

Quentin Kral

LES **ASTRONOMES** À LA **RECHERCHE** DE LA **VIE** **EXTRATERRESTRE**

Que savons-nous vraiment ?

Comment fait-on ?

Quelles découvertes nous attendent ?

ellipses

La quête de vie extraterrestre

La vie extraterrestre fascine, enflamme les imaginations, fait palpiter les tabloïds. Depuis l'Antiquité, cette question traverse les civilisations comme un fil rouge cosmique, tissant un étrange mille-feuille : fantômes de civilisations lunaires, soucoupes volantes des années 1950, microbes martiens scrutés par des robots... Pourtant, derrière ce tumulte médiatique et culturel, une autre histoire se déploie – silencieuse, méthodique, parfois aride. Celle des scientifiques qui, comme moi, traquent des indices infimes au milieu du bruit.

Ce livre ne prétend pas trancher le débat, mais l'éclairer. Vous y trouverez un équilibre délicat : d'un côté, la rigueur propre à mon métier d'astronome à l'Observatoire de Paris, où j'évalue quotidiennement des hypothèses sous le scalpel de la reproductibilité et de l'analyse critique ; de l'autre, les récits qui ont jalonné cette quête – ces “rumeurs” qui, même infondées, révèlent nos espoirs collectifs.

Nous commencerons par les faits établis, puis, pas à pas, nous glisserons vers les recherches contemporaines en France et dans le monde pour chercher la vie au-delà de la Terre – dont certaines hypothèses audacieuses dansent à la frontière de la science établie. Enfin, dans les derniers chapitres, nous oserons une incursion mesurée dans le domaine philosophique : et si la vie extraterrestre nous obligeait à redéfinir la communication extraterrestre et ce que signifie “être vivant” ?

Rassurez-vous : aucun extraterrestre ne se cache dans ces pages. Mais peut-être, en refermant ce livre, regarderez-vous les étoiles avec un peu plus de curiosité... et beaucoup plus de clés pour démêler le réel du fictif.

1.1 Le questionnement sur la vie extraterrestre – Une histoire millénaire

S'il est une question universelle que tous les êtres humains se sont posée à un moment ou à un autre de leur vie, c'est bien celle de l'existence de la vie ailleurs que sur Terre. Grâce aux philosophes grecs, on peut remonter à des textes datant d'au moins 600 av.J.C. qui postulent l'idée qu'un grand nombre de mondes similaires au nôtre doivent exister sur d'autres planètes. Ce sont les atomistes¹ – un courant philosophique affirmant que la ma-



FIGURE 1.1 – Portrait d'Emmanuel Kant.

tière est discontinue et composée d'éléments insécables, les atomes – qui formalisent tout cela en premier vers 400 av.J.-C., en ouvrant la porte à une "pluralité cosmique" et à des mondes différents sur d'autres planètes. Plus récemment, en 1686, c'est de Fontenelle avec son "best-seller" intitulé "Entretiens sur la pluralité des mondes" qui explique en français² l'idée que les étoiles sont des soleils lointains qui pourraient avoir leurs propres systèmes planétaires, y compris la possibilité d'une vie extraterrestre, qu'il entendait démontrer à partir d'écrits de René Descartes et Nicolas Copernic. Un siècle plus tard, c'est Kant (Fig. 1.1) dans sa "Critique de la raison pure" (1781) qui écrit : "S'il était possible de décider la chose par quelque expérience, je parierais bien toute ma fortune que quelqu'une au moins des planètes que nous voyons est habitée. Aussi n'est-ce pas simplement une opinion, mais une ferme foi (sur l'exactitude de laquelle je hasarderais beaucoup d'avantages de la vie), qui me fait dire qu'il y a aussi des habitants dans d'autres mondes." Kant ne prend pas de risques car il n'y a, à l'époque, aucune technologie permettant de tester sa théorie.

1. Leucippe et son élève Démocrite sont les Grecs considérés comme les fondateurs de l'atomisme au V^e siècle av. J.-C., doctrine reprise par Épicure, puis à Rome par Lucrèce au I^{er} siècle av. J.-C.

2. L'utilisation du latin était alors courant et ce livre est en fait l'un des premiers livres tentant d'expliquer des théories scientifiques dans une langue populaire. De Fontenelle est un des précurseurs des vulgarisateurs et il explique en préface que les explications proposées devraient être facilement comprises même par ceux qui n'ont pas de connaissances scientifiques préalables.



Il serait maintenant plus aventureux de faire le même pari car on peut commencer à aborder la question scientifiquement... et potentiellement apporter des réponses comme nous allons le voir dans la suite de ce livre. Nous allons balayer l'état de l'art des connaissances autour de la vie extraterrestre. Ceci ne va pas être évident car la quête de la vie extraterrestre fait appel à de multiples ressources. Par exemple, il faut être capable de comprendre ce qu'est la vie pour pouvoir la chercher. De même, il faut savoir dans quels environnements elle se développe pour pouvoir pointer les bons endroits avec nos télescopes. On verra que la Terre est forcément un bon point de départ pour comprendre l'évolution de la vie mais une approche trop anthropocentrée peut aussi amener une multitude de biais. Les astronomes ont de nombreuses idées d'observations à mener, par exemple avec le nouvel arrivant dans le monde des télescopes spatiaux, le fameux James Webb (Fig. 1.2). De nombreux projets émergent aussi pour construire de nouveaux télescopes afin de pouvoir détecter de la vie microbienne ou des êtres intelligents, ce que nous aborderons en détail³.



La recherche de vie extraterrestre incarne la plus grande quête scientifique de l'humanité. Derrière cette enquête cosmique se cachent des énigmes titanesques : défis technologiques, limites de la connaissance et obstacles interstellaires. Chaque pas vers ce "trésor" – la découverte d'une vie ailleurs – exige de repousser les frontières, d'inventer de nouvelles méthodes et d'explorer des territoires inconnus, semés d'embûches et de révélations.

3. Vous pouvez voir une description de tous les encarts utilisés comme le point d'information ci-dessous au début du livre.

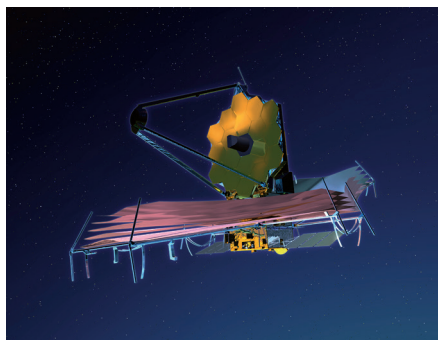


FIGURE 1.2 — *Gauche* : Le télescope spatial James Webb (JWST) lancé le 25 décembre 2021. *Droite* : La nébuleuse de la Carène est une des premières régions imagées avec le James Webb et on peut y observer les premières phases de formation des étoiles dans toute leur splendeur.



Une question simple ?

La question de savoir si la vie extraterrestre existe, en apparence simple, est en fait redoutable. D'une part, cela fait des milliers d'années que l'on se pose la question sans même avoir un semblant de réponse, et d'autre part cela fait plus d'un demi-siècle que l'on commence à aborder la question scientifiquement, c'est-à-dire en conduisant des tests pour mettre à l'épreuve les prédictions, mais on reste à ce jour, plus ou moins, bredouille. La question est complexe car elle relève d'une multitude de champs disciplinaires et fait appel à des connaissances que l'on ne peut trouver en une seule personne providentielle. Seule une collaboration internationale avec des biologistes, des biochimistes, des (exo-)climatologues, des géochimistes, des (astro)physiciens et même des philosophes pourra permettre de faire des progrès notoires. C'est cette aventure que je vais vous conter.

Ce qui est remarquable est l'attrait des médias pour la question de la vie ailleurs. Nous y reviendrons, mais il est à noter que la moindre publication scientifique faisant mention, parfois vaguement, de vie au delà de



l'ISS⁴ se voit souvent détournée et vidée de son sens originel pour attirer un plus grand public au détriment de la vérité scientifique. Ceci peut être problématique à long terme en laissant s'installer une perte de crédibilité vis à vis de ce domaine émergent – et il faut donc bien avoir son petit guide d'auto-défense intellectuel⁵ prêt en toute circonstance lors de telles lectures.

1.2 Pourquoi trouver la vie ailleurs n'est plus une totale utopie

Il fut un temps où la recherche de vie extraterrestre était plus spéculative et parfois mal perçue dans certains milieux universitaires. Mais les choses évoluent à toute vitesse et il y a maintenant un changement de paradigme où de nombreux universitaires s'accordent sur le fait que l'on peut s'attaquer à cette thématique de manière scientifique et qu'il est donc censé d'intégrer ce nouveau champ d'investigation dans nos recherches. D'ailleurs, ceux qui ne le font pas pourraient se retrouver marginalisés.

Prenons un petit exemple pour montrer les changements produits par le passage d'une recherche spéculative dans les années 60, à une recherche plus concrète maintenant. Jocelyn Bell (Fig. 1.3), jeune doctorante à Cambridge en 1967, travaille sur les quasars⁶ qu'elle souhaite observer en ondes radios. En analysant les données, elle découvre une source étonnante, fixe dans l'espace, qui pulse de manière périodique environ une fois par seconde. C'est alors que Jocelyn et son directeur de thèse Antony Hewish⁷ ont nommé cette source LGM-1 sans



FIGURE 1.3 – Une photographie de Jocelyn Bell Burnell en 1967. Elle a mis en évidence le premier pulsar pendant sa thèse.

4. Ou SSI en français, pour station spatiale internationale, qui orbite à environ 415 km de la surface terrestre (orbite terrestre basse). Elle est occupée en permanence par un équipage international qui se consacre à la recherche scientifique dans l'environnement spatial.

5. Qui est déjà potentiellement extrêmement développé chez vous mais que nous allons parfaire dans cet ouvrage !

6. Les quasars sont les objets les plus brillants de l'Univers et sont en fait des trous noirs supermassifs au centre d'une région extrêmement lumineuse (noyau actif de galaxie).

7. Qui a obtenu le prix Nobel pour cette découverte, mais pas sa doctorante Jocelyn, ce qui a créé des controverses notoires, à raison.



FIGURE 1.4 – Vue d’artiste d’une planète hycéanique avec deux satellites. Son atmosphère est principalement composée d’hydrogène et elle abrite un océan liquide en surface.

dévoiler initialement qu’il s’agissait des initiales de “little green men”. Avant de présenter son travail à la presse, Jocelyn cherche à interpréter sa découverte et comprend rapidement qu’elle vient de mettre à jour le premier pulsar, qui est simplement une étoile à neutrons⁸ qui tourne très rapidement sur elle même, et nous envoie des flashes périodiques vers la Terre. Grâce à sa rigueur scientifique et son humilité, Jocelyn Bell évite au monde de croire que les signaux pulsants venaient des aliens. Chapeau bas, prenons-en de la graine ! L’hypothèse des petits hommes verts est bien présente et considérée comme une possibilité dans les pensées des scientifiques, mais ces derniers se doivent de rester objectifs face à de tels enjeux.

Récemment, j’écoutais un séminaire scientifique sur les atmosphères d’exoplanètes qui avait aussi lieu à Cambridge⁹, mais en 2023, plus de 50 ans après le doctorat de Jocelyn Bell. Changement de ton ! Je constate qu’il y a des annonces de potentielles détections de biosignatures¹⁰ sans chercher de confirmation préalable mais en disant qu’il va falloir quand même vérifier

8. Astre compact principalement composé de neutrons qui se forme lorsqu’une étoile massive s’éteint (avec typiquement un rayon de l’ordre de 10 km pour une masse d’environ 1,4 fois celle de notre Soleil).

9. Où j’ai eu le plaisir de travailler plusieurs années et où j’ai pu un jour m’installer côte à côte avec Stephen Hawking pour suivre une présentation sur les trous noirs.

10. Une biosignature est une détection (chimique ou physique) dont la seule explication raisonnable est la présence d’une forme de vie (voir section 6.6.7 qui est dédiée à cela).



avec le James Webb. Nous avons peut-être été trop prudents et maintenant trop hâtifs. Certains prédisent ainsi qu'une détection de biosignatures sera possible dans les dix prochaines années notamment en cherchant la vie là où on ne l'attend pas, c'est-à-dire, sur de grosses planètes (mini-Neptunes¹¹) avec une atmosphère massive d'hydrogène et un océan en surface, que l'on appelle des planètes hycéaniques (Fig. 1.4). La science avance à petits pas et toutes les nouvelles idées en la matière sont bonnes à tester car on pourrait être surpris. Nous devons faire preuve d'ouverture d'esprit concernant les endroits où la vie pourrait se nicher, mais aussi sur les variétés de formes qu'elle pourrait prendre, pour pouvoir espérer la débusquer. Car, comme disait mon grand père, il n'y a que les imbéciles (et les vaches) qui ne changent pas d'avis.



Une découverte très bientôt ?

Il y a maintenant un certain nombre de chercheurs qui pensent que nous aurons des indices probants sur la vie ailleurs dans les prochaines décennies et ils ont peut-être raison. Cependant, la science n'est pas une opinion et il faut pouvoir le prouver pour le proclamer. Encore à plus forte raison, et comme le disait Carl Sagan^a, "des affirmations extraordinaires nécessitent des preuves extraordinaires" (Fig. 1.5). Il va de soi que quand on va découvrir les premières potentielles biosignatures, il faudra du temps pour vérifier, et digérer le résultat...

^a. Un grand vulgarisateur américain en astronomie et l'un des fondateurs de l'exobiologie que l'on étudie dans ce livre.

Une avancée majeure récente qui laisse à penser que la route à parcourir pour découvrir de la vie extraterrestre devient plus courte est la mise en évidence des exoplanètes. Avant 1995, nous n'avions pas de preuves formelles que des planètes orbitaient d'autres étoiles que notre Soleil. On a maintenant confirmé la présence de près de 10 000 exoplanètes par diverses méthodes¹² et ce nombre va vite atteindre 100 000 grâce aux télescopes spa-

11. Ce sont des planètes plus grosses que la Terre et plus petites que Neptune, une catégorie qui n'existe pas dans notre Système solaire.

12. Une partie de mon travail est dédiée à cataloguer ces exoplanètes dans l'*Encyclopédie des systèmes extrasolaires*, dont je suis le responsable, et qui est accessible à l'url suivante : exoplanet.eu

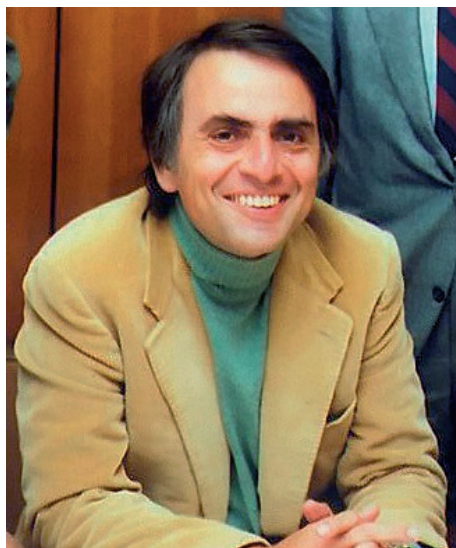


FIGURE 1.5 — Carl Sagan (1934-1996) : astrophysicien et grand vulgarisateur scientifique américain. Il a promu la recherche de la vie intelligente extraterrestre via le programme SETI. Il a passé la majeure partie de sa carrière en tant que professeur d'astronomie à l'université de Cornell.

tiaux Gaia, Roman, Plato, ou d'autres à venir. Cela a permis, entre autres, de faire des statistiques solides et de comprendre que les exoplanètes sont partout.

Les exoplanètes en chiffre

Ainsi, on pense maintenant que chaque étoile possède en moyenne un peu plus d'une planète (rocheuse ou géante) et qu'il y a environ 40-90% de chance pour une étoile qui ressemble au Soleil d'être orbitée par une planète similaire à la Terre (rocheuse avec la bonne taille et température), aussi appelée *exo-Terre*. Cela permet d'estimer que, statistiquement, l'*exo-Terre* la plus proche se trouve à environ 6 parsec^a, et qu'il y a environ 4 planètes rocheuses similaires à la Terre autour de naines G et K^b à moins de 10 parsec du Soleil. Si l'on prend en compte qu'il y a entre 200 et 400 milliards d'étoiles dans notre Galaxie, cela fait environ 100-400 milliards d'*exo-Terres* situées dans la zone habitable^c au sein de notre Galaxie. Vu qu'il y a plusieurs centaines de milliards de galaxies dans l'Univers observable, le nombre de mondes possibles est vertigineux !



- a. Les astrophysiciens parlent souvent en parsec plutôt qu'en année-lumière avec $1 \text{ parsec} = 3,26 \text{ années-lumière}$.
- b. Notre Soleil est une étoile de type G et les naines K sont un peu moins massives, avec une masse entre 0,6 et 0,9 fois la masse du Soleil.
- c. On définira la zone habitable précisément un peu plus tard (section 3.3) mais cela représente grossièrement une zone où l'eau liquide peut subsister sur une planète, à l'image de notre Terre, ni trop froide, ni trop chaude...



Ainsi, l'Univers abriterait plus de 10^{22} planètes potentiellement habitables (un 1 suivi de 22 zéros). Face à cette immensité, certains concluent hâtivement : “La vie extraterrestre doit forcément exister !”.

Piège statistique : Si la probabilité P qu'une planète accueille la vie est infime (ex. 10^{-25}), l'humanité pourrait être une singularité cosmique. Or, aujourd'hui, P reste une inconnue : aucune théorie ne permet de l'estimer sérieusement. Affirmer qu'elle dépasse 10^{-22} relève de la spéculation, pas de la science.

En résumé : L'optimisme des “nombres astronomiques” masque un vide théorique. Sans mesure de P , toute affirmation tranchée – qu'elle soit enthousiaste ou sceptique – est prématurée.

Cependant, l'avenir est prometteur et il suffira d'une détection pour affiner nos modèles et les probabilités. À court terme, le James Webb va sûrement livrer quelques nouveaux résultats fascinants, et en 2029, un télescope géant européen¹³, l'ELT (Fig. 1.6), sera opérationnel au Chili. Cette surface collectrice immense va permettre de nombreuses percées scientifiques et la recherche de la vie en fera sûrement partie. À moyen terme (horizon 2030) des missions sont prévues dans le Système solaire qui pourraient avoir un impact significatif sur notre compréhension du développement de la vie. Je pense notamment à Mars Sample Return (qui doit ramener des échantillons martiens sur Terre), Juice (qui doit explorer si les conditions propices à l'émergence de la vie sont présentes dans les océans sous-glaciaires qui semblent exister sur trois des quatre lunes galiléennes), Dragonfly (un drone géant qui va voler sur Titan, une lune de Saturne, pour évaluer son habitabilité microbienne et étudier la possibilité de l'apparition d'une chimie prébiotique) et Europa Clipper (pour explorer Europe, un satellite de Jupiter qui contiendrait un océan souterrain liquide qui pourrait héberger des micro-organismes). À plus long terme (horizon 2040), il y a déjà des

13. Avec un miroir de 39 mètres de diamètre qui collectera environ 15 fois plus de lumière que les plus grands télescopes optiques existants.

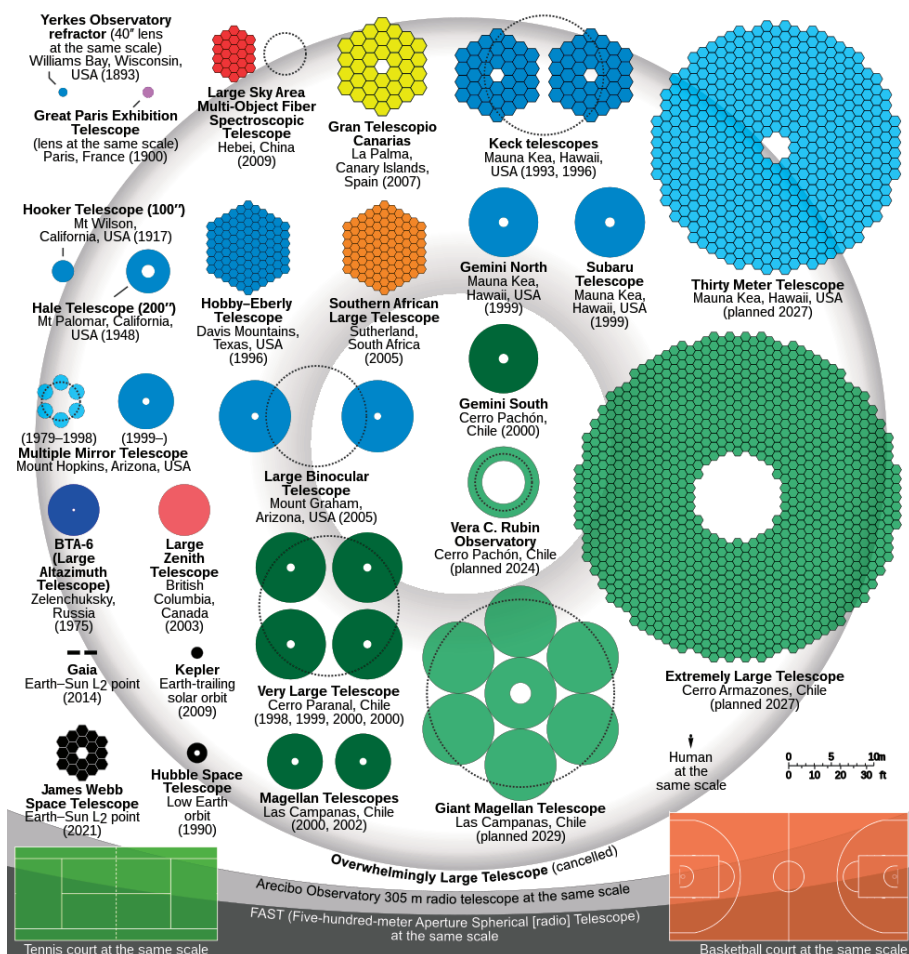


FIGURE 1.6 – Comparaison de la surface des miroirs primaires des principaux télescopes où l'on peut constater que l'ELT (Extremely Large Telescope) en impose.



plans pour développer des télescopes spatiaux révolutionnaires qui permettront de faire des recherches caractérisées de la vie. Deux prétendants sont HWO (américain) et LIFE (européen) dont nous reparlerons à plusieurs reprises dans la suite de ce livre.

1.3 Une nouvelle science extraordinaire et interdisciplinaire : l'exobiologie

L'exobiologie (ou astrobiologie, terme plus usité dans certains pays) est la discipline au cœur de cet ouvrage. Le mot a été inventé par Joshua Lederberg dans un article paru en 1960. La NASA était alors en pleine préparation pour mettre le pied sur la Lune (les fameuses missions Apollo) et procéder à des collectes d'échantillons lunaires pour les rapporter sur Terre. Il y avait alors une probabilité non nulle de ramener de la vie lunaire sur Terre risquant d'interagir et de mettre en péril cette dernière. C'est dans ce cadre que le mot exobiologie a été proposé pour désigner la science qui s'intéresse à la vie extraterrestre. Aujourd'hui, c'est un domaine de recherche à part entière qui se développe de manière exponentielle.

Une définition de l'exobiologie

L'exobiologie est la science étudiant l'origine, la distribution et l'évolution de la vie dans l'Univers. Pluridisciplinaire par essence, elle conjugue astrophysique, chimie prébiotique, biologie évolutive et sciences planétaires, tout en intégrant des réflexions épistémologiques et sociétales. Son objectif ? Éclaircir les mécanismes universels permettant à la matière inerte de se complexifier jusqu'à engendrer des systèmes vivants – que ce scénario se soit produit sur Terre, il y a 3,8 milliards d'années, ou sur d'autres mondes.

Cette discipline s'étend de l'infiniment petit – comme l'étude des acides aminés dans les météorites ou l'auto-organisation des premières cellules – à l'infiniment grand : recherche de biosignatures sur Mars, dans les geysers d'Encelade, ou sur des exoplanètes situées à des années-lumière. Elle explore aussi des formes de vie radicalement différentes de la nôtre, capables de prospérer dans des environnements hostiles (acidité extrême, températures cryogéniques, etc.) et cherche aussi à comprendre le type de messages que l'on pourrait recevoir de civilisations avancées.

Au-delà de la quête scientifique, l'exobiologie possède une dimension socioculturelle cruciale : elle interroge la place de l'humanité dans

le cosmos et implique un dialogue permanent avec le public. C'est précisément cette mission de médiation que cet ouvrage ambitionne d'incarner, en rendant accessibles les défis d'une science qui, pour repousser les frontières du connu, doit sans cesse réinventer ses méthodes et ses concepts.



Encore plus que d'autres disciplines, l'exobiologie, domaine extrêmement vaste, ne peut être incarnée par un chercheur isolé : maîtriser simultanément la physique, la chimie organique, la biologie cellulaire, l'astrophysique et la planétologie relève de l'utopie. Cette science existe uniquement à l'intersection des savoirs – climatologues dialoguant avec des biochimistes, géochimistes collaborant avec des spécialistes des exoplanètes.

Cette transversalité, bien que source d'une richesse méthodologique unique, impose une contrainte paradoxale : progresser demande de synchroniser des expertises aux langages et rythmes différents, ce qui peut ralentir l'émergence de théories unificatrices. La discipline avance ainsi par vagues, chaque percée dans un domaine (ex. découverte d'une possible biosignature dans les nuages de Vénus) relançant des débats dans d'autres champs.

En cela, l'exobiologie est un projet collectif en perpétuelle reconfiguration. Les scientifiques doivent donc être à l'écoute des autres champs de recherches, ce qui conduit à une grande richesse des voies d'approche des différentes questions pour construire une vision cohérente du vivant – terrestre et extraterrestre.

L'exobiologie poursuit deux obsessions millénaires : *Sommes-nous seuls dans l'Univers ?* et *Comment la matière inerte a-t-elle pu s'organiser en systèmes vivants ?* Pour y répondre, elle s'appuie sur : des télescopes, des expériences de laboratoires, beaucoup de théorie, et une patience à l'épreuve des faux espoirs. Car même si chaque découverte semble un petit pas, ensemble, elles redessinent notre place dans l'infini. Pourtant, l'expérience rappelle une réalité moins romanesque : les découvertes majeures adviennent rarement par "bonds" spectaculaires, mais par une accumulation patiente de preuves. Les avancées récentes – des acides aminés dans les comètes aux extrémophiles¹⁴ des abysses – illustrent cette progression incrémentale, où chaque pas éclaire un fragment du puzzle. Mais c'est précisément cette pru-

14. Micro-organisme (bactérie, archée, etc.) capable de vivre dans des environnements mortels pour la plupart des êtres vivants, comme les sources brûlantes des volcans, les profondeurs glacées de l'océan, ou les déserts arides.

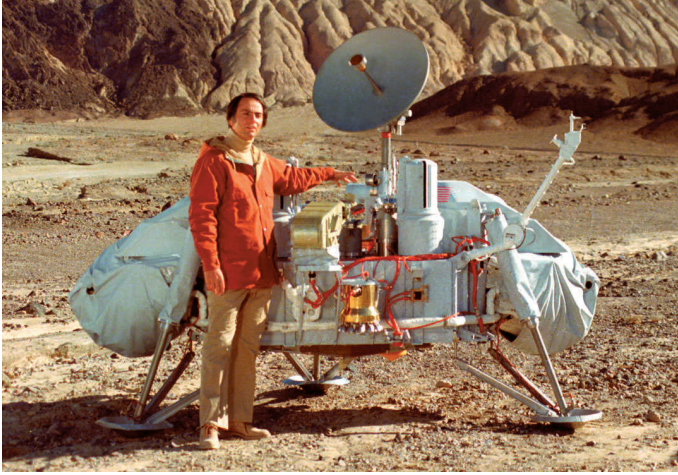


FIGURE 1.7 — Carl Sagan posant devant une réplique d’une sonde Viking.

dence méthodologique qui rend la quête exobiologique d’une audace folle : elle oblige à repenser les concepts de vie et d’habitabilité à l’aune de mondes radicalement étrangers. Les découvertes passées, que nous explorerons dans cet ouvrage, ne sont que les préludes d’une aventure dont l’enjeu ultime est de comprendre notre histoire au sein d’un Univers d’une immensité difficilement appréhendable.

La première mission exobiologique d’ampleur est définie par le programme Viking au début des années 1970 (Fig. 1.7). L’idée est d’envoyer deux sondes spatiales sur Mars, Viking 1 et Viking 2, qui embarquent des expériences dédiées pour rechercher des traces de vie. Chacune des sondes comprend un orbiteur qui se place en orbite autour de Mars et un module qui doit se poser à la surface martienne¹⁵ et mener des investigations en restant fixe – les rovers n’étant arrivés que bien plus tard. Les objectifs sont clairs et consistent à faire des images à haute résolution de la surface, de déterminer la structure et la composition du sol, de l’atmosphère, et surtout de tester l’hypothèse de présence de vie martienne (10% du budget total est consacré à cela). Trois expériences reposant sur des principes différents sont sélectionnées pour tester l’hypothèse de la présence d’organismes vivants sur Mars. Tout fonctionne à merveille et les sondes arrivent sur Mars en 1976. Malheureusement, aucunes des trois expériences ne donnèrent de réponses décisives – mais une mena à des résultats pouvant être interprétés comme possiblement positif à la présence de vie. Cependant, avec le temps, et des tests additionnels, la plupart des scientifiques furent convaincus que

15. Pour la deuxième fois de l’histoire de l’humanité, le premier atterrissage martien ayant eu lieu en 1971 par les Soviétiques avec Mars 3.

les résultats observés étaient en fait le fruit de réactions chimiques de nature non biologique, c'est-à-dire, non liés à la vie.



Étonnamment, il a fallu attendre l'arrivée du rover Perseverance sur Mars en février 2021 pour qu'une mission – la première depuis Viking dans les années 1970 – ait officiellement pour objectif de chercher des traces de vie passée sur la planète rouge. Perseverance explore aujourd'hui le cratère Jezero, un site unique où les scientifiques ont identifié les vestiges d'un ancien lac et de plusieurs deltas fluviaux. Ce paysage fossile, marqué par une diversité géologique exceptionnelle, représente l'un des environnements les plus prometteurs pour y détecter d'éventuelles biosignatures.

L'ambition ultime de la mission est de rapporter sur Terre des carottes de sol martien grâce au programme Mars Sample Return. Ce projet titanesque prévoit d'envoyer un atterrisseur sur Mars pour récupérer les échantillons collectés par Perseverance, puis de les placer dans une petite fusée capable de les propulser en orbite martienne. La NASA supervisera cette phase critique – on verra un peu plus loin que cette mission pourrait être remise en question au vu de son coût et de la nouvelle administration Trump –, tandis que l'Agence spatiale européenne (ESA) interviendra avec un vaisseau chargé de récupérer les précieux échantillons en orbite dès 2028, avant de les ramener sur Terre vers le début de la décennie 2030 dans une capsule conçue pour atterrir en douceur. Cependant, ce défi technologique sans précédent – estimé à plus de 10 milliards de dollars – s'accompagne de précautions extrêmes : les échantillons seront analysés dans un laboratoire ultra-sécurisé, isolé de toute contamination terrestre. Dans l'ombre de cette collaboration internationale, la Chine a annoncé son propre projet de retour d'échantillons martiens, avec un lancement prévu vers 2028 et un retour anticipé dès 2030. Une course discrète mais symbolique, où science et géopolitique s'entremêlent.

Une chose est sûre : ces grains de poussières martiennes pourraient révéler si la vie a un jour germé hors de la Terre... ou conforter notre solitude cosmique.

Qu'est-ce que la vie et comment elle se forme ?

La plupart des êtres vivants sur Terre vivent en secret

Avant toute chose, établissons un point important qui, souvent, n'est pas très bien connu. La plupart des espèces vivantes sur Terre sont inconnues et non répertoriées. On estime aujourd'hui que nous connaissons au maximum 20% de la vie terrestre. Ainsi, à ce jour, environ 2 millions d'espèces vivantes sont décrites par la science mais on extrapole que 8 millions (au moins) sont toujours inconnues. Et encore, ceci ne concerne que les espèces actuelles mais on estime que mille à dix mille fois plus ont existé dans les temps anciens et ne sont connues qu'à travers un nombre très limité de fossiles (Fig. 2.1).

2.1 Une définition de la vie ?

Si le but des exobiologistes est de trouver de la vie ailleurs que sur Terre, il faut bien pouvoir définir ce qu'est la vie et comprendre ce qui sépare les créatures vivantes de la matière non vivante. Cette trivialité apparente est en fait bien plus subtile qu'il n'y paraît comme on va le constater.

2.1.1 Restons simple...

Quand on y réfléchit bien, définir la vie est un vrai défi. C'est un peu comme déterminer à quel moment précis la nuit cède la place à l'aube : est-ce à la première lueur à l'horizon, au chant du coq, ou lorsque le soleil perce enfin l'obscurité ? Chaque culture, chaque humain, a sa propre interpréta-



FIGURE 2.1 — Stromatolithes laissés par les cyanobactéries, également appelées algues bleues. Ce sont les plus anciens fossiles connus de la vie sur Terre et peuvent dater de plus de 3 milliards d’années.

tion. Tentons alors en première approche quelque chose de simple et évident, du moins qui pourrait le paraître à priori. Voici une possible définition naïve de la vie : “Un être est vivant s’il est capable de se reproduire”.

Ainsi, être vivant serait représenté par la capacité à assembler différentes matières premières ou briques élémentaires issues de l’environnement, afin de les organiser et les transformer en sa copie conforme. La reproduction joue en effet un rôle central pour la vie et c’est Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), qui fut le premier à le reconnaître. Mais il y a un problème !

On voit aisément que cela ne fonctionne pas à tous les coups car il y a des êtres vivants qui ne peuvent pas se reproduire (comme les personnes stériles ou les mulets¹), et d’autre part il y a des exemples de choses non vivantes qui se reproduisent (comme les cristaux²). En conclusion, bien que la reproduction semble importante, ce n’est pas un critère suffisant. Donc, c’est quoi la vie ?

1. Le mulet et la mule sont des hybrides statistiquement stériles engendrés par un âne et une jument.

2. Vous pouvez, par exemple, très facilement cultiver et faire croître des cristaux de sucre ou de sel à la maison.



2.1.2 De la difficulté d'établir une définition globale de la vie

On pourrait essayer de prendre le métabolisme comme indicateur du vivant en disant qu'un être vivant consomme de l'énergie et la transforme mais on voit que, là encore, on aboutit à un problème car les flammes seraient des êtres vivants selon cette définition. De même pour une locomotive, qui transforme de l'énergie en mouvement.

Un autre critère pourrait être le spectre de l'adaptation, en disant que les êtres vivants sont des systèmes qui ont tendance à répondre aux changements de leur environnement de façon à promouvoir leur propre pérennité. Mais une fois encore, des problèmes persistent avec par exemple des mammifères qui peuvent se suicider, des programmes informatiques qui peuvent s'adapter à l'environnement, et pleins d'autres cas problématiques.

Et si on mélange les trois critères précédents que sont la reproduction, le métabolisme et l'adaptation, cela produit-il une bonne définition de la vie ? Toujours pas. En effet, la flamme possède les trois caractéristiques sans être vivante. Il y a aussi des organismes vivants qui montrent le phénomène dit de cryptobiosis (vie cachée en latin) pour qui la vie s'arrête pour une période limitée comme les graines des plantes ou les œufs de certains crustacés. Il y a même l'exemple des tardigrades³, animaux microscopiques marins qui ne deviennent vivants qu'au contact avec l'eau.

Une définition de la vie par la NASA

Malgré tous ces problèmes, la NASA s'est quand même essayée à donner une définition : "La vie est un système chimique auto-entretenu capable d'évolution darwinienne". L'aspect darwinien^a peut paraître assez anthropocentré car on ne sait pas si la vie a vraiment besoin de cela pour évoluer à long terme, même si ça semble être le cas sur Terre et que cette caractéristique permet une grande adaptation et une évolution vers des traits plus avantageux. De plus, d'après la définition de la NASA, la capacité d'évoluer de manière darwinienne implique de pouvoir se reproduire et donc une mule, un singe âgé, ou une fourmi ouvrière ne seraient pas vivants.

a. Rappelons que la sélection darwinienne est le fait que chaque enfant peut voir ses gènes varier légèrement d'une génération à l'autre et peut développer de nouvelles caractéristiques. Si les caractéristiques sont un handicap dans l'environnement en question alors l'individu meurt généralement avant d'avoir pu se

3. Considéré comme l'animal le plus indestructible de la planète... On en reparlera bientôt.

reproduire et de transmettre ses traits. En revanche, si la caractéristique est un plus pour la survie alors l'individu pourra avoir une descendance nombreuse qui possédera aussi ce caractère avantageux. Ceci favorise les traits avantageux au fil du temps et permet aussi de s'adapter lentement à un environnement changeant.

En conclusion, aucune définition ne semble tenir compte de tous les aspects qui caractérisent le vivant. On pourrait donc essayer de complexifier encore plus mais serait-ce suffisant ? En fait, les molécules des êtres vivants ne sont pas vivantes, même si la vie a une base moléculaire. C'est bien l'organisation complexe des molécules qui fait une cellule, et donc la vie. On voit bien que définir la vie est donc très compliqué car il faut fixer un curseur quelque part entre le vivant et le non-vivant et donc cela revient à faire un jugement de valeur. Il n'existe pas de frontière nette entre le vivant et l'inerte, c'est comme si on regardait un spectre continu des couleurs et qu'on voulait savoir précisément quand commence le orange et quand s'arrête le rouge ? Il n'y a pas de réponse évidente et commune à tous car ces mots sont des inventions humaines qui simplifient la nature pour pouvoir en parler facilement.

La vie comme concept thermodynamique

Francois Roddier (1936-2023) était un astrophysicien français. Il a proposé que la vie puisse émerger de principes naturels de la thermodynamique ^a. En effet, des résultats récents montrent que la structure la plus probable d'un système ouvert hors équilibre est celle qui maximise la dissipation de l'énergie ^b. La vie peut être vue comme un système ouvert qui échange avec l'extérieur et donc, d'après ce qui précède, un être vivant serait naturellement optimisé pour dissiper l'énergie. Par exemple, on peut voir qu'il y a une différence énorme entre n'importe quel être vivant et un amas d'atomes de carbone inanimés : les premiers captent beaucoup mieux l'énergie environnante et dissipent cette énergie sous forme de chaleur. Et donc, d'après Roddier (sur son blog ^c) : "La vie est apparue sur Terre parce qu'elle conduisait à un accroissement de la dissipation d'énergie, en particulier de l'énergie solaire. La vie a évolué de façon à augmenter constamment cette dissipation d'énergie. La thermodynamique nous donne donc la clef de l'évolution. Elle montre en particulier le véritable rôle de la sélection naturelle. Comme l'avait remarqué Lotka ^d dès 1922, la nature choisit toujours la solution qui dissipe le plus d'énergie. Lorsque Spencer ^e parle de la survie du plus apte, le sens du mot apte devient



maintenant clair. Il s'agit du plus apte à dissiper l'énergie, c'est-à-dire à consommer de la nourriture et à se multiplier.” Et dans tout ceci, l'homme est de loin le plus gros dissipateur d'énergie^f. Une bonne façon de dissiper plus est de faire plus de copies de vous-même et donc la vie pourrait émerger de ce fait. En outre, la vie serait le meilleur moyen pour accélérer le processus de dissipation et elle s'organise pour faire cela du mieux possible – par exemple avec une évolution Darwinienne. Ce concept pour décrire l'origine de la vie est encore spéculatif et controversé mais les discussions sont intenses car l'idée est très puissante et pourrait représenter le Graal de la physique moderne qui donnerait sens à l'existence. Jeremy England, biophysicien américain, et d'autres, essaient actuellement de tester cette théorie avec des simulations sur ordinateur (on en reparle à la section 2.2.6).

a. Pour simplifier, la thermodynamique est une branche de la physique qui permet d'étudier le comportement thermique des corps, plus exactement les mouvements de chaleur et comment l'énergie se transforme d'une forme à une autre (thermique vers mécanique par exemple). Cela permet par exemple d'étudier un moteur thermique (vapeur, explosion), un réfrigérateur, ou même la structure en température et pression dans les étoiles.

b. Ou de manière équivalente maximise la production d'entropie pour les plus avisés.

c. <https://www.francois-roddier.fr/?p=147>

d. Alfred J. Lotka (1880-1949) : Scientifique américain proposant que la sélection naturelle favorise systématiquement les organismes dissipant le plus d'énergie dans leur environnement.

e. Herbert Spencer (1820-1903) : Philosophe britannique, inventeur de l'expression “survie du plus apte” (1864) et pionnier du darwinisme social, étendant la sélection naturelle aux sociétés humaines.

f. Un être humain dissipe dix mille fois plus d'énergie que le Soleil par unité de masse.

2.1.3 La grande diversité du vivant sur Terre

Avant d'aborder la formation des premières briques de la vie et son évolution vers des formes plus complexes, faisons un petit tour d'horizon sur la grande diversité d'aspects que peut prendre la vie, qu'on a tant de mal à définir.

On peut avoir une vision simplifiée de la vie sur Terre en utilisant un arbre phylogénétique⁴ qui montre les relations de parenté entre des groupes d'êtres vivants. Il y a différentes manières de construire ces “arbres de la

4. Issu des termes grecs *phylon* (“groupe lié par descendance”) et *genesis* (“naissance”), le mot phylogénétique permet de décrire l'évolution des organismes vivants.

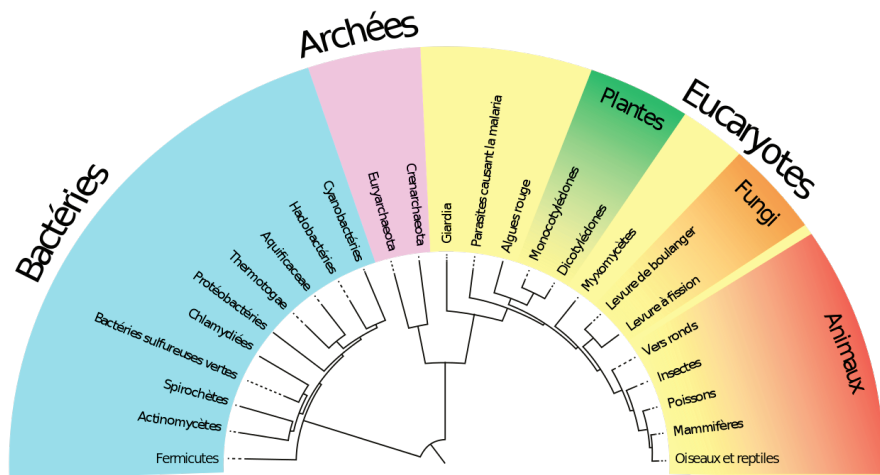


FIGURE 2.2 — Arbre phylogénétique très simplifié des groupes d'espèces connues sur Terre.

vie”... et ils peuvent vite devenir très complexes ! C’est pour cela que nous ne montrons qu’un diagramme simplifié (Fig. 2.2). On voit alors qu’il y a trois grands groupes distincts que sont les bactéries, les archées et les eucaryotes qui proviennent tous d’un même dernier ancêtre commun universel (DACU ou LUCA en anglais).

Les bactéries sont des organismes vivants qui sont procaryotes⁵ et pour la plupart unicellulaires. Leur structure interne est déjà extrêmement complexe (Fig. 2.3) bien que les bactéries soient le groupe le plus simple parmi les trois. En effet, les bactéries possèdent déjà une paroi cellulaire, un ADN⁶ circulaire, et même des ribosomes⁷ pour pouvoir créer les protéines utiles à leur fonctionnement. Cela montre qu’il y a déjà eu une phase d’évolution significative pour développer ces premières cellules vivantes qui interagissent avec l’extérieur. En fait, les premières bactéries arrivent rapidement après la formation de la Terre il y a ~4,55 milliards d’années. Les premières cellules pour lesquelles il existe des fossiles (Fig. 2.1), alors que la température de surface était comprise entre 40 et 80°C, sont datées de ~3,8 milliards

5. C’est-à-dire qu’il n’y a pas de noyaux dans la cellule et le patrimoine génétique fondé sur l’ADN est dispersé dans le milieu aqueux de la cellule.

6. Molécule en forme de double hélice présente dans toutes nos cellules, qui contient le plan de construction et de fonctionnement d’un être vivant. On peut l’imaginer comme une bibliothèque microscopique où chaque livre serait un gène.

7. Nanomachine cellulaire présente dans tous les êtres vivants. Composée d’ARN et de protéines, elle “lit” le code génétique (ARN messenger) pour assembler les acides aminés en protéines, véritables ouvrières de la cellule.

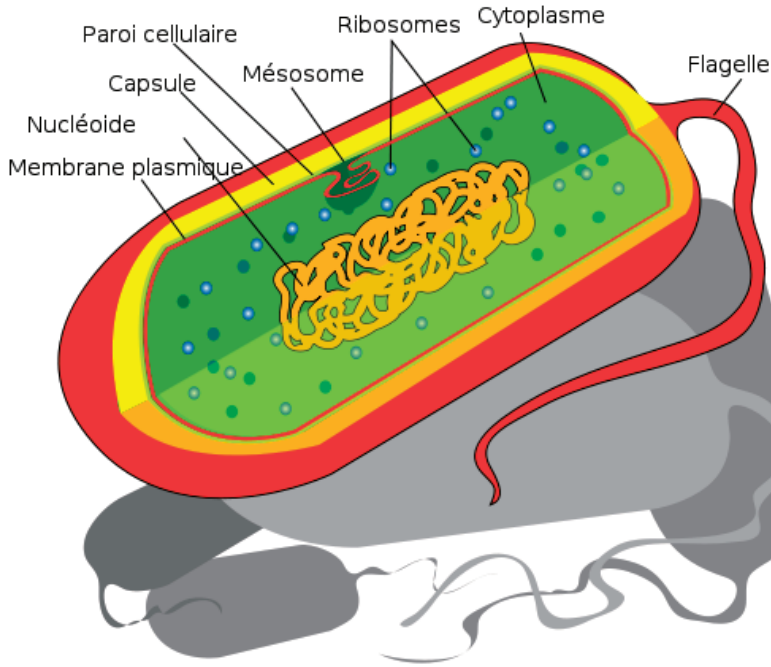


FIGURE 2.3 – Structure d'une cellule procaryote.

d'années. Il faut ensuite attendre environ 1,5 milliards d'années pour voir apparaître des organismes multicellulaires plus sophistiqués, et des eucaryotes⁸ qui sont les cellules à la base de tous les êtres complexes (comme les animaux).

Les archées sont très similaires aux bactéries quand on regarde leur structure car elles sont aussi constituées d'une cellule unique qui ne comprend, ni noyau, ni organites⁹ : ce sont aussi des procaryotes. Par contre, d'un point de vue génétique, les archées sont des organismes aussi différents des bactéries que des eucaryotes. Par exemple, chez les archées, les enzymes impliquées dans la réplication de l'ADN, la transcription de l'ADN en ARN et la traduction de l'ARN messager en protéines sont apparentées à celles des eucaryotes et non à celles des bactéries. On a ainsi découvert récemment que la branche des eucaryotes prend naissance parmi des archées d'Asgård qui semble créer un pont entre les premières archées découvertes et les cellules eucaryotes modernes.

8. Il faut bien comprendre que si l'arrivée de ces cellules eucaryotes complexes n'avait pas eu lieu, la vie serait restée microbienne et nous ne serions pas là à discuter de la possibilité de communiquer avec des civilisations extraterrestres.

9. Comme les mitochondries ou les chloroplastes (voir plus loin).

Les eucaryotes représentent le groupe qui a donné naissance à la vie complexe telle que les plantes, les champignons, les animaux. Les cellules d'eucaryotes sont encore plus complexes que celles des procaryotes avec la présence d'un noyau (qui protège le matériel génétique) et d'autres organites spécialisés, par exemple, dans la respiration. Ces cellules sont typiquement 15 fois plus grandes qu'un procaryote moyen, et peuvent être jusqu'à mille fois plus volumineuses. Nous ne rentrerons pas dans les détails de la complexité de ces cellules mais il est bon de regarder quelques instants une cellule végétale¹⁰, qui est l'unité élémentaire des organismes végétaux, pour s'en rendre compte (Fig. 2.4).



Pour comprendre la vie ailleurs, il faut comprendre comment cette complexité cellulaire a pu se mettre en place et pourquoi cela a pris tant de temps pour créer des eucaryotes. Ceci est important car, par exemple, s'il faut un ou deux milliard d'années pour que des eucaryotes émergent sur les autres planètes, alors il faut oublier la vie complexe autour d'étoiles plus de deux fois plus massives que notre Soleil qui disparaîtront avant que les cellules eucaryotes aient eu le temps de voir le jour !

Un point intéressant qui pourrait peut-être aider à fixer les échelles de temps sur d'autres planètes est que l'on considère généralement que les eucaryotes se sont créés par assimilation de petits procaryotes au sein de plus grands, ce qui a donné lieu à toute une nouvelle complexité qui a mené aux dinosaures et aux humains. Cela peut-il aussi avoir lieu ailleurs avec une probabilité assez grande ? Est-ce que la vie "autrement" pourrait aussi se développer de manière aussi complexe ? Répondre à ces questions reste un défi, bien que l'on donnera des éléments de réponses dans la suite de ce livre. Pour le moment, contentons-nous d'explorer la diversité d'espèces différentes qu'ont produit les eucaryotes.

Il y a, par exemple, le "blob" (Fig. 2.5), apparu il y a environ 500 millions d'années, qui est un eucaryote, mais n'est ni un animal, ni une plante, ni un champignon. C'est un curieux être rampant composé d'une unique cellule géante mais qui peut faire plusieurs mètres. Il peut se déplacer (jusqu'à quelques cm par heure), se nourrir, il a 720 types sexuels, est quasi immortel, découpable, et peut entrer en état végétatif. On peut le trouver dans les forêts ou jardins et il se nourrit généralement de bactéries ou de champignons. Il grandit à mesure qu'il mange et c'est donc une masse qui

10. Notez qu'une cellule animale est très similaire car elle fait aussi partie du règne des eucaryotes. Cependant, il y a quelques différences car ces dernières n'ont, par exemple, pas de chloroplastes qui servent à la photosynthèse.

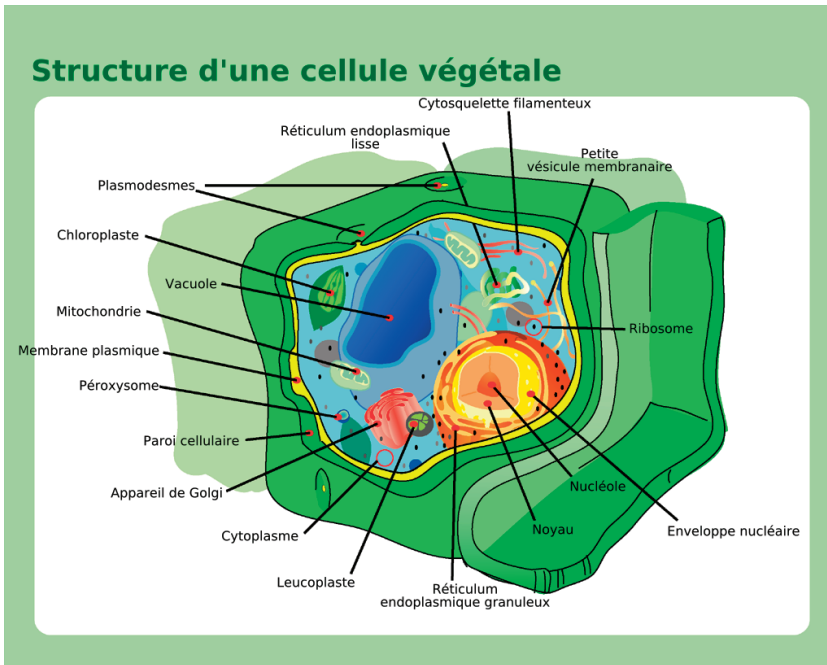


FIGURE 2.4 – Structure d'une cellule végétale (eucaryote).

grossit continuellement (il peut doubler ou tripler de taille tous les jours). Ses uniques prédateurs seraient certains scarabées et les limaces. Si un blob en rencontre un autre de la même espèce, les deux fusionnent pour donner une cellule unique. Le blob peut “mémoriser” l'endroit par où il passe et où se trouve la meilleure nourriture. Et une autre caractéristique qui intéresse les scientifiques est que le blob est relativement difficile à tuer car il cicatrise et referme sa membrane en deux minutes. Il peut aussi se dessécher pour se maintenir en vie et se réhydrater plus tard. En laboratoire, il est même capable de vivre éternellement dans les bonnes conditions.

La vie est donc surprenante, même sur Terre, et rappelez vous que nous avons un ancêtre commun avec le blob, et toute la vie sur Terre. Imaginez donc ce qu'il pourrait être d'une vie extraterrestre qui a peut-être émergé à partir d'éléments structurellement différents dès le départ. La vision d'un Alien vert avec une tête, des bras, et des jambes comme on le voit généralement à la télévision est loin d'être réaliste comme on en reparlera plus tard.

Il est aussi intéressant d'observer les extrêmophiles sur Terre – ces êtres qui vivent dans des conditions qui sont mortelles pour la plupart des autres organismes – pour comprendre que la vie prospère dans presque n'importe



FIGURE 2.5 – Blob (en jaune) formé sur une écorce d'arbre.

quelles conditions de température, pression, acidité, ... Par exemple, la bactérie *Deinococcus radiodurans* est l'un des organismes les plus résistants au monde. Cette bactérie résiste, par exemple, aux UVs, à la radioactivité, à l'acide, au dessèchement, aux températures extrêmes et même à la famine. Cette résistance hors pair est notamment due au fait que la bactérie peut réparer son ADN en 12 à 14 heures et sans perte de viabilité. Grâce à cela, *Deinococcus radiodurans* peut supporter jusqu'à 150 cassures (par exemple à cause d'une radiation intense) de son double brin d'ADN, par chromosome, sans effet mutagène... alors qu'une bactérie comme *Escherichia coli* n'en supporte qu'au maximum trois et subit des mutations délétères. Grâce à cela, des bactéries *Deinococcus radiodurans* ont pu survivre 3 ans attachées à l'ISS et elles étaient toujours vivantes à leur retour sur Terre.

Le tardigrade : un extrême parmi les extrêmes

Le tardigrade, parfois surnommé “ourson d'eau” est peut-être le plus extrême des extrémophiles (Fig. 2.6). Il fait partie des eucaryotes, dans la branche du règne animal, et est apparu il y a environ 500 millions d'années. Ces animaux ont quatre paires de pattes et ont des tailles allant de 50 micromètres à plus de 1 millimètre. Il existe environ 600 espèces, pouvant être soit terrestres soit aquatiques. Ils peuvent survivre dans des environnements extrêmement hostiles avec des températures allant de -272 à 150 °C et des pressions jusqu'à 6 000



bar^a. Ils résistent aussi à de fortes radiations UV ou X, à de nombreux produits toxiques et surtout ils ont une extrême tolérance à la dessiccation, ce qui leur permet de coloniser les déserts les plus secs. Ils peuvent aussi être asphyxiés (manque d'oxygène) sur plusieurs jours sans mourir. Une autre prouesse notoire est qu'ils peuvent se mettre en état de cryptobiose, où leur métabolisme est complètement arrêté. Pour rentrer dans cet état, le tardigrade déshydrate presque complètement son organisme, en perdant plus de 99% de son eau, et en la remplaçant par une sorte d'antigel qui préserve les structures cellulaires. L'animal redevient actif en une durée allant de quelques minutes, à quelques heures, quand les conditions redeviennent normales. Par exemple, un spécimen qui a été congelé à -20 °C pendant plus de 30 ans a pu être réveillé. Certains tardigrades sont même trouvés dans des glaces datées de plus de 2 000 ans et reprennent vie dès qu'on fait fondre cette dernière. On ne connaît pas la durée maximale possible de leur cryptobiose qui pourrait être beaucoup plus longue. Récemment, la sonde israélienne Beresheet qui transportait environ un millier de tardigrades en cryptobiose s'est écrasée sur la Lune. Si les tardigrades ont survécu à l'impact, il est possible qu'on puisse les récupérer sur la Lune dans plusieurs décennies (ou plus), puis les réhydrater dans un environnement avec une atmosphère (pas nécessairement la Terre), et un certain nombre d'entre eux seraient certainement réanimés.

a. Soit 6 000 fois la pression à la surface de la Terre.

Certains chercheurs poussent la diversification de la vie à l'extrême et estiment que notre Terre est vivante : c'est l'hypothèse Gaïa. Cette hypothèse controversée prétend que l'ensemble des êtres vivants sur Terre formerait un vaste super-organisme appelé Gaïa, d'après la déesse de la mythologie grecque personnifiant la Terre. Le super-organisme réaliserait alors l'autorégulation de ses composantes (comprenant la biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la pédosphère¹¹, étroitement couplées en tant que système évolutif) pour favoriser la vie. Cette hypothèse soutient donc que ce système dans son ensemble recherche un environnement physique et chimique optimal pour favoriser la vie contemporaine. Un exemple courant pour décrire cette idée est que la composition de l'atmosphère aurait été autorégulée au cours du temps par les êtres vivants de manière à maintenir

11. La couche de sol à la surface de la Terre, composée de roches altérées, de matières organiques et d'eau, qui interagit avec les autres sphères de la Terre pour permettre la vie.



FIGURE 2.6 — Un tardigrade vu au microscope électronique. Grossi >200 fois pour montrer des détails normalement invisibles à l'œil nu (taille réelle : < 1 mm).

une température constante (pour maintenir de l'eau liquide) en dépit d'une augmentation de 30% de la luminosité solaire depuis sa formation (c'est le paradoxe du jeune Soleil faible sur lequel on reviendra). Si l'hypothèse est un jour confirmée, cela pourrait avoir des conséquences sur la recherche de vie extraterrestre qu'il sera bon de considérer dans un modèle exobiologique complexe qui essaierait de prédire comment détecter la vie ailleurs.

2.2 Comment la vie émerge et se complexifie ?

Maintenant, nous allons rentrer dans une partie plus exploratoire car on va analyser l'état de l'art de la recherche sur l'émergence de la vie. Gardez bien à l'esprit que certains résultats pourraient être amenés à évoluer, c'est la démarche scientifique qui fonctionne ainsi : une nouvelle théorie peut remplacer la précédente si elle explique mieux les observations.



2.2.1 Quelles sont les briques de la vie ?

Les points clefs

Comme cette section est plus technique, voici un résumé des notions essentielles qu'il faut connaître pour poursuivre la lecture au cas où l'on souhaiterait sauter cette partie.

- Les briques essentielles pour espérer construire une cellule caractéristique de la vie sont : 1) les acides aminés, 2) les bases azotés, 3) les sucres, 4) les acides gras, et 5) le phosphore.

À votre avis, comment différencie-t-on un tardigrade, d'une poule, d'un être humain, au niveau cellulaire ? On peut, par exemple, comparer l'ADN (acide désoxyribonucléique, qui contient le code génétique¹²) des différents animaux entre eux. Un autre point de comparaison pourrait être les protéines qui sont des éléments présents en nombre dans les cellules. Par exemple, dans une cellule d'*Escherichia Coli*, les protéines constituent environ la moitié de la matière sèche, là où l'ADN représente 3%. Les protéines sont les éléments les plus actifs d'une cellule. Elles opèrent différentes fonctions comme maintenir la structure d'une cellule, transporter des molécules dans, ou en dehors, des cellules, détecter des signaux (e.g. lumière) ou messages (e.g. hormone), mouvoir des cellules (e.g. contraction des muscles), défendre l'organisme (e.g. anticorps) ou même accélérer les réactions chimiques (e.g. enzymes). Elles jouent donc un rôle essentiel et c'est pour cela qu'elles sont au menu des animaux. Après ingestion, les protéines sont dégradées dans l'estomac et les acides aminés libérés – qui sont les sous-briques des protéines – sont absorbés au niveau de l'intestin grêle et repassent dans le sang pour ensuite être réutilisés par les cellules. On peut donc penser que ces protéines pourraient être essentielles à d'autres formes de vie.

Si on regarde de près, les protéines ne sont qu'un enchaînement d'acides aminés¹³. Il y a environ 22 acides aminés différents¹⁴ qui sont incorporés dans les protéines lors de la traduction de l'ARN messager¹⁵ par les ribosomes. Ces acides aminés sont des molécules relativement simples telles

12. Pour n'importe quel être vivant, l'ADN est transmis au cours de la reproduction et joue le rôle de support de l'hérédité.

13. Liés entre eux par ce qu'on appelle des liaisons peptidiques.

14. Neuf acides aminés sont dit essentiels car ils ne peuvent pas être synthétisés par le corps humain et doivent donc être apportés par l'alimentation.

15. Qui est, pour simplifier, une copie d'un petit bout de notre ADN qui sort du noyau pour être transcrit en protéines.

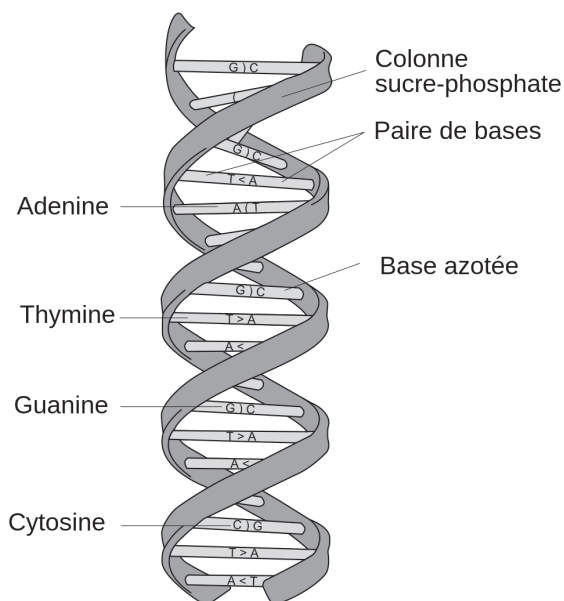


FIGURE 2.7 — Structure de la double hélice d'ADN.

que la glycine (de formule chimique $C_2H_5NO_2$). Les chaînes d'acides aminés peuvent être longues avec plusieurs centaines (voire des milliers) de ces derniers qui s'enroulent dans l'espace d'une façon unique, ce qui confère à la protéine sa fonction.

Quant à l'ADN, il est composé de trois éléments constitutifs que sont les bases azotées [adénine (A), cytosine (C), guanine (G) et thymine (T)], les sucres (le désoxyribose), et les phosphates. Les deux derniers éléments constituent les brins de l'ADN. Les bases azotées se lient deux à deux et se connectent aux deux brins formant la fameuse structure en double hélice (Fig. 2.7). Les sucres sont aussi utiles de manière générale pour les cellules car ils fournissent une bonne source d'énergie. Cela donne déjà une première idée des briques de base nécessaires à la vie sur Terre.

D'après notre compréhension actuelle, il semble aussi essentiel d'avoir des compartiments comme des cellules pour que la vie émerge. Cela donne de la structure et isole le milieu interne du capharnaüm externe. Donc, il faudrait aussi être capable de former des cellules avec nos briques de bases, ce qui revient à y ajouter les constituants des membranes cellulaires qui sont un assemblage de molécules relativement simples en forme de double feuillet. La membrane est principalement composée de phospholipides qui ont une tête hydrophile et une queue hydrophobe qui se placent souvent en double couche pour former une membrane cellulaire où les queues sont connectées



entre elles et les têtes sont en contact avec l'extérieur et l'intérieur de la cellule (deux milieux aqueux). Ce sont les acides gras (les unités de base des lipides) qui servent à la synthèse des phospholipides.



Donc pour résumer on peut définir cinq briques essentielles à la vie : 1) les acides aminés, 2) les bases azotés, 3) les sucres, 4) les acides gras, et 5) le phosphore (utile à la fois pour stabiliser l'ADN et faire des membranes cellulaires plus efficaces). On note que toute la vie sur Terre est composée au moins de ces 5 briques élémentaires. Si on mélange tout cela assez fort, ou plutôt de manière subtile, on pourrait peut-être obtenir une cellule primitive et c'est sûrement ce qu'il s'est passé à la genèse de la Terre.

2.2.2 La formation des premières briques élémentaires

Les points clefs

Comme cette section est aussi plus technique, voici un résumé des notions essentielles qu'il faut connaître pour poursuivre la lecture si on veut sauter cette partie.

- Les briques de bases ont pu s'assembler soit : 1) Dans l'océan près de cheminées hydrothermales ; 2) Dans des petites mares en interaction avec l'atmosphère terrestre ; 3) Sur des petits corps de type astéroïde et arriver sur Terre lors d'un impact.
- L'expérience de Miller montre qu'il n'est peut-être pas si compliqué de créer certaines briques élémentaires comme les acides aminés sur la Terre primitive.
- Toutes les briques de la vie (acides aminés, bases azotés, sucres, acides gras) sont assez facilement constructibles si on a du carbone, de l'oxygène, de l'hydrogène, de l'azote et du phosphore qui sont justement abondants dans l'Univers et disponible sur la Terre primitive.

Nous rentrons maintenant dans ce qu'on appelle la chimie prébiotique qui traite de la recherche de mécanismes réactionnels ayant menés au développement de molécules de plus en plus complexes non encore vivantes (abiotiques) jusqu'à des systèmes vivants (biotiques). Nous allons donc d'abord voir s'il est aisé d'obtenir les cinq briques élémentaires (que l'on



FIGURE 2.8 – Météorite de Murchison, une chondrite carbonée au Musée national d'histoire naturelle des États-Unis.

a détaillé précédemment) dans une soupe prébiotique¹⁶. Le développement des briques de base est l'étape la mieux comprise à ce jour, et la moins compliquée.

Dans quel environnement se forment les briques de base ?

Il faut savoir qu'il y a différents environnements dans lesquels on pourrait former les briques élémentaires. Les trois principaux qui sont envisagés sérieusement par les chercheurs sont les petites mares en interaction avec l'atmosphère, l'océan et les petits corps (astéroïdes, comètes). Pour les deux premiers cas, la source est endogène¹⁷ et les briques seraient créées directement sur Terre alors que pour le dernier, l'apport est exogène¹⁸. L'inspection des météorites – qui sont des bouts d'astéroïdes, de comètes ou de planètes qui viennent impacter la Terre (par exemple Murchison, Orgueil pour les plus connues) – montre que les chondrites¹⁹ carbonées (qui ont pour corps parents des astéroïdes, Fig. 2.8) renferment de nombreuses

16. Ou soupe primordiale, représentée par l'ensemble hypothétique des conditions présentes sur la Terre il y a environ 3,7 à 4,0 milliards d'années.

17. Produit sur la Terre elle-même, en dehors de tout apport extérieur.

18. Apport extérieur à la Terre.

19. Une chondrite est une météorite rocheuse (non métallique) qui n'a pas été modifiée par la fusion ou la différenciation du corps d'origine.