

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.

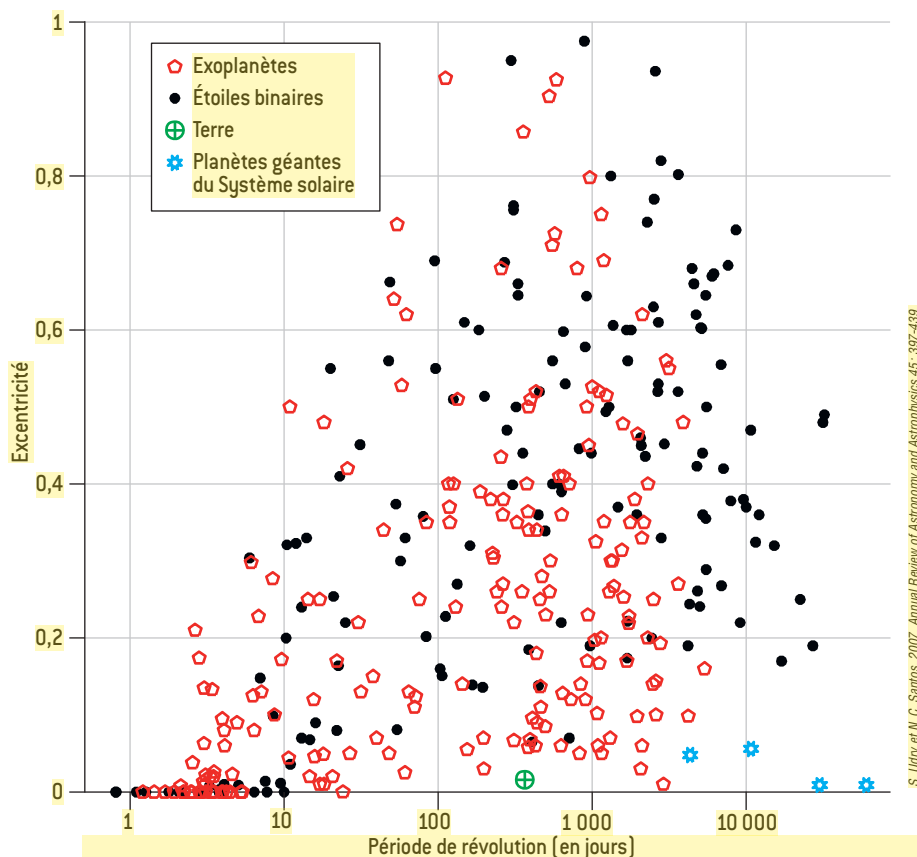
La distribution des éléments chimiques n'est pas uniforme dans la Galaxie. Certaines régions entières pourraient ainsi être inadaptées à l'émergence de la vie. En outre, la présence d'éléments radioactifs signifie qu'une supernova – leur principale source – a explosé récemment dans le voisinage de la 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.



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.