

Traces chimiques d'une forme de vie extraterrestre : si près ! si loin !

Michel Viso est responsable de l'Exobiologie au Centre National d'Études Spatiales (CNES).

L'exobiologie est la science qui recherche des formes de vie extraterrestre. La **Figure 1** est l'illustration de la « feuille de route » européenne de l'exobiologie, qui schématise l'évolution des molécules depuis la nucléosynthèse¹ au sein des nébuleuses jusqu'à la forme moléculaire la plus élaborée

dans la vie terrestre que sont les acides nucléiques².

Comprendre l'enchaînement des différentes étapes qui ont conduit sur Terre à l'émergence de la vie est nécessaire pour déterminer si ce cheminement a pu ou peut se produire ailleurs que notre Terre, sur d'autres planètes ou corps célestes.

1. Nucléosynthèse : synthèse de noyaux atomiques par différentes réactions nucléaires (capture de neutrons ou de protons, fusion, fission, spallation), éventuellement suivie de désintégrations radioactives ou de fission spontanée.

2. Acides nucléiques : biomolécules polymères dont les unités de base sont les nucléotides, reliés par des liaisons phosphodiester. Il existe deux types d'acides nucléiques : l'acide désoxyribonucléique (ADN) et l'acide ribonucléique (ARN).

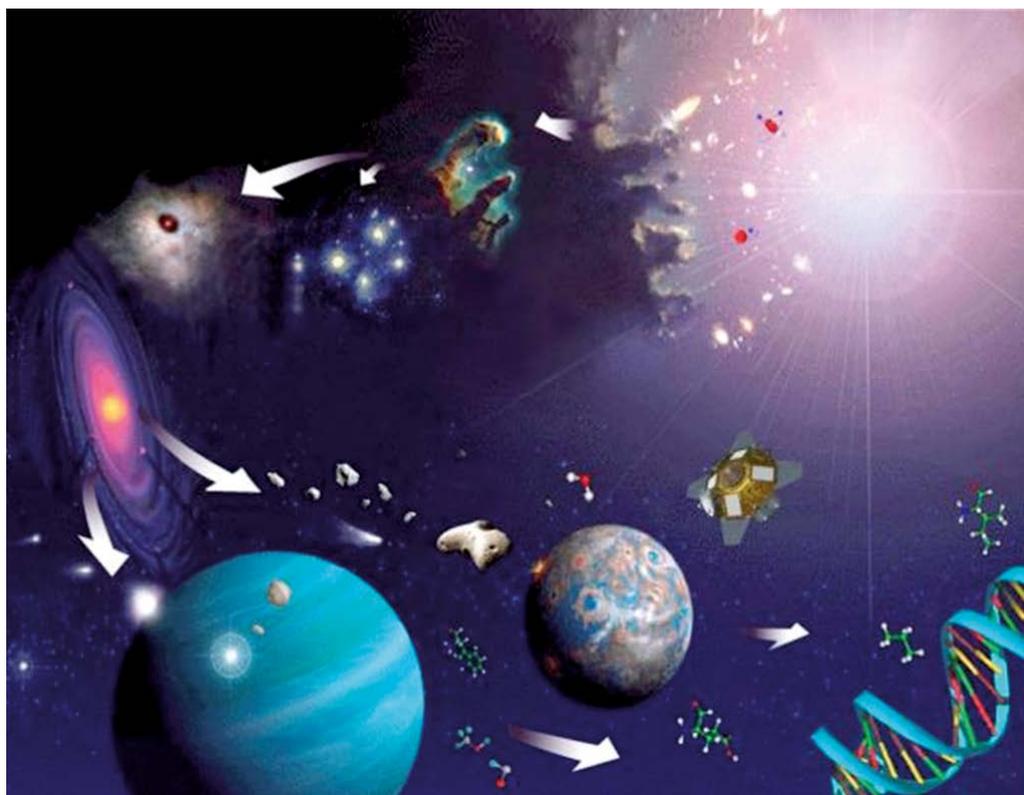


Figure 1

Représentation des différentes étapes d'évolution des molécules depuis la nucléosynthèse au sein des nébuleuses jusqu'aux acides nucléiques.

1 La recherche des manifestations d'une forme de vie

Des dizaines de philosophes se sont attaqués à la définition de la vie, et Jacques Reisse, chimiste, membre de l'Académie royale des Science de Belgique avec Hugues Bersini, dans un livre publié en 2007³, en recensent au moins soixante définitions.

La manifestation d'une forme de vie (**Figure 2**), c'est d'abord faire plus de soi-même par

soi-même : par exemple, quand on est petit on grandit. La deuxième caractéristique est la notion d'individu, c'est-à-dire la compartimentation (**Figure 2B**), qui n'est pas toujours prise en compte et qui aux yeux de la plupart des exobiologistes est un point essentiel pour arriver à la seconde forme de manifestation de la vie, qui est la capacité à se multiplier, à se diviser et à former des populations.

Actuellement, il est difficile de concevoir, peut-être à tort, une forme de vie qui n'aurait fait que croître sans cesse, sans la formation d'individus, qui par division deviennent deux puis forment une population. C'est à ce moment-là, lors du

3. Comment définir la vie ? Les réponses de la biologie, de l'intelligence artificielle et de la philosophie des sciences. (2007). Hugues Bersini, Jacques Reisse, Vuibert, pp 124.



processus de division, qu'il y a la transmission de l'information. Nous connaissons cela sous le terme de génétique. Mais cette transmission de l'information s'effectue de façon imparfaite, cela introduit la notion de mutation⁴.

Prenons l'exemple simple d'un ensemble de vaches clonées (Figure 2E). C'est la première vache qui a donné, à partir de ses cellules somatiques, 38 animaux qui sont théoriquement strictement identiques. Ces vaches, des Holsteins, sont blanches et noires car c'est un critère sur lequel elles sont sélectionnées. Cependant, on voit bien que les taches noires de ces vaches ne sont pas identiques. Donc, même en partant de la même cellule, et de cellules qui sont supposées identiques, les animaux obtenus sont différents. Cela signifie que la mutation est vraiment

congénique⁵, constitutive de la vie au proprement parler.

C'est à partir de cette possibilité et de cette abondance de mutations que se manifeste l'évolution, souvent dénommée, à tort, « adaptation ». Ce que nous dénommons « adaptation » provient de la présence au sein d'une population de caractéristiques portées par certains individus. À un moment donné, cette particularité donne aux individus qui la possèdent un avantage significatif par rapport aux autres. Un groupe se développe mieux et plus vite, et supprime la population qui ne porte pas cette caractéristique avantageuse. Le groupe apparaît s'être mieux adapté aux variations de l'environnement mais en fait c'est l'environnement qui a sélectionné, très progressivement, un groupe d'individus. Quand

Figure 2

Illustrations des manifestations de formes de vie aux niveaux cellulaire, animal et fossile.

4. Mutation : modification irréversible de la séquence d'un génome (ADN ou ARN).

5. Congénique : qualifie des espèces proches ou très voisines, qui diffèrent l'une de l'autre par une très petite partie du génome.

l'environnement change avec une ampleur importante ou que dans la population il n'existe pas d'individu possédant une caractéristique particulière favorable, l'espèce disparaît comme ce pauvre hadrosaure qui a disparu et qui n'est connu que par les fossiles retrouvés par exemple au Mexique (*Figure 2D*).

Pour attester la manifestation d'une forme de vie nous rechercherons deux choses. D'une part des *biomarqueurs*⁶ : du méthane, de l'oxygène, des hopanes, des stéranes, du cholestérol, des acides nucléiques (*Figure 3*). Avec les connaissances actuelles, pour les chimistes, ces molécules ne peuvent être fabriquées que par un processus métabolique : du vivant. Leur niveau de complexité requiert une succession d'étapes dont on ne voit pas comment cela

pourrait se faire de façon purement aléatoire dans des conditions « naturelles ».

Nous rechercherons aussi les *biosignatures*. Les biosignatures sont des manifestations indirectes de la vie. Prenons l'exemple d'une clé de douze (*Figure 4A*), si effectivement nous trouvons sur Mars une clé de douze, bien qu'il n'y ait pas de carbone ni d'azote dans le métal, c'est bien une biosignature, c'est bien un être vivant qui l'a fabriquée. La trouver ne préjuge pas qu'il y a une forme de vie sur Mars mais plutôt qu'elle a été oubliée par la personne qui a fabriqué l'engin. Mais il y a des équivalents de « clés de douze » d'origine microbiennes comme par exemple les stromatolithes (*Figure 4B*), qui sont des accumulations de lames de carbonate de calcium les unes derrière les autres, et qui sont caractéristiques, dans leur composition chimique mais aussi par leur morphologie, de l'existence d'une forme de vie.

6. Biomarqueur : caractéristique biologique mesurable liée à un processus normal ou non.

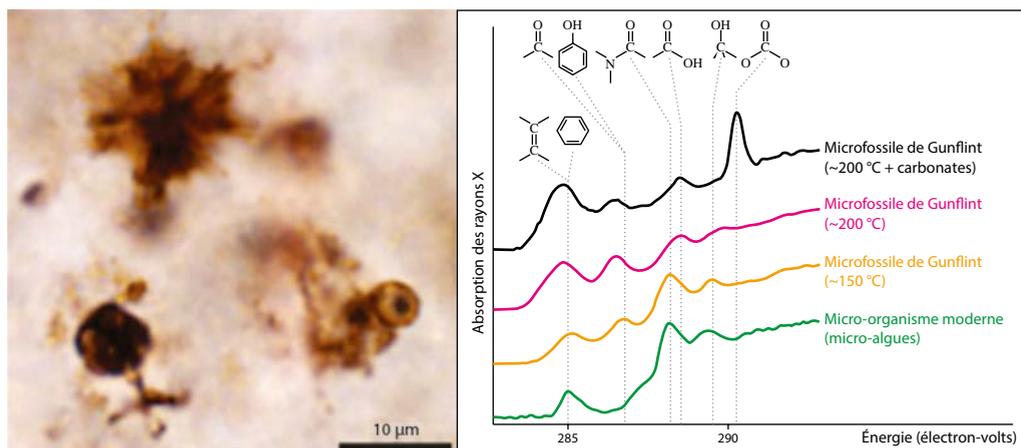


Figure 3

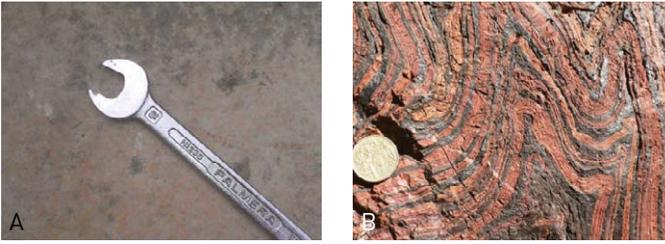


Figure 4

La « clé de douze », manifestation de la vie sur Mars ? Les stromatolites sont des « clés de douze » microbiennes, caractéristiques de l'existence d'une forme de vie.

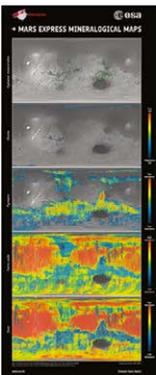
2 Où chercher les manifestations de la vie ?

Les formes de vie sont essentiellement cherchées dans le Système Solaire, là où nous pouvons explorer, avec des sondes, en orbite ou qui les survolent, ou bien des engins se déplaçant à leur surface. Mais depuis 1995, on va aussi chercher sur des planètes extrasolaires, et bien sûr on s'intéresse aussi à ce qui se passe sur Terre (Figure 5).

Le Système Solaire contient quatre planètes telluriques⁷ et des planètes géantes gazeuses (Figure 6). Pour les géantes gazeuses, ce sont leurs satellites qui nous intéressent ; ils ressemblent parfois à des petites planètes et sont de grosses lunes.

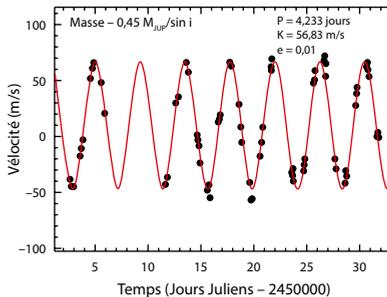
7. Planètes telluriques : en opposition aux planètes gazeuses, une planète tellurique est composée essentiellement de roches et de métal et possède en général trois enveloppes concentriques (noyau, manteau et croûte).

Le Système Solaire



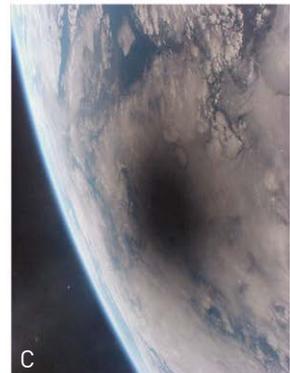
A

Les planètes extrasolaires



B

La Terre



C

Figure 5

Zones de recherche de formes de vie : le Système Solaire, les planètes extrasolaires, la Terre.

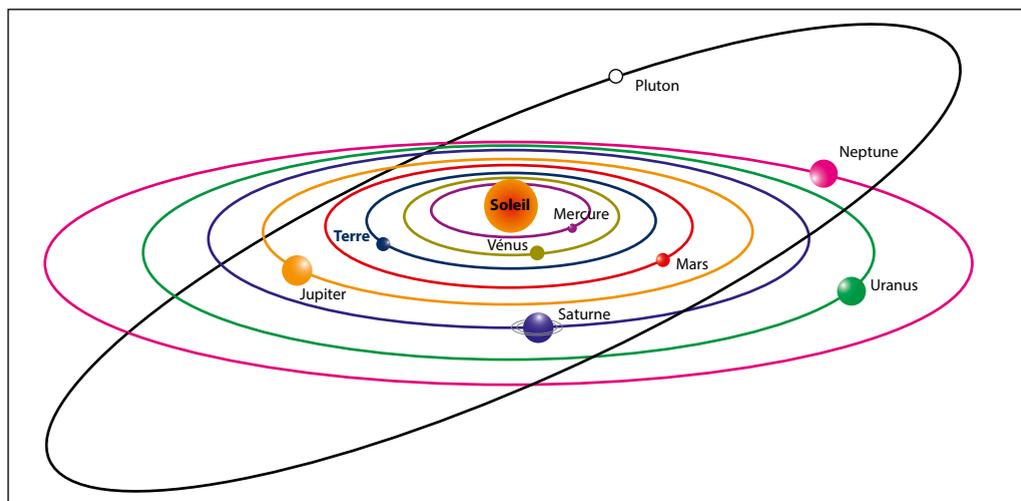


Figure 6

Représentation des planètes du Système Solaire.

Les programmes de recherche actuellement en développement s'orientent vers Mars, parce que c'est une planète rocheuse dont la température oscille entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, qui a une atmosphère très ténue et des traces d'eau ayant coulé à sa surface.

On pourrait s'intéresser à une autre planète voisine de la Terre mais qui a mal évolué, Vénus, dont la température est actuellement de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ au sol, avec une atmosphère extrêmement épaisse contenant de l'acide sulfurique. Donc même si Vénus a vécu peut-être une jeunesse aussi claire et « brillante » que la Terre avec le développement d'une forme de vie – ce qui n'est pas impossible mais on n'en sait rien actuellement –, ce n'est pas là que l'on va en chercher les traces car on ne sait pas y aller, et elles ont disparu sous l'effet de la chaleur, de l'activité volcanique et de la chimie de l'atmosphère. Mercure est aussi exclu, donc notre principale cible demeure la planète Mars.

3 La recherche des manifestations d'une forme de vie sur Mars

3.1. L'origine du méthane de l'atmosphère de mars

Il y a quelques années, à partir d'une observation terrestre, on a trouvé du méthane dans l'atmosphère martienne, d'où les grands titres des journaux de l'époque : « *Mars n'est pas une planète morte* ».

En effet, dans les conditions martiennes, et d'après un certain nombre de modèles photochimiques, on sait que le méthane émis à un moment donné se détruit en trois cents ans (peut-être moins selon certains modèles). Si on détecte du méthane sur Mars aujourd'hui c'est qu'il a été produit récemment (en termes géologique). Les volcans sont des sources de production de méthane, mais on ne connaît pas de traces de volcans actifs actuellement sur Mars car on sait qu'il n'y a pas de point chaud. Il existe aussi des sources qu'on

pourrait dire astronomiques de méthane puisqu'on en trouve par exemple beaucoup dans l'atmosphère de Titan, mais ce méthane devrait avoir disparu. Les vaches produisent du méthane (mais il n'y en a pas sur Mars !), ainsi que certaines bactéries méthanogènes ou les archées⁸. Au final on ne comprend pas encore pourquoi il y a du méthane sur Mars (*Figure 7*).

3.2. L'observation de l'atmosphère de Mars

Le satellite *Trace Gas Orbiter* de la mission *ExoMars* de 2016 vient d'arriver autour de la planète. Il emporte deux instruments que l'on voit en jaune sur la *Figure 8*, d'une part *NOMAD* (« *Nadir and Occultation for Mars Discovery* »), un instrument belge, et *ACS* (« *Atmospheric Chemistry Suite* »), qui est un instrument russe avec des contributions françaises, pour rechercher les gaz très peu concentrés dans l'atmosphère martienne. Celle-ci est majoritairement composée de trois gaz : 96 % de gaz carbonique (CO₂), 2 % de diazote (N₂), 2 % d'argon ; d'autres gaz intéressants pour les exobiologistes ne sont présents qu'à très faible concentration.

Tous ces gaz, qui sont à l'état de traces et qu'on n'a pas été capable de détecter jusqu'à présent, vont être recherchés.

8. Archées : anciennement appelées archéobactéries, ce sont des micro-organismes unicellulaires procaryotes, c'est-à-dire des êtres vivants constitués d'une cellule unique qui ne comprend ni noyau ni organite, comme des bactéries.

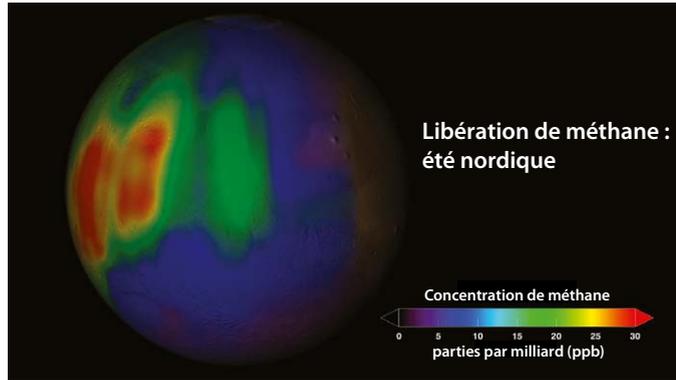


Figure 7

L'évaluation des concentrations en méthane à la surface de Mars montrent que la planète n'est pas morte.

Actuellement, le satellite *TGO*, lancé en septembre 2017, termine sa phase d'aéro-freinage pour être mis sur son orbite de travail en avril 2018. Il fonctionnera au moins pendant quatre ans.

Les observations de l'atmosphère martienne (en bleu sur la *Figure 9*) seront faites dans les deux directions : d'une part au *Nadir* (flèche rouge), d'autre part au *Limbe* (flèche bleue), et aussi par occultation stellaire. Les spectromètres extrêmement sensibles utilisés seront capables de détecter des concentrations de quelques parties par milliard (ppb), ou même peut-être quelques dizaines de parties par trilliard (ppt).

Il y a actuellement au moins quatre autres satellites déjà en fonction autour de Mars.

Mars Express, avec l'instrument *Omega* (*Figure 10B*), est fabriqué à l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) en France. Cet instrument pèse environ 30 kg, consomme peu d'énergie (une trentaine



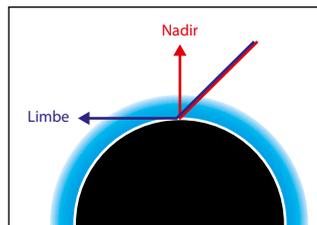
Figure 8

Satellite TGO emportant les instruments NOMAD et ACS vers Mars pour analyser son atmosphère.

Source : ESA.

Figure 9

Directions d'observation de l'atmosphère martienne par les instruments embarqués du satellite TGO.

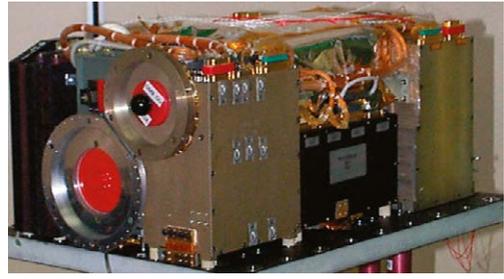
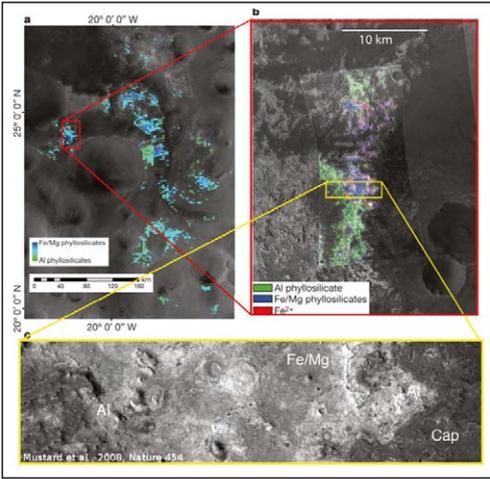


à une quarantaine de Watts en fonctionnement). Ce spectromètre-imageur travaillant dans le visible et l'infrarouge a étudié la surface de Mars. Quand on parle de la surface de Mars, on a exploré sur une épaisseur maximum d'un micron. Ce spectromètre-imageur est capable de produire des images successives dans 352 longueurs d'onde, les unes à côté des autres. Pour chaque pixel on peut obtenir ainsi un spectre. On a ainsi détecté des argiles (phyllosilicates) à la surface de Mars (Figure 10A). Les argiles de ce type se forment par altération des roches en présence

d'eau liquide pendant de longues durées. Enfin, beaucoup de chimistes estiment que les argiles pourraient jouer un rôle « catalytique » essentiel dans les premières réactions en chaîne menant au métabolisme. Ces événements primordiaux auraient pu se dérouler dans quelques endroits comme des sources hydrothermales ou des flaques d'eau avec un peu d'argile. Des liaisons faibles entre différentes molécules auraient favorisé à un moment donné leur polymérisation.

Mars est donc devenue un objet exobiologique. S'il y a eu de l'eau liquide durant quelques milliers, dizaines, centaines de milliers ou millions d'années, il est tout à fait possible qu'une forme de vie ou au moins une chimie intéressante, « prébiotique », ait pu commencer à s'y développer.

Le véhicule *Curiosity* (Figure 11), lancé par la



B

Figure 10

A) Images réalisées par Omega détectant des argiles (phyllosilicates) à la surface de Mars ;
 B) spectroscope-imageur Omega.

A

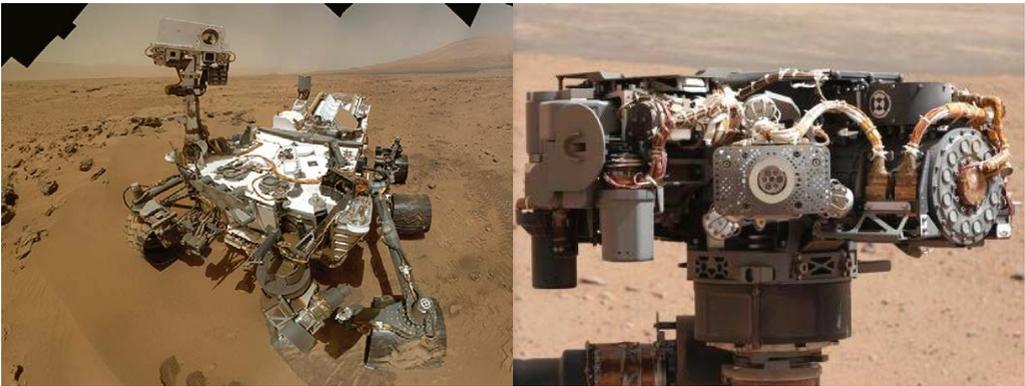


Figure 11

Le véhicule Curiosity est actuellement sur Mars pour analyser son environnement grâce à des instruments embarqués comme ChemCam et SAM.

NASA en 2012, est actuellement en opération à la surface de Mars. Il héberge deux instruments pour analyser l'environnement qui ont été fabriqués en coopération par la France et les États-Unis. L'un se dénomme *ChemCam*, et l'autre *SAM* (« *Sample Analysis at Mars* »).

ChemCam fonctionne selon le principe du LIBS (« *Laser Induced Breakdown Spectroscopy* »). Un laser

provoque un plasma⁹ par échauffement intense sur une surface. Lorsque les électrons retrouvent leur niveau électronique, ils émettent un rayonnement dans l'ultraviolet qui est caractéristique

9. Plasma : état de matière où les atomes et les molécules sont si chauds qu'ils deviennent ionisés en ions et électrons. Les électrons retrouvent leur niveau initial et émettent un rayonnement caractéristique de l'élément.

de chaque élément. On obtient des spectres comme celui de la **Figure 12**, dans lesquels on reconnaît un certain nombre d'éléments, à partir desquels des scientifiques sont capables de remonter à la composition du minéral de la surface.

On vient de fêter le 500 000^e tir du laser, donc 500 000 spectres ont déjà été obtenus. Ils sont étudiés notamment à Toulouse pour déterminer une des caractéristiques de la surface de Mars et raconter l'histoire minérale de la région explorée.

SAM est un système de chromatographie gazeuse¹⁰ couplé à

10. Chromatographie gazeuse : technique qui sépare des molécules d'un mélange éventuellement complexe. Cette technique s'applique principalement aux composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Une colonne contient une substance active solide ou liquide appelée phase stationnaire. L'échantillon est transporté à travers celle-ci à l'aide d'un gaz porteur (ou gaz vecteur), qui est la phase mobile. Les composés sont séparés en fonction de leur encombrement stérique ou de leurs propriétés électriques.

un spectromètre de masse¹¹ (GC-MS, **Figure 13**). L'instrument pèse environ 40 kg, mesure 80x40x40 cm. C'est un instrument massif pour des missions d'exploration et délicat à utiliser sur Mars.

Cet instrument a détecté de la matière organique sur Mars. (**Figure 14**). On a déjà pu identifier quelques molécules comme le chlorométhane, le dichlorométhane, le trichlorométhane et le chlorobenzène.

Sur la mission ExoMars 2020 de l'Agence spatiale Européenne, un nouvel instrument, *MOMA* (« *Mars Organic Matter Analysis* ») élargira la gamme de molécules identifiables (**Figure 15**). Cet instrument nouveau est fabriqué en partenariat entre l'Allemagne (les parties rouges), les États-Unis (les parties bleues) et la France

11. Spectrométrie de masse : technique d'analyse détectant et identifiant des molécules d'intérêt par mesure de leur masse, et caractérisant leur structure chimique. Son principe réside dans la séparation en phase gazeuse de molécules chargées (ions) en fonction de leur rapport masse/charge (m/z).

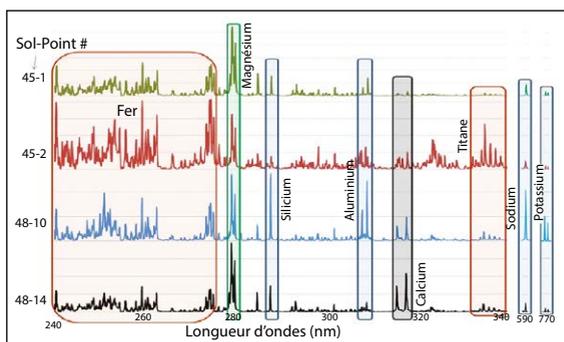


Figure 12

Les spectres d'absorption réalisés grâce à l'instrument ChemCam permettent de connaître des compositions minérales de la surface de Mars.



Figure 13

L'instrument SAM pour analyser les composés organiques sur Mars par spectrométrie de masse couplée à la chromatographie en phase gazeuse (GC-MC).

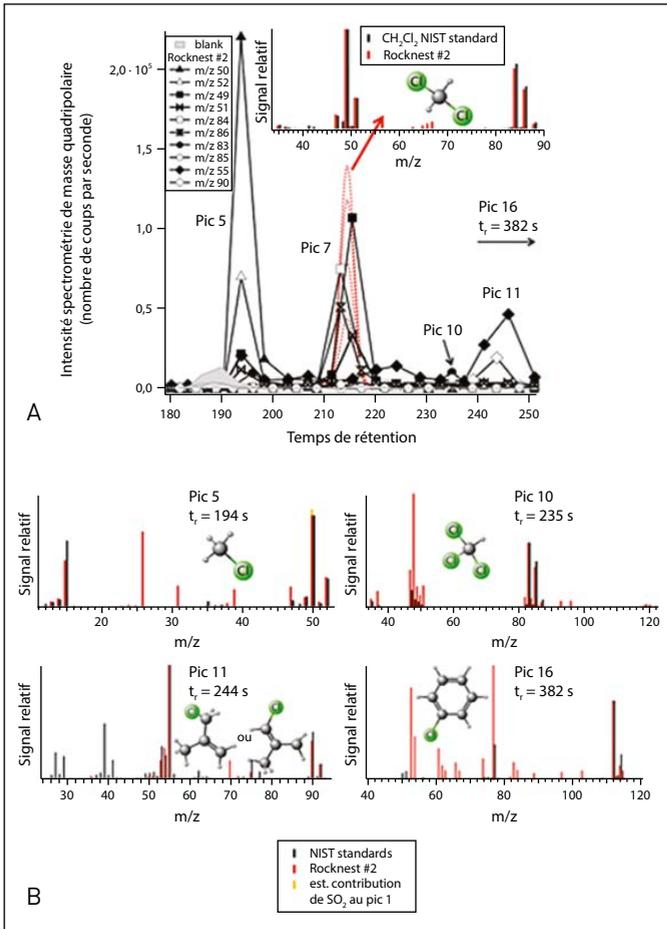


Figure 14

Les chromatogrammes et spectres de masse d'échantillons réalisés par SAM ont identifié sur Mars différentes molécules organiques.

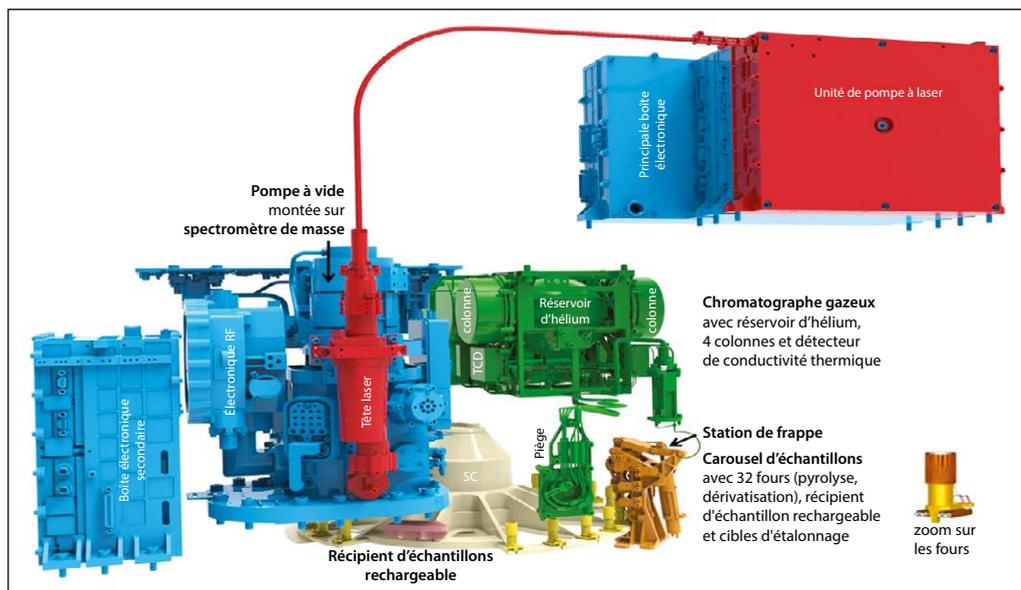


Figure 15

L'instrument MOMA permet d'identifier par GC-MS une plus grande gamme de molécules que SAM avec une résolution améliorée.

(les parties vertes). On utilise à la fois la chromatographie gazeuse, le laser pour faire du LIBS sur les échantillons, et le spectromètre de masse pour identifier davantage de molécules et avec une meilleure résolution, que ce qui se fait avec SAM.

MOMA est actuellement en construction et sera lancé sur le véhicule de la mission ExMars 2020 (Figure 16) pour

donner des résultats en 2021 et 2022.

Encelade, Europe, Titan sont des satellites des planètes géantes de notre Système Solaire qui ont déjà été visités, mais actuellement les missions exobiologiques à destination de ces corps sont encore au niveau de la discussion de l'élaboration de concepts audacieux. En jargon spatial, nous appelons cela la phase 0.

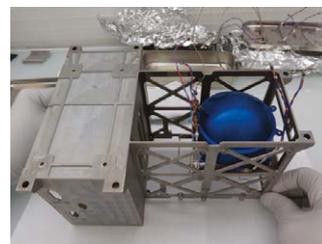
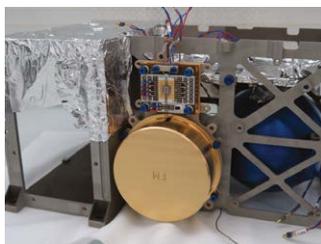
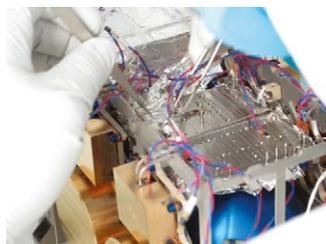


Figure 16

Instrumentation de l'appareil MOMA qui sera lancé en 2020.

4 L'exploration de planètes extrasolaires

Il y a actuellement 3 703 planètes connues et certifiées hors du Système Solaire. Elles sont certifiées pour l'instant car de temps en temps il y en a qui sont déclarées ne pas être des planètes (erreurs de mesure, fausses détections...). Sont identifiés 2 773 systèmes planétaires et 621 systèmes multi-planétaires. Pour les systèmes qui ne sont pas reconnus comme multi-planétaires, cela ne veut pas forcément dire qu'ils ne le sont pas, mais que pour l'instant on n'a pas mis en évidence d'autres planètes que la plus massive orbitant souvent à très faible distance de l'étoile.

4.1. Détection des planètes extrasolaires par la méthode des vitesses radiales

C'est par l'observation par la méthode des vitesses radiales que l'astrophysicien *Michel Mayor* et l'astronome *Didier Queloz* ont détecté la première planète extrasolaire (**Figure 17**). Sur la **Figure 18**, on voit une étoile et sa planète.

Avec un télescope, seule l'étoile est visible et la lumière qu'elle émet peut être analysée par spectroscopie. En langage commun, on dit que les planètes tournent autour des étoiles. En fait la planète et l'étoile tournent autour de leur barycentre. De ce fait, si la planète est massive, l'étoile s'éloigne et se rapproche de nous créant un effet Doppler¹². L'analyse du spectre de l'étoile montre que les raies d'absorption liées aux éléments qui la composent oscillent autour de la longueur d'onde caractéristique de ces différents éléments. Ayant calculé la période orbitale à partir de la mesure de ces déplacements, avec des modélisations, les astronomes sont capables de remonter à la vitesse à laquelle se déplace l'étoile et, connaissant sa masse, en déduire la masse de sa planète.

12. Effet Doppler : décalage de fréquence d'une onde (mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature) observé entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

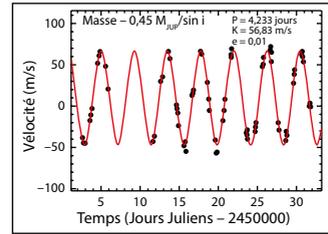


Figure 17

Les vitesses des planètes extrasolaires peuvent être mesurées expérimentalement.

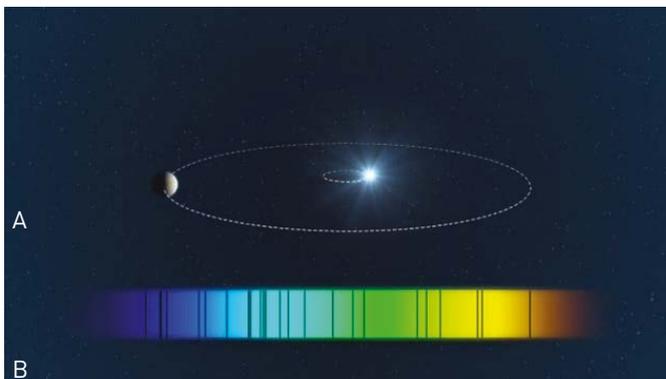


Figure 18

Méthode des vitesses radiales.
A) Rotation d'une planète et de son étoile autour de leur barycentre ;
B) spectre d'absorption de l'étoile : capture d'écran du film montrant le déplacement des raies d'absorption (effet doppler) dû au mouvement de l'étoile.

4.2. La découverte de nouvelles planètes par la méthode des transits

La seconde méthode, celle qui a détecté maintenant le plus grand nombre de planètes depuis le lancement par les américains du satellite *Kepler*, est la *méthode des transits*. Cette technique repose sur le fait que lorsqu'une planète passe devant son étoile, elle diminue la lumière transmise

par l'étoile. C'est le phénomène de l'ombre chinoise.

La **Figure 19A** montre le premier satellite dédié à ce type de mesure, *CoRoT*. Ce satellite du CNES a été lancé en 2006 et a fonctionné pendant six ans. La **Figure 19B** montre le schéma de principe de la méthode et la **Figure 19C** un résultat expérimental obtenu avec le satellite *Spitzer* de la NASA.

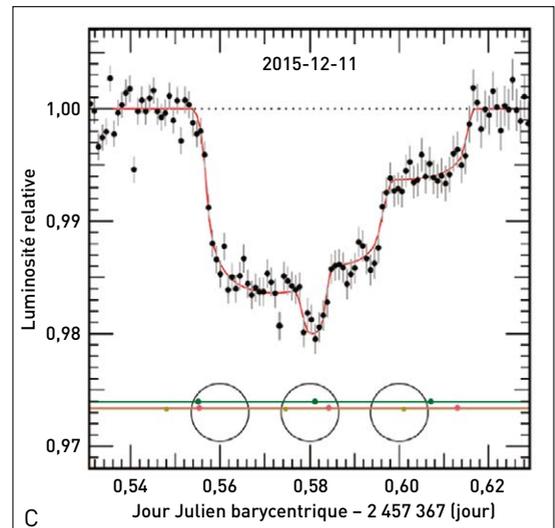
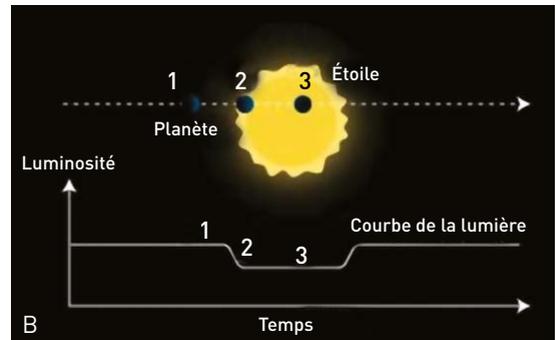


Figure 19

A) Le satellite *CoRoT* est le premier qui a mesuré la diminution de la lumière transmise lorsqu'une planète passe devant son étoile ; B) principe de la méthode des transits ; C) résultat expérimental.

Les observations sont aussi possibles à partir d'observatoires au sol. La complémentarité des données recueillies dans l'espace et au sol est illustrée par la découverte et la compréhension du système *Trappist-1* (voir le **Chapitre de M. Guélin** dans cet ouvrage *Chimie, aéronautique et espace*, EDP Sciences, 2018) (**Figure 20**).

Sur l'exemple de la **Figure 19C**, trois planètes gravitent autour de l'étoile, le passage simultané de deux d'entre elles (les planètes 2 et 3) entraîne une chute importante de l'intensité. La troisième (la planète 1) débute son transit quand l'une des deux premières achève le sien (planète 3), etc. L'analyse des baisses d'intensité (**Figure 19B**) fournit le rayon de ces planètes ainsi que leur période orbitale (**Figure 21B**). Les fluctuations au cours du temps des périodes orbitales liées aux interactions

gravitationnelles entre les planètes donnent une indication de leurs masses respectives (**Figure 21A**), avec, cependant, des incertitudes très importantes.

Le programme belge d'observation *Trappist* est constitué d'un réseau de deux télescopes robotisés de 60 cm mis en place par l'Université de Liège au Chili et au Maroc. *Spitzer*, un satellite de la NASA qui était en fin de vie pour son objectif premier, a été reprogrammé à partir du sol pour détecter des exoplanètes par Transit. Ce satellite a pu faire des observations complémentaires du système planétaire découvert par le réseau Trappist avec une précision qui ne peut être atteinte au sol. C'est ainsi qu'ont été décrites en détail les « 7 merveilles », les sept planètes qui orbitent autour de l'étoile dénommée maintenant *Trappist 1* (**Figure 20B**).

Planète	Masse (M_{Jup})	Rayon (R_{Jup})	Période (jour)	a (Unité astronomique)	e	i (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Découverte	Mise à jour
TRAPPIST-1 h	–	0,0674	20	0,063	–	89,8	–	2017	2017-09-01
TRAPPIST-1 g	0,00422	0,1005	12,35294	0,0451	0	89,71	–	2017	2017-09-01
TRAPPIST-1 f	0,0021	0,09323	9,20669	0,0371	0	89,68	–	2017	2017-09-01
TRAPPIST-1 e	0,002	0,0819	6,099615	0,02817	0	89,86	–	2017	2017-09-01
TRAPPIST-1 d	0,0013	0,0689	4,04961	0,02144	0	89,75	–	2016	2017-09-01
TRAPPIST-1 c	0,00434	0,09421	2,4218233	0,01521	0	89,61	–	2016	2017-09-01
TRAPPIST-1 b	0,0027	0,09689	1,51087081	0,01111	0	89,75	–	2016	2017-09-01



Figure 20

Les planètes du système *Trappist 1* ont été découvertes à partir de la méthode des transits.

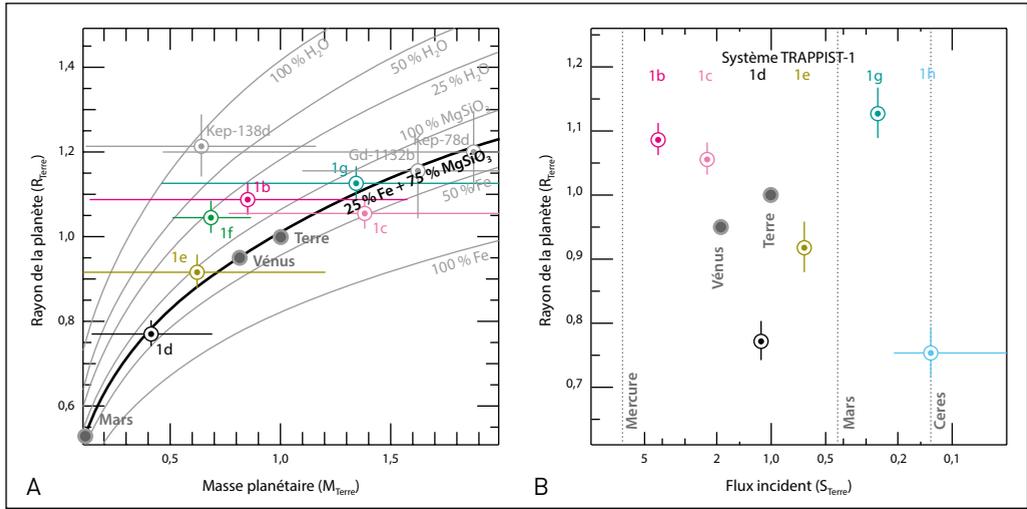


Figure 21

Les résultats expérimentaux de la méthode des transits pour le système *Trappist 1*.

Cette représentation (**Figure 20B**) est cependant totalement imaginaire. On aurait pu représenter les planètes par des boules blanches ou des boules noires. On ne connaît en fait que très peu de choses sur ces planètes. On ne connaît que grossièrement leur masse et leur diamètre. La seule chose connue de façon précise (avec cinq ou six décimales) est leur période orbitale, c'est-à-dire la durée de leur année, ou combien de temps elles mettent pour faire le tour de leur étoile. Ces périodes orbitales sont très brèves et le système très compact autour d'une étoile naine brune.

Si l'on veut observer plusieurs transits, pour des orbites de quelques heures à vingt jours, cela est facile, mais pour une orbite de vingt ans, il faut attendre quarante ans pour en voir deux et soixante ans pour en voir trois, donc on n'est pas encore tout à fait prêts à les observer.

Quoi qu'il en soit, avec les informations recueillies, les

astronomes arrivent à déduire la composition chimique très grossière des planètes observées. Pour simplifier, une planète c'est soit du fer, soit du silicate de magnésium, soit de l'eau. Avec la masse et le diamètre on déduit la densité moyenne de la planète et on évalue la composition avec des proportions de ces trois composés (**Figure 21A**).

Par opposition aux planètes géantes gazeuses, les planètes telluriques sont essentiellement composées de roches (silicates) et de métal (fer). La Terre est une planète tellurique sèche, alors que nous avons l'impression qu'il y a beaucoup d'eau. Elle se trouve essentiellement en surface. La quantité d'eau identifiable sur Terre ne représente que 0,06 % de sa masse, ce qui est vraiment infinitésimal et ne serait pas détectable par les méthodes que nous utilisons.

On s'aperçoit qu'il y a dans le système *Trappist 1* des planètes qui sont à peu près sur la

même courbe que la Terre sur le graphe des rayons planétaires en fonction de la masse (**Figure 21A**) : pour les planètes 1f, 1b, 1g, 1c, il y a d'énormes incertitudes sur leur masse. Certaines planètes (comme 1f et 1b) pourraient être des « planètes-océans », avec des pourcentages d'eau extrêmement importants : 25 % d'eau. C'est la première fois, avec *Trappist*, qu'on est capable d'établir, de façon aussi complète, ce genre de détection et de présenter ce genre de calculs fondés sur des modèles mathématiques. La réalité nous dira peut-être un jour où est la vérité, mais pour l'instant ce système est déjà très intéressant puisqu'il existerait, de façon assez évidente, des planètes-océans et peut-être des planètes « intermédiaires » qui seraient susceptibles d'héberger une forme de vie.

Revenons au schéma de la **Figure 20B** : la zone représentée en vert est ce qu'on appelle la zone d'habitabilité, c'est-à-dire, pour résumer, la zone autour d'une étoile où le rayonnement lumineux est suffisant pour assurer à la surface d'une planète semblable à la Terre la présence d'eau liquide à sa surface. On voit que le système *Trappist-1* possède trois planètes dans cette zone. La possibilité de la présence d'eau liquide ne garantit pas que ce soit le cas.

4.3. La détection d'une exo-forme de vie sur une planète extrasolaire

Beaucoup de caractéristiques doivent être réunies pour pouvoir détecter une exo-forme de vie sur une planète. La

seule chose observable d'une planète extrasolaire est la lumière filtrée par son atmosphère, soit par occultation soit par réflexion. Pour détecter une forme de vie sur une planète, il faut donc que la planète transite régulièrement devant son étoile. Si la planète tourne dans un plan perpendiculaire à l'axe de visée de l'observateur, elle ne sera jamais détectée.

Ainsi, pour être détectée par nos moyens actuels, il faut que la forme de vie se soit développée et ait modifié l'atmosphère de la planète. Par exemple, dans le cas de la Terre primitive, pendant deux milliards d'années, il y avait de la vie qui produisait du gaz carbonique déjà naturellement présent dans l'atmosphère. Ces premiers micro-organismes ne produisaient pas d'oxygène ou très peu. Notre Terre était donc déjà habitée mais cette forme de vie était absolument indétectable avec les moyens dont on dispose actuellement. Il faut donc, pour être détectée, que la modification apportée par la vie soit massive et univoque.

L'exemple du méthane est lui aussi typique de la prudence à garder dans les interprétations. Trouver du méthane avec un peu de vapeur d'eau n'est pas une preuve suffisante. En effet, il y a du méthane sur Titan, mais on est certain qu'il n'est pas d'origine biologique. Certes, du méthane a été détecté sur Mars mais ce résultat pose plus de questions qu'il n'apporte de réponses quant à l'existence d'une forme de vie martienne.

4.4. Les moyens d'exploration des exoplanètes

Les compositions atmosphériques de Mars, Vénus et la Terre ont été analysées par spectrométrie. Le spectre de Mars (en rouge) est caractéristique avec son CO_2 ; celui de Vénus est en jaune et celui de la Terre en bleu (**Figure 22**). On dispose d'instruments capables d'effectuer ce type d'analyse sur des objets éloignés jusqu'à 35 années-lumière environ. On a ainsi trouvé une vingtaine d'exoplanètes (planète extrasolaire) et il y en a peut-être une qui pourrait ressembler à la Terre.

La seule chose qui serait vraiment excitante serait de détecter de l'ozone, puisqu'on pense actuellement que si on trouve une production massive de dioxygène sur un corps céleste, il y aurait une forme

de vie développée qui y serait associée.

Il faut cependant rester prudent car il a été très récemment montré que sur les planètes gravitant autour de naines brunes, la décomposition du monoxyde de carbone provoquait sous l'effet des rayonnements un excès d'oxygène atmosphérique. Les spectres de la **Figure 22** montrent que le flux de photons¹³ reçu (en ordonnée), 100 à 1 000 photons, est faible et il faut intégrer longtemps pour obtenir un spectre. La **Figure 22** rassemble des spectres synthétiques, idéaux. Ce n'est pas ce que l'on peut obtenir en réalité. Il faut donc travailler sérieusement à l'amélioration du traitement de données et de la sensibilité des instruments.

Plusieurs satellites seront utilisés pour détecter, étudier et éventuellement analyser la lumière provenant des exoplanètes. *Cheops* mesurera précisément le diamètre des planètes qui transitent. Le lancement par l'ESA est prévu en 2019. Le *James Webb Space Telescope* (JWST) sera lancé en 2021 par une fusée Ariane 5 (**Figure 23**). TESS est un satellite de la NASA qui sera lancé en 2018 pour détecter des exoplanètes de type terrestre.

PLATO est une mission de l'ESA pour détecter de

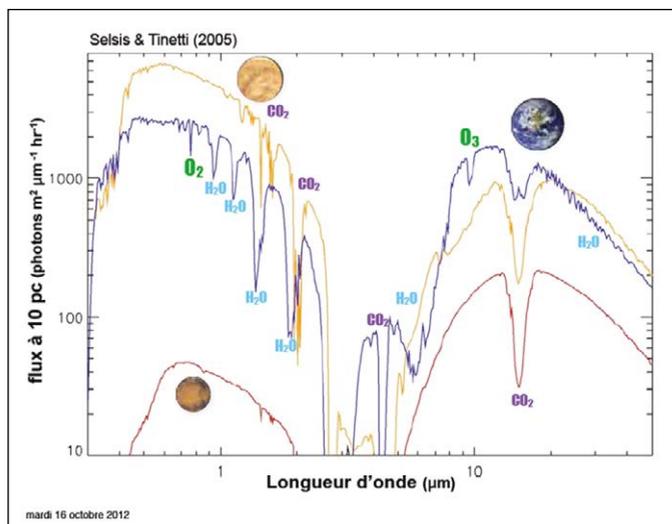


Figure 22

Identification par spectrométrie des compositions atmosphériques de Mars, de Vénus et de la Terre.

13. Photon : quantum d'énergie associé aux ondes électromagnétiques (allant des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible), qui présente certaines caractéristiques de particule élémentaire. Le photon n'a pas de charge électrique et une masse nulle.

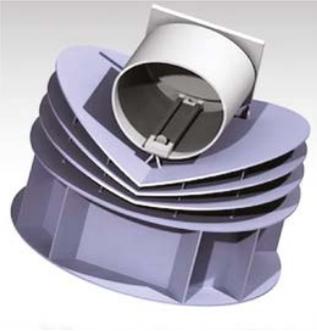
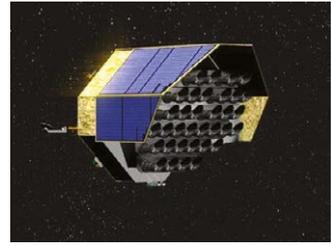
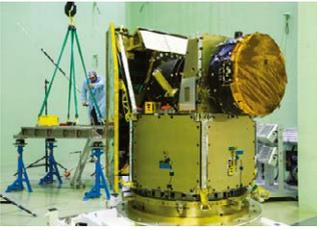


Figure 23

Différents satellites vont être lancés dans les prochaines années pour détecter des exoplanètes.

nouvelles exoplanètes. Elle doit être lancée en 2026. **ARIEL** déterminera la composition chimique des planètes gazeuses et devrait être lancé dans les années 2026-2028. La radioastronomie (voir le **Chapitre de M. Guélin**) a montré aussi la grande richesse moléculaire du milieu interstellaire (**Figure 24**). Toutes ces molécules formées dans le milieu interstellaire et interplanétaire finissent par arriver quelque

part, et notamment sur les corps célestes.

On étudie au laboratoire la synthèse de ces molécules dans les grains et dans les glaces interstellaires. Dans ces expériences, on irradie soit avec une lampe dite solaire, soit au synchrotron¹⁴,

14. Synchrotron : instrument pulsé permettant l'accélération à haute énergie de particules stables chargées.

2 atomes		3 atomes		4 atomes		5 atomes		6 atomes		7 atomes		8 atomes		9 atomes		10 à 13 atomes	
H ₂	H ₂ O	NH ₃	CH ₄	CH ₃ OH	CH ₂ CHOH	H ₂ C ₂	(CH ₂) ₂ O	(CH ₂) ₂ CO									
CO	H ₂ S	H ₂ CO	SiH ₄	CH ₃ SH	c-C ₂ H ₂ O	HCOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ CN	HOCH ₂ CH ₂ OH									
CSi	HCN	H ₂ C ₂ S	CH ₂ NH ₂	C ₂ H ₄	HCOCH ₃	CH ₂ OHCHO	CH ₃ CH ₂ OH	CH ₂ CH ₂ CHO									
CP	HNC	C ₂ H ₂	NH ₂ CN	H ₂ C ₂	CH ₂ CCCH	CH ₂ C ₂ N	CH ₂ C ₂ H	CH ₂ C ₂ N									
CS	CO ₂	HNCO	CH ₂ CO	CH ₂ CN	CH ₂ CH ₂	CH ₂ COOH	HC ₂ N	HC ₂ N									
NO	NO ₂	HNC ₂	HCOOH	CH ₃ NC	CH ₂ CHCN	CH ₂ CHCHO	C ₂ H	CH ₂ C ₂ H									
NS	MgCN	H ₂ O ⁺	HC ₂ N	NH ₂ CHO	HC ₂ N	CH ₂ CCCHN	C ₂ H	C ₂ H ₂ OCCHO									
SO	MgNC	SiC ₂	HC ₂ NC	HC ₂ CHO	C ₂ H ⁺	CH ₂ C ₂ OH	CH ₂ C ₂ OH	CH ₂ C ₂ OH									
HCl	NaCN	C ₂ S	c-C ₂ H ₂	HC ₂ NH ⁺	C ₂ H ⁺	NH ₂ CH ₂ CN	CH ₂ CH ₂	C ₂ H ₂ CN									
NaCl	N ₂ O	H ₂ CN	I-C ₂ H ₂	HC ₂ N													
KCl	NH ₂	c-C ₂ H	CH ₂ CN	C ₂ N													
AlCl	OCN	I-C ₂ H	H ₂ COH ⁺	C ₂ H													
AlF	CH ₂	HCN	C ₂ Si	H ₂ C ₂													
PN	HCO	CH ₂	C ₂	C ₂ N ⁺													
SiN	C ₂	C ₂ CN	HNC ₂	c-H ₂ C ₂ O													
SiO	C ₂ H	C ₂ O	C ₂ H														
SiS	C ₂ O	HCNH ⁺	C ₂ H ⁺														
NH	C ₂ S	HOCO ⁺	CNCHO														
OH	AiNC	C ₂ N ⁺															

Figure 24

Tableau d'identification de molécules dans le milieu interstellaire.

les glaces de monoxyde de carbone, d'eau et d'ammoniac. On obtient une multitude d'acides aminés¹⁵ ainsi que de nombreux autres composés organiques.

Par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS et MS, **Figure 25**), on a identifié jusqu'à vingt aminoacides, six di-aminoacides plus dix espèces non caractérisées. Les acides aminés du monde vivant sont α -aminés, mais dans cette expérience il y en a aussi qui sont des β ou δ aminés.

Des travaux très récents dont l'un des auteurs, *Louis d'Hendecourt*, est un peu le père de ces expériences, ont montré qu'un rayonnement UV polarisé pouvait favoriser la formation de la forme chirale « gauche » des acides

15. Acides aminés ou aminoacides : éléments de base constituant les protéines. Ce sont des acides organiques contenant au moins un radical amine (NH_2) et un radical carboxyle (CO_2H).

aminés. Cette chiralité est caractéristique du vivant sur Terre.

Il se forme aussi un nombre important d'aldéhydes (**Figure 26**) et notamment du glycéraldéhyde, toutes molécules que l'on retrouve dans le monde vivant.

D'autres scientifiques, notamment à Strasbourg (avec *Joseph Moran*), font fonctionner le cycle de Krebs¹⁶ à l'envers. Mais au lieu d'utiliser des enzymes pour assurer cette synthèse cyclique, ils utilisent des complexes métalliques $\text{Fe}(0)$, Fe^{2+} , Mn^{2+} et Cr^{3+} (**Figure 27**). Cette synthèse à l'envers pourrait être une voie de synthèse ayant contribué à l'émergence de la vie à un moment ou à un autre.

16. Cycle de Krebs : ensemble de réactions chimiques au sein de la cellule qui a pour but de fabriquer de l'énergie à partir des glucides et accessoirement à partir des lipides et des protides. Le cycle de Krebs est appelé aussi cycle de l'acide citrique ou métabolisme intermédiaire.

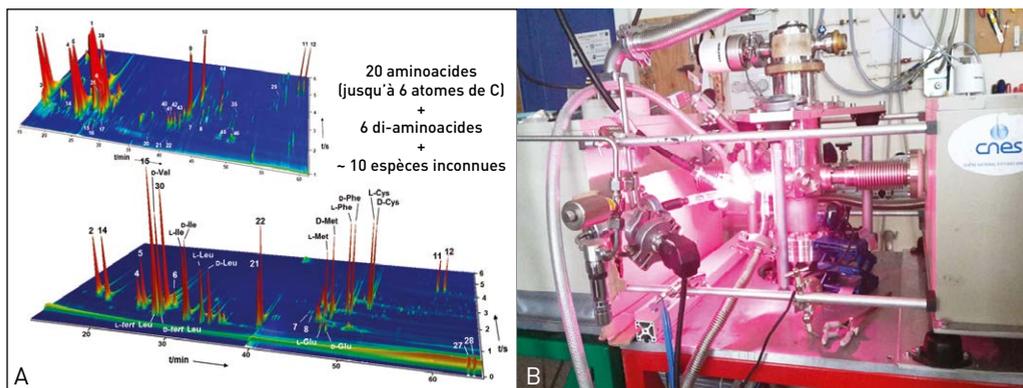


Figure 25

A) Instrumentation utilisée pour irradier et analyser les composants de glaces au CO et NH_3 ; B) spectre GC-MS en 2D permettant d'identifier de nombreuses molécules.

#C ^a	Compound	R ₁ ^b [min]	R ₂ ^c [sec]	MS fragmentation/ ¹³ C sample		MS fragmentation/ ¹³ C standard	
				[M ⁺⁺]	Other important ions, m/z	[M ⁺⁺]	Other important ions, m/z
1	Formaldehyde	17.08	1.80	226 ^d	196, 181	225	195, 181
2	(Z)-Acetaldehyde	20.35	1.94	241 ^d	211, 181	239	209, 181
	(E)-Acetaldehyde	21.20	1.92	241 ^d	211, 181	239	209, 181
	(Z)-Glycolaldehyde	41.81	2.24	329 ^e	314, 181, 132, 104, 73	327	312, 181, 130, 103, 73
	(E)-Glycolaldehyde	42.14	2.32	329 ^e	314, 181, 132, 104, 73	327	312, 181, 130, 103, 73
	(Z)-Glyoxal	72.12	5.21	450 ^f	420, 255, 253, 237, 181	448	418, 253, 251, 235, 181
	(E)-Glyoxal	74.54	5.14	450 ^f	420, 255, 253, 237, 181	448	418, 253, 251, 235, 181
3	(Z)-Propanal	25.49	1.94	256 ^d	239, 226, 239, 181	253	236, 223, 181
	(E)-Propanal	25.99	1.94	256 ^d	239, 226, 181	253	236, 223, 181
	(E,Z)-Propenal	25.98	2.20	254 ^d	237, 224, 181	251	234, 221, 181
	(E,Z)-Propenal	26.66	2.33	254 ^d	237, 224, 181	251	234, 221, 181
	(Z) Lactaldehyde	46.39	2.54	344 ^e	329, 181, 73		
	(E) Lactaldehyde	46.81	2.54	344 ^e	329, 181, 73		
	(Z) Glyceraldehyde	51.47	2.55	431 ^g	417, 328, 251, 220, 181, 147, 104, 73	429	414, 326, 248, 218, 181, 147, 103, 73
	(E) Glyceraldehyde	52.89	2.44	431 ^g	417, 328, 251, 220, 181, 147, 104, 73	429	414, 326, 248, 218, 181, 147, 103, 73
	(Z)-Methylglyoxal	71.12	3.84	465 ^f	435, 284, 268, 181	463	432, 281, 265, 181
	(E)-Methylglyoxal	74.54	4.14	465 ^f	435, 284, 268, 181	462	432, 281, 265, 181
4	(Z) Butyraldehyde	31.65	1.99	271 ^d	241 ^h , 181	267	239 ⁱ , 181
	(E) Butyraldehyde	31.74	2.04	271 ^d	241 ^h , 181	267	239 ⁱ , 181

Figure 26

Tableau listant les aldéhydes identifiés sur des corps célestes.

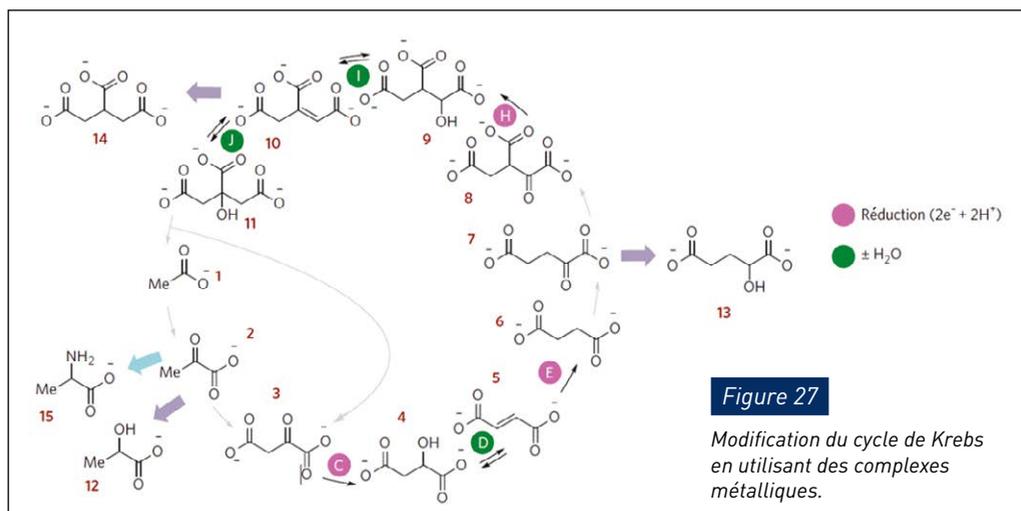


Figure 27

Modification du cycle de Krebs en utilisant des complexes métalliques.

Le futur de la recherche d'une forme de vie extraterrestre

En conclusion, depuis l'expérience fondatrice de *Stanley Miller*, l'exobiologie et la recherche de la vie sur Terre ont une base chimique solide. La recherche de formes de vie extraterrestres se fonde sur la recherche de biomarqueurs

chimiques et de biosignatures, qui sont parfois plus parlantes même si elles sont moins faciles à décrire.

La chimie du milieu interstellaire et des corps célestes nous montre des synthèses originelles à grande échelle, mais il ne faut pas oublier les synthèses qui sont possibles *in situ*, sur place, aussi bien dans l'atmosphère que dans des sites hydrothermaux par exemple.

Mars est actuellement la cible raisonnablement idéale pour rechercher des traces de l'émergence d'une forme de vie ailleurs que sur Terre. D'autres cibles plus lointaines sont intéressantes pour détecter des formes de chimie prébiotique. Des missions spatiales dédiées se décideront dans la prochaine décennie et se feront dans les vingt à trente prochaines années.

Enfin, les exoplanètes, elles sont des milliards dans notre galaxie, font rêver tout le monde. Leur nombre nous autorise à penser qu'effectivement il peut y avoir des formes de vie ailleurs. Avec 200 milliards d'étoiles, même si on admet qu'il n'y a qu'une planète par étoile, cela fait déjà 200 milliards de planètes, et en admettant qu'il n'y en ait que 1 % d'habitables, cela fait quand même 2 milliards de possibilités ; c'est absolument gigantesque.

On ne les observera pas toutes et on ne saura pas les observer toutes car elles ne seront pas toutes observables pour de multiples raisons, mais en tous cas, elles sont, avec Mars, des cibles existantes pour l'exobiologie.