

ARTICLE DE FOND

Exoplanètes et exobiologie

Eric Josselin

Groupe de Recherche en Astronomie et Astrophysique du Languedoc, Université Montpellier II

Résumé : *La première découverte d'une planète orbitant autour d'une étoile autre que le Soleil a été réalisée en 1995. Depuis, plus d'une centaine de systèmes planétaires ont été observés. Ils ont apporté un nouvel éclairage sur notre compréhension de la formation et de l'évolution de ces systèmes, et donc du Système Solaire. Ils ont par ailleurs apporté de nouvelles contraintes sur la possibilité de trouver une forme de vie hors de notre Système. Cet article est largement inspiré de l'exposé que j'ai présenté à l'école d'été du CLEA en 2005.*

Introduction

« *If we are alone in the Universe, then it is an awful waste of space* »¹. Cette phrase de Carl Sagan, astrophysicien célèbre entre autres pour sa quête d'une éventuelle intelligence extraterrestre, résume assez bien une idée ancienne, mais qui a longtemps manqué d'arguments scientifiques. L'hypothèse selon laquelle il pourrait exister une infinité de mondes, semblables ou non au nôtre, avait déjà été mentionnée par Epicure (341-270 av. J.-C.). Mais cette idée étant en contradiction avec la physique d'Aristote, elle est longtemps restée minoritaire, voire condamnée. Il faut attendre la fin du XVII^e siècle pour que la première tentative de détection d'une planète extrasolaire soit menée (C. Huygens, 1698) ... et la fin du XX^e siècle pour que cette quête porte ses fruits !

Comment détecter les planètes extrasolaires ?

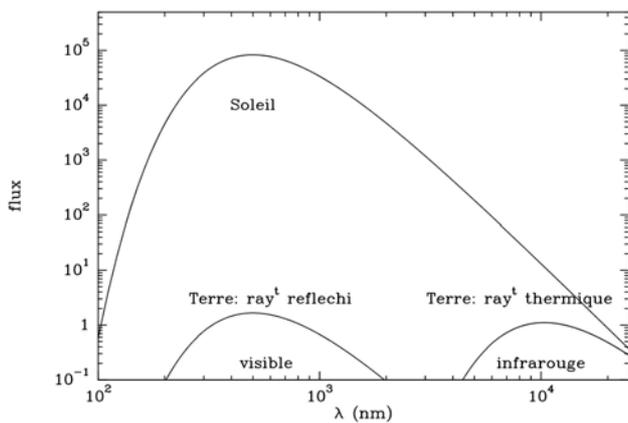
L'imagerie directe

La première technique qui vient à l'esprit est l'imagerie directe. Mais cette méthode s'avère quasiment impossible à mettre en œuvre actuellement, du fait de l'éblouissement par l'étoile. Si on considère le Système Solaire comme référence, Jupiter, la planète intrinsèquement la plus lumineuse, reste malgré tout un milliard de fois moins lumineuse que le Soleil ! En plus de ce contraste extrêmement défavorable, plusieurs

facteurs s'opposent à une éventuelle détection. Tout d'abord, pour un observateur lointain, une étoile n'apparaît pas ponctuelle, mais forme une tache (la tache de diffraction), qui est susceptible de « noyer » le rayonnement de la planète. De plus, dans le cas de l'observation d'un système lointain intervient une « fonction de phase », qui prend en compte les effets d'inclinaison du plan orbital de la planète par rapport à l'observateur, de la position de la planète sur son orbite (pensez aux phases de Vénus !). Cette fonction est toujours inférieure à 1, c'est-à-dire que le rapport *observé* des luminosités de la planète et de l'étoile est toujours inférieur au rapport *intrinsèque*.

Il existe cependant des moyens de rendre envisageable une telle observation. Tout d'abord, le rapport de luminosité n'est pas le même à toutes les longueurs d'onde. Ainsi, dans l'infrarouge (autour de 10 μm pour la Terre), le rayonnement thermique propre de la planète atteint son maximum, alors que le rayonnement d'une étoile de type solaire chute rapidement (voir figure). Malheureusement, une grande partie du rayonnement infrarouge est inobservable depuis le sol, du fait de l'absorption par l'atmosphère terrestre. Ce type d'observations ne peut donc être réalisé qu'avec un télescope spatial. Par ailleurs, la combinaison de plusieurs télescopes (principe de l'interférométrie) permet de réaliser un télescope équivalent à un télescope géant, pour lequel la tache de diffraction sera réduite. Dans tous les cas, la mise en œuvre de ces techniques s'avérant extrêmement lourde, elle ne le sera que pour l'étude de planètes pré-identifiées plutôt que pour la détection de nouveaux systèmes.

¹ "Si nous sommes seuls dans l'Univers, c'est alors un terrible gaspillage d'espace"



L'année 2005 a vu l'acquisition de la première « image » d'une planète extrasolaire. Cette image a été obtenue dans l'infrarouge proche (2 μm) avec l'un des télescopes du *Very Large Telescope* (VLT) de l'Observatoire Européen Austral (ESO) équipé d'un coronographe et d'un système d'optique adaptative, qui permet de corriger les déformations de l'image par la turbulence atmosphérique. Il faut noter toutefois que cette planète orbite autour d'une naine brune, c'est-à-dire une étoile « ratée », 500 fois moins lumineuse que le Soleil. Il faudra encore patienter quelques années avant de pouvoir obtenir une image d'une planète de type terrestre orbitant autour d'une étoile de type solaire ...

Les perturbations dynamiques

L'observation directe de ces planètes extrasolaires restant alors inenvisageable, on s'attache donc à rechercher le mouvement d'une étoile autour de laquelle orbiterait une planète. En effet, du fait de l'interaction gravitationnelle entre une étoile et une planète, ces deux corps orbitent autour de leur centre de gravité. Celui-ci reste cependant très proche du centre de l'étoile : le centre de gravité du système Soleil – Jupiter est ainsi à 740 000 km du centre du Soleil (soit approximativement un rayon solaire), et celui du système Soleil – Terre à 450 km du centre du Soleil seulement² ! Le mouvement de l'étoile qui en résulte est donc faible (et d'autant plus faible que la planète est peu massive) mais est parfois détectable. Ce mouvement peut potentiellement s'observer de trois manières : l'astrométrie, le chronométrage et les variations de vitesses.

L'astrométrie consiste à observer les variations de position de l'étoile sur la voûte céleste. Pour un système de type Soleil – Jupiter situé à 10 parsecs (1 pc $\approx 3 \times 10^{16}$ m), et correspond à la distance typique entre

² On peut donc continuer à prétendre que la Terre gravite autour du Soleil ...

les étoiles dans notre Galaxie), le déplacement observé serait de 5 mas (millièmes de seconde d'arc), soit à la limite de précision des mesures actuellement réalisables. Cette technique n'a actuellement conduit à aucune nouvelle détection.

Le chronométrage consiste à mesurer une variation dans le temps d'arrivée d'un signal régulier émis par l'étoile, du fait de la variation de distance à l'observateur (distance moyenne \pm distance au centre de gravité du système étoile – planète), et de la vitesse finie de propagation de la lumière. Cette technique est à comparer avec la technique employée par Ole Römer pour mettre en évidence la finitude de la vitesse de la lumière (cf. CC N°83, p. 28). Malheureusement, les étoiles « normales » n'émettent pas un signal suffisamment régulier pour que l'on puisse appliquer cette méthode. Une exception notable est le cas des pulsars, ces étoiles à neutrons ayant un fort champ magnétique et une rotation extrêmement stable. Le chronométrage de l'un d'entre eux, PSR 1917+12, a mis en évidence des irrégularités dans la période d'arrivée de ses signaux, dues à la présence de trois planètes telluriques autour de ce pulsar (cf. CC N°60, p. 2). Les pulsars résultent de l'explosion d'une étoile massive (supernova de type II). Un tel phénomène a nécessairement volatilisé d'éventuelles planètes présentes avant l'explosion. Celles qui ont été détectées se sont donc probablement formées à partir des éjecta de l'étoile. Quoi qu'il en soit, les conditions régnant sur ces planètes sont certainement trop hostiles pour permettre l'apparition d'une quelconque forme de vie ...

Restent les variations de la vitesse de l'étoile. Celles-ci sont mesurables par effet Doppler. Plus précisément, on mesure le décalage des raies spectrales par rapport à leur position nominale, mesurée en laboratoire :

$$\frac{\lambda_{\text{observé}} - \lambda_{\text{lab.}}}{\lambda_{\text{lab.}}} = \frac{v_*}{c}$$

λ désigne la longueur d'onde d'une raie donnée, v_* la vitesse *radiale* (c'est-à-dire projetée sur la ligne de visée) par rapport à l'observateur et c la vitesse de la lumière. Si l'étoile est en mouvement autour d'un centre (de gravité) dû à la présence d'une planète en orbite, on mesurera donc une variation périodique de cette vitesse, la période T étant naturellement égale à la période orbitale de la planète. De cette mesure, on peut déduire :

- la distance a étoile – planète, en appliquant la 3^{ème} loi de Kepler :

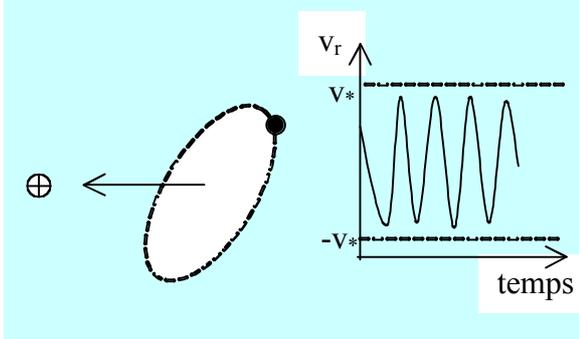
$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

M étant la masse du système et G la constante de gravitation ;

- la distance d entre l'étoile et le centre d'inertie du système, à partir de l'amplitude de variation de la vitesse δv , et donc la masse de la planète M_p :

$$\frac{\delta v}{2} = \frac{2\pi d}{T} \quad \frac{d}{a} = \frac{M_p}{M_* + M_p} \approx \frac{M_p}{M_*}$$

En fait, comme on ne mesure qu'une vitesse projetée, et que l'angle de projection est a priori inconnu, on ne détermine qu'une *limite inférieure* à la masse de la planète (on détermine $M_p \times \sin i$, i étant l'angle entre l'axe de rotation et la ligne de visée). Pour un système de type Soleil – Jupiter, l'amplitude de variation de la vitesse serait de 25 m/s. Pour un système Soleil – Terre, elle ne serait que de 20 cm/s ... Étant donné la précision des spectrographes actuels, cette méthode n'est applicable qu'à la détection de planètes massives.

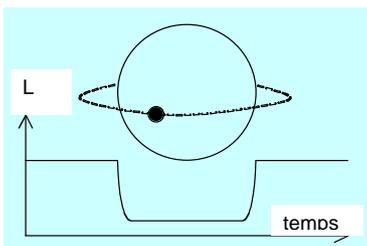


Les transits planétaires

Une autre technique intéressante pour l'étude des planètes extrasolaires est la méthode des transits. Si le système présente une inclinaison adéquate, soit un axe de rotation quasi perpendiculaire à la ligne de visée, chaque passage de la planète devant l'étoile entraînera une baisse de la luminosité L de l'étoile, d'autant plus importante que la taille relative de la planète par rapport à l'étoile est grande :

$$\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

Étant donné le caractère aléatoire de l'inclinaison des systèmes par rapport à la Terre, ces transits sont extrêmement rares. Par contre, dans le cas où ils seraient observés, ils permettent donc de mesurer le rayon de la planète, donc sa densité, et de distinguer les planètes gazeuses des planètes solides.



Les premières détections

51 Pégase b

En août 1995, Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, annoncent la première découverte d'une planète extrasolaire, autour de l'étoile 51 Pégase, par la méthode de variation de la vitesse exposée ci-dessus. Les observations ont été réalisées avec le spectrographe ELODIE, monté sur le télescope de 193cm de l'Observatoire de Haute Provence. Cette découverte fait sensation, non seulement par sa nature, mais aussi par les caractéristiques de la planète. Elle a une masse de 0,45 fois la masse de Jupiter (au moins) mais sa distance à l'étoile n'est que de 0,05 u.a. (1 unité astronomique = distance Terre – Soleil ; Jupiter est à environ 5 u.a. du Soleil). Or, les théories de formation du Système Solaire nous avaient appris que les planètes géantes ne pouvaient se former que « loin » des étoiles !

Du coup, certains n'ont pas hésité à contester cette découverte, attribuant les variations de vitesses à des mouvements dans l'atmosphère de l'étoile. Mais la régularité de ces variations, et surtout la découverte depuis d'autres systèmes, ont mis fin à cette polémique.

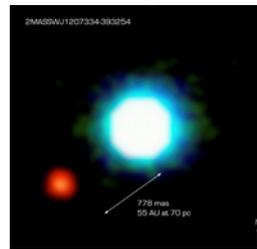


Photo ESO 14a/05 (30 avril 2005)

La naine brune 2M1207 et son compagnon planétaire

Premières leçons

À ce jour, 170 planètes ont été détectées, dont 23 dans des systèmes multiples. Leurs masses sont comprises entre 0,06 et 13 fois la masse de Jupiter, et ont des distances orbitales allant de 0,02 à 6 u.a. Ainsi, on constate que 5% au moins des étoiles sont accompagnées d'un cortège planétaire. La plupart de ces étoiles sont « riches en éléments lourds » (c'est-à-dire que l'abondance relative des éléments plus lourds que le carbone est plus grande que dans le Soleil). Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle les planètes gazeuses se forment par accréation de gaz autour d'un cœur rocheux (composé de ces éléments lourds).

Le premier transit fut observé en 2000, pour l'étoile HD 209458. On a pu ainsi mesurer la densité de sa planète, de l'ordre de 0,5 (soit moins dense encore que

Saturne, qui détient le record dans le Système Solaire !). On avait donc la première planète *géante gazeuse* clairement identifiée ! Mais sa proximité (elle n'est qu'à 0,045 u.a.), associée à cette faible densité, implique des relations tumultueuses. Avec une température de 1300 K, plus les effets des marées qu'elle ne manque pas de subir, cette planète est progressivement évaporée ...

Migrations

Reste à expliquer ces paramètres orbitaux surprenants. Comme mentionnée ci-dessus, la formation des planètes géantes gazeuses ne peut se faire qu'au-delà de la limite de condensation de l'eau, soit environ 5 u.a., par accréation lente de gaz autour d'un embryon de roches et de glaces, de 10 masses terrestres environ, puis par effondrement gravitationnel du gaz.

La seule façon d'expliquer les courtes distances étoile – planète observées est donc que ces planètes ont migré. Cette migration peut être provoquée par les forces de frictions entre la planète nouvellement formée et le disque proto-planétaire de débris, qui ralentissent la planète et donc la font « tomber » vers l'étoile. Mais la compréhension de ce phénomène a longtemps été un défi pour les théoriciens. Une fois la planète formée, le disque est en principe trop dispersé pour engendrer une friction suffisante. Les derniers modèles montrent en fait que la planète peut continuer à accrêter de la matière au cours de sa migration, et donc n'atteindre sa masse finale qu'une fois stabilisée sur une orbite proche de l'étoile.

Du coup, ces simulations semblent reproduire si facilement les orbites observées qu'on est amené à se demander pourquoi ces migrations n'ont pas eu lieu dans le Système Solaire ! En fait, il y a eu probablement migration. Les planètes géantes devant se former sur des orbites circulaires et coplanaires, les excentricités actuellement observées (6%, 9% et 8% pour Jupiter, Saturne et Uranus) s'expliquent si on considère une migration due non seulement aux frictions mais aussi aux interactions entre Jupiter et Saturne, dont les distances initiales auraient été dans un rapport de 2 initialement (phénomène de résonance). Les orbites auraient alors été chaotiques, se seraient croisées, avant de se stabiliser dans leur configuration actuelle. Cette hypothèse est très séduisante car elle permet d'expliquer non seulement les orbites actuelles des planètes géantes gazeuses, mais aussi la distribution des petits corps (astéroïdes, objets de Kuiper) et le pic de bombardement tardif de la lune, 700 millions d'années après sa formation. En résumé : il y a bien eu migrations dans le Système Solaire, mais elle est plus complexe car il y a plus de planètes géantes.

Une vie en dehors de la Terre ?

Combien de civilisations dans notre Galaxie ?

L'astrophysicien Drake tenta de répondre à cette question, en posant une équation devenue célèbre et qui porte son nom :

$$N_T = R_* f_p n_e f_l f_i f_t$$

Les différents facteurs qui apparaissent sont :

- N_T : nombre de civilisations capables de communiquer ;
- R_* : taux de formation des « bonnes » étoiles (type ~ solaire) ;
- f_p : fraction des étoiles ayant un système planétaire ;
- n_e : nombre de planètes de type terrestre par système planétaire ;
- f_l : fraction de ces planètes sur lesquelles la vie apparaît ;
- f_i : fraction sur lesquelles l'intelligence se développe ;
- f_t : fraction des êtres intelligents développant une technologie ;
- t_l : durée de vie d'une civilisation capable de communiquer.

Le problème est que l'on n'a aucune estimation fiable de la plupart de ces paramètres, puisqu'on ne connaît qu'une seule planète tellurique habitée, et une seule civilisation, la nôtre (et encore, on ne connaît pas sa durée de vie ...). Seuls le taux de formation d'étoiles de type solaire (de l'ordre de 1 à 10 par an dans notre Galaxie), et, maintenant, la fraction d'étoiles ayant un système planétaire (au moins 5%) sont à peu près connus grâce aux observations astronomiques. Pour les autres paramètres, libre à chacun de se montrer optimiste ou pessimiste ... Drake était parvenu à environ 15 millions de civilisations intelligentes communicantes, ce qui justifie de les rechercher ! Mais les plus pessimistes parviennent à un nombre inférieur à 1 ...

Premier problème : savoir définir la vie ...

Avant de se lancer dans la recherche de vie extraterrestre, encore faut-il savoir ce que l'on cherche ... Et ce n'est pas aussi simple qu'il y paraît ! Il faut établir une définition suffisamment large pour inclure toute forme de vie terrestre (y compris les plus primitives) et extraterrestres (même très différentes des différentes vies terrestres), tout en restant suffisamment précise pour exclure des formes de « vie » artificielles comme les ordinateurs. Ce problème est loin de se limiter à une simple question de sémantique, mais peut conditionner notre capacité à interpréter une information, telle que la découverte de structures particulières sur la météorite martienne ALH 84001

(micro-organisme fossile, ou simple phénomène chimique ou minéralogique ?).

Pour A. Brack, l'un des pères de l'exobiologie en France, « *la vie est un système chimique, capable de se reproduire par autocatalyse et de faire des erreurs, qui augmentent progressivement l'efficacité de l'autocatalyse* ». On voit donc émerger la notion, floue, de complexité chimique sous-jacente à la notion de vie. Cette complexité va donner des pistes pour la recherche de vie extraterrestre.

Retour sur Terre ...

Essayons tout d'abord de voir comment la vie est apparue sur Terre. Selon le scénario standard, des petites molécules réactives (H₂O, HCN), d'origine interstellaire et/ou cométaire, ont réagi sur terre, pour former des bio-monomères (acides aminés, nucléotides), puis des bio-polymères (protéines, ARN), qui ont conduit à l'apparition des premiers systèmes autoreproducteurs, puis des premières cellules.

Ce principe d'émergence de structures biologiques à partir de processus purement chimiques dans une « soupe primordiale » doit son succès à la célèbre expérience de Miller et Urey, qui, en 1953, ont observé la formation d'acides aminés via la conversion d'énergie électrique en énergie biochimique dans une atmosphère primitive constituée de méthane, d'ammoniac, de vapeur d'eau et d'hydrogène. Depuis, on a réalisé que le carbone atmosphérique était plus probablement sous forme de dioxyde de carbone que de méthane. Une telle atmosphère, non réductrice, induirait un taux de production d'acides aminés très faible. De tels processus chimiques auraient par contre pu avoir lieu au voisinage des sources hydrothermales, plus riches en méthane.

À moins que ces acides aminés soient d'origine extraterrestre ... Les comètes et certaines météorites (les chondrites) sont en effet riches en molécules organiques, comme l'a montré en particulier l'analyse de la météorite de Murchinson.

Dans tous les cas, deux principes de base apparaissent. Tout d'abord, la complexité chimique est basée sur le carbone. Cet élément est en effet idéal, puisqu'il est très réactif et très abondant dans l'Univers. Des alternatives ont été envisagées, telle qu'une chimie basée sur le silicium. Toutefois, cet élément ne semble pas en mesure de s'assembler en macromolécules, étant donné la « rigidité » de ses liaisons chimiques.

Ensuite, il faut un solvant pour assurer le transport et la survie des molécules. L'eau apparaît comme le solvant idéal, étant donné ses propriétés électriques.

Ceci conduit à la définition d'une zone habitable, c'est-à-dire la zone autour d'une étoile dans

laquelle la température est compatible avec la présence d'eau liquide. Une planète aura en effet une température d'autant plus basse qu'elle sera éloignée de l'étoile. Une modélisation relativement simple, mais incluant des effets importants comme l'effet de serre, donne ainsi, pour une étoile de type solaire, une zone habitable allant de 0,6 à 1,1 u.a. Si on tient compte par ailleurs de l'évolution du Soleil, et en particulier de la croissance de sa luminosité, la zone habitable continue, compatible avec les échelles de temps des processus biologiques, se restreint à 0,95 à 1.01 u.a.

Ces considérations semblent suggérer que l'apparition de la vie ailleurs que sur Terre est très improbable. Cependant, on trouve sur Terre des organismes, dits extrémophiles, qui se sont adaptés à des conditions extrêmes en termes de température, pression, acidité. Tout reste donc envisageable !

Dans le Système Solaire ?

Si on retient le principe d'un solvant comme ingrédient nécessaire à une activité pré-biotique, trois sites dans le Système Solaire en dehors de la Terre sont à considérer.

Les nombreuses missions d'exploration de Mars ont montré de nombreuses traces de ruissellement à sa surface, attestant qu'un liquide non visqueux y a existé dans le passé. Étant donné la composition des calottes polaires et celle, supposée, du sous-sol martien, l'eau est le plus probable. Cependant, du fait du comportement chaotique de l'axe de rotation, le climat martien est extrêmement instable, rendant les conditions particulièrement hostiles. Dans tous les cas, les températures très basses actuelles et la très faible pression atmosphérique semblent incompatibles avec la survie d'une quelconque forme de vie primitive passée.

Le deuxième site intéressant est Europe, l'un des satellites de Jupiter. Europe est entièrement recouvert de glaces, mais ces glaces sont parcourues par de nombreuses failles, qui laissent supposer l'existence d'un océan d'eau liquide sous cette croûte. L'énergie nécessaire au maintien de cette eau liquide pourrait provenir des effets des marées joviennes. Des missions d'exploration de ce satellite sont actuellement envisagées.

Enfin, Titan, le plus gros satellite de Saturne, est particulièrement intéressant, puisque c'est le seul satellite d'une planète géante à avoir une atmosphère. Cette atmosphère est riche en azote, mais aussi en hydrocarbures, en particulier en méthane. Cette molécule étant relativement fragile, un réservoir de méthane liquide est probable. Les premiers résultats de la mission Cassini – Huygens laissent penser qu'il n'y a pas d'océans de méthane liquide, mais éventuellement des rivières et des lacs. À suivre ...

Hors du Système Solaire ?

Actuellement, aucun site habitable n'a été identifié en dehors du Système Solaire, puisque les techniques actuelles ne permettent pas de détecter d'éventuelles planètes telluriques. La question de la détectabilité d'une activité biologique a cependant déjà été étudiée.

Sur Terre, l'oxygène moléculaire (O_2) est entièrement produit par la biosphère, par photosynthèse. Avec les postulats de base énoncés ci-dessus (chimie du carbone + eau liquide), la production d'oxygène moléculaire est une conséquence naturelle d'une activité biologique. Sa détection serait donc un indice très intéressant ! On recherchera plutôt l'ozone (O_3), produit à partir de O_2 , et qui est observable dans l'infrarouge. C'est le principe à la base de plusieurs missions futures, comme le satellite DARWIN, de l'Agence Spatiale Européenne, qui devrait être lancé autour de 2015.

Il faut cependant être prudent. Une non-détection ne signifierait pas nécessairement l'absence de vie. Sur Terre, l'oxygénation de l'atmosphère a débuté il y a environ 2 milliards d'années, alors que la vie sous-marine a commencé 1,5 milliard d'années plus tôt. Par ailleurs, l'oxygène moléculaire peut être produit de façon purement abiotique, par photolyse de l'eau. Une bio-signature fiable serait donc la détection simultanée de l'ozone, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.

Mais où sont-ils ???

Enrico Fermi a énoncé ce fameux paradoxe. Étant donné la vitesse de développement technologique sur Terre, il semble probable que les humains seront en mesure de coloniser la Galaxie d'ici quelques millions d'années. Comparé aux échelles de temps cosmiques, ce délai est extrêmement court, et laisse donc supposer que des vies extraterrestres sont déjà parvenues à ce stade. On peut donc se demander pourquoi nous n'avons toujours pas été contactés. Deux explications (sérieuses) sont possibles. Soit l'apparition (ou le développement) de la vie est difficile et donc improbable, soit toute civilisation s'autodétruit inexorablement avant de pouvoir conquérir la Galaxie.

Cette vision est bien sûr très anthropomorphique, et probablement largement conditionnée par les remords de Fermi qui avait contribué à la mise au point de l'arme atomique. Au moins nous rappelle-t-elle notre fragilité ...

Conclusion provisoire : le futur de la recherche

La prochaine étape dans notre connaissance des planètes extrasolaires et de l'exobiologie sera la possibilité de détecter des planètes telluriques. Plusieurs missions futures devraient le permettre. Le satellite COROT (CNES), dont le lancement est prévu en 2007, observera entre autres des transits planétaires avec une précision jusque-là inégalée. Le satellite GAIA (ESA) sera un satellite astrométrique et vélocimétrique de très grande précision et devrait être lancé en 2010. Le James Webb Space Telescope, successeur du Hubble Space Telescope, aura un miroir de 6,5 m et observera dans l'infrarouge. Au sol, des instruments dédiés à la recherche de planètes telluriques sont envisagés sur les VLT de l'Observatoire Européen Austral.

L'avenir est donc riche de promesses !



gp