Sommes-nous seuls dans l'univers?

A. Jorissen
Maître de recherches du F.N.R.S. à l'Institut d'Astronomie et d'Astrophysique, Université Libre de Bruxelles

> *The readiness with which the argument* [that life on Earth must be considered unique] *is advanced and accepted shows that even to this day many people have learned little from the old Copernican controversy. By preference, they are still pre-Copernican. Robbed of the Earth as the geometrical centre of the Universe, they are avid to make the Earth the biological centre of the Universe.*
>
> **F. Hoyle,** *The Relation of Biology to Astronomy,* University College Cardiff Press, 1980

Sommes-nous à la veille d'une révolution culturelle pareille à celle qui marqua, en 1543, l'avènement du modèle planétaire héliocentrique, défendu par Copernic et qui imposa à l'Humanité, non sans mal, l'abandon de l'idée que la Terre est le centre du cortège planétaire, et partant, de l'univers ? Plusieurs progrès récents, accomplis dans cette discipline récente qu'est l'exobiologie, le laissent penser !

Dans un discours pronocé en 1996 et destiné à revitaliser la NASA après la catastrophe de la navette Challenger, son administrateur D. Goldin a promis aux américains la première photographie d'un extraterrestre d'ici à 2020 dans le cadre du programme 'Origins'. Certes, cette photographie ne sera que celle révélant la présence d'ozone [1 ; Fig. 8] dans l'atmosphère d'exoplanètes (on connaît à ce jour plus de 100 étoiles abritant des exoplanètes ; voir ci-dessous) traduisant ainsi l'activité photosynthétique de végétaux - et donc l'existence de vie extraterrestre. L'Agence Spatiale Européenne (ESA) s'associera d'ailleurs à cette prouesse technologique dans le cadre de la future mission *Darwin* . Si ces tentatives aboutissent, il nous faudra renoncer à notre sentiment tenace d'être au centre de l'univers... habité. Une telle révolution néo-copernicienne (affirmant cette fois que le Soleil n'est pas la seule étoile de l'univers à abriter une planète habitée) aurait sans conteste un impact considérable sur les grandes religions révélées de la planète: ainsi pour n'en donner qu'une seule illustration, la question ne se poserait-elle pas alors aux `astro-théologiens' de savoir si le rôle rédempteur de la mort du Christ en croix s'étend également aux habitants d'autres mondes? Cette question provocante n'est certes pas neuve, puisque Melanchthon (1497-1560), disciple de Luther, la posait déjà en 1550 dans son ouvrage *Initia doctrinae physicae*, tandis que les spéculations, remarquablement en avance sur leur temps, de Giordano Bruno sur la pluralité des mondes habités lui valurent de périr sur le bûcher de l'Inquisition en 1600.

La découverte d'exoplanètes géantes : un premier pas vers la pluralité des mondes

Comme ce fut souvent le cas en science, la découverte en 1995 par Michel Mayor et Didier Queloz de l'Observatoire de Genève, de la première exoplanète (autour de l'étoile 51 Pegasi) fut un événement fortuit [2], puisque les astronomes suisses chassaient non les exoplanètes, mais les naines brunes (ces dernières sont des étoiles mort-nées, dont le cœur n'est pas assez chaud pour initier la fusion de l'hydrogène ; leur masse est comprise entre 0.013 et 0.075 fois la masse du Soleil). Même si cette découverte fut fortuite, elle n'était pas totalement

inattendue. Les astronomes étaient convaincus en effet que la présence de planètes autour des étoiles doit être courante puisque les théories de formation stellaire prévoient la formation de planètes comme sous-produit naturel de la formation des étoiles. Cependant, ce furent les propriétés de cette exoplanète qui suscitèrent la surprise totale : la planète découverte possède une masse d'au moins la moitié de la masse de Jupiter (la plus massive des planètes de notre système solaire, représentant un millième de la masse du Soleil) mais elle tourne autour de l'étoile 51 Pegasi en à peine 4.2 jours ! A titre de comparaison, Mercure, la planète la plus proche du Soleil dans notre système planétaire, tourne autour du Soleil en 88 jours. L'exoplanète en orbite autour de 51 Peg frôle littéralement son étoile, et la température à sa surface y est d'ailleurs extrêmement élevée (environ 1300 K). C'est la raison pour laquelle cet objet (et de nombreux autres découverts ensuite) sont désormais appelés des « Jupiters chauds » [3].

Au 1er septembre 2004, des exoplanètes sont connues autour de 111 étoiles de type solaire (parmi lesquelles 13 abritent plus d'une planète ; ce sont au total 127 exoplanètes de masse inférieure à 18 fois celle de Jupiter qui sont actuellement recensées [4]), ce qui correspond à une fréquence de l'ordre de 10% d'étoiles de type solaire abritant des planètes géantes[5]. L'analyse des propriétés de ces exoplanètes remet en question des pans entiers d'une théorie aussi fondamentale que celle de Laplace [6] expliquant la formation de systèmes planétaires. Selon cette théorie, la formation d'un système planétaire se déroule naturellement au sein du disque de gaz et de poussières entourant l'étoile en gestation (ces disques ont été observés autour de nombreuses étoiles en formation, notamment dans la nébuleuse d'Orion ; voir Fig. 1), d'abord par collisions entre grains de poussières formant des petits cailloux, puis par collisions entre cailloux jusqu'à former des corps solides de plus en plus gros. Si de la glace ou de la neige est présente dans le disque, le processus d'accrétion-collisions est rendu beaucoup plus efficace par le fait que ces flocons ou glaçons peuvent servir de noyaux de condensation. A ce moment, le noyau solide de la future planète grossit suffisamment vite pour que sa force de gravité puisse attirer le gaz environnant, avant que celui-ci ne soit dispersé par la pression de radiation de l'étoile qui rayonne de plus en plus d'énergie. C'est ainsi que sont supposées naître les planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune dans notre système), qui sont constituées d'une énorme enveloppe gazeuse entourant un noyau solide de roches et de glace. La vapeur d'eau est la première à se condenser dans le disque protoplanétaire, à une distance d'environ 5 unités astronomiques de l'étoile (l'unité astronomique de distance – UA – est la distance moyenne de la Terre au Soleil), lorsque la température du disque protoplanétaire descend sous 160 K, soit la température de condensation de l'eau lorsque la pression est quasi nulle. C'est précisément à cette distance du Soleil que se trouve Jupiter, et ce n'est probablement pas un hasard. Mais comment dans ces conditions rendre compte des Jupiters chauds ? Et comment expliquer que le système solaire apparaisse désormais presque comme une exception, avec son absence de Jupiters chauds (Fig. 2)?

La théorie la plus en vogue aujourd'hui pour expliquer la formation de Jupiters chauds invoque une migration de la planète géante [7], initialement formée là où existe de la glace dans le disque protoplanétaire. Cette migration résulte d'un échange de moment angulaire entre la planète et le disque protoplanétaire, dans lequel cette dernière crée des ondes spirales.

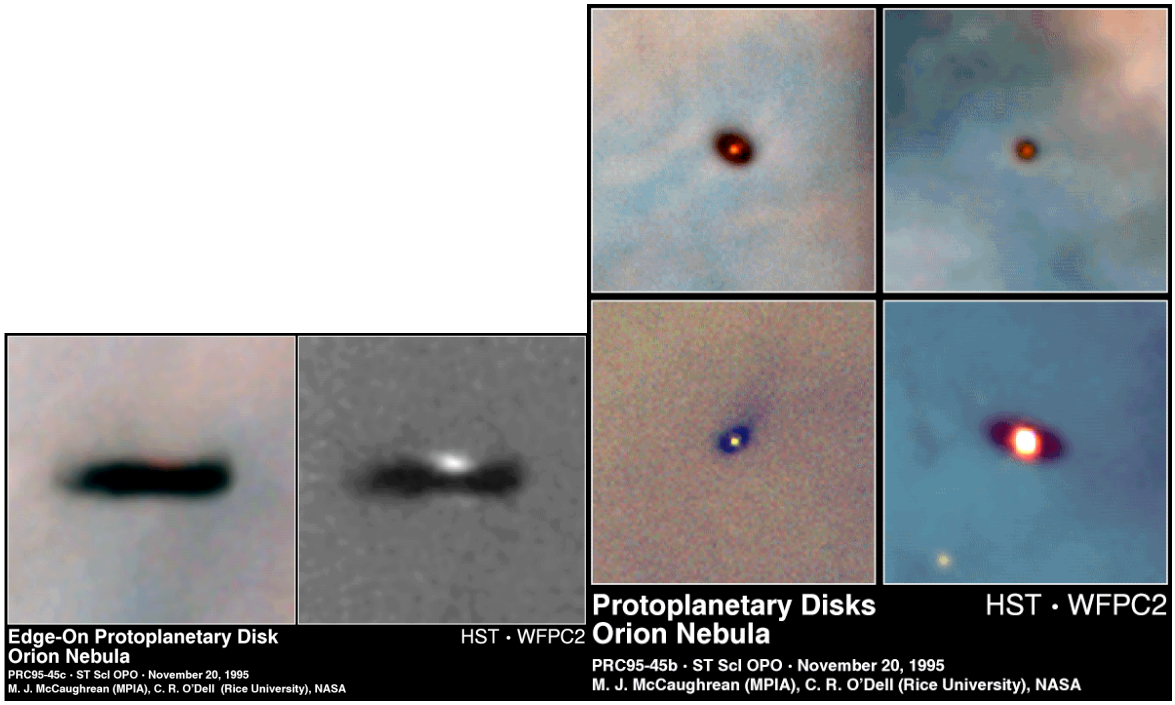


Figure 1. Exemples de disques protoplanétaires observés autour d'étoiles en formation dans la nébuleuse d'Orion, illustrée à la Fig. 8.
Crédit : Space Telescope Science Institute (STScI, NASA).

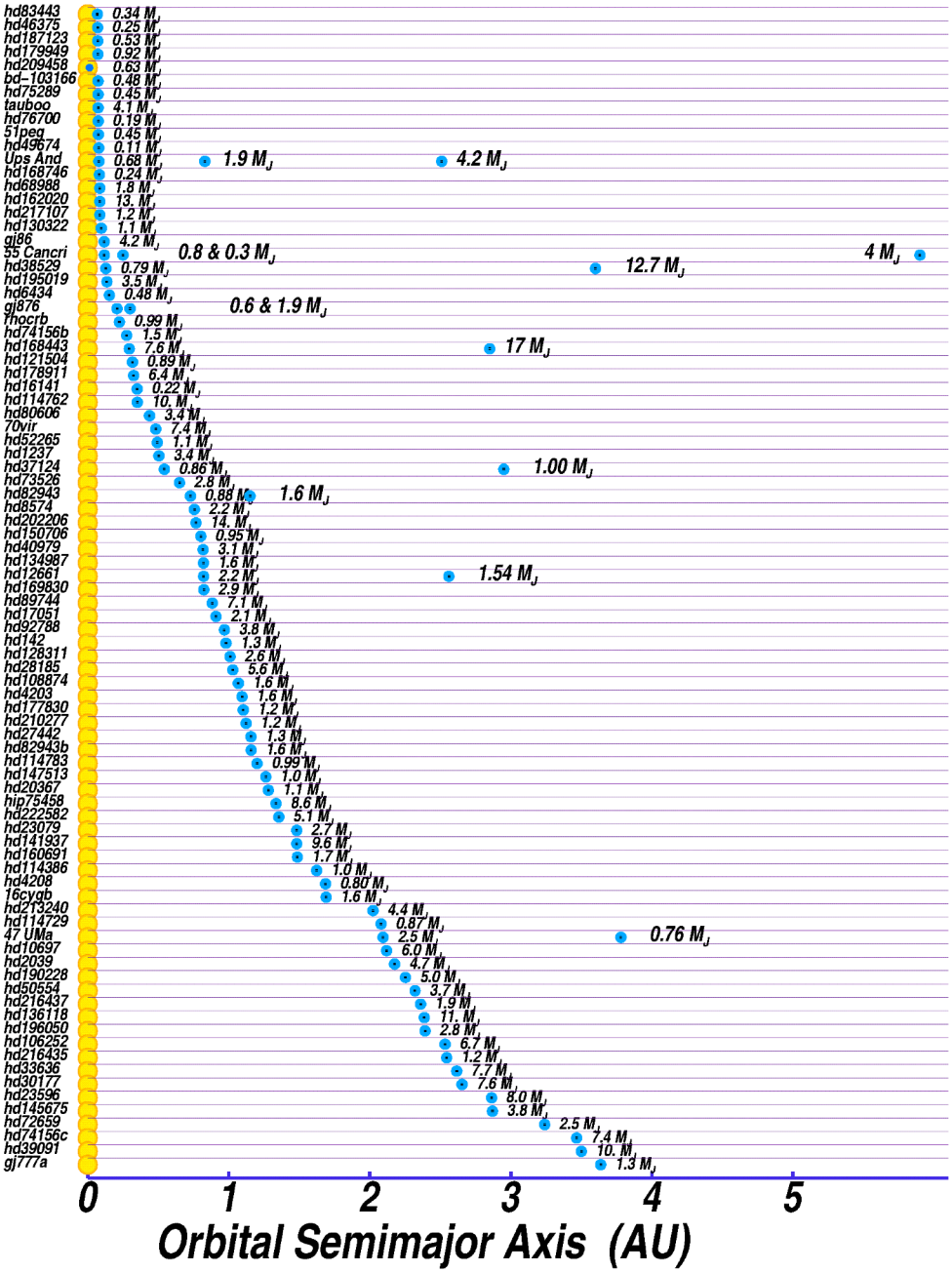


Figure 2. Répartition de la distances des exoplanètes à leur étoile hôte, en unités astronomiques (UA ; 1 UA = distance moyenne Terre – Soleil). Leur masse (minimale) est également mentionnée, en unités de masse de Jupiter (M_J).
Crédit : California & Carnegie Planet Search

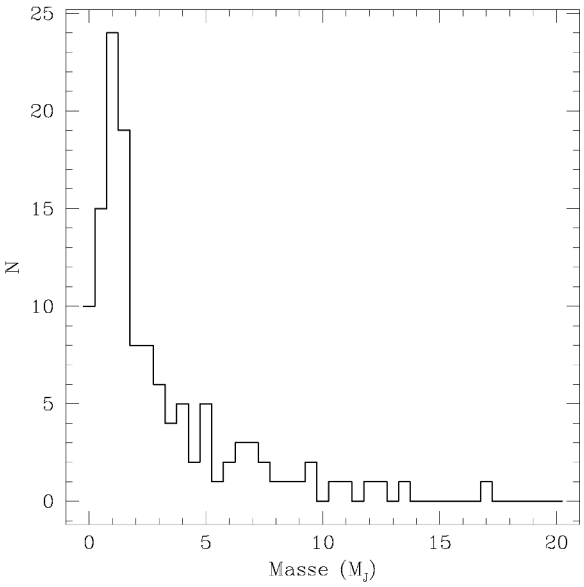


Fig. 3. Distribution des masses (minimales) des exoplanètes (au 1/9/2004), en unités de masse de Jupiter (M_J ; pour des raisons techniques, seule une borne inférieure de la masse est directement accessible aux observations ; on ne s'attend cependant pas à des masses beaucoup plus élevées que cette borne inférieure). Il faut noter que la sensibilité des méthodes de détection ne permet de détecter actuellement que des objets dont la masse est supérieure à environ 0.05 M_J, soit approximativement la masse d'Uranus.

Outre la distribution des distances à leur étoile hôte, deux autres propriétés des exoplanètes conduisent à des surprises : la distribution de leurs masses et celle de leurs excentricités orbitales.

La distribution des masses des exoplanètes révèle que la majorité des exoplanètes possède une masse inférieure à environ 5 fois la masse de Jupiter (M_J) [8]; il y a très peu d'objets dans la gamme 13 – 80 M_J, correspondant aux étoiles naines brunes : c'est le « désert des naines brunes ». Ce « désert » signale peut-être la transition entre les mécanismes très différents supposés former étoiles et planètes : les premières se forment par fragmentation et contraction d'un nuage de gaz, tandis que les secondes se forment par agglomération de corps solides plus petits, suivie de l'accrétion gravitationnelle d'une enveloppe gazeuse dans le cas des planètes géantes. Pourtant, malgré ces mécanismes de formation différents, rien ne permet de distinguer (Fig. 4), au niveau de leur « forme », les orbites d'étoiles doubles des orbites d'exoplanètes (ellipses que l'on caractérise par leur demi-grand axe et leur excentricité).

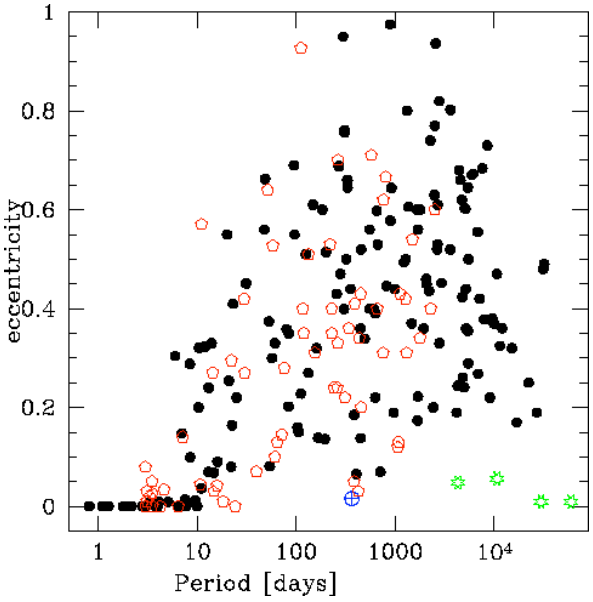


Figure 4: Comparaison des diagrammes excentricité-période pour les exoplanètes (pentagones) et pour les compagnons stellaires orbitant autour d'étoiles de type solaire (cercles pleins). On notera l'étonnante similitude de ces deux ensembles de données. A titre de comparaison, les positions dans ce diagramme, de la Terre et des planètes géantes du système solaire sont représentées par une croix cerclée et par des symboles étoilés, respectivement.
Crédit : Udry & Mayor, in : G. Horneck, C. Baumstark-Khan, editors, *Astrobiology – The Quest for the Conditions of Life*, Springer (Berlin), 2002

L'analyse de la forme des orbites exoplanétaires révèle deux surprises. La première est la présence d'orbites très excentriques au sein des exoplanètes, alors que dans le système solaire, toutes les orbites (mis à part Mercure et Pluton dont le caractère exceptionnel est explicable par ailleurs) sont quasiment circulaires. Et la deuxième surprise, déjà mentionnée ci-dessus, est la similitude entre les distributions d'excentricités des compagnons planétaires et des compagnons stellaires, malgré des mécanismes de formation supposément très différents. En corollaire, cette similitude des propriétés orbitales repose d'ailleurs la question (toujours ouverte) de la définition même d'une planète (surtout dans le cas des planètes géantes) !

Notons en passant le rôle important que peut jouer l'argument anthropique [9] pour comprendre les particularités du système solaire. Un Jupiter chaud, et la migration orbitale qui lui est associée, aurait nécessairement balayé toute planète tellurique se trouvant sur son chemin, et nous ne serions donc pas là. De même, la stabilité de l'orbite terrestre nécessaire au développement de la vie n'est possible que si Jupiter possède lui-même une orbite circulaire. Dans le cas contraire, la Terre aurait probablement été décrochée de son orbite par les perturbations joviennes. Un argument anthropique peut donc probablement également rendre compte de la (quasi-)circularité des orbites planétaires dans le système solaire.

A la recherche des planètes telluriques

Les succès rencontrés jusqu'ici dans la recherche d'exoplanètes sont essentiellement le fruit de la méthode des vitesses radiales. Les méthodes des transits et des micro lentilles gravitationnelles ont quant à elles livré quelques détections isolées. Ces méthodes de détection ne seront pas détaillées ici. Un exposé détaillé des nombreuses méthodes possibles peut être

trouvé dans la référence [10] ou sur le site http://www.obspm.fr/encycl/searches.html, de sorte que seul un bref résumé sera proposé ici. Les méthodes peuvent se subdiviser en deux grandes classes : méthodes directes (voir les planètes) et les méthodes indirectes (détecter leur effet). La première classe est rendue difficile par l'énorme contraste existant entre la planète et son étoile hôte (dans le cas d'une planète géante située à 5 UA d'une étoile de type solaire, le rapport de leurs flux lumineux respectifs atteint 10^8 dans le domaine visible et 10^5 dans l'infrarouge à 40 microns). Il faut ajouter à cette difficulté liée au contraste une autre causée par la faible distance angulaire séparant l'étoile et la planète sur le ciel : la séparation apparente du couple Soleil-Jupiter vu d'une distance de 33 années-lumière s'élève à seulement 0.5 secondes d'arc. A titre de comparaison, le diamètre apparent de la Lune est d'environ 1800 secondes d'arc, tandis que la turbulence atmosphérique, responsable de la scintillation des étoiles, étale les images stellaires sur des distances angulaires souvent largement supérieures à 0.5 secondes d'arc. L'imagerie directe d'une exoplanète ne sera donc possible qu'au prix de la mise en œuvre de techniques spatiales complexes (interférométrie soustractive dans l'infrarouge ; voir ci-dessous la description de la mission *Darwin* de l'Agence Spatiale Européenne - ESA).

Les méthodes indirectes peuvent elles-mêmes être subdivisées en deux classes : celles qui détectent le mouvement de l'étoile autour du centre de masse du système étoile-planète (mouvement détecté soit le long de la ligne de visée, par effet Doppler, soit sur le plan du ciel, par astrométrie), et celles qui détectent des variations d'éclat (dues soit au transit de l'exoplanète devant le disque de l'étoile, soit à un effet de double microlentille gravitationnelle amplifiant temporairement l'éclat d'une source lointaine lorsque le système étoile-exoplanète, entraîné comme toutes les étoiles par son mouvement autour du centre de la Galaxie, passe sur la ligne de visée de la source lointaine ; voir http://www.jpl.nasa.gov/releases/2004/103.cfm).

Ce sont les programmes de recherche basés sur l'effet Doppler qui ont livré la moisson la plus importante d'exoplanètes à ce jour. Cependant, cette méthode présente deux inconvénients majeurs : (i) la sensibilité de cette méthode ne permet actuellement que de détecter des planètes dont la masse est supérieure à celle d'Uranus, soit environ 15 fois la masse de la Terre[1] ou 0.05 M_J, (ii) seule une borne inférieure à la masse peut être déterminée. Les planètes de type terrestre (ou telluriques) ne peuvent actuellement être détectées que par la méthode des transits, mais aucune détection de planète tellurique n'a été réalisée à ce jour.

Les missions *Darwin* de l'ESA (http://www.esa.int/science/darwin) et *Terrestrial Planet Finder* de la NASA (http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.html) auront précisément pour objectif principal non seulement la détection de planètes telluriques, mais aussi la détection d'une éventuelle atmosphère l'entourant, et enfin la mise en évidence d'éventuelles signatures de vie sous forme d'activité photosynthétique. Ce seront de véritables prouesses technologiques, qui devraient voler vers 2015 (Fig. 5). Elles mettront en œuvre la technique de l'imagerie par synthèse d'ouverture et augmenteront le contraste exoplanète-étoile par interférométrie en mode soustractif.

---

[1] Le 25 août 2004, l'équipe de l'Observatoire de Genève annonçait la découverte d'une planète dont la masse est égale ou supérieure à 14 fois la masse de la Terre, suivie une semaine plus tard par des annonces similaires faites par des équipes américaines. Dans les trois cas, la planète la plus légère fait partie d'un système de plusieurs planètes.

Figure 5 : Vue d'artiste de l'armada constituant la mission *Darwin* de l'ESA. Dans une étude de faisabilité réalisée par Alcatel Space Industries, elle est constituée de 6 satellites d'observation portant des télescopes de 1.5 m de diamètre, d'un satellite foyer où les faisceaux sont recombinés, et enfin d'un satellite de télécommunications relayant les informations vers la Terre. L'ensemble des satellites, dont les positions relatives sont contrôlées par faisceau laser, est positionné au point de Lagrange L_2 du système Terre-Soleil, situé à environ 1.5 millions de kilomètres de la Terre, dans la direction opposée à celle du Soleil.

Copyright : Alcatel Space Industries **Permission to reproduce this picture must be sought from the makers, Alcatel Space Industries, in Cannes, France. The person to contact is Dr Glenn Lund (glenn.lund@space.alcatel.fr).**

Le principe de la méthode est présenté à la Fig. 6. Deux télescopes séparés d'une distance *D* observent simultanénement une étoile abritant une exoplanète, et leurs faisceaux sont recombinés de manière cohérente, mais après passage dans un déphaseur qui introduit un décalage d'exactement une demi longueur d'onde sur les trajets optiques suivis par les deux faisceaux. En d'autres termes, les faisceaux arrivant en concordance de phase sur l'axe optique de l'instrument seront en opposition de phase au moment de leur co-addition dans le détecteur. Si l'étoile est placée exactement sur l'axe optique, sa lumière disparaîtra donc du détecteur, tandis que l'exoplanète, située dans une direction faisant un angle θ avec l'axe optique, pourra voir son intensité renforcée au contraire si les paramètres de l'instrument sont choisis tels que les deux faisceaux en provenance de l'exoplanète arrivent approximativement en opposition de phase sur les deux télescopes, soit $\varphi = \theta D/\lambda \sim \pi$. Après passage dans le déphaseur, ils se retrouvent donc en concordance de phase sur le détecteur ! On peut espérer ainsi mettre en évidence la lumière de l'exoplanète à condition que la lumière de l'étoile puisse être annulée à mieux qu'une partie pour 10^5 (Cette technique sera testée d'ici 2008 sous la forme d'un prototype au sol dans le projet conjoint ESO/ESA nommé GENIE et utilisant les télescopes VLT de 8 mètres de diamètre). La lumière de l'exoplanète est alors envoyée dans un spectrographe infra-rouge qui permettra de savoir si de l'ozone O_3 est présent dans l'atmosphère (éventuelle) de l'exoplanète tellurique (Fig. 7). Pour être complet, signalons encore que la signature spectrale d'une atmosphère composée notamment d'oxygène et de carbone a déjà été observée autour de l'exoplanète orbitant autour de l'étoile HD 209458 [11],

mais il s'agit d'une exoplanète géante gazeuse pour laquelle l'existence d'une atmosphère fait peu de doute, à l'inverse des planètes telluriques.

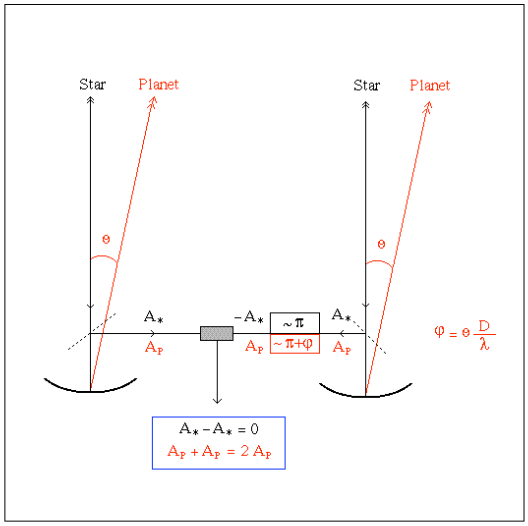


Figure 6 : Principe de l'interféromètre en mode soustractif mis en œuvre par les missions *Darwin* (ESA) et *Terrestrial Planet Finder* (NASA ; voir texte).

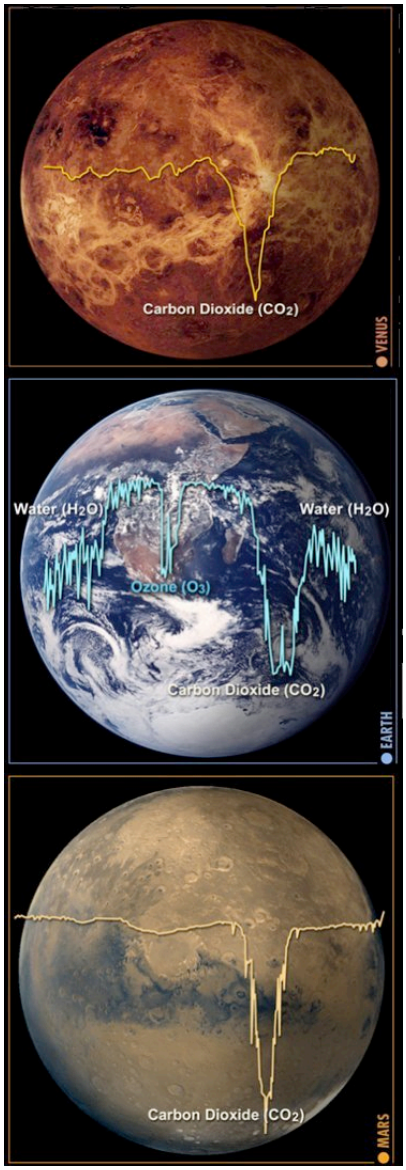
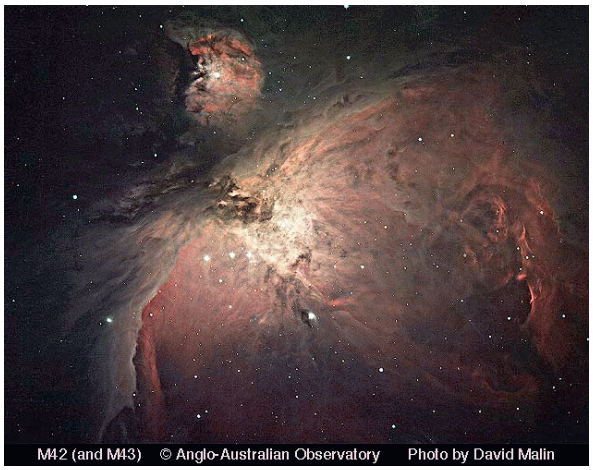


Figure 7 : Spectres des atmosphères de Vénus, la Terre et Mars dans la gamme spectrale allant de 5 à 30 microns. Il apparaît clairement de cette comparaison que l'atmosphère de la Terre se distingue par la présence de bandes de vapeur d'eau et d'ozone, considéré comme un excellent indicateur d'activité photosynthétique et donc de vie.
Crédit : Darwin/ESA

Le développement de la vie ailleurs dans l'univers ?

Les considérations précédentes sur la recherche d'une signature spectrale attribuable à la vie dans l'atmosphère d'exoplanètes telluriques encore à découvrir conduisent naturellement à la question du développement de la vie ailleurs dans l'univers. Des ouvrages entiers ont été consacrés à ce sujet [12]. Nous nous limiterons donc ici à la discussion de l'évolution du concept de la panspermie, depuis sa proposition par S. Arrhenius dans la première décennie du 20e siècle, jusqu'à sa révision, à partir des années 1960, suite à la découverte de la présence des briques élémentaires de la vie, les acides aminés, dans des environnements extraterrestres, à savoir des météorites chondrites carbonées (apparentées à des noyaux cométaires, et dont la morphologie indique qu'elles ont été peu altérées par les processus

physico-chimiques qui ont modelé les corps solides du système solaire) et, plus récemment, peut-être au sein de nuages interstellaires, notamment dans la nébuleuse d'Orion (Fig. 8).



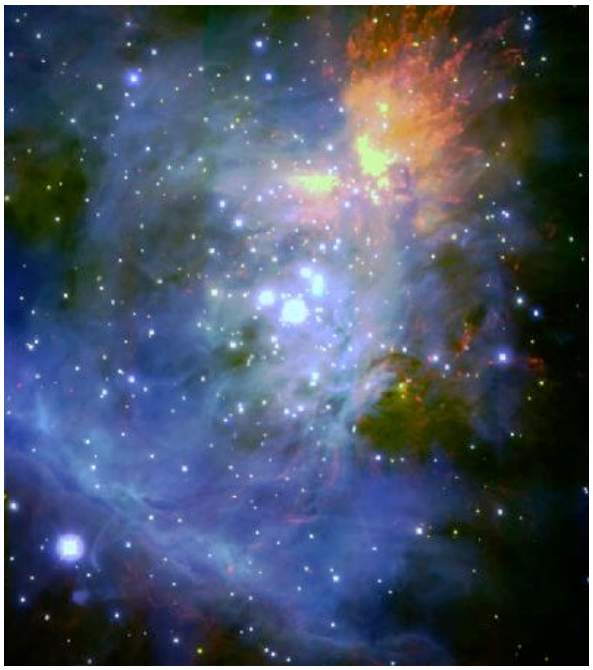


Figure 8 (en haut) : La grande nébuleuse d'Orion, photographiée en lumière visible.
Crédit : D. Malin, Anglo-Australian Observatory
(en bas) : Gros plan, en lumière infrarouge, sur la région centrale de la nébuleuse d'Orion, abritant le « Trapèze », un amas de plusieurs étoiles très jeunes. La nébulosité orange dans la partie supérieure est la Nébuleuse de Kleinman-Low, où la présence de glycine a été annoncée [19].
Crédit : Télescope Subaru, National Astronomical Observatory of Japan

Les nuages interstellaires sont constitués de gaz et de poussières et représentent de 20 à 30% de la masse de notre Galaxie. La majeure partie de ces nuages provient de matière éjectée par les étoiles en fin de vie, et servira de matière première à partir de laquelle se formeront les générations suivantes d'étoiles (avec leur cortège de planètes et comètes). Environ 1% de la masse de ces nuages (dont la masse totale peut atteindre plusieurs millions de fois la masse du Soleil) se trouve sous la forme de grains de poussières dont la taille est de l'ordre du micromètre. La surface de ces grains peut servir de catalyseur pour de nombreuses réactions chimiques [13]. Certains parmi ces nuages sont relativement denses (10^4-10^8 atomes

d'hydrogène par cm^3) et très froids (10—30 K), de sorte que la composition de leur phase gazeuse ne peut être étudiée que via les transitions moléculaires (généralement rotationnelles) de faible énergie émises dans les domaines infrarouge, submillimétrique et radio. Des listes de molécules détectées dans les environnements interstellaires ou circumstellaires (c'est-à-dire dans la coquille de gaz et poussières entourant les étoiles en fin de vie éjectant leur enveloppe dans le milieu interstellaire) peuvent être consultés sur les sites http://www.ph1.uni-koeln.de/vorhersagen/molecules/
ou http://www.cv.nrao.edu/~awootten/allmols.html (voir aussi [13]). En août 2004, plus de 120 molécules, parmi lesquelles de nombreuses molécules organiques, étaient recensées. Ces résultats suscitent immanquablement la question du lien entre la présence de ces molécules organiques dans l'espace et l'apparition de la vie ailleurs dans l'univers. C'est sans conteste l'une des questions majeures auxquelles devront tenter de répondre les astronomes et biologistes du 21e siècle.

Dans sa forme initiale la plus dure (reprise plus récemment par Hoyle et Wickramasinghe [12] qui affirment que les grains responsables de l'extinction interstellaire sont en fait des bactéries), la théorie de la panspermie affirme que des organismes vivants microscopiques (bactéries ou virus) furent déposés sur la Terre par des comètes [14], des météorites, des poussières météoritiques ou même simplement poussées par la pression de radiation des étoiles d'abord, du Soleil ensuite (pour une revue récente de cette question, voir [15]). La principale objection émise contre cette théorie tout au long de la première moitié du 20e siècle, fut la supposition que ces organismes vivants, fussent-ils élémentaires, ne survivraient vraisemblablement ni aux grands froids, ni au vide poussé, ni aux radiations cosmiques, X et ultraviolette présentes dans le milieu interstellaire (cette objection classique est cependant réfutée par une analyse plus moderne présentée en [16]). A partir des années 1960, la théorie de la panspermie refait surface cependant, mais dans une version fortement amendée stipulant que ce sont les briques élémentaires de la vie – les acides aminés et les sucres – et non les organismes vivants eux-mêmes qui ont ensemencé la Terre. Cette suggestion fait suite à la découverte dans la chondrite carbonée Murchison (tombée à proximité du village australien éponyme en septembre 1969) de plusieurs dizaines d'acides aminés différents (voir références citées dans [17]), dont la plupart sont rares sur la Terre (de sorte que leur présence dans Murchison ne peut donc résulter d'une contamination par de la matière organique terrestre).

En outre, les acides aminés ainsi que les nombreuses autres classes de molécules organiques découvertes dans la météorite Murchison [13] sont plus riches en deutérium que leurs équivalents terrrestres et possèdent également un rapport isotopique $^{12}C/^{13}C$ différent de la valeur solaire, ce qui plaide largement en faveur d'une origine interstellaire de ces molécules. En effet, la très faible température régnant dans les nuages interstellaires denses (de l'ordre de 10 K) permet à des processus opérant à la surface de grains d'augmenter le contenu moléculaire en deutérium au détriment de l'hydrogène [13]. Il est vraisemblable que le parcours de ces molécules des nuages interstellaires aux chondrites carbonées s'effectue via la surface de grains de poussières du milieu interstellaire qui furent incorporés à la nébuleuse protosolaire, et de là aux corps parents qui donneront naissance aux comètes et aux chondrites carbonées. Plusieurs possibilités sont envisageables quant aux mécanismes de synthèse des acides aminés [18], dont tous les précurseurs sont par ailleurs observés dans le milieu interstellaire (HCN, ammoniac NH_3 et composés carboxyles). L'une d'elles est le déroulement de réactions organiques en milieu aqueux dans le corps parent, au cours de la formation du système planétaire, lorsque fond la glace d'eau contenue dans ce corps parent sous l'effet de la chaleur de l'étoile en gestation. Une autre théorie, confortée par des expériences en laboratoire, plaide en faveur de la formation des acides aminés lors de

l'interaction de la lumière ultraviolette avec les manteaux organiques recouvrant les grains interstellaires. En vertu des considérations qui précèdent relatives aux possibles modes de formation des acides aminés, il n'est pas garanti que ceux-ci résideront à un moment ou un autre dans la phase gazeuse du milieu interstellaire. Leur signature spectroscopique y est pourtant activement recherchée depuis de nombreuses années, et dans le passé, plusieurs annonces de découverte de la glycine ont fait l'objet de vives controverses sans jamais recueillir cependant l'adhésion totale de la communauté astronomique [19].

Remarquons pour terminer cette discussion qu'un argument intéressant en faveur de la présence des acides aminés dans le milieu interstellaire (éventuellement à la surface de grains), avant leur incorporation dans la nébuleuse proto-solaire, est fourni par la détection d'un excès énantiomérique de 2 à 9% en faveur de l'isomère L au sein des acides aminés de Murchison (voir références citées en [17]). Puisque les quatre groupes chimiques liés à l'atome de carbone ne sont pas situés dans un plan, mais adoptent une géométrie tétrahédrique (Fig. 9), tous les acides aminés sont chiraux (à l'exception de la glycine, l'acide aminé le plus simple, dont le groupe R est un atome d'hydrogène), c'est-à-dire possèdent deux structures possibles, non superposables, qui sont l'image miroir l'une de l'autre. Quelle est l'origine de cet excès énantiomérique observé au sein des acides aminés de Murchison ? Beaucoup de théories ont été proposées à cet effet [17]. Parmi celles-ci, la photolyse asymétrique de l'acide aminé par de la lumière polarisée circulairement, qui détruit sélectivement l'un des deux énantiomères, connaît un regain d'intérêt suite à la détection de pareille lumière dans l'un des nuages associé au complexe d'Orion (Fig. 8 ; [17]).

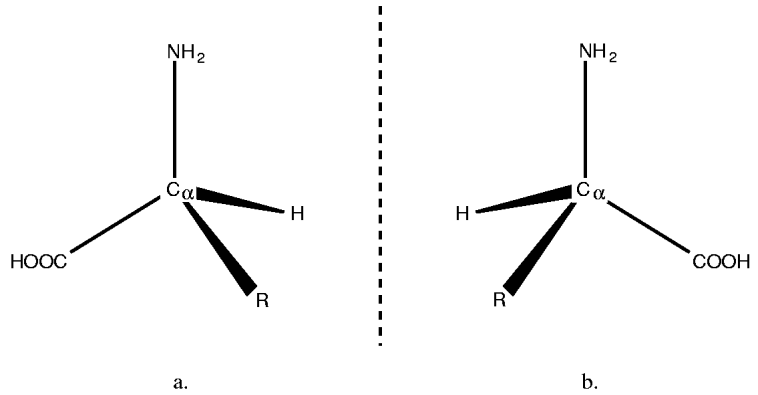


Figure 9. Les deux énantiomères d'un acide aminé : (a) acide aminé L (b) acide aminé D

Le développement de l'intelligence ailleurs dans l'univers ?

Interrogé en 1950 sur son opinion quant à l'existence possible d'extraterrestres, Fermi répondit *Mais où sont-ils ?* Par ces mots restés célèbres, il voulait exprimer que son estimation grossière du nombre de civilisations technologiquement très avancées dans notre Galaxie (qui abrite environ 200 milliards d'étoiles) paraissait suffisamment élevé pour rendre plausible la colonisation de la Terre par des entités extraterrestres. Et Fermi s'étonnait de n'en pas trouver trace ici bas (laissant de côté la problématique des Objets Volants Non Identifiés !)... Quelques années plus tard, l'astronome F. Drake, initiateur du programme SETI de recherche d'intelligence extraterrestre (par l'écoute systématique du ciel sur plusieurs milliards de canaux radio simultanés; voir *http://setiathome.ssl.berkeley.edu*) estimait que la durée de vie moyenne de ces civilisations constituait une bonne approximation de leur nombre dans notre

Galaxie (voir encadré au sujet de la formule de Drake). Ainsi, à supposer qu'une hypothétique civilisation capable de développer une technologie électromagnétique existe en moyenne pendant L = 10000 ans, il doit y en avoir de l'ordre de 10000 dans notre Galaxie (en adoptant 1 pour tous les facteurs de l'équation de Drake, à l'exception de L). Sachant que le disque galactique possède un diamètre de l'ordre de 100 000 années-lumière (1 année-lumière = 1 a-l = 9.46 10^{15} m), cela impliquerait une civilisation dans un rayon de 1000 a-l ! Il y a approximativement un million d'étoiles de type solaire dans un tel volume…

La formule de Drake (1971), ou comment fractionner notre ignorance

$$N = R\, f_p\, n_e \quad f_v\, f_i \quad f_c\, L$$

facteurs astronomiques — biologiques — sociologiques

où

N = nombre de civilisations, ayant développé une technologie électromagnétique, actuellement présentes dans notre Galaxie

R = rythme annuel moyen de formation d'étoiles dans la Galaxie (de l'ordre de 1 par an)

f_p = fraction des étoiles de la Galaxie abritant un système planétaire (au moins 10 à 20% pour les étoiles de type solaire)

n_e = nombre moyen de planètes par système

f_v = fraction des planètes abritant de la vie

f_i = fraction des planètes abritant la vie où l'intelligence s'est développée

f_c = fraction des planètes abritant une vie intelligente ayant développé des moyens de télécommunications éléctromagnétiques

L = durée durant laquelle ces civilisations restent détectables (L > 100 ans, à en juger par l'Humanité)

Mais combien de temps une civilisation technologique reste-t-elle électromagnétiquement bruyante ? Toutes les civilisations, même intellectuellement brillantes, ne sont pas nécessairement bruyantes[2] (imaginons des civilisations méditatives plutôt que technologiques,

[2] A cet égard, il convient de souligner que les télécommunications terrestres mettent en œuvre de plus en plus fréquemment des techniques de modulation à étalement de spectre. La théorie de l'information de Shannon montre en effet que ces techniques sont très efficaces en termes d'insensibilité au bruit. Le décodage d'un tel signal impose la connaissance d'une `clé'. Avant démodulation au moyen de cette clé, le signal peut apparaître presqu'exactement semblable à du bruit et dès lors passer inaperçu dans le cadre d'un programme SETI !

à l'instar de l'Orient terrestre, ou d'autres dominées par l'intelligence artificielle…). Dans le cadre de notre civilisation technologique occidentale (qui est aussi la plus vulnérable, par suite d'une destruction de son eco-système ou par auto-destruction nucléaire), les émetteurs les plus puissants sont les radars météorologiques et de défense (de l'ordre de 10 GW de puissance isotrope équivalente ; voir Table 2), si l'on exclut les rares occasions pendant lesquelles le radio télescope d'Arecibo fonctionne en émission plutôt qu'en réception (Table 2). Ce fut le cas à deux reprises en 1974 lorsqu'un signal de 1679 bits codant diverses informations essentielles relatives à la vie terrestre [20] fut envoyé vers l'amas globulaire Messier 13, où il arrivera dans 25 000 ans et pourrait être detecté – voire décodé – par d'éventuelles civilisations abritées par d'éventuelles planètes orbitant autour de l'une ou l'autre des centaines de milliers d'étoiles constituant cet amas globulaire. Le radiotélescope est également utilisé en mode radar pour sonder la surface des planètes du système solaire.

Le radiotélescope d'Arecibo possède alors une puissance émettrice isotrope équivalente de 1 TW. Seul un signal d'une telle puissance pourrait être détecté par ce même radiotélescope (à condition cependant que sa bande passante soit très étroite ; Table 2) sur des distances de plusieurs milliers d'a-l, représentatives de la séparation entre civilisations estimée par la formule de Drake. Le second type de signal détectable sur de relativement grandes distances (de l'ordre de 1 a-l), quoiqu'encore inférieures à la distance nous séparant de l'étoile la plus proche (Table 2), est l'onde porteuse d'un signal TV UHF.

Les chances de détection paraissent donc bien minces, même si le bruit de fond cosmique apparaît spécialement faible dans le domaine des micro-ondes qui offrent donc les meilleures perspectives de détection (Fig. 10). Comme le montrent les Tables 1 et 2 , les capacités de détection actuelles restent en fait largement en-dessous de la sensibilité nécessaire pour détecter des signaux électromagnétiques du type de ceux produits quotidiennement sur Terre.

Table 1 : Propriétes de quelques programmes SETI radio

Projet	Date	Gamme de fréquences (MHz)	Nombre d'étoiles ou de fraction du ciel	Seuil à détection ($W\ m^{-2}$)	PIE à 4 a-l (W)	PIE 1000 a-l (W)
Square Kilometer Array	2010	150 – 20000	100 000	$8\ 10^{-29}$	$1\ 10^{6}$	$9\ 10^{10}$
Phoenix	1995-2004	1200 – 3000	700	$1\ 10^{-26}$	$2\ 10^{8}$	$1\ 10^{13}$
Serendip IV	1996-	1420 – 1620	28%	$1\ 10^{-24}$	$2\ 10^{10}$	$1\ 10^{15}$
Serendip III	1992-1998	424 – 436	28%	$3\ 10^{-25}$	$5\ 10^{9}$	$3\ 10^{14}$
META	1985-1995	1418 – 1421	68%	$2\ 10^{-23}$	$3\ 10^{11}$	$2\ 10^{16}$
Ohio Sate Univers.	1973-1986	1420.4	68%	$1\ 10^{-21}$	$2\ 10^{14}$	$1\ 10^{19}$
OZMA	1960	1420 – 1420	2 (τ Cet, ε Eri)	$4\ 10^{-22}$	$8\ 10^{12}$	$4\ 10^{17}$

1 a-l = 1 année-lumière = $9.46\ 10^{15}$ m.
PIE = puissance *isotrope* équivalente que doit posséder un émetteur à la distance de 4 a-l (soit l'étoile la plus proche) ou 1000 a-l (contenant de l'ordre de un million d'étoiles de type solaire) pour être détecté. A titre indicatif, les puissances isotropes équivalentes *PIE* d'un certain nombre d'émetteurs terrestres sont donnés dans la Table 2.
Le seuil de détection *Sd* est relié à la distance *R* de la source et à sa puissance isotrope équivalente par la relation $S_d = PIE / (4\pi R)^2$.

Adapté de http://www.ras.ucalgary.ca/SKA/science/node33.html

Table 2 : Seuils de distance pour la détection de différents types d'émissions radioélectriques

Le seuil de distance R_d correspondant à la détection, avec un rapport signal/bruit *SNR,* d'un signal de puissance isotrope équivalente *PIE* (W), s'obtient à partir des considérations suivantes.

Soit *Pt* la puissance (W) émise par une antenne directionnelle de gain *Gt* dans une bande de fréquence de largeur *Bt* (Hz). Le gain de l'antenne (> 1) correspond, *grosso modo*, au rapport entre 4π stéradians et l'angle solide dans lequel rayonne l'antenne ; plus précisément, $Gt = Aet\ (4\pi) / \lambda^2$, où *Aet* est la surface effective de l'antenne émettant à la longueur d'onde λ. Par définition, la puissance *isotrope* équivalente vaut $PIE = Pt\ Gt$. La puissance *Pr* reçue par une antenne de surface effective *Aer* (et dont la bande passante $Br > Bt$) située à la distance R_d de la source s'exprime simplement par

$$Pr = Aer\ PIE / (4\pi\ R_d^2),$$

avec $Aer = \eta_r \pi\ d_r^2 / 4$,

où d_r est le diamètre de l'antenne réceptrice et η_r son efficacité (≤ 1).

Cette puissance reçue ne sera détectée que si le rapport signal sur bruit associé *SNR* est supérieur à l'unité. Deux sources de bruit sont présentes dans le cas considéré. D'une part, le bruit poissonien lié au nombre fini de photons détectés et associés à la puissance *Pr*, et d'autre part le bruit thermique *Pb* du système récepteur, auquel s'ajoute celui du fond de ciel comme représenté à la figure 10. Le bruit thermique *Pb* est décrit par la température T_{sys} du corps noir qui rayonnerait, par unité de fréquence et de surface, la même puissance que le système, soit $Pb = k\ T_{sys}\ Br$, où $k = 1.38\ 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann, et *Br* (Hz) est la bande passante du récepteur. Ce facteur *Br* s'avèrera jouer un rôle capital dans la détectabilité du signal. Le rapport signal sur bruit s'exprime alors

$$SNR = Pr\ G_i / Pb,$$

où le facteur G_i représente le *gain d'intégration* correspondant à la réduction du bruit après intégration du signal. En résumé,

$$R_d^2 = PIE\ Aer\ G_i / (4\pi\ SNR\ Br\ k\ T_{sys}) \equiv PIE / (4\pi\ S_d),$$

où le seuil S_d introduit dans la Table 1 peut se ré-exprimer en termes des paramètres du système comme suit :
$S_d = SNR\ Br\ k\ T_{sys} / (Aer\ G_i)$

Pour fixer les idées, on supposera que $SNR = 3$, $G_i = 1$, et que l'antenne réceptrice est similaire à celle d'Arecibo, soit $d_r = 305$ m, $\eta_r = 0.7$ conduisant à $Aer = 51\ 143.2$ m^2. Dans ces conditions, la relation ci-dessus devient

$$\boxed{R_d\,(\text{a-l}) = 1.05\ 10^{-3}\ [\ PIE\ (\text{W}) / (Br\ T_{sys}(\text{K})\ )\ ]^{1/2}}$$

L'application de cette relation à quelques types d'émissions radioélectriques terrestres est donnée dans le tableau ci-dessous.

Source	Gamme de fréquences	Bande passante (Br)	Température du système + ciel (Fig.10) (T_{sys}, K)	*PIE* (W)	Seuil de détection (R_d)
Radio AM (signal)	530 – 1600 kHz	10 kHz	300	10^5	12 UA
Radio AM (porteuse)	530 – 1600 kHz	1 Hz	300	10^5	1200 UA
Radio FM	88 – 108 MHz	150 kHz	100	$5\ 10^6$	38 UA
Image TV UHF	470 – 806 MHz	6 MHz	50	$5\ 10^6$	9 UA
Porteuse TV UHF	**470 – 806 MHz**	**0.1 Hz**	**50**	**$5\ 10^6$**	**1 a-l**
Porteuse Pioneer 10	2.295 GHz	1 Hz	20	$3.4\ 10^4$	0.04 a-l
Radar météo	2.8 GHz	0.63 MHz	20	$3.2\ 10^{10}$	0.05 a-l
Arecibo (émetteur)	**2.38 GHz**	**0.01 Hz**	**20**	**10^{12}**	**2343 a-l**

1 a-l = 1 année-lumière = 9.46 10^{15} m = 63235 UA
1 UA = 1 unité astronomique de distance = distance moyenne Terre – Soleil = 1.496 10^{11} m
A titre de comparaison, le demi-grand axe de l'orbite de Pluton s'élève à 39.4 UA.

Adapté de [21]

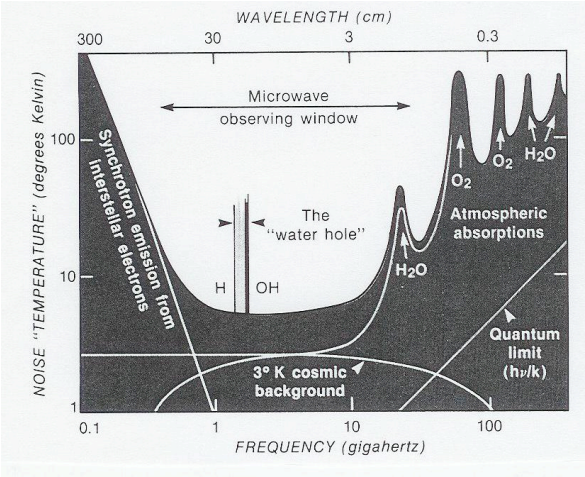


Figure 10. Les fréquences radio entre 1 et 10 GHz (la « fenêtre des micro-ondes ») sont les meilleures pour les télécommunications interstellaires. En effet, les fréquences plus basses sont contaminées par le bruit des électrons interstellaires émettant du rayonnement synchroton, tandis que les fréquences plus élevées sont absorbées par l'atmosphère terrestre. Dans la « fenêtre des micro-ondes », le rayonnement peut traverser la Galaxie sans être notablement absorbé. Nichées au sein de cette fenêtre se situent les émissions de l'hydrogène neutre (la raie à 21 cm) et du radical OH, qui pourraient baliser des fréquences de communication interstellaire universellement reconnues.
En ordonnée, l'intensité du bruit I_ν [puissance reçue par unité de fréquence dans l'intervalle (ν, ν+dν), par unité d'angle solide et par unité de surface] est exprimée en termes de température de brillance, soit la température T_b du corps noir tel que $I_\nu = B_\nu(T_b)$.
[Crédit : NASA SP-419, The Search for Extraterrestrial Intelligence]

Le principe des différents programmes SETI (dont une description succincte peut être trouvée dans la Table 1 ; on notera, depuis lors, l'avènement de programmes SETI *optiques*, même si les perspectives en termes d'absorption du signal sur de longues distances galactiques sont bien moins favorables que dans la gamme des micro-ondes) est de rechercher des signaux quasi monochromatiques ($\Delta\nu$ < 1 Hz, à comparer à 300 Hz pour les signaux naturels les plus étroits, en provenance des masers cosmiques), sur plusieurs milliards de canaux simultanés ! La fréquence d'un tel signal doit lentement dériver, par effet Doppler, parce que la projection de la vitesse de la Terre (ainsi que celle de la planète émettrice !) sur la ligne de visée varie lentement, par suite de sa rotation diurne et de sa révolution autour du Soleil. Un exemple de détection (d'un signal d'origine *humaine*, quoique situé à plus de 10 milliards de kilomètres de la Terre – celui envoyé par l'émetteur de quelques kilowatts de puissance isotrope équivalente de la sonde Pioneer 10, actuellement situé au-delà de l'orbite de Pluton) est présenté à la Fig. 11. Seulement deux signaux suspects ont été enregistrés, l'un en 1977 et l'autre très récemment [22]. En 1977, le radiotélescope *Big Ear* de la *Ohio State University* (Table 1) capte un signal (baptisé depuis *Wow !* en référence au commentaire inscrit par son découvreur en marge du tracé) qui possède toutes les caractéristiques attendues (quoique son

origine humaine n'ait jamais pu être éliminée formellement : la seule possibilité semble être celle d'un satellite militaire secret en orbite solaire émettant illégalement à une longueur d'onde proche de celle de la raie de l'hydrogène à 21 cm, pourtant réservée par traités internationaux à la recherche astronomique). Malheureusement, malgré de nombreuses écoutes ultérieures de cette même région du ciel, ce signal ne s'est jamais plus reproduit. Il n'a donc pas conduit au déclenchement des protocoles d'annonce publique d'une détection positive (voir http://www.seti.org/science/principles.html)!

Plus récemment (août-septembre 2004), l'Institut SETI a annoncé avoir détecté à trois reprises un signal en provenance d'une région du ciel à la limite des constellations du Bélier et des Poissons (où aucune étoile n'est observée à moins de 1000 a-l !), mais ce signal présente des caractéristiques inattendues, comme une dérive très rapide en fréquence (de 8 à 37 Hz/s ; à titre de comparaison, un signal émis depuis la Terre en rotation dériverait d'environ 1.5 Hz/s) mais qui débute à chaque fois exactement à la fréquence de la raie d'hydrogène à 1420 MHz. Il convient donc encore de rester très prudent avant de conclure à la détection d'ET !

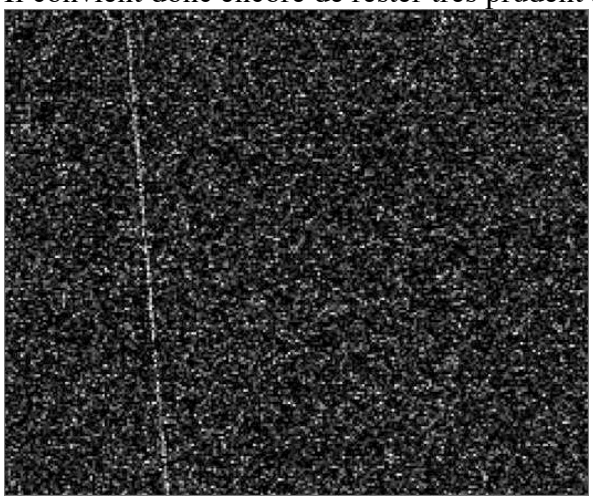


Figure 11. Le signal reçu de la sonde Pioneer 10 lancée en mars 1972 à destination de Jupiter. En abscisse, chaque pixel représente un canal de fréquence, tandis que le temps figure en ordonnée. L'intensité du signal est codée en échelle de gris. La dérive du signal en fréquence, due à l'accélération de la Terre (rotation et révolution autour du Soleil), est clairement visible. Chaque nuit, ce signal (émis par un émetteur de 1.6 kW de puissance isotrope équivalente situé à 10 milliards de kilomètres de la Terre) est observé afin de s'assurer du bon fonctionnement des équipements.
Crédit : Jodrell Bank Observatory

Le rôle de la conscience dans l'univers ?

> [It is possible that the study of the physical world] *will lead back, in some now-hidden way, to man himself, to conscious mind, tied unexpectedly through the very acts of observation and participation to partnership in the foundation of the universe.*
>
> **J. A. Wheeler,** "The Universe as Home for Man," *American Scientist,* p. 683, Nov. - Dec. 1974.

Could a universe exist without any conscious inhabitants whatever ? Are the laws of physics specially designed in order to allow the existence of conscious life ? Is there something special about our particular location in the universe, either in space or in time ?

R. Penrose, *The Emperor's New Mind*, Penguin Books (New York), 1989

D'une certaine manière, le Principe Anthropique [9] peut être ressenti comme l'antithèse du principe copernicien. C'est une tentative de réappropriation par les physiciens du concept de conscience et de son rôle dans l'univers, après qu'elle ait été chassée du cadre de la physique par Descartes qui en a exclut l'observateur (et sa conscience). L'étude de la conscience a depuis lors été l'apanage des théologiens ou des philosophes (sur le plan théorique), des mystiques (sur le plan expérimental) et, beaucoup plus récemment, des chercheurs en neurosciences.

L'approche cartésienne a largement fait ses preuves dans l'étude du monde matériel, quoique les difficultés dans l'interprétation de la mécanique quantique aient clairement montré les limites de la dualité observateur – système observé. Par analogie, la description d'un ordinateur en termes de sa quincaillerie et des courants qui le parcourent serait une vision fondamentalement limitée de sa nature. Cette vision peut difficilement espérer appréhender le logiciel qui s'y exécute – et l'intention qui le soutend –, ce qui représente pourtant l'essence même de l'ordinateur. Les mystiques, surtout orientaux, ont pourtant été très loin dans l'étude expérimentale de la conscience par l'introspection et la méditation [23]. Les physiciens peuvent-ils se la réapproprier? Y aurait-il une loi de conservation pour la conscience, au même titre que pour la masse-énergie et la charge électrique ? Faut-il, comme le suggère C. de Duve, considérer la pensée comme un attribut supplémentaire de la matière (au même titre que sa charge, sa masse…)? La conscience humaine est-elle le dernier stade de l'évolution ? L'intelligence artificielle prendra-t-elle un jour le relais ?

Gageons que ces questions seront appelées à jouer un rôle de plus en plus central dans la science du 21e siècle, puisque, selon les mots de C. de Duve [24], *il n'existe pas dans l'Univers connu, de mystère plus grand que la pensée humaine, mis à part l'Univers lui-même*.

Références

[1] La présence d'oxygène moléculaire (que ce soit sous la forme de dioxygène O_2 ou d'ozone O_3) dans une atmosphère planétaire est considéré comme une excellente signature de vie, à tout le moins d'une vie développant une activité photosynthétique. En effet, en l'absence d'une source permanente d'oxygène, une atmosphère planétaire ne peut conserver longtemps de fortes concentrations en oxygène comme c'est le cas pour la Terre actuellement, puisque celui-ci serait très rapidement consommé par les réactions d'oxydation ayant lieu à la surface des roches. Voir Mayor M., Frei P.-Y., Les Nouveaux Mondes du Cosmos, Editions du Seuil, 2001.
[2] Le contexte dans lequel cette découverte eut lieu est narré par Michel Mayor lui-même dans son livre (avec P.-Y. Frei, *op. cit.*). La découverte proprement dite fut annoncée par Mayor et Queloz dans *Nature*, 378, 355 (1995).
[3] L'épopée de la découverte des exoplanètes est décrite de manière romanesque par Elisa Brune dans *Les Jupiters Chauds*, Belfond (Paris), 2002.
[4] La liste la plus récente des exoplanètes peut être trouvée sur le site http://www.obspm.fr/encycl/f-encycl.html, régulièrement mis à jour.
[5] Les études les plus récentes [Santos et al., *Astron. Astrophys.* 398, 363 (2003)] montrent que la présence de planètes géantes est favorisée par une métallicité élevée (la métallicité caractérise la teneur de l'étoile en éléments plus lourds que l'hélium) : la fréquence de planètes géantes autour d'étoiles deux fois plus riches en métaux que le Soleil atteint 20 %,

tandis que cette fréquence tombe à zéro pour des étoiles 3 fois moins riches en métaux que le Soleil.

[6] La théorie de Laplace, énoncée en 1796, est décrite par Woolfson M.M., *Astron. Geophys.* 41, 12 (2000). Voir aussi [7].
[7] Lin D.N.C., Bodenheimer P., Richardson D.C., 'Orbital migration of the planetary companion of 51 Pegasi to its present location'. *Nature*, 380, 606 (1996).
[8] Jorissen A., Mayor M., Udry S., `The distribution of exoplanet masses', *Astron. & Astrophys.* 379, 992 (2001).
[9] J.D. Barrow, F.J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press (New York), 1986.
[10] Perryman M., *Rep. Prog. Phys.* 63, 1209 (2000). Voir aussi http://www.obspm.fr/encycl/searches.html
[11] Vidal-Madjar et al., 'Detection of oxygen and carbon in the hydrodynamically escaping atmosphere of the extrasolar planet HD209458b', *Astrophys. J.* 604, L69 (2004)
[12] De nombreux ouvrages traitant d'exobiologie (ou bioastronomie !) sont désormais disponibles, parmi lesquels :

- J. Oró et al., *Cosmochemical Evolution and the Origins of Life*, Reidel, 1974.
- R. Shapiro, *L'origine de la vie : Le sceptique et le gourou*, Flammarion (Paris), 1994.
- S.J. Dick, *The Biological Universe*, Cambridge University Press, 1996.
- D. Goldsmith, T. Owen, *The Search for Life in the Universe* (3rd edition), University Science Books, Sausalito (California), 2001.
- G. Horneck, C. Baumstark-Khan, editors, *Astrobiology – The Quest for the Conditions of Life*, Springer (Berlin), 2002

Pour une description plus complète de l'histoire du vivant, voir C. de Duve, *Poussière de vie*, Fayard (Paris), 1996.
Et enfin les ouvrages qui nourrissent la controverse : F. Hoyle, C. Wickramasinghe, *Lifecloud : The Origin of Life in the Universe,* J.M. Dent & Sons Ltd. (London), 1978 ; *Cosmic Life-Force*, J.M. Dent & Sons Ltd. (London), 1988.
Parmi les nombreux sites consacrés à l'exobiologie, mentionnons http://www.astrobiology.com
[13] Ehrenfreund P., Charnley S.B., 'Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets, and Meteorites : A Voyage from Dark Clouds to the Early Earth', *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 38, 427 (2000).
[14] La mission *Rosetta* de l'ESA (http://www.esa.int/science/rosetta), en route pour la comète Churyumov-Gerasimenko qu'elle devrait atteindre en novembre 2014, devrait permettre d'importants progrès en de domaine. De même, la mission *Stardust* de la NASA (http://stardust.jpl.nasa.gov) est passée à 236 kilomètres du noyau de la comète Wild 2 le 2 janvier 2004 pour collecter des particules dans son « aérogel », qui seront ramenées sur Terre en janvier 2006.
[15] Chyba C., Sagan C., 'Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules : an inventory for the origins of life', *Nature* 355, 125 (1992) ; Irvine W.M., 'Extraterrestrial Organic Matter : A Review', *Origins of Life and Evol. of the Biosphere* 28, 365 (1998).
[16] Horneck et al., in G. Horneck, C. Baumstark-Khan, editors, *Astrobiology – The Quest for the Conditions of Life*, Springer (Berlin), 2002.
[17] Cerf C., Jorissen A., 'Is amino-acid homochirality due to asymmetric photolysis in space ?, *Space Science Rev.* 92, 603 (2000). Aussi Jorissen A., Cerf C., *Origins of Life and Evol. of the Biosphere* 32, 129 (2002) ; Bailey et al., *Science* 281, 672 (1998).
[18] Greenberg J.M., in R.B. Hoover (ed.) *Instruments, Methods, and Missions for the Investigation of Extraterrestrial Microorganisms* (Proc. SPIE Vol. 3111), p. 226, 1997.

Ehrenfreund P., Charnley S. B., `Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets, and Meteorites: A Voyage from Dark Clouds to the Early Earth', *Annual Review of Astron. & Astrophys.* 38, 427 (2000). Blagojevic V., Petrie S., Bohme D.K., `Gas-phase syntheses for interstellar carboxylic and amino acids', *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* 339, L7 (2003).
[19] A propos de la controverse entourant la détection de glycine dans le milieu interstellaire, on notera que Miao et al., *Bull. Am. Astron. Soc.* 26, 906 (1994); Travis J., *Science* 264, 1668 (1994) ; Combes et al., *Astron. & Astrophys.* 308, 618 (1996), et plus récemment Hollis et al., *Astrophys. Journal*, 588, 353 (2003) ne détectent pas de trace de glycine dans les différents nuages interstellaires sondés, tandis que Kuan et al., *Astrophys. Journal* 593, 848 (2003) annoncent sa détection dans la nébuleuse Kleinman-Low associée au complexe d'Orion (Fig. 8). Cependant, un avis critique sur cette détection est émis par certains experts (voir http://www.ph1.unikoeln.de/vorhersagen/molecules/glycin.html) qui signalent que « the number of positively identified transitions reported by Kuan *et al.* is fairly large. Therefore, the report may be considered quite convincing. However, it was brought to our attention that there seem to be some inconsistencies in the intensities of the lines. In particular, some of the observed lines seem to be too weak by a substantial amount that seems to be incompatible with the derived abundances and rotational temperatures. This may cast doubt on the derived abundances and possibly even on the interstellar detection. At the moment it appears as if the publication of these reported inconsistencies will not settle the dispute of the glycine detection. Therefore, we would recommend reports on the detection or non-detection of glycine to be taken with a grain of salt. »
[20] D. Goldsmith, T. Owen, *The Search for Life in the Universe* (3rd edition), University Science Books, Sausalito (California), 2001, p. 501
[21] P. Horowitz, in : *Carl Sagan's Universe*, édité par Y. Terzian et E. Bilson, Cambridge University Press (Cambridge), p. 98 (1997) ; S.A. Kaplan (éditeur), *Extraterrestrial Civilizations : Problems of Interstellar Communication*, NASA TT F-631 (1971). Voir aussi J.D. Kraus, *Radio Astronomy*, Cygnus-Quasar Books (Powell, Ohio, USA ; 1986)
[22] A propos du signal *Wow !*, voir http://www.bigear.org/wowmenu.htm. A propos du signal annoncé en septembre 2004, voir *New Scientist,* September 4, 2004, p.6
[23] De nombreux ouvrages ont abordé les relations entre physique et conscience ou pensée, parmi lesquels D. Bohm, D.F. Peat, *La Conscience et l'Univers,* Editions du Rocher (2003) ; M. Bitbol, *Physique et Philosophie de l'Esprit,* Flammarion (2000) ;
R. Penrose, *Emperor's New Mind*, Penguin Books, 1989 ; B.A. Wallace, *Science et Bouddhisme*, Calmann-Lévy (1998) ; T.J. Farlane, *Einstein & Bouddha – Pensées Parallèles*, Publications Kunchab (Huy, Belgique ; 2002).
[24] C. de Duve, *Poussière de vie*, Fayard (Paris), 1996, p. 405.