

sexuelle, le comportement sexuel ou la fécondité chez des rats femelles après une exposition au bisphénol A pendant la gestation et la lactation. Ces résultats contradictoires rendent l'évaluation du risque encore plus difficile chez l'homme. On ignore pourquoi toutes les équipes ne retrouvent pas les mêmes effets.

Savoir comment interpréter les résultats obtenus en laboratoire est pourtant capital, car le bisphénol A n'est pas le seul perturbateur endocrinien auquel est exposée la population. Des milliers d'autres substances auraient des propriétés similaires, par exemple des produits limitant la propagation des flammes, des pesticides et des antimicrobiens. Et il est important de considérer l'effet combiné d'une exposition à de multiples perturbateurs endocriniens. Récemment, une équipe de recherche de l'Université d'État de Washington n'a pas pu reproduire les effets du bisphénol A sur les ovaires de souris. En fait, ces effets n'étaient observés que chez des souris soumises à un régime riche en soja, un aliment naturellement riche en génistéine qui est aussi un perturbateur endocrinien. Le régime

alimentaire, parmi d'autres différences méthodologiques, pourrait expliquer pourquoi les résultats obtenus sur l'effet des faibles doses de bisphénol A sont contradictoires.

Mettre en œuvre le principe de précaution ?

Qui plus est, les perturbateurs endocriniens auraient des effets d'une génération à l'autre. Par exemple, on commence à craindre que les filles des « filles distilbène » (désignées sous le nom de « petites-filles distilbène ») puissent aussi être confrontées à des troubles de la reproduction. Pour elles, l'exposition s'est produite alors qu'elles n'étaient que des cellules germinales dans les ovaires en développement de leurs mères, dans l'utérus de leurs grands-mères.

Comment les effets d'une perturbation endocrinienne se transmettent-ils aux générations suivantes ? Des mécanismes épigénétiques seraient en cause. L'hérédité épigénétique implique des changements

dans les schémas d'expression des gènes sans modification de la séquence des gènes. Si des modifications épigénétiques ont lieu dans les cellules germinales, la transmission aux générations suivantes est possible. Randy Jirtle, de l'Université Duke aux États-Unis, a montré que le bisphénol A engendre des modifications épigénétiques chez la souris. D'autres molécules, tels les biphenyles polychlorés (ou PCB) et la vinclozoline, un fongicide, ont des effets transgénérationnels, sans doute par des mécanismes épigénétiques.

Étant donné ce contexte complexe, une stratégie scientifique claire pour identifier, étudier et contrôler les composés suspectés d'être des perturbateurs endocriniens est nécessaire. Presque 40 ans après l'interdiction du DDT, un pesticide mais aussi le premier perturbateur endocrinien reconnu, les nouveaux produits chimiques ne sont pas toujours testés pour leurs propriétés endocriniennes. Aujourd'hui, les effets du bisphénol A continuent à faire débat, mais il y a suffisamment de preuves chez l'animal pour justifier des mesures de précaution. ■

Et tout s'éclaire

france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

CRÉAM ON - photo France / Christophe Jarrin

Des **super-Terres** accueillantes

Dimitar Sasselov et Diana Valencia

Il existe sans nul doute d'innombrables planètes extrasolaires. Mais à quoi ressemblent-elles ? Les modèles suggèrent qu'un grand nombre d'entre elles seraient semblables à la Terre, et susceptibles d'abriter la vie.

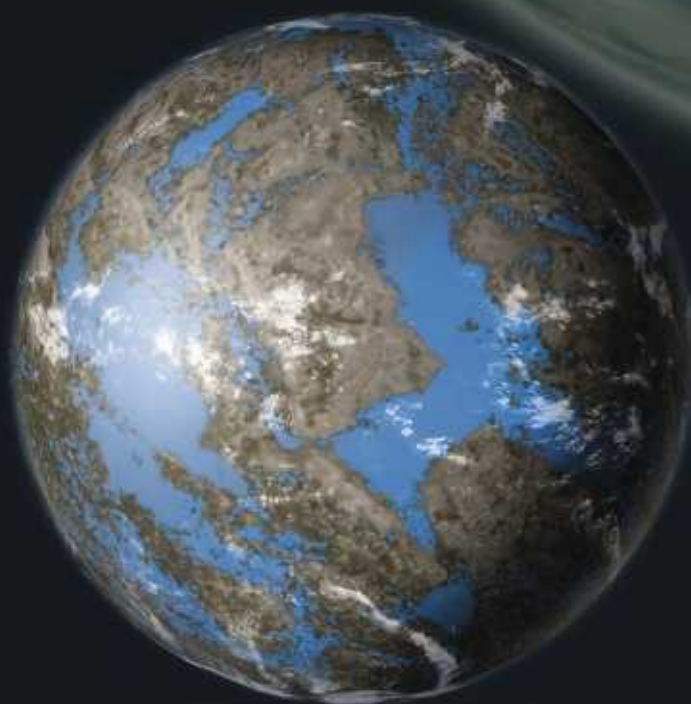
L'ESSENTIEL

✓ Le rythme de détection des planètes extrasolaires s'accélère ; on commence à découvrir des planètes de quelques masses terrestres.

✓ Selon les modèles, les planètes rocheuses plus grosses que la Terre pourraient être géologiquement actives et avoir une atmosphère et un climat stables.

✓ Les conditions sur certaines de ces « super-Terres » pourraient être favorables à la vie.

LES PLANÈTES EXTRASOLAIRES déjà découvertes (490 à la fin août 2010) sont pour la plupart des géantes gazeuses semblables à Jupiter (*en haut et en bas sur cette vue d'artiste*). Mais on commence à détecter des planètes plus petites qui pourraient ressembler à des versions agrandies de la Terre. D'autres seraient couvertes d'eau (*au centre*).





Vous êtes en train de contempler le ciel nocturne. Vous regardez en direction d'une étoile autour de laquelle tourne, avez-vous lu, une planète au statut particulier. Même si vous ne pouvez pas la voir – vous apercevez à peine l'étoile elle-même –, vous savez qu'elle est plusieurs fois plus grosse que la Terre et pour l'essentiel constituée de roches. Des séismes en agitent parfois la surface, qui est en grande partie recouverte d'océans. Son atmosphère n'est pas si différente de celle que nous respirons, et son ciel est balayé de fréquentes tempêtes et souvent obscurci par des cendres volcaniques. Abrite-t-elle la vie ? Selon les scientifiques, ce n'est pas impossible...

Cette rêverie astronomique pourrait bientôt devenir réalité. Bien que la plupart des quelque 500 planètes extrasolaires découvertes jusqu'à présent soient des géantes gazeuses ressemblant plutôt à Jupiter, les astronomes commencent à en découvrir certaines – notamment grâce au télescope spatial européen CoRoT – qui pourraient ne pas être très différentes de la Terre. Et l'Observatoire spatial américain *Kepler*, lancé l'année dernière, en découvrira sans doute bien davantage.

Bien sûr, ces exoplanètes se trouvent à des années-lumière, si bien que même nos télescopes les plus perfectionnés ne sont pas en mesure de discerner les détails de leur surface (montagnes, nuages, mers, etc.). Peut-être ne le pourront-ils jamais. En général, nous pouvons seulement mettre en évidence de façon indirecte la présence d'une planète, et estimer sa masse et la taille de son orbite. Dans certains cas, les instruments ont réussi à obtenir des informations sur le diamètre de la planète et quelques autres détails. On connaît ainsi grossièrement la composition atmosphérique et la dynamique des vents de certaines exoplanètes géantes gazeuses.

Nous sommes donc loin de mesurer des données précises concernant la géologie, la chimie ou d'autres caractéristiques des exoplanètes. Et pourtant, à partir de quelques éléments, les chercheurs sont capables de dresser des portraits complexes de ces planètes lointaines, à l'aide de modèles théoriques, de simulations numériques et même d'expériences de laboratoire, combinés aux connaissances établies pour la Terre et les autres planètes du Système solaire.

Dans nos recherches, par exemple, nous avons modélisé des planètes de

Ron Miller

composition similaire à celle de la Terre. Nous avons découvert que de telles planètes, même quand elles sont bien plus massives que la nôtre, semblent géologiquement actives et posséder une atmosphère et un climat qui pourraient être favorables à la vie. En fait, la Terre se situe peut-être à la limite inférieure de la plage de masses possibles pour qu'une planète soit habitable. En d'autres termes, si la Terre avait été un peu plus petite, elle serait devenue aussi stérile que Mars ou Vénus.

Les premières super-Terres

La première planète extrasolaire a été découverte au milieu des années 1990 par la méthode des « vitesses radiales », qui consiste à détecter la présence d'une planète par ses effets gravitationnels sur son étoile. La gravité de la planète imprime un léger mouvement oscillant à l'étoile ; mouvement qui est détecté sous forme d'un décalage du spectre lumineux de l'astre.

Dans les premiers temps, certains chercheurs se sont demandé si ces oscillations résultaient de la physique de l'étoile ou de la présence de planètes en orbite. Il y a une dizaine d'années, l'un

d'entre nous, D. Sasselov, alors spécialiste des étoiles variables, a contribué à montrer que les oscillations étaient bien causées par des planètes, validant ainsi la méthode des vitesses radiales.

D. Sasselov a ensuite rejoint le projet de l'Observatoire spatial *Kepler*, destiné à la recherche des exoplanètes. *Kepler* a finalement été mis en orbite en 2009. Comme CoRoT, il est conçu pour détecter des planètes par la méthode des transits, c'est-à-dire en observant les petites baisses de luminosité périodiques d'une étoile lorsqu'une planète en orbite passe devant elle. Le télescope de *Kepler* pointe sur une petite région du ciel près de la constellation du Cygne. Sa caméra à grand-angle suivra environ 150 000 étoiles en continu durant trois ans. *Kepler* devrait permettre de trouver des centaines de nouvelles planètes, dont certaines aussi petites que la Terre.

Dès les premiers stades de planification de la mission, D. Sasselov a réalisé que les scientifiques ne sauraient pas nécessairement exploiter la masse de données produites par *Kepler*. Par exemple, personne n'avait alors modélisé les processus géologiques à l'œuvre dans une grosse planète tellurique. Face à ce constat, D. Sasselov commença à travailler avec Richard

✓ SUR LE WEB

Site du télescope spatial Kepler : <http://kepler.nasa.gov/>

Le site de la mission CoRoT : <http://sci.esa.int/corot/>



Commentez cet article sur : www.pourlascience.fr

DESTINATIONS DE CHOIX DANS LA VOIE LACTÉE

Parce que les grosses planètes sont plus faciles à détecter que les petites, la plupart des 490 planètes connues à ce jour sont massives, jusqu'à huit fois plus que Jupiter. Pour la plupart, on ne peut estimer que leur masse et leur orbite, mais pas leur rayon. Pour certaines, cependant, le rayon est connu. C'est notamment le cas de deux planètes relativement petites, les super-Terres CoRoT-7b et GJ1214b.

PLANÈTE : Terre

TYPE : Tellurique (rocheux)

MASSE : 1 masse terrestre

RAYON : 1 rayon terrestre (6 371 kilomètres)

PÉRIODE ORBITALE : 365 jours

La géologie active, couplée à la « bonne » distance de la planète à son étoile mère, contribue à maintenir des températures de surface propices à la persistance de l'eau liquide. Très hospitalière pour la vie.

PLANÈTE : GJ1214b

TYPE : Super-Terre

DATE DE DÉCOUVERTE : 2009

MASSE : 6,55 masses terrestres

RAYON : 2,7 rayons terrestres

PÉRIODE ORBITALE : 38 heures

Une des deux seules super-Terres dont on connaît le rayon. Elle s'apparente davantage à une mini-Neptune, avec un intérieur de glace et de roche, et une enveloppe gazeuse.

PLANÈTE : CoRoT-7b

TYPE : Super-Terre rocheuse

DATE DE DÉCOUVERTE : 2009

MASSE : 4,8 masses terrestres

RAYON : 1,7 rayon terrestre

PÉRIODE ORBITALE : 20 heures

La première super-Terre dont on a mesuré le rayon. Elle présente toujours la même face à son étoile ; celle-ci est si chaude qu'elle est fondue en permanence. Des nuages de silice s'élèvent et se condensent sur le côté nuit constamment glacial.

PLANÈTE : Kepler 7b

TYPE : Géante gazeuse

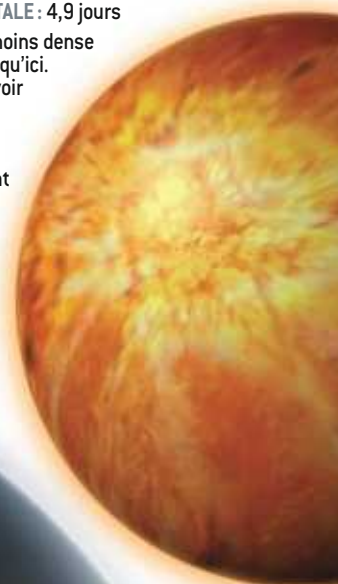
DATE DE DÉCOUVERTE : 2009

MASSE : 0,43 masse de Jupiter

RAYON : 1,48 rayon de Jupiter

PÉRIODE ORBITALE : 4,9 jours

La planète la moins dense découverte jusqu'ici. Elle pourrait avoir un petit noyau rocheux, mais elle est essentiellement gazeuse.



O'Connell, spécialiste de la structure de la Terre à l'Université Harvard.

Suite à une conversation avec D. Sas-selov, R. O'Connell demanda à ses étudiants de réfléchir à la façon dont la taille de la Terre serait modifiée si sa masse était supérieure. Dans quelle mesure le supplément de gravité contracterait-il la planète ? La question passionna Diana Valencia (l'autre auteur de cet article), une de ses étudiantes, qui s'engagea dans le champ de la dynamique des exoplanètes.

Dans le Système solaire, la Terre est la plus grosse des planètes rocheuses (ou telluriques), de sorte que l'on n'avait pas envisagé de planètes rocheuses plus massives, qualifiées aujourd'hui de super-Terres. Lorsque nous avons soumis en 2004 notre premier article sur le sujet, de nombreux planétologues restaient perplexes : les seules exoplanètes découvertes jusqu'alors étaient des géantes de la classe de Jupiter. Pourquoi étudier des planètes telluriques massives, dont l'existence était incertaine ?

Le bien-fondé de notre entreprise a néanmoins été vite confirmé. Par la méthode des vitesses radiales, Eugenio Rivera, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et ses collaborateurs ont découvert en 2005 une planète en orbite autour de l'étoile Gliese 876, dans la constellation du Verseau, qui avait les caractéristiques d'une super-Terre.

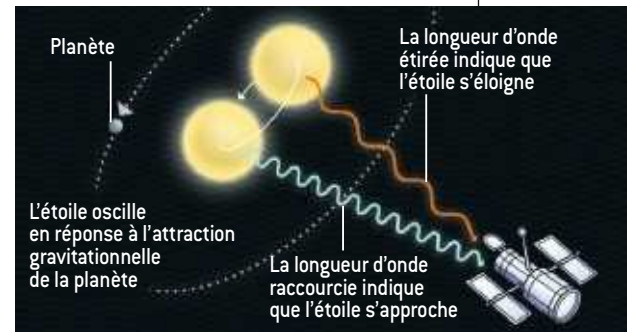
Nommée GJ 876d, cette planète fait le tour de son étoile en deux jours seulement, et sa masse vaut approximativement 7,5 fois celle de la Terre. C'est cependant

COMMENT REPÉRER UNE PLANÈTE

Comparées aux étoiles autour desquelles elles tournent, les planètes sont des sources lumineuses de très faible intensité. Par conséquent, seule une poignée de planètes extrasolaires, toutes grosses et brillantes, ont été « vues » directement, c'est-à-dire comme un point lumineux distinct de leur étoile. Dans certains cas, les astronomes ont distingué le spectre de la lumière réfléchi par la planète mélangé à celui de l'étoile. La plupart des autres planètes n'ont été détectées que de façon indirecte, en général par la méthode des vitesses radiales ou celle des transits.

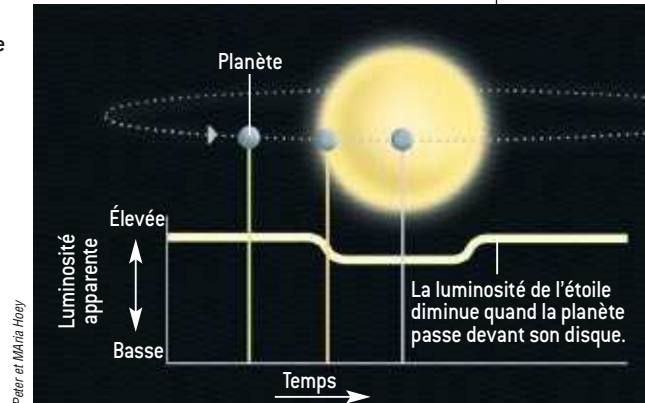
MÉTHODE DES VITESSES RADIALES

Tout au long de son orbite, une planète attire légèrement vers elle son étoile. Les infimes changements de la vitesse relative de l'étoile par rapport à la Terre qui en résultent se traduisent par des décalages tenus dans le spectre lumineux de l'étoile. On sait détecter des variations d'à peine un mètre par seconde. Leur périodicité révèle la présence de la planète.



MÉTHODE DES TRANSITS

Si l'orbite d'une planète croise la ligne de visée de son étoile à la Terre, elle bloque partiellement la lumière de l'étoile, comme une éclipse de Lune obscurcit le Soleil. Le transit d'une planète de la taille de Jupiter fait baisser la luminosité de son étoile d'environ un pour cent (cela dépend aussi de sa distance à l'étoile) ; pour une planète de la taille de la Terre, la baisse est d'environ 0,01 pour cent. Une variation aujourd'hui décelable.



PLANÈTE : HD149026b

TYPE : Géante gazeuse

DATE DE DÉCOUVERTE : 2005

MASSE : 0,36 masse de Jupiter

RAYON : 0,65 rayon de Jupiter

PÉRIODE ORBITALE : 69 heures

La planète géante la plus dense découverte à ce jour. Son orbite est si proche de son étoile que sa température en surface dépasserait 2 000 °C.

PLANÈTE : Osiris (HD209458b)

TYPE : Géante gazeuse

DATE DE DÉCOUVERTE : 1999

MASSE : 0,69 masse de Jupiter

RAYON : 1,32 rayon de Jupiter

PÉRIODE ORBITALE : 3,5 jours

Une des rares planètes dont la lumière a été isolée dans le spectre de son étoile. Son spectre révèle la présence d'oxygène et de carbone dans l'atmosphère. Il y aurait également de la vapeur d'eau.

PLANÈTE : Fomalhaut b

TYPE : Géante gazeuse

DATE DE DÉCOUVERTE : 2008

MASSE : 0,5 à 3 masses de Jupiter

RAYON : 1 rayon de Jupiter ?

PÉRIODE ORBITALE : 872 ans

Une des rares planètes extrasolaires, et l'objet de plus faible masse hors du Système solaire, à avoir été détectées de façon directe.

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.

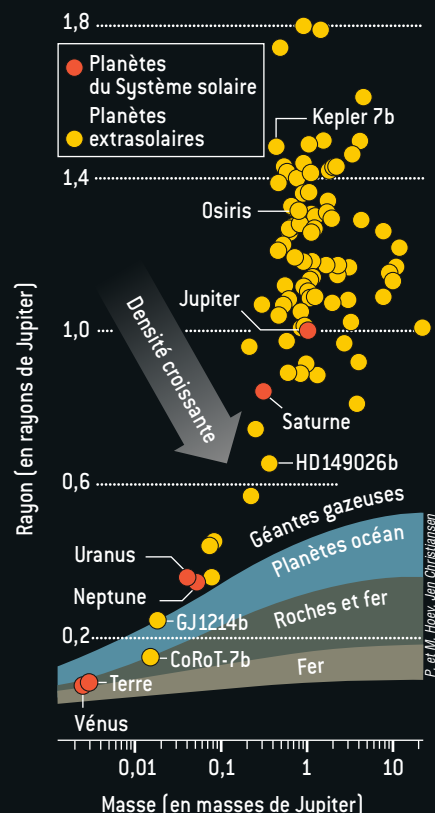
Mais d'après des calculs théoriques récents, les pressions qui règnent dans le noyau d'une grosse planète sont telles que le fer peut rester solide jusqu'à des températures de 10000 degrés. Or les planètes ne dépassent sans doute ces températures que dans leur prime jeunesse, et

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.

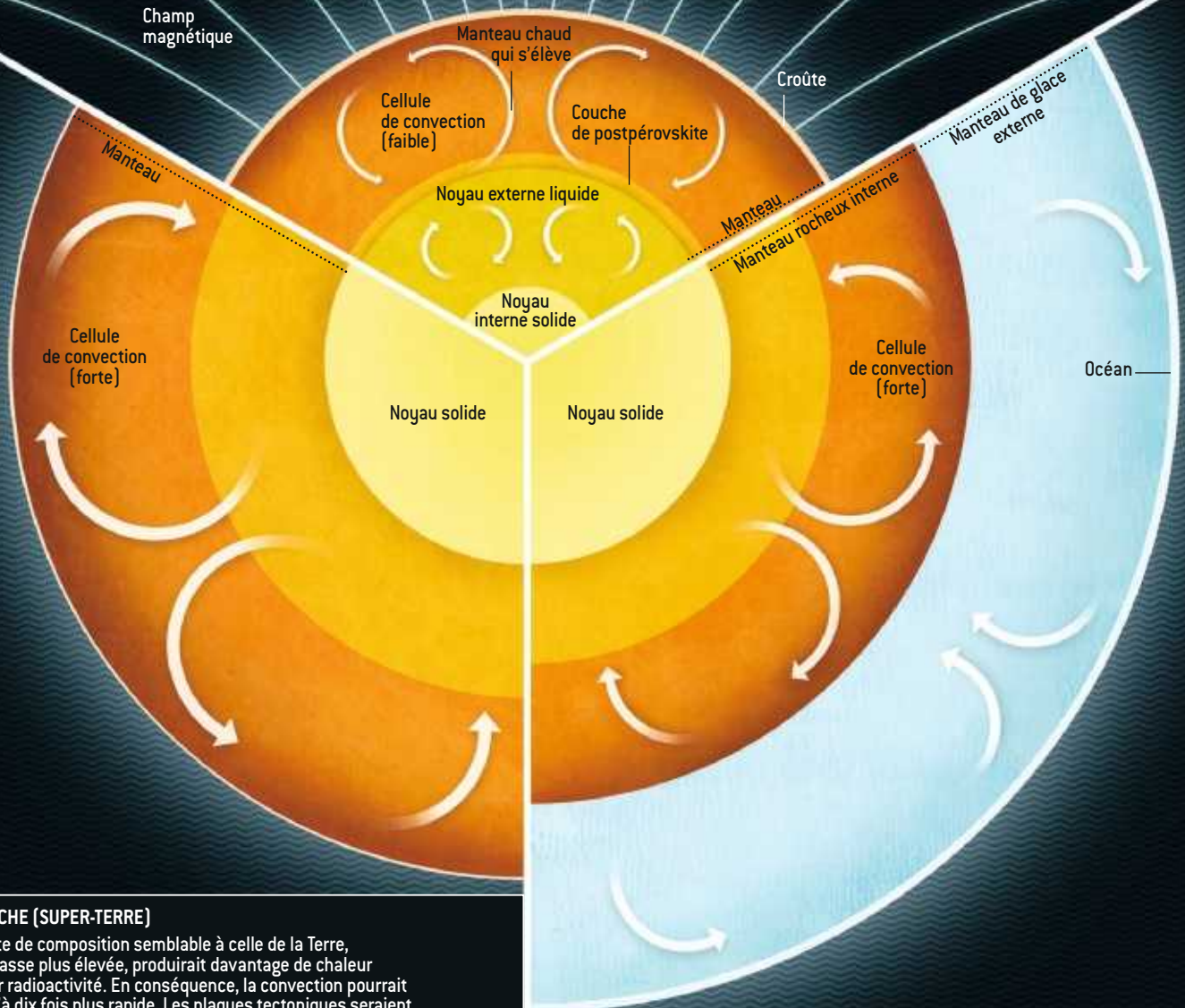
▼ TROIS TYPES DE PLANÈTES ROCHEUSES

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.



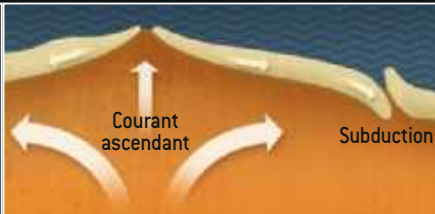
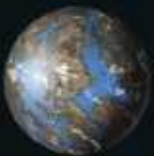
FER ET ROCHE (TERRE)

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.

✓ 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 CO₂ 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

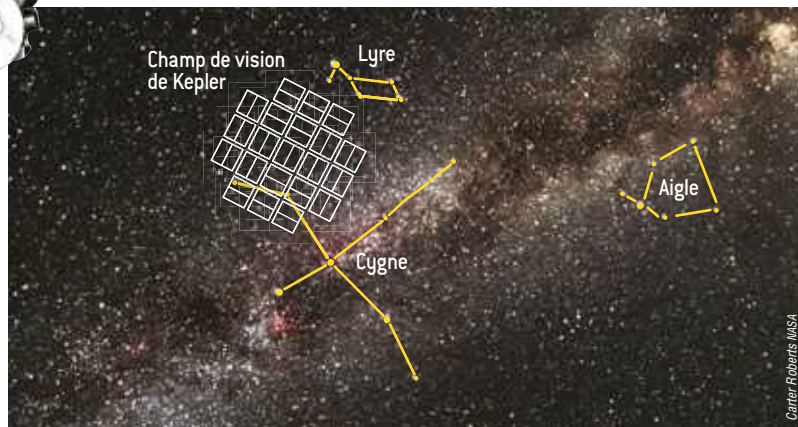
Sur une super-Terre, la durée de formation et la durée de vie des plaques raccourcissent, ce qui rend le cycle carbone-silicate plus rapide et moins sensible aux perturbations. À certains égards donc, les super-Terres pourraient être encore plus hospitalières pour la vie que les planètes de la taille 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. ■

La toundra, la taïga et le **réchauffement**

L'ESSENTIEL

- ✓ En comparant des photographies des années 1940 et des prises de vue récentes, on constate que les arbustes sont plus nombreux dans la toundra.
- ✓ La forêt boréale « brunit » en raison de la sécheresse, d'incendies plus intenses, et d'infestations par les insectes.
- ✓ Ces transformations ont des répercussions sur la faune, la flore et les habitants, et pourraient accélérer le réchauffement climatique.

Matthew Sturm

Dans les régions boréales, le réchauffement climatique réduit la surface occupée par les glaces, et modifie celle de la toundra et de la taïga.



1. LA VÉGÉTATION DU NORD DE L'AMÉRIQUE subit un verdissement de la toundra (zones beiges et marron), par exemple dans la région du North Slope (en haut à gauche), et un brunissement de la forêt boréale, ou taïga, la large bande verte s'étendant d'Ouest en Est.