être identifiés. Actuellement il a été démontré qu'ils étaient en grande partie responsable de la dégradation de matière organique à la surface et sont des contaminants pour les analyses réalisées par les véhicules. Il a fallu attendre la mission « Mars science laboratory » (MSL) avec le véhicule « Curiosity » qui a atterri en 2012 sur le sol martien pour enfin pouvoir déterminer si Mars était composé de matière carbonée. Cette mission de la NASA/JPL comportait à son bord un instrument capable de détecter et d'identifier des molécules organiques (sample analysis at Mars-SAM). Cet instrument est un classique en laboratoire de chimie car il permet d'analyser des solides ou des liquides et d'en identifier les molécules organiques. Il s'agit d'un spectromètre de masse avec soit un chromatographe gazeux en amont avec un pyrolyseur pour vaporiser les molécules et les séparer, soit un laser pulsé pour désorber les molécules de la surface de l'échantillon. C'est en 2015 que les premières molécules organiques ont été découvertes, il s'agissait de cycles aromatiques chlorés et d'alcane. Depuis, d'autres molécules organiques ont pu être analysées dans le sol martien en fonction de la composition minéralogique. En 2022, aucune molécule de types « briques de la vie » n'a été à ce jour identifiée mais les études se poursuivent à d'autres endroits de la planète et de nouvelles missions sont prévues. En particulier, les espoirs reposent sur l'exploration du sous-sol de Mars, protégé de l'oxydation et de l'irradiation de surface. Les véhicules précédents ont en effet déjà révélé que sous les premiers centimètres de la surface, il était possible d'avoir de la glace, mais on ne sait pas ce qu'il en est au-delà de ces premiers centimètres. La future mission Exobiologique vers Mars est la mission Exomars de l'ESA, qui devrait creuser jusqu'à 2 m de profondeur pour récupérer des échantillons non-altérés par la surface et qui pourraient donc contenir une matière beaucoup plus préservée. La mission Exomars comprend également

l'instrument décrit précédemment et permettra d'analyser les molécules organiques. La mission qui devait partir en 2022 a été repoussée à la fin des années 2020 suite aux conflits mondiaux. Mars n'a pas dit son dernier mot et demeure une cible de choix pour la recherche en Exobiologie et l'avancement des connaissances en planétologie.

D'autres corps habitables d'intérêt Exobiologique ont été découverts ces dernières décennies au-delà de la barrière d'astéroïdes, il s'agit des satellites des géantes gazeuses. Les géantes gazeuses n'ont que peu d'intérêt pour l'exobiologie car elles n'ont pas de surfaces et donc pas d'eau liquide. Par contre elles revêtent une importance considérable pour comprendre la formation et l'origine du système solaire. Pour l'exobiologie c'est leurs satellites qui présentent des intérêts certains et notamment Ganymède, Callisto et Europe autour de Jupiter, Encelade et Titan autour de Saturne. Révélés grâce à la sonde Cassini-Huygens (1997-2017) qui a visité ces mondes pendant 15 ans, ces satellites glacés ont surpris de par leur diversité et l'abondance d'eau liquide qu'ils contiennent. Le satellite Europe par exemple contiendrait un océan 10 fois plus grand que sur la Terre, alors que le satellite est deux fois plus petit que la Terre. Cette eau liquide est maintenue par les effets de marée engendrés par l'attraction gravitationnelle des lunes avec Jupiter. Du côté de Saturne, c'est le satellite Encelade qui intéresse particulièrement l'exobiologie avec la découverte en 2014 de geysers d'eau à sa surface, qui s'étendent jusqu'à 100 km au-dessus de sa surface, révélant sans aucune doute la présence d'un océan sous la couche de glace. Des études en Exobiologie s'intéressent alors à la possible émergence de vie dans ces environnements qui ont été définis comme habitables (fig 6). Le plus grand satellite de Saturne, Titan, revêt aussi un fort intérêt exobiologique de par la grande quantité de matière organique qu'il contient. En 1980 et 1981, les sondes Voyager-1 et Voyager-2 passent au-dessus de Titan et révèlent un monde avec une atmosphère extrêmement dense composé majoritairement de diazote et de méthane (quelques %). L'atmosphère est si dense qu'elle masque la surface du satellite. La chimie dans l'atmosphère de Titan s'est avérée extrêmement complexe, entraînant notamment la formation d'aérosols organiques qui sédimentent à la surface. La mission Cassini-Huygens, dont Huygens est un atterrisseur qui a traversé l'atmosphère de Titan pour se poser à sa surface, a confirmé cette chimie organique complexe dans l'atmosphère. Des images époustouflantes de la surface recouverte de grains organiques, de dunes et de lacs d'hydrocarbures ont été obtenues. Les modèles astrophysiques ont proposé que Titan puisse héberger sous sa surface un océan d'eau liquide car il a une densité trop faible pour être un corps pleinement rocheux. Titan présente alors tous les ingrédients définis précédemment pour l'émergence d'une chimie prébiotique riche et une possible forme de vie. Les modèles d'évolutions géochimiques proposent que dès les premières millions d'années après la formation de Titan, cet océan sous la surface ait été en contact avec l'atmosphère, dans laquelle les premières molécules complexes se seraient formées avant de tomber dans l'océan. Par analogie avec la Terre, la présence de sources hydrothermales - qui constituent une source d'énergie pour les molécules organiques et leur organisation en système prébiotiques- est envisagée dans cet océan de Titan. La possibilité d'une vie dans l'océan de Titan n'est donc pas à exclure et aurait pu se maintenir pendant plusieurs milliards d'années. La nouvelle mission très ambitieuse de la NASA (Dragonfly) qui a pour cible Titan devrait être essentielle de ce point de vue. Sélectionnée en juin 2019 dans le cadre des programmes New

Frontiers de la NASA, la mission devrait partir en 2027 et arriver sur Titan en 2034. La nouveauté de cette mission réside dans l'exploitation de la dense atmosphère de Titan (1.5 fois celle de la Terre) et de sa faible gravité pour faire voler un aérogiro, nommé aérobot, d'une masse de 450 kg à sa surface. Les objectifs scientifiques sont multiples, comme affirmer la présence d'un océan dans la sous-surface de Titan, analyser les matériaux de surface pour identifier des molécules d'intérêt exobiologique, caractériser la météorologie de Titan, ou encore mesurer l'activité sismique pour déterminer l'activité interne de Titan. Pour cela l'aérobot aura à son bord quatre groupes d'instruments dont un spectromètre de masse couplé à de la chromatographie en phase gazeuse (DraMS-GC), qui est une contribution française avec le CNES et un héritage des missions martiennes.

Par-delà le système solaire

Dans l'état actuel des connaissances et des avancées dans le domaine de l'Exobiologie, il est très difficile d'émettre l'hypothèse d'une planète habitée et de la présence avérée de vie dans notre galaxie ou au-delà. Les sites potentiels pour un développement de la vie semblent de plus en plus nombreux, mais qu'en est-il effectivement d'un développement de vie ? Par-delà notre système solaire, en fonction du nombre d'étoiles dans l'univers, il est probable que des milliards d'autres systèmes planétaires, avec des zones habitables, avec probablement de la matière organique et de l'énergie nécessaire à la vie. C'est en 1995 que Didier Queloz et Michel Mayor observent pour la première fois une exoplanète. Depuis, et avec l'avancée des techniques d'observations, ce sont aujourd'hui (2022) plus de 4000 exoplanètes qui ont été localisées, observées et répertoriées dans notre galaxie. La découverte de ces planètes extrasolaires a permis des découvertes majeures, comme par exemple la remise en cause de la formation de notre propre système solaire. Les premières détections d'exoplanètes révélaient surtout la présence de géantes gazeuses, de type Jupiter, orbitant très près de leur étoile dans des systèmes à 1, 2 ou 3 corps planétaires. Ce paradigme, par rapport à notre système solaire à 8 planètes, qui était jusque-là pensé comme relativement classique, a fait reconsidérer en profondeur l'hypothèse de la formation de notre système solaire. De nouveaux modèles de formation du système solaire ont été étudiés. Le plus remarquable fut proposé en 2011 par Kevin Walsh, Alessandro Morbidelli, et Sean Raymond et permet de donner des réponses à nombre d'énigmes sur la composition et la position des différents corps de notre système solaire. Le modèle stipule que Jupiter aurait bouleversé les embryons de planètes en migrant vers le soleil dès le début de sa formation puis serait reparti à sa position actuelle, en partie grâce à la présence de Saturne (Fig 7). Le rapprochement de Jupiter jusqu'à ~ 1.5 AU a tronqué petit à petit le disque protoplanétaire et la matière disponible en aval de Jupiter s'est réduite. Ce modèle permet par exemple d'expliquer la petite taille de la planète Mars et son sort funeste, alors que dans un modèle de formation statique, Mars aurait dû être plus grande que la Terre.

Une autre découverte majeure concerne l'observation d'une majorité d'étoiles de classe naines rouges dans notre galaxie. Ce sont de petites étoiles, très actives et avec des durées de vie de l'ordre de la centaine de milliard d'années. En comparaison, notre soleil ne vivra qu'une dizaine de milliards d'années et donc si une vie se développait (où s'est développée) sur une planète autour d'une naine rouge, elle aurait le temps de se développer et se complexifier a minima autant que sur la Terre. Seulement, à cause de la faible masse des naines rouges (< 0.4 masse solaire), les exoplanètes ont la nécessité d'être relativement proches de l'étoile pour être dans la zone habitable. Cela entraîne une vitesse de rotation sur elle-même similaire à leur rotation autour de leur étoile et elles présenteront donc toujours la même face au jour ou à la nuit. Ce paramètre est extrêmement important car il va jouer sur les climats et les saisons de l'exoplanète et donc directement sur les potentielles formes de vie.

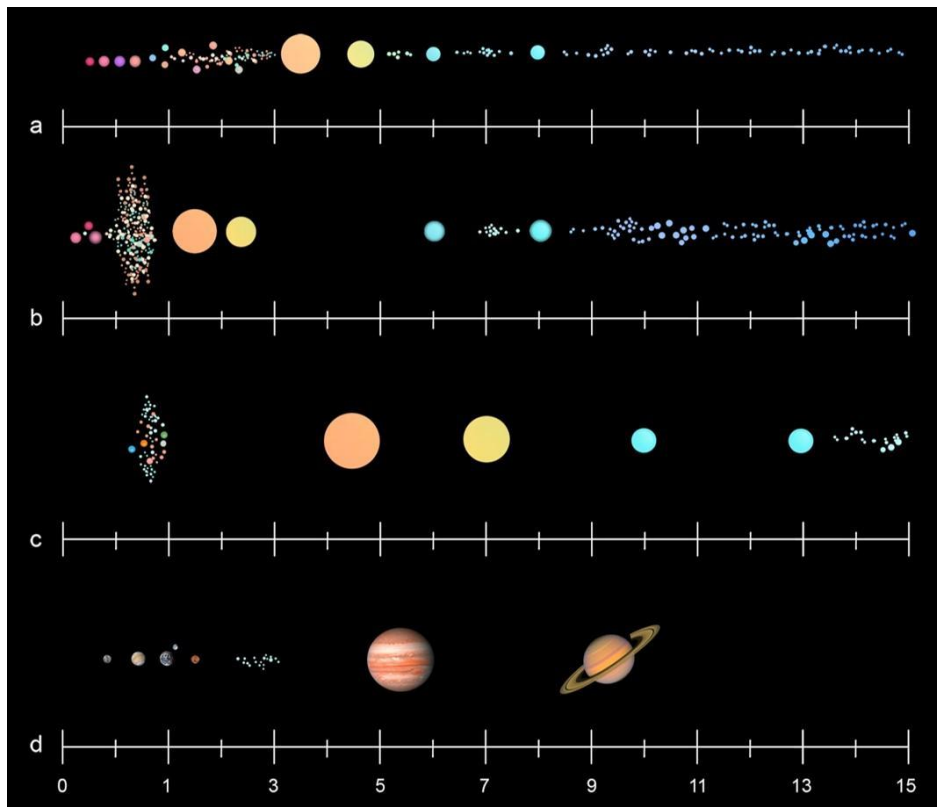


Fig. 7 Représentation schématique de l'hypothèse du « grand tack » pour expliquer la formation de notre système solaire et de ses planètes ; a) début du modèle avec formation des planètes géantes en cours, puis b) première migration de Jupiter vers le soleil avec Saturne, c) deuxième migration de Jupiter vers le système solaire externe emportant Saturne et poussant les astéroïdes et comètes au-delà du 13 AU, d) position des planètes actuellement avec la ceinture d'astéroïdes entre 2 et 3 UA. @BlackAlley

Il est également proposé que la présence d'atmosphère sur les exoplanètes se situant dans les zones habitables soit une condition d'habitabilité majeure. Récemment, des exoplanètes avec des atmosphères riches en eau ont été observées. Cependant, on ne connaît pas à l'heure

actuelle tous les scénarios favorisant ou altérant le maintien d'une atmosphère sur ces exoplanètes orbitant autour d'étoiles de différent type que notre Soleil.

Les diversités d'exoplanètes observées à ce jour, avec des vitesses de rotation, des obliques, des densités extrêmement variées rendent encore plus difficile cette notion d'habitabilité qui a besoin constamment d'être redéfinie. L'impact sur l'émergence de vie, ou le maintien d'une vie dans ces environnements est encore inconnu à ce jour, et constitue tout un pan de recherche en Exobiologie

Conclusions

Toutes ces études en Exobiologie, dont les grandes lignes ont été décrites ici, rendent compte de la difficulté et complexité à répondre aux questions de l'origine et l'évolution de la vie et de la présence de vie ailleurs. L'interdisciplinarité est la clé de l'Exobiologie et la richesse pour de nouvelles avancées majeures dans le domaine.

En bref, l'astrobiologie tente de déterminer si la vie pourrait exister dans d'autres parties de l'univers, en étudiant notre propre origine et, si oui, de quelle manière, pour tenter de répondre à une question existentielle : sommes-nous seuls dans le cosmos ?

Bibliographie

Bibring, J.-P. (2022) *Seuls dans l'Univers*, Odile Jacob.

Fiore, M. (dir.) (2022) *Prebiotic Chemistry and Life's Origin*, Royal Society of Chemistry,

Forterre, P., Brocher, C., Philippe, H. (2002) Evolution of the Archaea , in *Theoretical Population Biology*, vol. 61, n° 4, pp. 409-420.

Gargaud, M., Claeys, P., Martin, H. (Eds.) (2005). *Des atomes aux planètes habitables* (Vol. 3). Presses Univ de Bordeaux.

Gargaud, M., Martin, H., Lopez-García, P. et al. (2009) *Le Soleil, la Terre... la vie. La quête des origines*, Belin.

Kolb, V. M (dir) (2014) *Astrobiology. An Evolutionary Approach*, CRC Press, Chapter 4.

Lancet, D., Zidovetzki, R., Markovitch, O.. (2018) *Systems protobiology: Origin of life in lipid catalytic networks*. Journal of The Royal Society Interface. 15. 20180159. 10.1098/rsif.2018.0159.

Lederberg, J. (1960) *Exobiology : Approaches to life beyond the Earth*, in *Science*, vol. 132, n° 3424, pp. 393-400.

Oparin, A., (1957) *The origin of life on the Earth*, Academic Press Inc., New York, 3^e éd.

Videos in [Astrobioeducation.org](https://astrobioeducation.org) <https://astrobioeducation.org/fr/>