

à peu près tout ce que nous pouvons en dire. En particulier, nous ne connaissons pas la densité moyenne de GJ 876d, et *a fortiori* pas sa composition, car la méthode des vitesses radiales ne permet pas de mesurer sa taille (ni son volume).

La méthode des transits livre ces données : l'intensité de la baisse de luminosité de l'étoile, donne, connaissant la distance de la planète, le diamètre de cette dernière. Si l'on mesure aussi les variations de vitesse radiale de l'étoile, on peut alors connaître à la fois la masse et le diamètre de la planète, et donc calculer sa densité moyenne. Une densité élevée est le signe probable d'une planète rocheuse.

C'est grâce à cette méthode que les astronomes de l'équipe de l'Observatoire CoRoT ont découvert début 2009 la première super-Terre en transit, CoRoT-7b. Avec une masse environ cinq fois supérieure et un rayon 1,6 fois plus grand que la Terre, cette planète a une densité 1,2 fois supérieure à la nôtre : elle est assurément formée de roche. Cependant, CoRoT-7b est très proche de son étoile (son année dure moins longtemps qu'un de nos jours) et lui présente toujours la même face – comme la Lune avec la Terre –, si bien que son côté jour doit être un océan de lave fondue.

À peine dix mois plus tard, le projet au sol *MEarth*, dirigé par David Charbonneau, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, a découvert une deuxième super-Terre en transit, GJ1214b. Cette planète de 5,5 à 7,5 masses terrestres est inhabituelle en cela qu'elle a une densité de 1,8, plus proche de celle de l'eau que de celle de la roche, ce qui suggère qu'elle doit avoir une épaisse enveloppe de gaz, voire être recouverte d'eau.

Aucune de ces deux planètes n'est semblable à la nôtre. Nous sommes à la recherche de planètes telluriques habitables, mais nous ne trouvons que des monstres. Et d'autres étrangetés vont vraisemblablement se présenter à nous. Par exemple, autour d'étoiles très riches en carbone, les éventuelles planètes rocheuses ne seraient pas constituées pour l'essentiel de composés de silicium et d'oxygène, comme dans le Système solaire, mais de composés de silicium et de carbone. Cela donnerait un type de planète très différent, avec un intérieur formé en grande partie de diamant, à cause de la pression.

Mais comme la plupart des systèmes stellaires ont des compositions semblables

à celle du Système solaire, les chercheurs s'attendent à ce que la composition des super-Terres soit assez proche de celle de la Terre – pour l'essentiel, du silicium lié à de l'oxygène et du magnésium, plus du fer, et d'autres éléments en plus petites quantités –, avec de grandes quantités d'eau. Bientôt, nous découvrirons sans doute beaucoup de planètes de ce type, c'est pourquoi il faut en apprendre davantage sur elles, à commencer par leur physique interne.

Voyage au centre d'une super-Terre

Il devrait exister deux catégories principales de super-Terres, selon la région de leur système planétaire où elles se forment. Celles qui sont nées suffisamment loin de leur étoile accumulent de grandes quantités de particules de glace du disque protoplanétaire, et l'eau doit constituer une part beaucoup plus importante de leur masse que pour les planètes telluriques du Système solaire. En revanche, les planètes qui se sont formées plus près de leur étoile, là où il fait trop chaud pour que de la glace soit présente, finissent relativement sèches, comme la Terre et ses compagnes rocheuses du Système solaire.

Une planète rocheuse commence sa vie comme un mélange brûlant de matériau fondu qui refroidit en rayonnant de la chaleur dans l'espace. Des cristaux à base de fer et de silicates se forment alors dans le magma, qui se solidifie. En fonction de la quantité d'oxygène, une partie plus ou moins grande du fer restée libre, très dense, sombre jusqu'au centre. Comme la Terre, la planète acquiert finalement une structure en oignon, avec un noyau ferreux et un manteau de silicates.

Selon la taille de cette planète rocheuse par rapport à celle de la Terre, une différence apparaît au niveau du noyau. Le noyau terrestre s'est suffisamment refroidi pendant des milliards d'années pour que sa partie interne se solidifie, tandis que sa couche externe reste liquide, et brassée par des courants convectifs. On pense que cette convection du noyau externe est à l'origine du champ magnétique de la Terre.

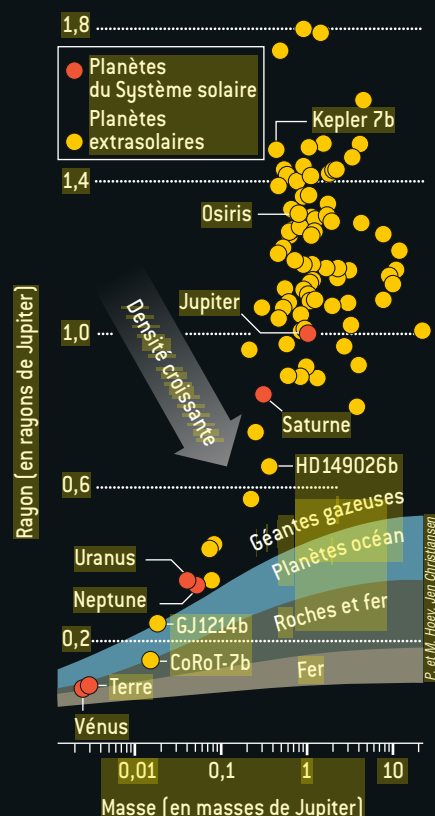
Mais d'après des calculs théoriques récents, les pressions qui règnent dans le noyau d'une grosse planète sont telles que le fer peut rester solide jusqu'à des températures de 10000 degrés. Or les planètes ne dépassent sans doute ces températures que dans leur prime jeunesse, et

UNE VIE MEILLEURE AVEC LA GÉOPHYSIQUE

L'activité géophysique pourrait être cruciale pour qu'une planète soit habitable. Les modèles théoriques et les simulations numériques, couplés aux connaissances acquises sur la Terre et les autres planètes du Système solaire, permettent aux astronomes de prédire la dynamique d'une planète à partir de sa masse et de sa composition. Les travaux sur les petites planètes se sont concentrés sur les super-Terres et les planètes océans, dont les éléments constitutifs sont répandus dans la Galaxie. Dans les deux cas, la convection brasse lentement les couches internes, transportant la chaleur interne de la planète jusqu'à la surface. Ce bouillonnement est le moteur du volcanisme et de la tectonique des plaques, qui contribuent à enrichir l'atmosphère en éléments chimiques nécessaires à la vie ; atmosphère qui contribue à son tour à stabiliser les températures de surface.

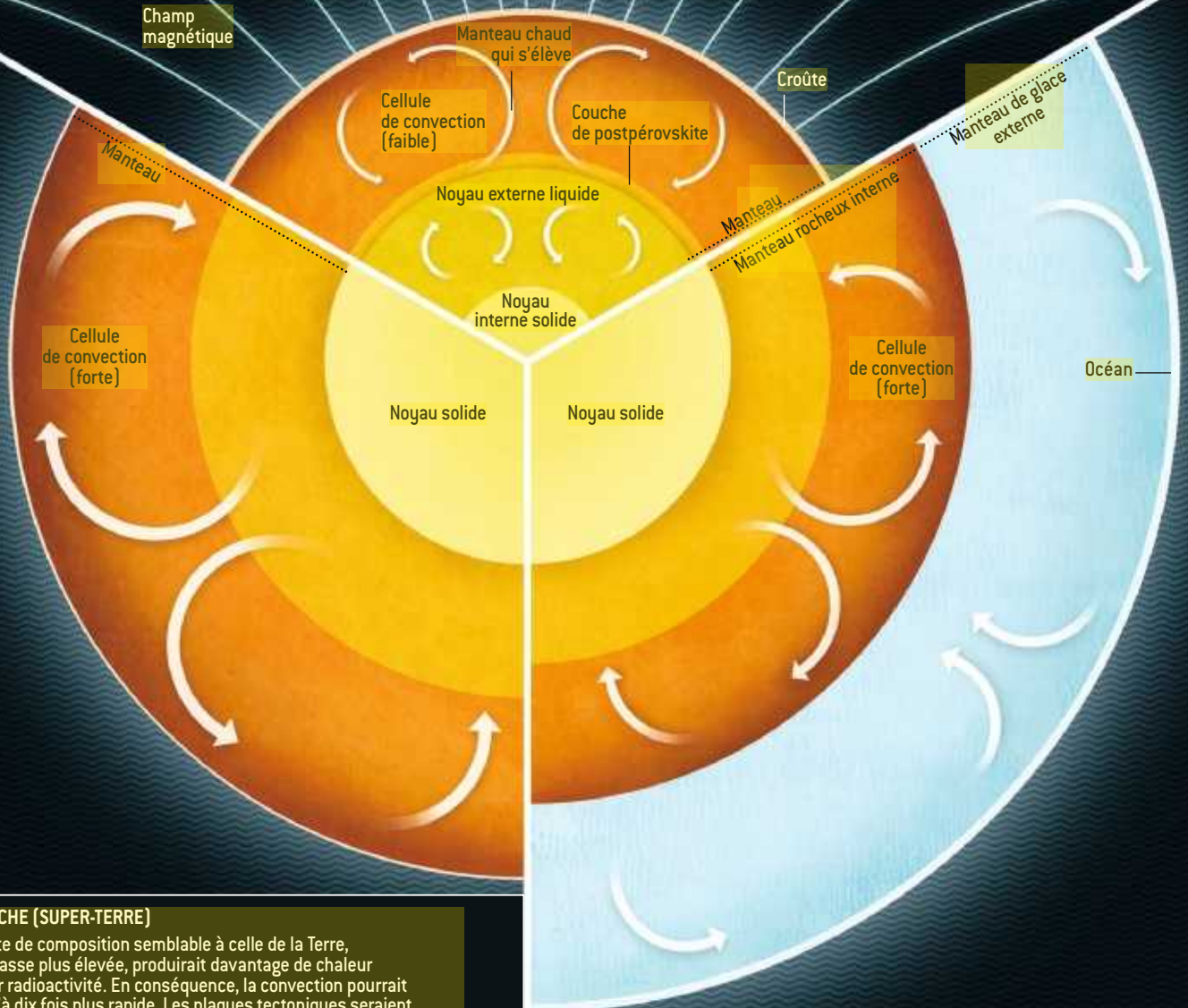
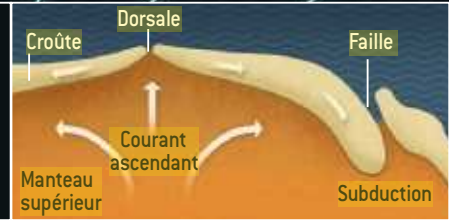
▼ TROIS TYPES DE PLANÈTES ROCHEUSES

Les astronomes ont détecté plus de 80 planètes par la méthode des transits, et réussi à estimer leur densité moyenne. Cela pose des contraintes fortes sur leur composition. Les planètes les moins denses sont vraisemblablement des géantes gazeuses ; les planètes un peu plus lourdes pourraient être rocheuses, avec des quantités variables de fer et d'eau ; les plus lourdes sont vraisemblablement constituées en majeure partie de fer.



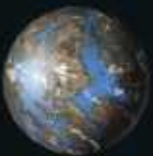
FER ET ROCHE (TERRE)

Sur Terre, la convection dans le manteau dominé par les silicates est le moteur du volcanisme et de la tectonique des plaques. La chaleur interne est en partie le résidu de la formation planétaire, et en partie produite par la radioactivité du manteau. On pense que c'est la convection dans le noyau externe de fer liquide qui engendre le champ magnétique terrestre, lequel contribue à protéger la vie des rayons cosmiques et du vent solaire.



FER ET ROCHE (SUPER-TERRE)

Une planète de composition semblable à celle de la Terre, mais de masse plus élevée, produirait davantage de chaleur interne par radioactivité. En conséquence, la convection pourrait être jusqu'à dix fois plus rapide. Les plaques tectoniques seraient plus minces, car elles auraient moins de temps pour s'épaissir lors de leur dérive. Le noyau de fer serait entièrement solide, et ne produirait donc pas de champ magnétique global. Ce pourrait être un problème pour la vie sur la terre ferme.



EAU, ROCHE ET FER (PLANÈTE OCÉAN)

Une planète constituée d'une grande quantité d'eau, en plus du fer et de la roche, aurait deux manteaux solides : l'un rocheux, et l'autre de glace d'eau, qui serait sous forme solide aux pressions qui règnent sous un océan de plusieurs centaines de kilomètres de profondeur. Ces deux manteaux seraient soumis à la convection.



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.

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 postpéroovskite. 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

✓ 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.