

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.

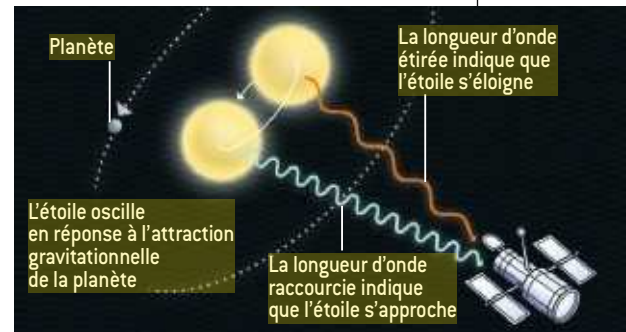
Nommée GJ 876d, cette planète fait le tour de son étoile en deux jours seulement, et sa masse vaut approximativement 7,5 fois celle de la Terre. C'est cependant

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

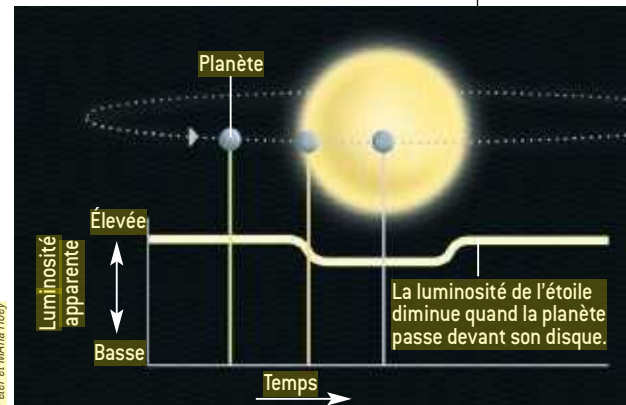
Tout au long de son orbite, une planète attire légèrement vers elle son étoile. Les infimes changements de la vitesse relative de l'étoile par rapport à la Terre qui en résultent se traduisent par des décalages ténus dans le spectre lumineux de l'étoile. On sait détecter des variations d'à peine un mètre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

Peter et Maria Hody



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.

