



Malgré la découverte de nombreuses planètes extrasolaires, l'existence d'une civilisation extraterrestre dans notre région de la Galaxie serait peu probable.

Howard Smith

Avant la découverte de 51 Pegasi b, en 1995, nous ne connaissions aucune planète en orbite autour d'une autre étoile semblable au Soleil. À peine 16 ans plus tard, 570 planètes environ ont été caractérisées, et plus de 1 500 candidates proposées. Le rythme des découvertes d'exoplanètes s'est accéléré depuis le lancement du satellite européen CoRoT, en 2006, et, surtout, de la mission Kepler de la NASA, en 2009.

Les astrophysiciens ne sont pas les seuls à se passionner pour ces découvertes. Le public s'intéresse beaucoup aux planètes extrasolaires et à la possibilité qu'elles abritent la vie, voire des formes de vie intelligente. En 2010, la Société royale de Londres a parrainé un symposium inti-

mulé « La détection de la vie extraterrestre et ses conséquences pour la science et la société ». Les participants observaient que « s'il se révélait que nous ne sommes pas seuls dans l'Univers, cela bouleverserait la représentation que l'humanité se fait d'elle-même ».

La plupart des gens pensent que nous ne sommes pas seuls dans l'Univers. Certains analystes expliquent que le public veut croire aux extraterrestres car « ils viendraient de sociétés utopiques qui ne connaissent ni la guerre, ni la mort, ni la maladie » et qu'ils « pourraient aider l'humanité à surmonter ses problèmes ».

Les scientifiques eux-mêmes encouragent parfois cette vision sensationnaliste. L'astronome Ray Jayawardhana écrivait

ainsi en 2010 dans le *New York Times* que les gens ne devraient pas s'inquiéter de « la vie extraterrestre, surtout si elle maîtrise une technologie susceptible de nous faire sentir tout petits et insignifiants ». Mais ce scénario de science-fiction pourrait au contraire déresponsabiliser les gens et les rendre désinvoltes à l'égard d'autrui ou de notre planète !

L'étude des planètes extrasolaires (ou exoplanètes) apporte les premiers éléments concrets pour réévaluer l'hypothèse répandue selon laquelle la vie intelligente existe ailleurs dans l'Univers. Un raisonnement courant est que, puisque les exoplanètes sont légion, les civilisations extraterrestres doivent être nombreuses. Pourtant, l'un n'entraîne pas l'autre. Je pense pour ma part que ces données renforcent au contraire l'idée qu'il est très improbable qu'une civilisation extraterrestre plus ou moins semblable à la nôtre existe, du moins dans l'Univers proche.

Il serait ainsi plus pertinent de réfléchir à la place de l'humanité en la considérant comme une espèce rare et précieuse

l'Univers ?

L'ESSENTIEL

- ✓ La plupart des gens pensent qu'il existe des formes de vie intelligente dans l'Univers, avec qui nous pourrions communiquer.
- ✓ L'abondance des planètes extrasolaires découvertes renforce à première vue cette idée.
- ✓ Les planètes qui remplissent tous les critères sont cependant sans doute très rares.
- ✓ Il est improbable que d'autres civilisations existent dans notre voisinage galactique.

© 2008 Century Fox

dans l'Univers, ni négligeable ni cosmiquement insignifiante.

La vie – et en particulier la vie intelligente, pas juste des micro-organismes – devrait être omniprésente dans un univers aussi vaste et riche que le nôtre. Cet univers est sans doute rempli de planètes rocheuses (ou telluriques) abritant la vie. Peut-être même les êtres intelligents sont-ils le produit inévitable de la vie et de l'évolution. Telle est en tout cas la position classique, illustrée par Percival Lowell, astronome et fervent défenseur des canaux martiens, qui écrivait en 1908 : « Nous savons que la vie est une phase de l'évolution planétaire aussi inévitable que le quartz, le feldspath ou le sol azoté. Les uns comme les autres ne sont que les manifestations d'affinités chimiques. »

Nous savons aujourd'hui que les canaux de Mars n'étaient que des chimères. En 1993, dans l'ouvrage *The Search for Life in the Universe* (La recherche de la vie dans l'Univers), Donald Goldsmith et Tobias Owen présentaient cependant une vision moderne de la même idée : « Nous prévoyons que tous les systèmes planétaires

sont dotés d'un groupe de planètes intérieures rocheuses, avec des atmosphères engendrées par le dégazage et l'érosion, pour les mêmes raisons que [dans le Système solaire]. À en juger par notre propre exemple, il y a de bonnes chances pour que l'une de ces planètes intérieures soit en orbite autour de son étoile à la « bonne » distance [...]. Nous estimons cette proportion à une sur deux au moins. »

Seuls... en pratique

Aujourd'hui, cette vision semble elle aussi obsolète. La principale leçon de l'étude des planètes extrasolaires est en effet qu'il existe une incroyable diversité de systèmes planétaires, avec un éventail d'environnements bien plus vaste qu'on ne l'imaginait. Une cinquantaine de planètes de moins de 25 masses terrestres ont été détectées à ce jour. Les planètes de la taille de la Terre, susceptibles d'abriter de l'eau liquide et une atmosphère propice à la vie, se situent encore au-dessous du seuil de détection des instruments actuels ; mais d'ici quelques années, il est raisonnable

de penser qu'on en découvrira quelques-unes. On s'apercevra alors peut-être que notre Système solaire est représentatif de la moyenne. Toutefois, nous savons d'ores et déjà que certains systèmes planétaires n'ont rien à voir avec le nôtre. En attendant, ces résultats nous permettent de perfectionner les modèles de formation planétaire, et de mieux comprendre les planètes en général.

Avant d'aller plus loin, clarifions deux points. Tout d'abord, seule l'existence d'êtres intelligents m'importe dans cet article. Il n'est pas encore exclu que nous découvriions des formes de vie primitive sur Mars, voire des formes de vie pluricellulaire sur des planètes extrasolaires proches. Ces découvertes seraient

1. LE FILM LE JOUR OÙ LA TERRE S'ARRÊTA (*ici, la version de 2007*) illustre le désir du public de croire en l'existence de civilisations extraterrestres utopiques qui aideraient l'humanité à surmonter les difficultés auxquelles elle est confrontée. Mais si nous sommes seuls dans l'Univers, en prendre conscience nous aiderait à apprécier le caractère précieux de l'humanité et de notre planète.

L'AUTEUR



Howard SMITH est astrophysicien au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian de Cambridge, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

✓ SUR LE WEB

Société française d'exobiologie : <http://www.exobiologie.fr/>

L'Encyclopédie des exoplanètes : <http://exoplanet.eu/>

Institut SETI : <http://www.seti.org>

La mission Kepler de la NASA : <http://kepler.nasa.gov/>

assurément révolutionnaires et nous éclaireraient sur l'apparition et l'évolution de la vie sur Terre. Mais faute d'une espèce douée de pensée consciente et apte à communiquer, nous serons toujours seuls dans l'Univers, sans personne avec qui interagir.

La vie intelligente signifie ici capable de communiquer d'une étoile à une autre ; cela implique la maîtrise d'une technologie équivalente à celle de la radio. À l'aune de cette définition, notre civilisation n'a qu'une centaine d'années. Si la vie intelligente est fréquente dans un Univers âgé de 13,7 milliards d'années, alors nous en sommes l'une des formes les plus jeunes ! Cependant, comme le soulignait le physicien italien Enrico Fermi dans son célèbre « paradoxe », la vie intelligente ne doit pas être monnaie courante dans l'Univers, sinon, pourquoi n'en avons-nous jamais découvert ?

Le second point découle de deux caractéristiques de notre monde qui étaient inconnues au début du XX^e siècle. D'une part, aucun signal ne peut dépasser la vitesse finie de la lumière. D'autre part, l'Univers est en expansion : les galaxies s'éloignent de nous, et ce d'autant plus vite qu'elles sont distantes.

Cela devrait refroidir l'enthousiasme de certains physiciens qui avancent que dans un univers infini ou dans des univers multiples, même si la vie intelligente est rare, elle existe quelque part, car tout scénario, même extrêmement peu probable, est réalisé.

Cette hypothèse est en effet intéressante, mais inopérante en pratique. L'Univers est peut-être infini, mais nous ne pouvons pas recevoir d'information de la plus grande partie de ce monde : notre vision se limite à l'horizon cosmique, c'est-à-dire la distance qu'a pu parcourir la lumière depuis le Big Bang. Cet horizon s'élargit avec le temps, mais attendre n'arrangera rien, car avec l'expansion cosmique, les galaxies reculées s'éloignent plus vite que l'horizon ne s'étend. Pour ce qui est d'envoyer des messages, la situation est encore pire ; la lumière envoyée aujourd'hui de la Terre ne pourra jamais atteindre des galaxies dont la lumière a mis dix milliards d'années pour nous parvenir. Ces galaxies s'éloignent de plus en plus rapidement et sont à jamais hors d'atteinte.

La vitesse finie de la lumière pose aussi des limites pratiques pour les étoiles plus proches. La plupart des étoiles de la Voie lactée, et leurs milliards de planètes présumées, se trouvent à plusieurs dizaines de milliers d'années-lumière. Il faudrait donc autant d'années avant que des extraterrestres reçoivent nos signaux, et encore le même temps pour recevoir une réponse.

La vie en équation

Nous n'avons pas besoin d'attendre aussi longtemps pour nous sentir seuls dans l'Univers, sans personne avec qui communiquer. Cent générations, soit 2500 ans, me semblent déjà être une éternité à notre échelle. Un aller-retour des signaux étant nécessaire, je me limiterais donc dans ce qui suit à examiner les étoiles situées dans un rayon de 1250 années-lumière.

Nous connaissons beaucoup de choses sur les étoiles de ce proche voisinage, ce qui permet de faire des estimations quantitatives. Si nous nous focalisons sur un aller-retour de 25 ans, soit une région de 12,5 années-lumière de rayon, les chances de communiquer avec une vie intelligente diminueraient d'un facteur un million (le nombre d'étoiles est proportionnel au volume, donc au cube de la distance). Nous aurions cependant une réponse – positive ou négative – plus tôt. Inversement, plus le volume exploré est grand, plus les chances, mais aussi le temps d'attente, augmentent.

On pourrait imaginer qu'une civilisation extraterrestre lointaine scrute la galaxie à la recherche de jeunes planètes telluriques et envoie avec optimisme ses saluta-



2. UNE MESURE DE L'INTELLIGENCE D'UNE FORME DE VIE est sa capacité à communiquer d'une étoile à l'autre, par exemple par ondes radio. Ces antennes du radiotélescope Allen, en Californie, sont ainsi utilisées dans le cadre du projet SETI pour rechercher une intelligence extraterrestre. Selon ce critère, notre propre civilisation n'a pas plus d'une centaine d'années.



3. NOTRE SYSTÈME SOLAIRE est situé dans un bras périphérique de la Voie lactée. Le cercle représente un volume de 1 250 années-lumière de rayon autour de la Terre, une distance à laquelle des signaux pourraient être envoyés et retournés en au plus 100 générations humaines.

tions très longtemps à l'avance, pour qu'elles arrivent juste au moment où une espèce intelligente a suffisamment évolué pour se mettre à écouter les signaux provenant de l'espace. Difficile cependant de concevoir une telle entreprise en pratique.

En fin de compte, il y a une explication simple au fait que l'espace reste désespérément silencieux, malgré des décennies d'écoute attentive: comme le soutenait Fermi, les extraterrestres ne sont tout simplement pas là. Et même en imaginant qu'il existe une technologie de communication fantastique plus rapide que la lumière, l'absence de signaux impliquerait alors non seulement que de tels êtres ne vivent pas dans notre Galaxie, mais qu'ils sont, au mieux, très rares ailleurs dans l'Univers.

La probabilité qu'une vie extraterrestre intelligente existe a été formalisée par l'astronome américain Frank Drake il y a tout juste 50 ans. L'équation de Drake fournit une estimation du nombre de civilisations extraterrestres détectables à l'époque actuelle dans le voisinage de la Terre. Il ne s'agit pas de la formulation mathématique d'un phénomène physique, et tout le monde n'y met pas exactement les mêmes termes, mais la formule la plus classique est le produit de cinq termes: le nombre d'étoiles appropriées, le nombre de planètes potentiellement propices à la vie autour de ces étoiles, la probabilité que la vie se développe sur l'une de ces planètes, la probabilité que la vie évolue jusqu'à l'intelligence, et la durée de vie typique d'une civilisation, rapportée à celle de son étoile.

Ces facteurs et leurs valeurs font l'objet de vifs débats depuis le début, car

seule la première variable, le nombre d'étoiles adaptées, peut être raisonnablement estimée à partir d'un échantillon statistiquement significatif. Les récents résultats en matière de planètes extrasolaires précisent le deuxième terme de l'équation de Drake. Les autres facteurs restent assez mystérieux et ne sont que des extrapolations à partir du seul exemple connu: la vie sur Terre.

Le point de vue classique est qu'avec environ 10^{20} étoiles dans l'Univers visible, même si on surestime plusieurs centaines de fois chacun de ces facteurs, il reste pléthore de civilisations dans l'Univers. Cependant, si nous ne sommes pas disposés à attendre un milliard d'années pour recevoir des signaux et que nous

teur deux près. Cela signifie qu'environ 30 millions d'étoiles de tous types sont présentes dans un rayon de 1 250 années-lumière. C'est là une limite supérieure pour le premier facteur de l'équation de Drake dans le voisinage que nous avons défini. Intéressons-nous maintenant au deuxième terme.

Les premières planètes extrasolaires découvertes étaient les plus faciles à trouver, pour la simple raison que ce sont les plus grosses ou qu'elles ont des orbites assez proches de leur étoile pour que plusieurs transits successifs devant l'astre puissent être observés en quelques années seulement. Andrew Howard, de l'Université de Californie à Berkeley, et

L'HYPOTHÈSE DE LA « TERRE RARE »

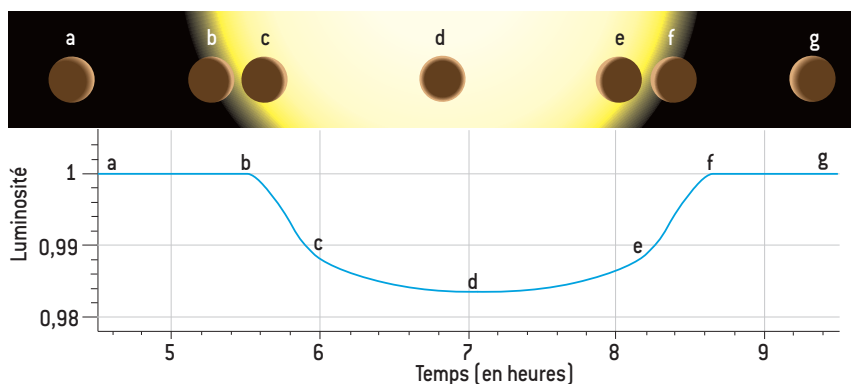
retient quatre critères essentiels: stabilité de l'étoile, habitabilité et présence d'eau, masse et composition.

nous focalisons donc sur notre voisinage stellaire, alors de petites surestimations font de grosses différences. Or s'il est impossible de réévaluer à la hausse les estimations classiques, optimistes, il est en revanche très facile de les revoir fortement à la baisse.

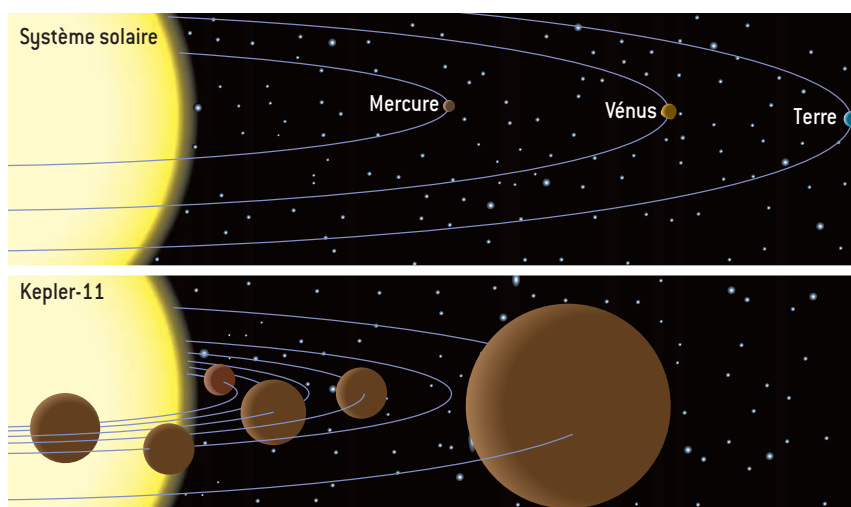
Le Soleil se trouve dans une cavité de gaz interstellaire d'environ 600 années-lumière appelée Bulle locale. Celle-ci est elle-même située dans la Ceinture de Gould, un filament d'étoiles, d'amas stellaires et de nuages moléculaires s'étendant au maximum sur environ 1 200 années-lumière. Dans cette région, le nombre d'étoiles par année-lumière au cube est approximativement égal à 0,004, à un fac-

ses collègues ont néanmoins montré que parmi les 1235 candidats planétaires détectés par *Kepler* dont la période orbitale est inférieure à 50 jours, les petites planètes sont plus abondantes. Nous n'avons pas encore déniché de planètes de type terrestre, mais sans doute n'est-ce qu'une question de temps. Les premières planètes de type terrestre qui seront découvertes seront peut-être non représentatives des planètes rocheuses.

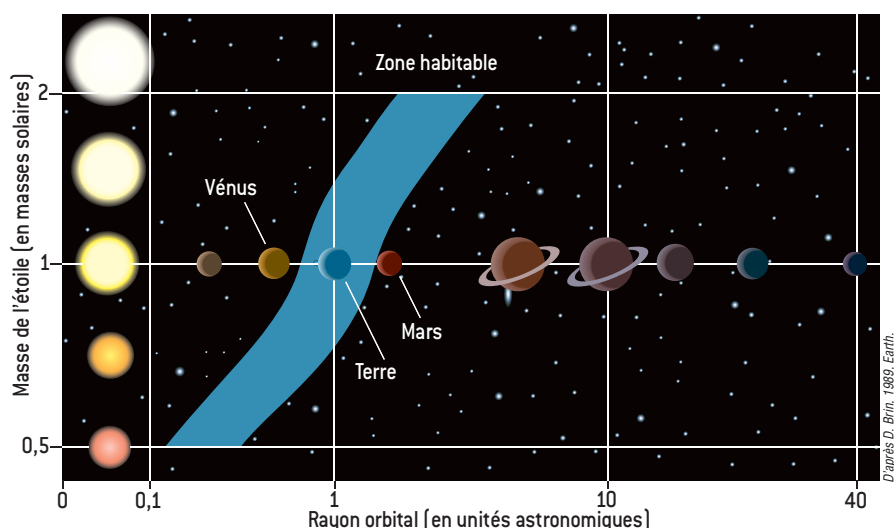
L'hypothèse dite de la « Terre rare » exprime l'idée que les planètes telluriques propices à l'émergence d'une vie intelligente sont très rares. Le paléontologue Peter Ward et l'astrophysicien Donald Brownlee, de l'Université de Washington,



4. LA MÉTHODE DES TRANSITS est utilisée par les satellites *Kepler* et *CoRoT* pour découvrir des planètes extrasolaires. Lorsqu'une telle planète passe devant son étoile, elle bloque une partie de la lumière stellaire. La durée et l'amplitude de la baisse de luminosité pendant ce transit révèlent les caractéristiques de la planète.



5. LES SYSTÈMES PLANÉTAIRES SONT TRÈS DIVERS. Le système *Kepler 11* (en bas) abrite par exemple six planètes géantes, dont cinq sont plus proches de l'étoile que Mercure ne l'est du Soleil (en haut), et la dernière est à l'intérieur de l'orbite de Vénus. Notre Système solaire n'est sans doute pas la norme dans l'Univers (ces représentations ne sont pas à l'échelle).



6. LA ZONE HABITABLE D'UNE ÉTOILE, la plage de distance où la température autorise le maintien d'eau liquide, varie en fonction de la masse et de l'âge de l'étoile (bande bleue). Si la zone habitable est trop proche de l'étoile, une planète s'y trouvant se synchronisera par effet de marée et finira par présenter toujours la même face à son étoile. Quant aux étoiles trop massives, elles se consomment vite, et leur zone habitable ne persiste pas assez longtemps pour qu'une vie intelligente apparaisse.

entre autres, ont proposé un ensemble de conditions nécessaires, qu'on peut regrouper en quatre critères essentiels : stabilité de l'étoile, habitabilité et présence d'eau, masse et composition.

Pour remplir le critère de stabilité, l'étoile hôte doit avoir une taille et un rayonnement stables durant les milliards d'années nécessaires à l'évolution de formes de vie intelligente. C'est le cas du Soleil, mais il n'est pas représentatif de la majorité des étoiles. Plus de 90 pour cent d'entre elles sont plus petites, et beaucoup n'atteignent pas le dixième de sa masse. Or les petites étoiles sont plus froides. La zone habitable – la bande orbitale où les températures permettent à l'eau de subsister sous forme liquide – est donc plus proche de l'étoile.

Et lorsqu'une planète est très près de son étoile, elle a tendance à être piégée par les effets de marée dans une résonance synchrone, c'est-à-dire à présenter toujours la même face à l'étoile (comme la Lune vis-à-vis de la Terre). L'un des hémisphères de la planète est alors perpétuellement plongé dans l'ombre et le froid, tandis que l'autre, toujours exposé à l'étoile, est une fournaise. Il semble improbable que la vie se développe sur de telles planètes, bien que certains soutiennent qu'elle pourrait se nicher à la frontière entre la partie éclairée et la partie obscure.

Une étoile ni trop grosse ni trop petite

À l'autre bout de l'échelle, les étoiles de masse beaucoup plus élevée que le Soleil sont elles aussi peu adaptées : plus une étoile est massive, moins elle vit longtemps. Une étoile de deux masses solaires ne brûle de l'hydrogène de façon stable (phase dite « séquence principale ») que pendant 1,8 milliard d'années, soit cinq fois moins longtemps que le Soleil et quelques milliards d'années de moins qu'il n'en a fallu à la vie intelligente pour apparaître sur Terre. Les étoiles de huit masses solaires explosent en supernovae après quelques dizaines de millions d'années à peine. En fin de compte, moins de dix pour cent des étoiles se situent dans un intervalle de masse correspondant à une durée de vie acceptable, soit 0,7 à 1,7 masse solaire.

En outre, l'âge de l'étoile aussi a son importance. Une étoile trop jeune n'a pas encore laissé le temps à la vie d'évoluer, et une étoile trop vieille voit sa luminosité

augmenter (le Soleil sera 40 pour cent plus lumineux dans 3,5 milliards d'années) ; sa zone habitable se décale donc vers l'extérieur. Autre problème : la plupart des étoiles – dont les deux tiers des étoiles de type solaire – vivent en couples au sein d'un système binaire. Des planètes peuvent être en orbite autour de l'une ou l'autre étoile, ou des deux, mais l'influence gravitationnelle complexe d'une étoile compagnon perturberait sans doute la longue période de gestation d'une planète dans la zone habitable.

Des orbites bien ajustées

La deuxième condition pour le développement d'une vie intelligente sur une planète est l'habitabilité : une planète doit résider dans la zone habitable de son étoile ou permettre la conservation de l'eau à l'état liquide par un mécanisme quelconque. Son orbite doit aussi être stable et suffisamment circulaire pendant plusieurs milliards d'années. Or la découverte la plus remarquable sur les planètes extrasolaires est la diversité de leurs orbites : certaines sont extrêmement elliptiques, d'autres sont très serrées autour de l'étoile (on parle de « jupiters chauds »), etc.

La présence de jupiters chauds dans un système n'exclut pas qu'il y ait une planète de type terrestre plus loin de l'étoile, dans la zone habitable, mais cela complique les choses. On pense que les planètes se forment à bonne distance de l'étoile par accréation progressive de matériaux du disque protoplanétaire. Une fois leur cœur rocheux formé, les planètes géantes auraient tendance à migrer vers des orbites plus serrées en raison de l'interaction avec le matériau du disque. Lors de cette migration, elles perturbent et éjectent certainement les petits corps rocheux présents dans la zone habitable. Certains pourraient néanmoins subsister.

Un autre paramètre est l'excentricité de l'orbite, c'est-à-dire la forme plus ou moins allongée de la trajectoire elliptique. L'excentricité détermine les variations annuelles de la distance par rapport à l'étoile, et donc d'« ensoleillement ». De fortes variations orbitales n'empêchent pas forcément la présence d'eau liquide, mais pourraient entraver le développement de systèmes biologiques. Dans un système multiple, une orbite excentrique augmente aussi la probabilité d'interactions gravi-

tationnelles avec les autres planètes et ainsi le risque d'une évolution chaotique de l'orbite. L'orbite de la Terre est pratiquement circulaire. Sur les quelque 500 planètes extrasolaires actuellement confirmées et dont les paramètres orbitaux sont déterminés, seules 11, soit 2,2 pour cent, ont une excentricité inférieure ou égale à celle de la Terre. La moitié d'entre elles voient leur distance à l'étoile varier de 20 pour cent au cours d'une révolution, et pour 20 pour cent d'entre elles, cette distance varie du simple au double !

Un paramètre connexe est l'obliquité de la planète, c'est-à-dire l'angle entre son axe de rotation propre et celui de l'orbite. L'obliquité de la Terre, égale à 23,5 degrés, résulte d'une collision avec un objet de la taille de Mars dans sa jeunesse – impact dont est née la Lune. L'obliquité de la Terre est à peu près stabilisée par l'attraction exercée par la Lune. Elle explique les saisons, chaque pôle étant alternativement orienté vers le Soleil et recevant alors davantage de lumière. La valeur de l'obliquité est telle que le climat à la surface de la Terre n'est ni trop chaud ni trop froid tout au long de l'année.

Des chercheurs ont calculé que si l'obliquité de la Terre atteignait 90 degrés, une partie importante de sa surface deviendrait inhabitable (un hémisphère serait en permanence tourné vers le Soleil, l'autre restant dans l'ombre). Aucune autre planète de notre Système solaire n'a une obliquité aussi stable. Celle de Mars vaut actuellement environ 25 degrés, mais elle aurait varié de façon chaotique entre 0 et 60 degrés.

Les modèles actuels de formation des planètes de la taille de la Terre suggèrent qu'en raison des collisions en tous sens aux stades précoces de la formation planétaire, des obliquités initiales élevées devraient être fréquentes ; cependant, leur évolution ultérieure reste à mieux comprendre.

Le bon mélange chimique

L'axe de rotation des étoiles elles-mêmes peut aussi être incliné par rapport au plan orbital des planètes. Les données suggèrent pour l'instant que les étoiles abritant des jupiters chauds ont des obliquités importantes, résultant probablement de fortes perturbations gravitationnelles dans ces systèmes extrêmes.

✓ BIBLIOGRAPHIE

W. J. Borucki *et al.*, **Characteristics of Kepler planetary candidates based on the first data set**, *The Astrophysical Journal*, vol. 728, article 117, 2011.

D. Sasselov et D. Valencia, **Des super-Terres accueillantes**, *Pour la Science*, n° 396, octobre 2010. http://bit.ly/pls396_sasselov

F. Raulin Cerceau, **Sur la piste des extraterrestres**, *Dossier Pour la Science* n° 60, juillet-septembre 2008. http://bit.ly/doss60_raulin

P. Ward et D. Brownlee, **Rare Earth : Why Complex Life is Uncommon in the Universe**, Springer-Verlag, 2000.

Là encore, l'ensemble des planètes extrasolaires connues représente la partie émergée de l'iceberg ; la plupart des systèmes extrasolaires pourraient se révéler différents. Cependant, les explications avancées pour rendre compte des paramètres orbitaux observés sont générales. Le mécanisme qui façonne des orbites très elliptiques, par exemple, est sans doute à l'œuvre d'une façon ou d'une autre dans d'autres systèmes planétaires encore inconnus.

La troisième condition pour une « bonne » planète porte sur sa masse. La planète doit être suffisamment massive pour retenir une atmosphère, mais pas au point que la tectonique des plaques soit bloquée. La tectonique, qui alimente l'atmosphère par le biais des volcans et permet l'existence d'un cycle du carbone, semble en effet indispensable pour la vie. D'après les estimations actuelles, les planètes de moins de 0,4 masse terrestre ne se prêtent pas à l'existence durable d'une atmosphère, et au-delà de 4 masses ter-

restres, la tectonique ne peut se mettre en place sur une planète rocheuse.

La fréquence à laquelle de telles planètes se forment n'est pas encore connue, mais, d'après les premières données du satellite *Kepler*, elles sont abondantes : environ 13 pour cent des planètes en orbite serrée ont une taille comparable à celle de la Terre, et des indices laissent penser que sur des orbites plus éloignées, elles seraient encore plus nombreuses, notamment autour des petites étoiles.

Le quatrième et dernier grand critère pour une planète adaptée concerne sa composition. Une planète habitable doit à l'évidence contenir les éléments nécessaires à la chimie organique (carbone, hydrogène, oxygène, etc.). Mais certains éléments favorisent aussi la vie de façon indirecte. Le silicium et le fer, par exemple, facilitent la tectonique des plaques. La chaleur dégagée par les éléments radioactifs maintient le noyau de fer de la Terre à l'état liquide, d'où l'existence d'un champ magnétique qui protège la surface des par-

ticules chargées éjectées par le Soleil. Cette chaleur alimente aussi la convection du manteau et donc la tectonique.

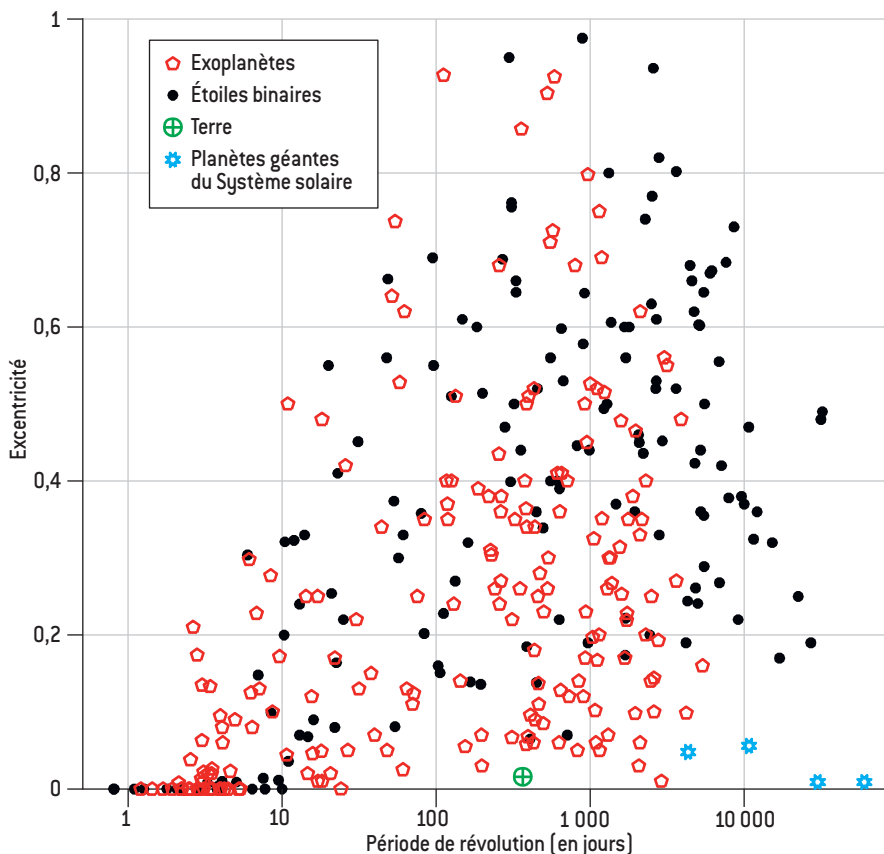
La distribution des éléments chimiques n'est pas uniforme dans la Galaxie. Certaines régions entières pourraient ainsi être inadaptées à l'émergence de la vie. En outre, la présence d'éléments radioactifs signifie qu'une supernova – leur principale source – a explosé récemment dans le voisinage de la planète considérée (mais pas trop près...). La Bulle locale où se situe le Soleil aurait été sculptée par des explosions de supernovae, mais certains des éléments lourds vitaux présents dans le Système solaire pourraient être absents dans d'autres régions de la zone d'investigation de 1250 années-lumière de rayon.

Enfin, il existe sans doute de nombreuses planètes flottant dans l'espace intersidéral, éjectées de leur système planétaire par des interactions gravitationnelles. Il est difficile d'imaginer la vie s'y développer sans l'énergie apportée par une étoile.

Des facteurs biologiques difficiles à estimer

Même si toutes les conditions précédentes étaient remplies, rien ne garantit que la vie se développe. Le fait que la vie n'ait pas encore été créée en laboratoire signifie que sa genèse n'est pas évidente. Mars se situe à peu près dans la zone habitable, mais n'abrite aucune vie intelligente. Et même si la vie était le résultat inévitable des processus chimiques se déroulant sur toutes les planètes dotées d'eau, rien ne laisse penser que cela se fait rapidement. Sur Terre, la vie a mis entre 500 millions et un milliard d'années à apparaître, et quelques autres milliards d'années à évoluer jusqu'à notre civilisation. Il suffit qu'ailleurs la chimie soit deux ou trois fois plus lente, ou que l'évolution se « fourvoie », et il est trop tard : une étoile de type solaire se sera alors dilatée jusqu'à atteindre l'équivalent de l'orbite de la Terre.

À cela, certains partisans de l'intelligence extraterrestre rétorquent que la vie peut évoluer de façon beaucoup plus efficace à partir de formes non carbonées. Outre l'absence de tout élément de preuve allant dans ce sens, la plupart des spécialistes s'accordent à penser qu'au minimum, l'intelligence requiert une certaine complexité.



S. Udry et M. C. Santos, 2007, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 45: 397-439.

7. L'EXCENTRICITÉ D'UNE PLANÈTE mesure le degré d'allongement de son orbite elliptique, c'est-à-dire le rapport entre les distances minimale et maximale de la planète à son étoile, et donc les variations d'ensoleillement au cours d'une orbite. L'excentricité de la Terre (en vert) est presque nulle (son orbite est quasi circulaire). La plupart des exoplanètes connues (en rouge) ont une excentricité supérieure à celle de la Terre, et la moitié environ voient leur distance à l'étoile varier de 20 pour cent ou plus au cours d'une révolution.

Quelle que soit leur nature, ces formes de vie extraterrestre doivent avoir évolué assez longtemps pour que des organes relativement complexes prennent forme.

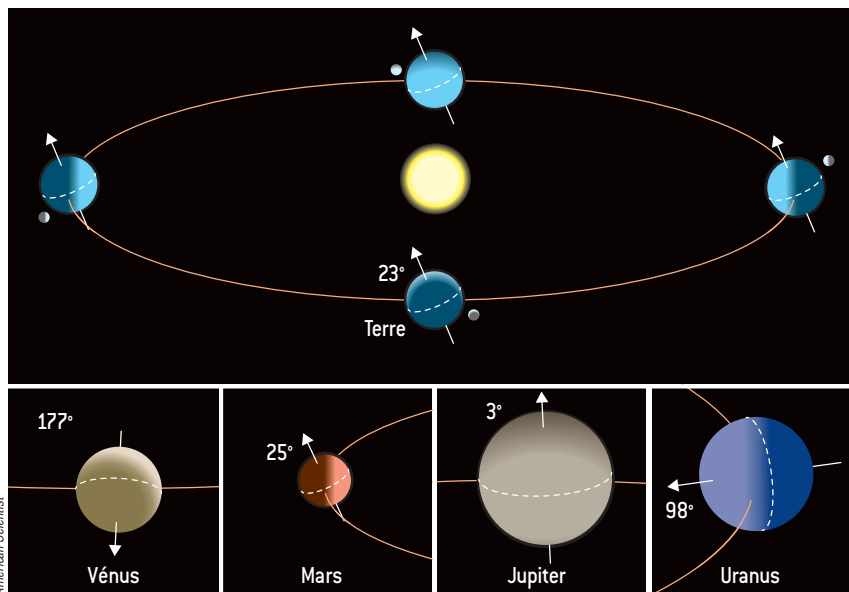
Par ailleurs, l'habitabilité d'une planète est une condition nécessaire, mais pas suffisante. La Terre, par exemple, a subi un certain nombre de catastrophes improbables – essentielles ou secondaires ? – qui ont facilité l'évolution.

Une collision gigantesque, survenue tôt dans l'histoire de la Terre, a créé la Lune, inclinant suffisamment l'axe de rotation de notre planète pour lui conférer l'obliquité et les saisons dont elle jouit, mais sans aller jusqu'à la faire voler en éclats. La Lune, engendrée dans le même impact, nous apporte les marées et stabilise les oscillations de l'axe terrestre. Quelques milliards d'années plus tard, tout autant par hasard, les dinosaures qui avaient dominé la planète durant 100 millions d'années ont été éradiqués par la chute d'un astéroïde, catastrophe qui a permis l'essor des mammifères. Il y a eu environ 15 extinctions massives, dont six catastrophiques, avant que l'homme n'entre en scène, ce qui souligne le caractère complexe, tumultueux et aléatoire de notre évolution.

De nombreuses autres conditions particulières ont permis à la vie de prospérer sur Terre. Par exemple, l'eau est essentielle à la vie, mais si la planète avait été couverte d'océans, les poissons ne se seraient jamais aventurés sur la terre ferme pour évoluer en quadrupèdes, puis en bipèdes. En outre, le chemin emprunté par l'évolution est sinueux. Selon le paléontologue Stephen Jay Gould, notre évolution était tellement aléatoire qu'elle ne pourrait probablement jamais se répéter.

Enfin, la principale incertitude dans l'équation de Drake est la longévité d'une civilisation intelligente. Si la durée typique est courte – notre civilisation radio n'a qu'une centaine d'années –, alors il doit y en avoir très peu autour de nous en ce moment même.

Les valeurs des probabilités associées à tous ces facteurs biologiques de l'équation de Drake sont très incertaines, et l'astronomie n'apporte pas de nouvelles données permettant de les affiner. Généralement, on a tendance à ne considérer que les deux extrêmes : soit la vie intelligente est inévitable sur toute planète vaguement adaptée, soit elle est hautement improbable.



8. L'OBLIQUITÉ DE LA TERRE, c'est-à-dire l'angle entre l'axe de rotation de notre planète et la perpendiculaire au plan de son orbite, vaut 23,5 degrés (*en haut*). Cette inclinaison permet aux hémisphères Nord et Sud d'être alternativement orientés vers le Soleil (l'été), maintenant ainsi une température modérée à peu près constante sur l'ensemble du globe (*en haut*). L'obliquité de la Terre est stabilisée par le couple exercé par la Lune. Celle des autres planètes du Système solaire (*en bas*), et peut-être de certaines planètes extrasolaires, est très variable.

F. Drake pense désormais que « seule environ une étoile sur dix millions héberge une civilisation détectable », si bien que dans notre volume d'espace comprenant 30 millions d'étoiles, il pourrait y en avoir deux autres. Chacun peut faire sa propre estimation. Il n'y aura pas de civilisation si l'étoile est trop grosse ou trop petite, si l'orbite de la planète ou son obliquité ne sont pas bonnes, si sa taille ou sa composition chimique ne sont pas adaptées, si sa surface ne s'y prête pas, si son histoire géologique est trop défavorable, si la chimie nécessaire pour engendrer les premières formes de vie est trop compliquée ou trop lente, si l'évolution de ces formes de vie vers l'intelligence avorte ou s'égare trop souvent sur des voies stériles, ou si les civilisations s'éteignent facilement.

Un principe misanthropique ?

Pour que nous ayons une chance raisonnable d'avoir de la compagnie dans notre volume d'espace galactique, il faudrait que la probabilité moyenne pour chacune de ces conditions soit assez élevée (disons, supérieure à 20 pour cent). Si la probabilité de l'une d'elles est beaucoup plus faible, alors même si les autres sont certaines, il devient très improbable qu'une étoile proche de nous abrite des êtres intelligents.

Ainsi, malgré le discours enthousiaste souvent tenu sur la vie extraterrestre, tout indique que nous sommes probablement seuls, isolés comme les habitants d'une île magnifique, mais éloignée de tout. Dans 100 générations, l'humanité n'aura sans doute toujours pas reçu de signaux cosmiques intelligents.

Le « principe anthropique » est l'idée que les conditions dans l'Univers sont remarquablement bien ajustées pour que la vie émerge, puisque nous sommes là. Il me semble que l'on pourrait aussi énoncer un « principe misanthropique », stipulant que les environnements possibles dans l'Univers sont si vastes, variés et peu appropriés, au moins à un moment quelconque durant les trois ou quatre milliards d'années que met la vie intelligente à émerger, qu'il est peu vraisemblable que celle-ci se développe et se maintienne.

Adopter ce point de vue rend la vie sur Terre encore plus rare et précieuse. Même si nous ne sommes pas uniques dans l'Univers, nous avons beaucoup de chance. Voilà qui appelle une plus grande humilité et une plus grande responsabilité envers l'humanité et l'environnement. La recherche de nouvelles planètes, parmi lesquelles se trouvent peut-être des cousines de la Terre, nous permettra au moins de mieux comprendre la nôtre. Et c'est déjà beaucoup. ■

Concevoir plus rapidement des vaccins

Alan Aderem

L'analyse simultanée de toutes les composantes du système immunitaire après une vaccination accélérerait la mise au point de vaccins efficaces, et porterait un coup fatal au virus du sida.

Les biologistes travaillant sur le sida avaient espéré que le vaccin développé par les Laboratoires Merck et l'Institut américain d'étude des allergies et des maladies infectieuses serait celui que l'on attend depuis 30 ans. Ces espoirs furent anéantis en 2007, quand les conclusions d'un essai clinique impliquant 3000 personnes révélèrent que le vaccin était inefficace. Non seulement l'inoculation du vaccin ne protégeait pas les personnes participant à l'essai clinique, mais elle augmentait, pour certaines d'entre elles, le risque de contamination par le VIH. Des millions de dollars et plus de dix ans de recherche avaient été nécessaires à la mise au point de ce vaccin. Pendant la même période, 18 millions de personnes ont succombé au sida et des millions d'autres ont été contaminées.

En fait, aujourd'hui encore, après des dizaines d'années de recherches, on ignore comment élaborer un vaccin efficace contre le VIH. Certes, quelques vaccins, tels ceux utilisés contre la poliomyélite ou la variole, ont connu un succès spectaculaire. Mais en réalité, la chance joua un grand rôle dans leur réussite. À partir de leurs connaissances limitées du système immunitaire et des agents pathogènes, les biologistes ont en

L'ESSENTIEL

- ✓ Pour mettre au point un vaccin, les biologistes sélectionnent une molécule supposée déclencher des réactions immunitaires efficaces contre l'agent infectieux. Puis ils testent la molécule sur des milliers de personnes.
- ✓ Une nouvelle approche, la biologie des systèmes, permettrait d'accélérer la mise au point des vaccins.
- ✓ Dans cette approche, on étudie les modifications de l'activité des gènes après injection du vaccin en cours d'évaluation.
- ✓ En comparant ces résultats avec les réactions immunitaires idéales pour lutter contre une infection, les biologistes améliorent la formulation et l'efficacité des vaccins.

effet imaginé des vaccins qui, après quelques ajustements, se sont révélés efficaces pour protéger les sujets contre ces infections. Mais trop souvent, quand on ignore quelles sont les réactions immunitaires qui protègent réellement, les résultats sont décevants, surtout quand on ne constate l'inefficacité qu'au terme d'un essai clinique de grande ampleur.

D'où la question que se posent les immunologistes : comment mettre au point des vaccins efficaces et accélérer leur évaluation ? Pour y parvenir, il faudrait comprendre précisément toutes les réactions immunitaires induites par un vaccin réellement efficace. Il faudrait, par exemple, découvrir quelles sont les cellules immunitaires en jeu et comment elles interagissent, ou encore quels sont les gènes activés ou inhibés par ces cellules. Les immunologistes pourraient ensuite rassembler ces informations pour préciser quelle serait la réaction immunitaire réellement protectrice. Ce profil servirait à déterminer les constituants d'un vaccin protecteur contre la maladie.

En comparant des centaines de formulations possibles, les biologistes choisiraient celles qui produisent un profil immunologique proche du profil type. Ils améliore-