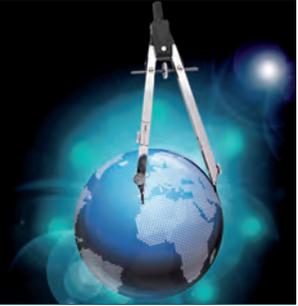


Ces Terres d'ailleurs

Roger Ferlet

Directeur de recherche CNRS
Institut d'Astrophysique de Paris



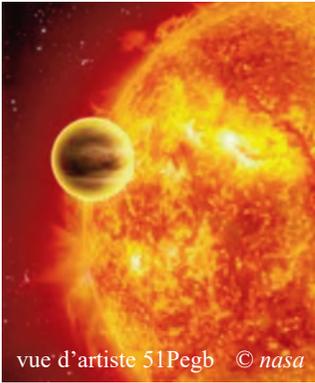
En 1995, les sciences planétaires ont fait irruption dans tous les médias : des astronomes suisses, utilisant un spectrographe à l'Observatoire de Haute Provence, annonçaient la découverte de la première planète qui tournait autour d'une autre étoile que notre Soleil. Près de quatre siècles après que Giordano Bruno ait été brûlé à Rome en partie pour avoir affirmé la pluralité des mondes, la science commençait à mettre en place les moyens de répondre à l'une des plus anciennes questions que se pose l'Humanité : sommes-nous seuls ?

Comment détecter les exoplanètes ?

A l'instar d'un lanceur de marteau qui prend son élan, dans un système étoile – planète (*l'étoile représentant le lanceur et la planète le marteau*), ce sont en fait les deux astres qui tournent autour du centre de masse du système. La planète demeure invisible, mais sa présence provoque un petit mouvement périodique de son étoile, que l'on cherche à mettre en évidence.

Le moyen le plus simple est de repérer au cours du temps la position du centre de l'étoile sur le plan du ciel ; mais l'amplitude du mouvement est extrêmement faible et encore hors de portée de l'instrumentation actuelle, au moins depuis le sol.

Un autre moyen fait appel à la spectroscopie. Si l'on fait le spectre de l'étoile lorsque, sur son orbite autour du centre de gravité du système, elle se rapproche de l'observateur, son spectre sera décalé par l'effet Doppler-Fizeau vers les longueurs d'onde plus courtes ; inversement, le même spectre sera décalé vers les longueurs d'onde plus grandes lorsque l'étoile sur son orbite s'éloigne de l'observateur. Là aussi, le décalage à mesurer est très petit ; mais en 1995, les Suisses ont pu atteindre une précision de mesure suffisante pour détecter un objet en orbite autour de l'étoile de type solaire *51Pegasi*. Avec cette méthode dite des vitesses radiales, il est possible de déduire la masse de la planète (stricto sensu, une limite supérieure ; notons également que si le système est vu de face depuis la Terre, il n'y a plus d'effet Doppler-Fizeau). Ainsi, *51Pegb*



vue d'artiste 51Pegb © nasa

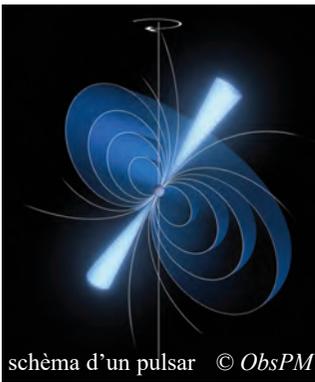


schéma d'un pulsar © ObsPM

(*b* pour désigner la planète autour de 51Peg) possède une masse moitié de celle de Jupiter. Mais la surprise était également dans la période de cette planète – 4,2 jours – ce qui implique (lois de Képler) qu'elle se trouve à 7,5 millions de kilomètres de son étoile, à comparer à la période de Jupiter, 11,9 ans soit 778 millions de km !

Un troisième moyen pour mettre en évidence le petit mouvement périodique de l'étoile autour du centre de gravité du système consiste à trouver une étoile qui soit une horloge extrêmement régulière et chercher si des décalages temporels anormaux apparaissent au cours du temps. Une telle horloge céleste s'appelle un *pulsar*, mais ce peut être aussi une étoile binaire à éclipse ou bien même un système avec une planète déjà connue. C'est en 1992 que de premiers objets ont été détectés autour d'un pulsar (résidu de l'explosion d'une étoile très massive en supernova). Bien que la stricte définition d'une planète extrasolaire soit

d'être en orbite autour d'une étoile *allumée* de la séquence principale (ce que ne sont pas les pulsars, qui en plus sont très rares), ces *planètes-pulsars* représentent néanmoins les corps en orbites régulières les moins massifs connus à ce jour hors du Système Solaire, l'un d'entre eux étant juste un peu plus massif que notre Lune !

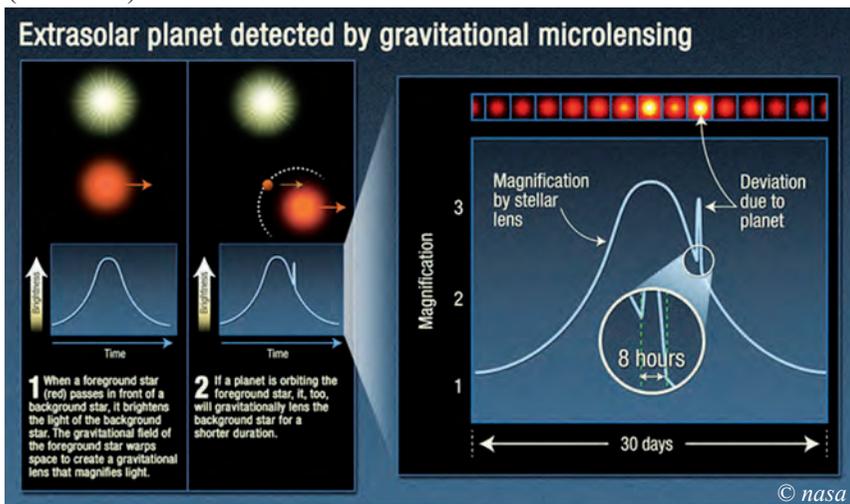
Des observations indirectes aux observations directes

Ces différents moyens sont indirects, la planète demeurant invisible pour deux raisons principales. D'une part, les étoiles comme le Soleil sont environ 10 milliards de fois plus brillantes en lumière visible que les planètes ; le contraste est donc colossal. D'autre part, la séparation angulaire entre une planète et son étoile est très faible ; par exemple, à sa plus grande élongation la distance Soleil-Terre vue depuis 100 années lumière correspond à 0,03" seconde d'angle seulement (un peu moins de 1/1000000°). Ainsi, pour des extraterrestres situés à une trentaine d'années lumière du Soleil, photographier la Terre serait équivalent à vouloir imager depuis Paris un ver luisant placé à 30 cm d'un phare à Marseille !

Cela reste hors de portée des moyens instrumentaux actuels.

Cependant, le rapport des flux dans la lumière infrarouge n'est plus que d'environ 10 millions et depuis 2004, il devient possible de faire des images directes d'objets sub-stellaires.

Il existe par ailleurs deux principales méthodes photométriques de détection d'exoplanètes. La première fait appel à la Relativité Générale d'Einstein. Prenons un observateur regardant une étoile source très lointaine, laquelle bien sûr émet des rayons lumineux dans toutes les directions de l'espace. Supposons qu'entre cet observateur et la source se trouve une autre étoile massive, même invisible. Des rayons lumineux provenant de la source qui, sans étoile intermédiaire, ne passeraient pas par l'observateur, sont *déviés* par la masse de cette étoile intermédiaire (la lentille) et arrivent dans l'œil de l'observateur.

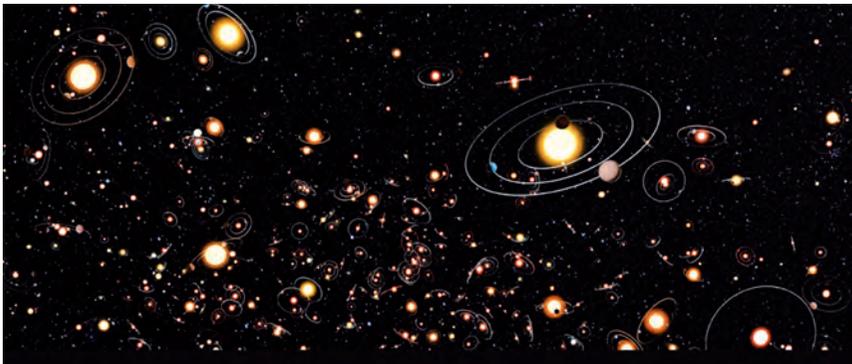


Au final, la présence de cette lentille gravitationnelle provoque pour l'observateur une amplification de la lumière de la source, et lorsque dans leurs mouvements respectifs, les trois – observateur, lentille, source – sont parfaitement, ou presque, alignés, cette amplification est mesurable ; la première détection de cet effet a été réalisée en 1993 simultanément par des équipes française et états-unienne. Supposons maintenant qu'une planète soit en orbite autour de la lentille. Toujours invisible, dans certaines configurations géométriques cette planète pourra elle aussi *dévier* la lumière de la source et provoquer une seconde amplification, bien plus courte, superposée à la première due à son étoile. Cette méthode a donné son premier résultat en 2004 ; depuis, elle a montré qu'elle était capable de détecter des exoplanètes de quelques masses terrestres et cela sans aucun photon de la planète elle-même !

L'autre méthode photométrique s'applique lorsque la Terre se trouve plus ou moins dans le plan orbital du système étoile-planète. Dans ce cas, quand la planète passe devant son étoile elle occulte une fraction du disque stellaire, ce qui se traduit par une diminution de la luminosité de l'étoile. Par exemple, pour des extraterrestres le flux solaire serait diminué d'environ 1% pendant un transit de Jupiter, ce qui est facilement mesurable. Le premier transit d'une exoplanète a été identifié en 1999 avec un petit télescope au sol, puis longuement étudié ensuite avec le Télescope spatial Hubble (HST) ; il s'agissait de HD 209458 b (transit de $\sim 1,4\%$), que nous appelons aussi Osiris. Evidemment, l'avantage de cette méthode est de donner accès à la taille de la planète. Osiris avait été détectée auparavant par la méthode des vitesses radiales. En combinant sa masse et son rayon, on en déduit donc sa masse volumique ($0,34 \text{ g/cm}^3$). C'était la preuve définitive que l'on a bien à faire à une planète géante gazeuse, analogue à notre Jupiter.

A ce jour (mi-avril 2013), 861 planètes extrasolaires ont été détectées dans 677 systèmes planétaires dont 128 possèdent plus d'une planète (jusqu'à 6 actuellement dans quelques cas). Sur les 861, la méthode des vitesses radiales en a fourni plus de 500, dont près de 300 transitent leur étoile.

Si l'on extrapole les résultats actuels à l'ensemble de notre Galaxie la Voie lactée qui compte plus de 100 milliards d'étoiles, le nombre de planètes extrasolaires s'élève sans doute à **plusieurs centaines de millions**, sans compter les petites planètes comme la Terre qui commencent seulement à être détectables. En fait, des études statistiques sophistiquées semblent indiquer la présence de planètes autour de la grande majorité des étoiles.

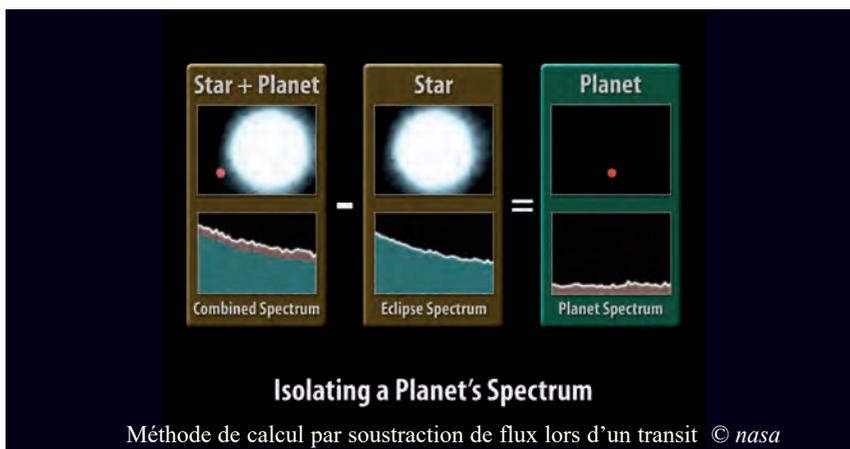


Cette vue d'artiste illustre qu'en moyenne, il existe au moins une planète par étoile dans notre galaxie, la Voie Lactée, et que les planètes de faible masse (bleutées) sont plus nombreuses que les planètes géantes gazeuses (orangées). C'est la conclusion à laquelle est parvenue une étude statistique basée sur six ans d'observation de microlentilles gravitationnelles. © ESO

Les propriétés de ces systèmes sont extrêmement diverses. Par exemple, l'excentricité des orbites est parfois très grande (0,93 dans un cas), contrairement à notre Système Solaire. Mais la plus grande surprise a sans doute été la découverte des *jupiters chauds*, dont les périodes sont inférieures à 5 jours et qui sont donc très proches de leur étoile ; ils représentent environ 20% des exoplanètes connues, dans une situation là aussi très différente du Système Solaire. Le scénario conventionnel de formation des planètes (accumulation de particules de poussières et glaces) implique une formation loin de l'étoile. Or les jupiters chauds sont observés très proches de leur étoile. La théorie est-elle alors mise à mal ? Il semble bien que non car un mécanisme de migration a été proposé (d'ailleurs avant la découverte des exoplanètes) pour rapprocher de son étoile la planète géante en train de se former dans un disque circumstellaire dense en gaz et en poussières.

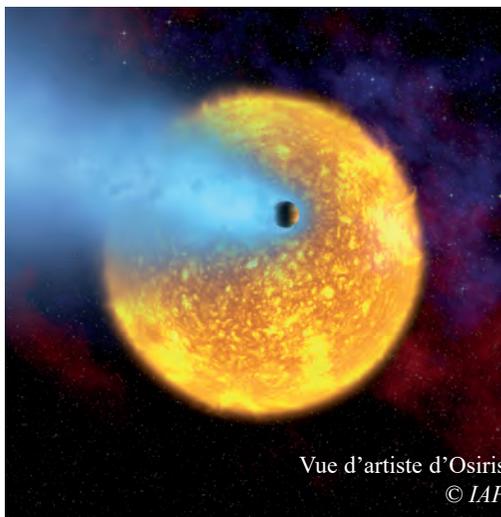
Le transit des planètes

Dans le cas des planètes qui transitent leur étoile, il est possible d'observer directement les photons émis par la planète elle-même lorsque celle-ci passe derrière son étoile. A ce moment-là, le flux provient de l'étoile seule, et par soustraction au flux reçu en dehors de ce transit secondaire, on obtient l'émission thermique de la planète elle-même. Ceci a été réalisé pour quelques jupiters chauds, dans l'infrarouge avec le télescope spatial Spitzer, et il en a été déduit la température effective de la planète – supérieure à 1000 K, 1150 K pour Osiris – ainsi que son albédo. Les planètes qui transitent devant leurs étoiles sont des cibles particulièrement intéressantes pour sonder leur environnement. En effet, pendant le transit la lumière de l'étoile traverse l'atmosphère de la planète et le spectre de l'étoile doit alors révéler les signatures spectrales dues à cette atmosphère.



La première détection de l'atmosphère d'une planète extrasolaire fut celle d'Osiris en 2002, dans la lumière du sodium, puis en 2003 et 2004 en hydrogène, carbone et oxygène, toujours grâce à HST.

Là encore, une surprise a surgi. L'absorption additionnelle due à l'atmosphère d'Osiris est si importante pour ces trois derniers éléments qu'il a fallu en conclure que la planète perd de sa masse, car son atmosphère s'évapore violemment. Des molécules sont également détectables.... y compris l'eau.

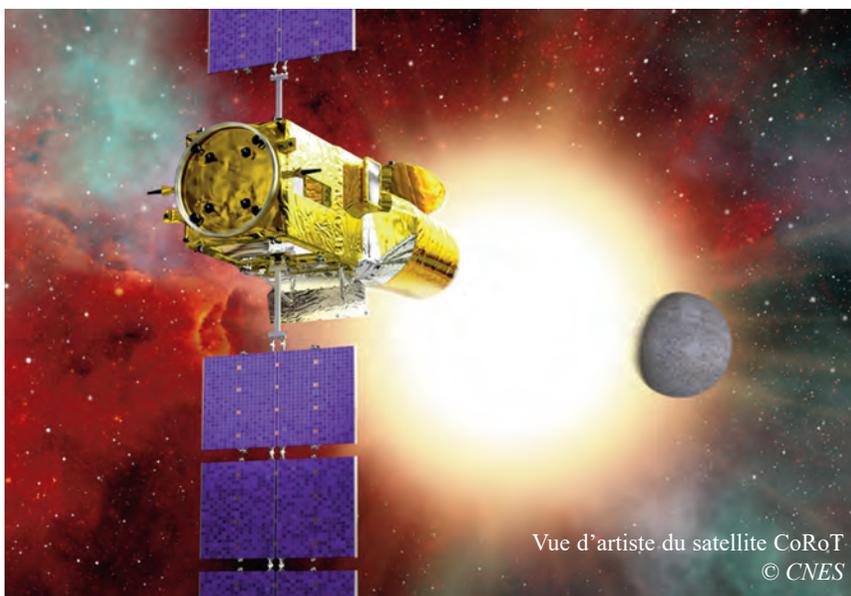


Vue d'artiste d'Osiris
© IAP

Ce phénomène d'évaporation peut influencer sur l'évolution de la planète, s'il agit sur une échelle de temps inférieur à l'âge de l'étoile. Il semble que ce pourrait être le cas des exoplanètes ayant les plus courtes périodes (environ moins de trois jours) et des masses inférieures à la moitié de celle de Jupiter. Dans ce cas, l'atmosphère pourrait même finir par disparaître entièrement, en laissant à nu un cœur central rocheux d'une dizaine de masses terrestres, peut-être avec une surface de lave *active* similaire à celle de Io (le satellite de Jupiter). Mais cela reste à confirmer.



tailles de petites exoplanètes © nasa



Vue d'artiste du satellite CoRoT
© CNES

Le satellite français CoRoT lancé en décembre 2006, cherche des exoplanètes par la méthode du transit. Début 2009, il a annoncé la découverte d'une exoplanète de rayon 1,7 fois celui de la Terre. La mission KEPLER de la NASA lancée en mars 2009 a déjà identifié quelques milliers de transits dont probablement la majorité sera confirmée comme planètes.

La course aux exoplanètes de moins en moins massives continue donc de plus belle. Très récemment, une exoplanète pas plus massive que notre Terre a été détectée autour de l'étoile la plus proche du Système Solaire, α Centauri B. Par ailleurs, on connaît quelques cas d'exoplanètes situées dans la *zone habitable* de leur étoile hôte, comme la Terre ou Mars sont dans la zone habitable du Soleil, c'est-à-dire la zone où l'eau (s'il y en a) peut être liquide. Enfin, des variations temporelles de la signature spectrale de l'évaporation de l'atmosphère d'une planète extrasolaire viennent d'être interprétées comme la manifestation pour la première fois de l'influence de l'étoile hôte sur l'atmosphère (ce qu'on appelle la météorologie spatiale dans le cas de notre Système Solaire). L'ultime défi sera de mettre en évidence des signatures spectrales dues, sans ambiguïté, à des mécanismes biologiques.

R.F.