

Vie sur une exoplanète : quelle vie, et à quelle condition ?

Les exoplanètes n'en finissent plus de se dévoiler... Nous sommes encore un peu loin d'une imagerie systématique, mais les informations obtenues (tailles, masses, paramètres orbitaux) se font de plus en plus précises.

A tel point que nombre de publications professionnelles visent à comprendre lesquelles de ces planètes abriteraient, ou pourraient habiter, une vie éventuelle. De même qu'on s'interroge sur une possible survie humaine sur leur sol, si nous venions à vouloir coloniser un de ces mondes lointains.

En supposant qu'une vie quelconque puisse exister sur ces planètes, à quelle conditions cette vie serait-elle possible ? Toutes les planètes sont-elles colonisables par une vie humaine ? Si on décidait d'y envoyer des colons, serait-il possible d'avoir une idée de la forme que pourrait avoir la faune et la flore locale ? Voyageons en pays d'exobiologie.

Pour commencer, il faut un peu préciser à quels types de planètes nous allons nous limiter. Pour faire simple, à celles qui ressemblent le plus à la nôtre. Ces fameuses « jumelles » de la Terre. Les anglosaxons parlent de « Earth-like planets ». Notons que le terme anglais est bien plus proche de la réalité que le nôtre.

En effet, les planètes de type terrestre détectées et qui font le bonheur d'articles agrémentés de vues d'artiste saisissantes sur la toile, ne sont pas identiques à la Terre. Rien à voir avec la similarité que le mot « jumelles » laisse supposer.

Elles sont définies essentiellement par une masse qui, sans être rigoureusement égale à celle de la Terre, n'en diffère pas trop du point de vue du physicien, c'est à dire seulement par un facteur deux au maximum (voir encadré). Oui, une masse qui ne « diffère pas trop » pour un physicien, cela veut souvent dire qu'on reste dans le même ordre de grandeur, pas plus.

Toutefois, ce critère de masse n'est pas suffisant pour espérer trouver une vie (ou en installer une !) sur la planète considérée. Il faut encore que...

- la taille de la planète soit similaire à celle de la Terre : de cette façon, sa densité se rapproche de celle que nous connaissons, ce qui permet de penser qu'on a affaire à une planète rocheuse « commune »
- la planète soit dans la zone habitable du système dans lequel elle gravite, c'est à dire à une distance de son astre correspondant à des températures permettant à de l'eau liquide d'être présente en surface (voir encadré).
- Qu'elle possède une atmosphère, et pas trop ténue, parce que c'est bien plus pratique pour éviter le bombardement d'UV et de rayons cosmiques... Et pour respirer !
- sa rotation soit libre (voir encadré), pour une alternance de jours et de nuits.
- qu'elle orbite autour d'une étoile qui donne suffisamment de lumière, dans les « bonnes » gammes de fréquence.

Et même en listant tous ces critères, on peut se retrouver avec une planète inhospitalière, en tout cas pour les humains. Ce qui n'exclut évidemment pas une vie, mais peut-être très différente de la nôtre.



Quelques « jumelles » de la Terre découvertes par le télescope spatial Kepler (vues d'artistes, NASA).

Le problème est donc corsé- et par conséquent intéressant. Il y a quelques candidates viables, comprenez quelques planètes découvertes qui semblent réunir toutes les qualités requises.

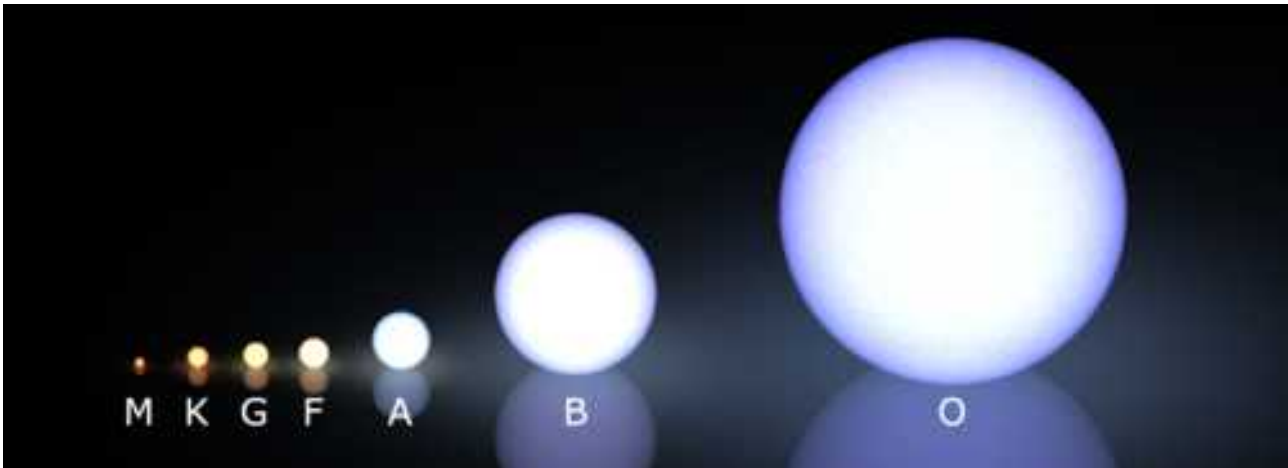
Nous allons d'abord nous arrêter sur quelques aspects délicats de ces critères et des découvertes faites sur ces planètes.

Le type d'étoile

Notre soleil est une étoile de type G (voir diagramme). Il est de masse moyenne. Mais plus lourd que la plupart des étoiles de la galaxie. Il rayonne essentiellement dans le jaune pour ce qui est de la lumière visible. Il nous donne des UV (dont une bonne partie, fort heureusement, est bloquée par l'atmosphère, nous y reviendrons), des infrarouges (de la chaleur) et donc comble les besoins des espèces vivantes terrestres.

Il est environ à la moitié de sa vie d'étoile ce qui lui donne encore un peu plus de 4 milliards d'années environ.

Lorsqu'il aura épuisé son hydrogène (qu'il transforme en éléments plus lourds, en produisant ainsi de l'énergie), le Soleil va éjecter la partie superficielle de sa structure, ce qui détruira très efficacement les planètes les plus proches-dont la Terre, puis le cœur de notre étoile s'effondrera pour devenir une étoile naine, petite loupote timide au regard de ce qu'il est aujourd'hui.



Différents types spectraux stellaires (classification de Morgan-Keenan). Le Soleil est une étoile G, mais la plupart des étoiles sont des naines M.

Il faut savoir que la plupart des étoiles ne sont pas du tout comme notre soleil. En réalité, 80% des étoiles de notre galaxie sont bien moins massives. Il s'agit des « naines M », des étoiles dont la température de surface n'excède pas 4000K (alors que le soleil est à 6500K) et qui sont rouges. Il faut donc se demander s'il serait possible pour une planète orbitant autour d'une étoile M d'abriter la vie. Bien qu'il puisse nous paraître étrange de penser à un paysage comprenant un Soleil rouge, les scientifiques s'accordent à dire que les planètes en orbite autour de telles étoiles pourraient être accueillantes. Pendant un temps, on a pensé que la « zone habitable » autour de ces étoiles était trop proche de l'étoile. On pensait donc que les forces de marées imposeraient une rotation synchrone à la planète (voir encadré) et la rendrait invivable. De récents travaux ont montré que rien n'est moins sûr.

Et les systèmes multiples ?

Plus de la moitié des étoiles de la galaxie sont incluses dans des systèmes multiples, c'est à dire des systèmes dans lesquels plusieurs étoiles gravitent ensemble, avec éventuellement des planètes tournant autour. Là encore, notre Soleil n'est pas du tout représentatif.

Les planètes de ces systèmes pourraient-elles être accueillantes ?

Les premiers papiers sur ces planètes suggéraient que leurs orbites avaient toutes les chances d'être erratiques, perturbées par les effets gravitationnels de plusieurs astres différents. En fait, la planète se retrouverait détruite ou expulsée du système assez rapidement.

Toutefois, il semble qu'il y a une configuration orbitale dans laquelle une planète pourrait évoluer de façon stable, et donc permettre l'évolution d'une vie complexe. On appelle cela une « configuration de type S ». Il s'agit d'avoir un système de deux étoiles (c'est ce qui est le plus répandu, les systèmes de multiplicité supérieure sont beaucoup plus rares), et que la planète orbite autour de l'une des deux seulement.

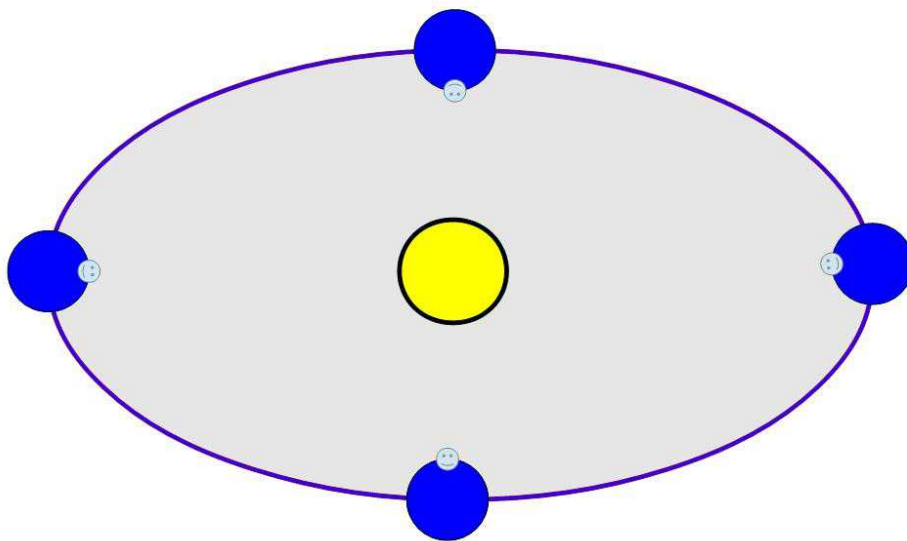
Il semble que 50 à 60% des étoiles doubles de la galaxie pourraient ainsi abriter des planètes ayant une atmosphère, un climat stable et donc des conditions propices à la vie.

Des scientifiques sont allés jusqu'à simuler le flux de lumière sur certaines candidates pour évaluer les chances d'avoir une photosynthèse. En prenant deux exemples de « super-Terres », donc des planètes beaucoup plus massives que la nôtre, ils concluent qu'une planète d'un système multiple pourrait très bien recevoir un flux de lumière suffisant pour abriter la vie. Toutefois, la lumière reçue dépendrait de rythmes très

complexes liés aux paramètres orbitaux de la planète (inclinaison de l'axe de rotation par rapport à l'orbite, distances entre les composants du système). De ce fait, il nous faudra attendre d'avoir des données plus précises sur les mondes découverts pour ajuster ces prédictions. En tous les cas, un Soleil double n'est pas un obstacle !

La rotation de la planète sur elle-même

Si une planète se retrouve trop près de l'étoile autour de laquelle elle gravite, cela a un effet désastreux sur sa rotation sur elle-même. En effet, la planète subit alors une telle attraction gravitationnelle que cela freine sa rotation. Au point de tourner tellement lentement, qu'elle met presque le même temps à tourner sur elle-même (période de rotation) qu'autour de son étoile (période de révolution). Or, si la période de rotation est proche de la période de révolution, la planète se retrouve à présenter toujours la même face à son étoile. On parle alors de rotation synchrone. Si une planète se retrouve dans cette configuration, elle aura une face éclairée en permanence, où la température sera excessive pour la vie, vaporisant pas exemple l'eau liquide, et une face dans un noir perpétuel, sur laquelle il règnera un froid polaire. Certains calculs montre que cela pourrait geler une éventuelle atmosphère, qui se retrouverait « happée » par la face froide et donc, condamnerait toute possibilité de vie.



Rotation synchrone - Sur ce schéma représentant 4 moments de la révolution d'une planète autour de son étoile, on peut se rendre compte du blocage qu'entraîne une rotation synchrone. Il suffit de prendre un point de l'orbite, d'effectuer une translation de la planète sur un quart de cette orbite puis de la tourner sur elle-même, d'un quart de tour, pour avoir une nouvelle position. On constate que le repère est toujours face au Soleil. C'est donc bien toujours la même moitié de planète qui est éclairée, alors que l'autre moitié reste dans le noir.

Le cas existe dans le Système Solaire : Mercure, la plus proche planète du soleil, effectue sa rotation en 58 jours et sa révolution autour de l'astre en 88 jours. Mercure est particulièrement inhospitalière. Elle a d'ailleurs probablement subi bien d'autres traumatismes, sa densité suggérant qu'elle est peut-être le noyau d'une planète initialement plus massive, et dont une partie aurait été arrachée...

Pire, Vénus, elle, tourne sur elle-même en 225 jours et autour du soleil en 243. Un cas typique de rotation synchrone donc... Pas tout à fait. Notre voisine a un atout dans sa manche : une atmosphère très massive et surchauffée. Bien plus épaisse que celle de la Terre (et tout à fait irrespirable, saturée comme elle l'est de dioxyde de carbone), et cent fois plus lourde que l'atmosphère de notre planète, elle pourrait être à l'origine de la rotation rétrograde de la planète. En effet, Vénus tourne sur elle-même dans un sens qui est contraire à celui dans lequel elle parcourt son orbite autour du Soleil. On a longtemps pensé que ce type de rotation (rare) était dû à une collision avec un astre lors de la formation de la planète. Ce n'est plus l'explication privilégiée. Des travaux récents montrent que l'existence d'effets de « marées thermiques » dus à la présence de cette atmosphère pourraient suffire à aboutir à cette rotation rétrograde.

L'atmosphère de Vénus présente d'ailleurs un mouvement propre, une rotation en 4 jours terrestres.

Pour l'instant, on ne sait pas avec certitude comment le changement de rotation s'est fait : a-t-il été progressif avec un ralentissement puis une inversion, ou bien brutal ?

Mais de telles hypothèses ont été une aubaine pour les réflexions autour des exoplanètes. Partant de ces travaux, des chercheurs se sont aperçus que le même phénomène pourrait se produire pour des planètes orbitant autour d'étoiles plus petites que le Soleil (des étoiles de type spectral M, pesant entre 0,1 et 0,5 masse solaire). Autour de ces étoiles, on pourrait avoir des planètes très proches de leur étoile, et ayant pourtant une *rotation libre* (c'est le terme utilisé lorsque l'influence gravitationnelle de l'étoile ne provoque pas de ralentissement de rotation). Il suffirait qu'elles possèdent une atmosphère, même beaucoup plus ténue que celle de Vénus. Ces étoiles, qu'on avait tendance à exclure des cas intéressants, pourraient donc être bien plus prometteuses que prévues en terme d'habitabilité de leur système planétaire.

En étant proches de leur planète, elles reçoivent assez de lumière pour pouvoir abriter la vie. Sans le problème de la rotation synchrone, le climat peut être stable, et la vie évoluer.

L'âge du système et de la planète

Le paramètre temporel n'est pas facile à appréhender lorsqu'on parle de durées géologiques, et pourtant, il est nécessaire de le garder à l'esprit. Prenons le Système Solaire. Il a connu bien des visages. On sait aujourd'hui que les planètes se sont probablement déplacées par rapport au Soleil au cours de la formation de tous ces corps. Jupiter était plus proche de notre étoile lorsqu'elle s'est formée qu'elle ne l'est aujourd'hui. De même, avant d'abriter la vie, notre planète a subi bien des changements... Et rappelons que l'essentiel des espèces vivantes ayant parcouru le sol de la Terre a disparu !

Il faut donc bien se dire que même si une planète a toutes les qualités pour abriter la vie, il sera tout à fait possible que son évolution soit encore longue. Les bombardements d'astéroïdes sont-ils finis ? La planète possède-t-elle une activité interne, est-elle suffisante pour maintenir une planète vivante, mais suffisamment faible pour éviter que tous ces habitants meurent par des éruptions volcaniques massives ?

Certains des systèmes qui sont prometteurs sont bien jeunes, et peut-être la vie n'a-t-elle pas eu le temps d'évoluer sur ces mondes. Toujours est-il qu'il pourraient bien être colonisables. Mais c'est un autre débat, gardons cela pour plus tard...

L'atmosphère

Point crucial s'il en est. Il faut de l'air pour la vie. Plus précisément, de l'oxygène. Et pour l'instant, il n'est pas possible d'avoir beaucoup d'indices sur les éventuelles atmosphères des exoplanètes détectées. De plus, la même question revient systématiquement : l'atmosphère terrestre est propice à la vie que nous connaissons, mais est-ce la seule composition permettant l'émergence d'une vie ?

Les découvertes se sont multipliées concernant les organismes dits « extrêmophiles », c'est-à-dire vivant dans des conditions extrêmes, pourtant réputés hostiles à la vie :

- températures catastrophiques : on a trouvé de la vie dans des glaces de l'Antarctique aussi bien qu'en sortie de sources sous-marines d'eau à plus de 80°C.
- pressions insupportables, pour les organismes découverts dans les fonds marins, à plus de 1000 fois la pression atmosphérique
- acidité (ou basicité, le contraire en terme de pH, voire encadré) terribles, pour des espèces trouvées à des pH proche de 0 ou de 11, sur des sites volcaniques africains,
- teneur en sel impropre à la vie, dans les eaux de la mer morte...

Il est tout à fait possible que ces organismes soient les traces d'une vie primitive, apparue alors que notre planète avait un visage bien moins accueillant.

Certes, il n'y a pas de vie sur Vénus, qui est un bel exemple de climat extrême, avec son atmosphère de dioxyde de carbone, ses lacs de méthane, ses sources bouillantes et son volcanisme débridé.

Et bien que tous ces organismes des extrêmes soient vivants, ils n'ont pas non plus colonisé la planète ni ne se sont beaucoup développés... Ce sont des unicellulaires pour la plupart. Leurs conditions de vie limitent leur évolution.

Espérons donc que les prochaines données récupérées sur les exoplanètes après des suivis longs permettront d'avoir quelques indices sur leurs atmosphères, et d'en trouver quelques-unes accueillantes.

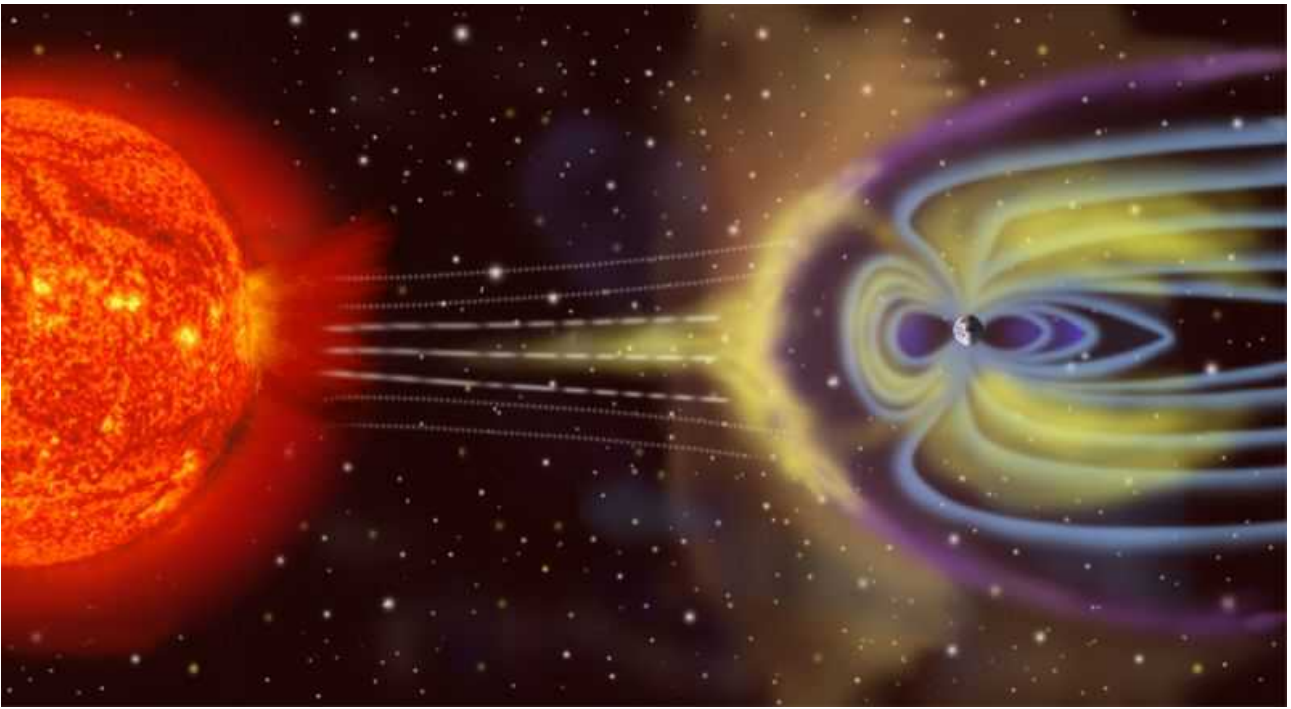
Le champ magnétique

Le Soleil éjecte régulièrement ce qu'on appelle le « vent solaire », un flux de particules très énergétiques. Si ces particules atteignaient la surface de la Terre, elles rayeraient tout simplement toutes les espèces vivantes de nos cartes.

En effet, ces particules sont capables de briser l'ADN, causant des dommages irréversibles aux cellules vivantes.

Fort heureusement pour nous, nous sommes très efficacement protégés de ces petites choses par une particularité terrestre : le champ magnétique.

Notre planète a le bon goût d'être un gigantesque aimant. Elle produit un champ magnétique dont les lignes (bien évidemment invisibles, mais représentées sur la figure suivante) l'entourent et dévient toutes les particules chargées. On ignore l'origine de ce champ magnétique, et on ne sait pas bien comment il est généré. Le noyau actif de notre planète recèle encore bien des secrets.



Le champ magnétique terrestre (image : NASA) est une protection contre les excès de notre étoile...

Ce dont on est sûr, c'est que les particules du vent solaires étant chargées, l'existence de ce champ magnétique leur interdit l'accès à notre planète. A l'exception d'une toute petite partie qui finit par entrer dans l'atmosphère au niveau des pôles, produisant les aurores boréales et australes. Ces régions étant peu voire pas du tout peuplées, ces particules ne causent pas de dégâts.

On en parle peu, mais ce champ magnétique est donc essentiel à notre survie. D'ailleurs, certains scientifiques ont émis l'hypothèse que Mars avait pu avoir un champ magnétique et le perdre, causant peut-être la disparition d'une vie endémique.

Ce qui est sûr, c'est qu'il va falloir se pencher sur la question en ce qui concerne les exoplanètes. Des travaux ont déjà été publiés sur les naines M, qui pourraient justement posséder un tel champ et donc être protégées de leur soleils rouges.

Ces études suggèrent que certaines raies détectées dans les spectres d'exoplanètes seraient dues à la vitesse prise par des particules déviées de l'atmosphère de la planète, ce qui pourrait prouver l'existence du même phénomène que sur Terre.

Les mondes-océans (« waterworlds »)

Les mondes appelés « super-Terres », c'est à dire les planète ayant une à dix fois la masse de la Terre, pourraient avoir des océans profonds, et même être entièrement couvert d'eau, ce qui feraient de ces planètes des mondes-océans (traduction personnelle de l'expression « waterworlds » utilisée par les anglo-saxons).

De plus, des chercheurs ont montré que ces mondes garderaient leur océans pendant des millions d'années.

Problème de taille, de tels mondes auraient un climat beaucoup moins stable. En effet, sur Terre, c'est l'alternance en surface de continents émergés et des vastes étendues océaniques qui régule les températures et les circulations d'air dans l'atmosphère. On dit très souvent que les océans sont les thermostats de notre planète, mais ils ne sont que du point de vue des continents !

Des études sont donc en cours sur la viabilité de ces planètes exotiques, afin de savoir si une vie pourrait y émerger.

Ces mondes pourraient d'ailleurs avoir différents visages, suivant la température moyenne : « boule de glace » recouverte de banquise (la Terre est peut-être passée par ce stade au cours de son histoire, et Europe, une lune de Jupiter, en est un exemple actuel, même si de l'eau liquide pourrait être présente sous la couche de glace), océan chaud et atmosphère humide, voire très humide, ou bien océan très chaud et atmosphère sèche... Rien de très hospitalier !

Toutefois, certains chercheurs avancent un autre argument : les échanges de masses d'eau liquide entre le manteau terrestre et les océans.

On a découvert il n'y a pas si longtemps que l'eau recelée par la Terre n'est pas seulement présente en surface, bien au contraire. Des quantités d'eau liquide supérieures à celles de nos océans seraient piégées dans le manteau de notre Terre, la couche de roche la plus superficielle de notre planète.

Piégées... Pas tout à fait ! Des échanges permanents auraient lieu dans les zones de subductions et les failles, l'eau du manteau rejoignant les océans tandis que de l'eau issus de ceux-ci plongerait dans les entrailles de la planète.

En s'inspirant de ce phénomène, des scientifiques ont émis l'hypothèse que sur une planète comportant une tectonique des plaques, donc une activité interne, de tels échanges pourraient aboutir à éviter la configuration « monde-océan », en permettant d'avoir des continents émergés. Ce qui impliquerait un climat stabilisé... Et donc ce qu'il faut à la vie !

Une raison de plus de scruter ces mondes afin d'obtenir une représentation de leur surface...

Une vie basée sur autre chose que du carbone ?

Toutes les suppositions sur les conditions nécessaires à la vie partent des caractéristiques de la vie telle que nous la connaissons, encore supposons-nous que la définition de ce mot est claire. Ce n'est pas si simple. Les virus, ces longues protéines qui se répliquent, sont-elles vivantes ? Ce n'est évidemment pas à des organismes unicellulaires que vous pensez lorsque vous lisez le mot « vie » depuis le début de cet article...

A quel point une vie pourrait-elle être différente ? Hypothèse basique : toutes nos cellules, toutes celles des animaux familiers, utilisent la chimie du carbone. Peut-on envisager une autre base que le carbone pour une vie éventuelle ?

Des chercheurs se sont posé la question de remplacer le carbone par du silicium par exemple. Et ce n'est pas convaincant. La chimie du vivant que nous connaissons dépend de millions de petits mécanismes de conformations des molécules (la façon dont elles se placent dans l'espace) qui sont fondamentaux dans tous les processus, du stockage de l'énergie, à son utilisation ou bien encore à la régulation des fonctionnements du corps humain par exemple. Or, aucun autre atome ne permet autant de choses variées que le carbone, avec sa capacité à « fabriquer » quatre liaisons inter-atomes...

Peu de chance donc de trouver une vie basée sur autre chose... Mais après tout, des molécules complexes à bases de carbone ont été détectées dans des nuages interstellaires, alors ce n'est pas vraiment un critère contraignant !

Alors, ces mondes lointains sont-ils propices à l'apparition de la vie ? Sont-ils colonisables ?

Dans les prochaines années, nous allons savoir ce qui se cache sur ces exoplanètes, qui vont progressivement nous dévoiler leurs atmosphères, leurs climats...

Les prochains instruments de surveillance utilisés seront plus précis, plus nombreux aussi, et donc plus efficaces. Nous allons avoir des images de ces endroits pour l'instant inaccessibles. Et nous aurons très certainement des surprises.

Encadré 1 : les exoplanètes de masses terrestre

Ces exoplanètes, ont une masse comprise entre une et deux fois celle de la Terre, ou supposée telle (obtenir la masse d'une exoplanète est un processus long, qui nécessite un suivi de la planète sur son orbite).

On rappelle que la masse de la Terre est de $6 \cdot 10^{24}$ kg.

La base de données exoplanets.org dénombre 203 planètes (données février 2016) dont la masse est comprise entre 0,03 et 0,045 fois la masse de Jupiter (la masse de Jupiter, $1,9 \cdot 10^{27}$ kg, soit environ 318 fois celle de la Terre, est toujours la référence en astronomie pour les petites étoiles ou les planètes), soit entre 1 et 1,5 fois la masse de la Terre.

Si on ajoute comme critère un rayon compris entre 1 et 2 fois le rayon terrestre, on tombe à 174 planètes.

En revanche, si on souhaite se limiter aux planètes situées dans la « bonne » zone, la fameuse « zone habitable » du système stellaire concerné, le chiffre tombe à moins de 10... Et c'est sans compter toutes les autres conditions nécessaires, atmosphère hospitalière, tectonique active et climat régulé...

Mais passons en revue quelques uns des mondes découverts les plus intéressants. Le tableau suivant résume leur caractéristiques, lorsqu'elles sont connues, et bien sûr il ne prétend surtout pas être exhaustif !

Nom	Rayon (en rayon de Jupiter R_J)	Masse (en masses de Jupiter M_J)
Kepler438b	0,100	0,0044
Kepler442b	0,120	0,0081
Kepler440b	0,166	0,0137
Kepler186f	0,099	0,0042
Kepler62f	0,1257	?
Kepler62e	0,1435	?
Kepler296e	0,01291	0,156
Kepler296f	0,1597	0,01319
Kepler69c	0,152	0,0126
Kepler452b	0,145	?
Kepler22b	0,212	0,113



Figure : « Kepler hall of fame »

Encadré 2 - La « zone habitable » d'un système stellaire

C'est la zone dans laquelle la planète reçoit suffisamment de lumière pour avoir une température moyenne tempérée, permettant que l'eau de surface reste sous forme liquide, en supposant toutefois l'existence d'une atmosphère similaire à la nôtre. Dans le système Solaire, la zone habitable se situe entre les orbites de Mars et de Vénus, avec la Terre en plein milieu. Toutefois, une planète pourrait avoir de l'eau liquide plus loin du Soleil, à condition d'avoir une atmosphère plus fine et un effet de serre plus élevé que la nôtre. Ou bien, une planète avec un albedo plus fort, dont « rejetant » plus de lumière, pourrait orbiter plus proche du soleil et conserver l'eau sous forme liquide. On constate que tout cela est affaire de moyenne, et mixe beaucoup de phénomènes différents. Ce qu'il faut garder en tête, c'est que pour l'instant, on a peu d'informations sur les mondes découverts. Et par conséquent, les classer rapidement en sélectionnant d'abord ceux qui sont en pleine « zone habitable » de leur système stellaire, permet de faire un premier tri très efficace. Nul doute que des surprises viendront ensuite...

Encadré 3 - Acides et Bases

Deux ions présents dans toutes les solutions aqueuses (les liquides formés par de l'eau, contenant des éléments dissouts) sont responsables de la basicité ou de l'acidité d'une solution : l'ion hydrogène et l'ion hydroxyde. Ce sont les proportions relatives de ces deux ions qui donne le caractère acide ou basique à la substance. Si une solution contient beaucoup plus d'ions hydrogène que d'ions hydroxyde, alors elle est acide. Si elle contient beaucoup plus d'ions hydroxyde que d'ions hydrogène, elle sera basique. Pour mesurer cela, on se sert d'un nombre : le pH (potentiel hydrogène). Il est compris entre 0 et 14. Plus il est proche de 0, plus la solution est acide. Plus il est proche de 14, plus la solution est basique. Si le pH est égal à 7 (on parle de solution neutre), alors il y a autant d'ions hydrogène que d'ions hydroxyde.

Ce qui est notable pour la vie, c'est que les solutions acides aussi bien que basiques, pourtant très différentes, ont le même effet : elles rongent les cellules vivantes en réagissant avec l'eau contenue par ces cellules !

Références :

Asynchronous rotation of Earth-mass planets in the habitable zone of lower-mass stars, Jérémy Leconte, Hanbo Wu, Kristen Menou, Norman Murray, *Science* 06 Feb 2015: Vol. 347, Issue 6222, pp. 632-635

Simulations of the Atmospheres of Synchronously Rotating Terrestrial Planets Orbiting M Dwarfs: Conditions for Atmospheric Collapse and the Implications for Habitability M. Joshi, R. M. Haberle, and R. T. Reynolds, *ICARUS* 129, 450–465 (1997) ARTICLE NO. IS975793

The Potential of Planets Orbiting Red Dwarf Stars to Support Oxygenic Photosynthesis and Complex Life, Joseph Gale and Amri Wandel, accepted for publication in the *International Journal of Astrobiology*, 2016

Magnetic moment and plasma environment of HD 209458b as determined from Ly α observations Kristina G. Kislyakova, Mats Holmström, Helmut Lammer, Petra Odert, Maxim L. Khodachenko, *Science* 346, 981, 2014

The Potential of Planets Orbiting Red Dwarf Stars to Support Oxygenic Photosynthesis and Complex Life, Joseph Gale and Amri Wandel, Accepted for publication in the *International Journal of Astrobiology*

Habitability of waterworlds: runaway greenhouses, atmospheric expansion and multiple climate states of pure water atmospheres, Colin Goldblatt, 2015

Surface Flux Patterns on Planets in Circumbinary Systems, and Potential for Photosynthesis Duncan H. Forgan, Alexander Mead, Charles S. Cockell, John A. Raven, 2014

Could silicon be the basis for alien life forms, just as carbon is on Earth? Scientific American, web.

Climate Model Studies of Synchronously Rotating Planets, Joshi, M., 2003, *Astrobiology*, 3, pp. 415-427

Discovery and validation of kepler-452b: a 1,6R super earth exoplanet in the habitable zone of a g2 star, Jon M. Jenkins et al, 2015, *Astrophysical Journal*