

LES AUTEURS



Dimitar SASSELOV est professeur d'astronomie à l'Université Harvard. Diana VALENCIA est postdoctorante à l'Observatoire de la Côte d'Azur à Nice ; elle a reçu le *Sagan Fellowship* 2010 de la NASA.

✓ BIBLIOGRAPHIE

K. Hirose, *L'ingrédient manquant de la Terre*, *Pour la Science* n° 394, août 2010.

F. Bouchy, *Super-Terres en vue*, *Dossier Pour la Science* n° 64, juillet-septembre 2009.

D. Valencia et R. O'Connell, *Convection scaling and subduction on earth and super-Earths*, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 286, n° 3-4, pp. 492-502, 15 septembre 2009.

D. Valencia, R. O'Connell et D. Sasselov, *Inevitability of plate tectonics on super-Earths*, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 670, n° 1, pp. L45-L48, 20 novembre 2007.

C. O'Neill et A. Lenardic, *Geological consequences of super-sized earths*, *Geophysical Research Letters*, vol. 34, L19204, 11 octobre 2007.

D. Valencia, R. O'Connell et D. Sasselov, *Internal structure of massive terrestrial planets*, *Icarus*, vol. 181, n° 2, pp. 545-554, avril 2006.

deviennent rapidement plus froides. Ainsi, une super-Terre typique pourrait avoir un noyau de fer complètement solide, par conséquent, être dépourvue de champ magnétique global. Sur Terre, le champ magnétique nous protège des effets nocifs du vent solaire et des rayons cosmiques. Mais il n'est pas certain qu'il soit indispensable pour que la planète soit habitable.

Une planète riche en eau serait le siège de phénomènes encore moins familiers. Un profond océan envelopperait toute la surface de la planète. Or l'eau se transforme en glace quand on la refroidit, mais également quand on la comprime à des pressions élevées. Ainsi, au-dessus du manteau de silicate, un autre manteau solide de glace se formerait. Il ne s'agirait pas de glace ordinaire, mais de structures cristallines qui n'ont jusqu'à présent été observées qu'en laboratoire.

Riche en eau ou non, une super-Terre est par définition très massive et l'intérieur est soumis à des pressions inimaginables. Une planète massive sera donc plus dense qu'une planète moins massive de même composition. Dans des conditions aussi extrêmes, les matériaux rocheux deviennent encore plus durs que ceux qui se trouvent à l'intérieur de notre planète, et peut-être plus que le diamant. Comment le matériau de type terrestre se comporte-t-il à ces très hautes pressions ? Les géophysiciens tentent de mieux le comprendre à l'aide de modèles théoriques et d'expériences.

Une géodynamique active

Par exemple, ces dernières années, ils ont découvert qu'il existe dans les profondeurs de la Terre une nouvelle phase cristalline nommée postpérovskite. Si elle ne représente qu'une petite fraction du manteau terrestre, elle pourrait constituer l'essentiel du manteau des super-Terres. Des arguments théoriques suggèrent qu'il pourrait y avoir une phase encore plus dense.

Quand nous avons une idée de la structure et de la composition des différentes couches des super-Terres, nous avons fait la moitié du travail. L'étape suivante consiste à comprendre la dynamique de cette structure. En d'autres termes, à déterminer si la planète est géologiquement agitée, comme la Terre, ou presque morte, comme Mars.

Sur Terre, la convection du manteau est le moteur de la plupart des processus

géologiques. Sous les plaques qui forment la surface, le manteau chaud issu des profondeurs monte vers la surface, puis s'enfonce à nouveau quand il refroidit. Ces mouvements de convection – semblables à ceux de l'eau bouillante dans une casserole – transportent la chaleur interne vers la surface. La convection est nourrie en majeure partie par la désintégration d'éléments radioactifs dans le manteau, et pour le reste par la chaleur résiduelle de la formation de la planète. Les super-Terres rocheuses devraient avoir des concentrations semblables à celle de la Terre en éléments radioactifs, ou du moins en uranium et en thorium, car ces éléments sont distribués de façon uniforme dans la Galaxie et s'incorporent facilement aux planètes lors de leur formation. Par conséquent, étant plus grosses que notre planète et renfermant, en quantité absolue, davantage de matériau radioactif, les super-Terres devraient engendrer plus de chaleur interne, et ainsi abriter une convection du manteau plus vigoureuse.

Ce fort brassage a plusieurs conséquences, qui favorisent des conditions propices à la vie. L'une, contre-intuitive, est que des planètes plus grosses que la Terre ont des plaques tectoniques plus minces. La convection se manifeste en surface par la tectonique des plaques, qui sont entraînées par les mouvements du manteau. Les plaques sont peu épaisses au niveau des dorsales océaniques où elles se forment à partir de remontée de matériau fondu, puis elles s'épaississent en se refroidissant à mesure qu'elles se dirigent vers les zones de subduction, où elles replongent dans le manteau. D'après nos modèles, la convection des super-Terres engendre des forces plus importantes et un brassage plus rapide, de sorte que leurs plaques se déplacent plus vite : elles ont donc moins de temps pour refroidir et s'épaissir.

Étant plus minces, les plaques devraient se déformer plus facilement. Cependant, une gravité plus importante rendant les matériaux plus rigides, les failles tectoniques résistent mieux au glissement. Par conséquent, la résistance des failles ne varie pas trop avec la taille des planètes.

Ainsi, la tectonique des plaques semble plus facile à entretenir sur les super-Terres que sur des planètes rocheuses plus petites. C'est une condition favorable à la vie. Sur Terre, l'activité géologique en général, et le volcanisme en particulier, injecte

en continu du dioxyde de carbone et d'autres gaz dans l'atmosphère. Le CO_2 réagit avec le silicate de calcium, produisant du carbonate de calcium et du dioxyde de silicium, qui finissent par sédimenter sur le plancher océanique. À mesure que la croûte replonge par subduction dans le manteau, elle entraîne avec elle ces sédiments et réapprovisionne le manteau en carbone, dont une partie retrouve le chemin de l'atmosphère, et ainsi de suite. Ce cycle carbone-silicate fait office de thermostat pour réguler – via l'effet de serre – la température globale de la surface. Sur Terre, il contribue à maintenir les températures propices à l'eau liquide depuis des milliards d'années. De même, la tectonique recycle d'autres minéraux et gaz importants pour la vie, dont, par exemple, le sulfure d'hydrogène qui a pu servir de carburant à la vie avant l'apparition de la photosynthèse.

Terrain de choix

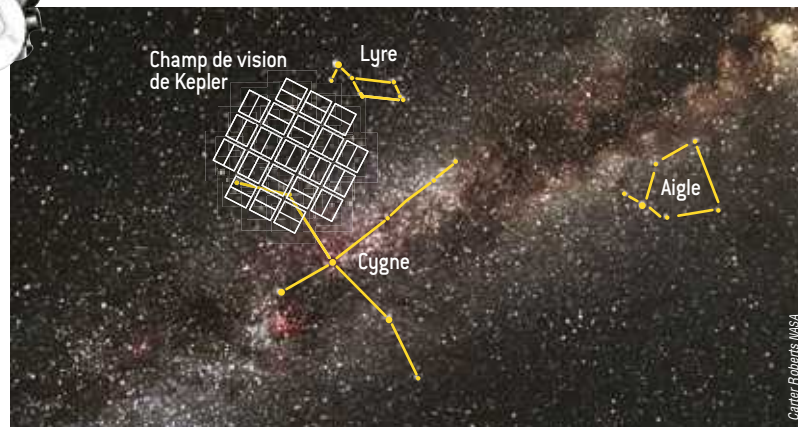
Sur une super-Terre, la durée de formation et la durée de vie des plaques raccourcissent, ce qui rend le cycle carbone-silicate plus rapide et moins sensible aux perturbations. À certains égards donc, les super-Terres pourraient être encore plus hospitalières pour la vie que les planètes de la taille de la Terre. De plus, leurs masses plus importantes ralentiraient la fuite de leur atmosphère et de l'eau dans l'espace. Ce phénomène de fuite est un réel problème pour les planètes plus proches de leur étoile que ne l'est Mars du Soleil.

En comparant la Terre aux modèles de super-Terres de différentes tailles, nous avons ainsi découvert un riche éventail de conditions de type terrestre stable pour des planètes telluriques. C'est cependant une famille où la Terre est reléguée à la marge. Plus petite, elle est plus vulnérable à maints égards. Et dans notre Système solaire, les petites planètes sont plutôt inactives d'un point de vue géologique. Si Vénus a peut-être une faible tectonique, Mars s'est figée très tôt, et ne dégaze aujourd'hui pas assez pour renflouer son atmosphère qui se raréfie. Si la taille de la Terre lui a permis d'échapper à ce sort, cela s'est apparemment joué à peu de chose. Néanmoins, malgré ces indices, on ne peut pas affirmer avec certitude que

FIXER DU REGARD 150 000 ÉTOILES



L'Observatoire spatial *Kepler* de la NASA, qui a été placé en orbite en 2009, est dédié à la recherche de nouvelles planètes. Sa mission est de scruter plus de 150 000 étoiles dans une région du ciel proche de la constellation du Cygne, en mesurant leur luminosité pour repérer les éventuels transits planétaires. Les 42 détecteurs de la caméra de *Kepler*, dont le champ de vision peut couvrir la Lune, ont une résolution totale de 95 mégapixels et peuvent détecter des baisses de luminosité de 0,01 pour cent seulement. Afin de distinguer les signaux véritables du bruit, *Kepler* doit suivre les mêmes étoiles pendant plusieurs années pour enregistrer plusieurs transits. *Kepler* a déjà découvert de nouvelles planètes, mais le meilleur est à venir !



la tectonique des plaques soit indispensable à la vie.

À quoi ressembleraient les paysages sur une super-Terre rocheuse (et non couverte d'un océan global) ? Au premier coup d'œil, ils ne seraient peut-être pas très différents de ceux de notre planète, en dehors d'éventuels signes de vie. Les processus géologiques y auraient engendré des continents, des montagnes, des océans et une atmosphère, avec des nuages, des intempéries, etc.

Cependant la tectonique des plaques étant jusqu'à dix fois plus rapide que sur Terre, les montagnes s'érigeraient de façon accélérée. En raison de la plus forte gravité, elles seraient aussi moins hautes (par comparaison, Mars, moins massive, porte la plus haute montagne du Système solaire, Olympus Mons, qui culmine à 21 kilomètres d'altitude). La composition de l'atmosphère pourrait également être différente à cause de l'activité volcanique plus intense et du rythme plus lent d'échappement des gaz atmosphériques dans l'espace.

L'ère de l'exploration à distance des super-Terres ne fait que commencer. Nous anticipons une riche moisson de découvertes grâce à la mission *Kepler*. L'étape

suivante consistera à étudier les atmosphères de ces planètes pour voir si l'on peut y détecter des signes de vie. Nous devons déterminer au moins deux choses : de quoi est constituée la planète, et quels gaz abondent dans son atmosphère, ce qui est lié à sa dynamique interne.

Par analyse spectroscopique de la lumière de ces planètes, on pourra y détecter la signature de molécules telles que l'eau, le dioxyde de carbone ou le méthane. Dans quelques années, le télescope spatial *James Webb* (successeur du télescope spatial *Hubble*) permettra d'observer en infrarouge les atmosphères des super-Terres. Les cibles seront sélectionnées parmi les plus intéressantes et les plus proches des planètes découvertes par *Kepler* et CoRoT. Et avec un peu de chance, les projets qui prolongeront ces missions mettront au jour quelques super-Terres à transit très proches de nous, et donc faciles à étudier. Sinon, il faudra construire des instruments capables de détecter la lumière directe des planètes telluriques et d'analyser leur atmosphère même lorsqu'elles ne transitent pas. C'est l'objectif des projets Darwin ou *Terrestrial Planet Finder*, qui verront sans doute le jour prochainement. ■