

La grande diversité des systèmes planétaires extrasolaires

Guillaume Hébrard, directeur de recherche au CNRS, Institut d'astrophysique de Paris, hebrard@iap.fr

Actuellement plus de quatre mille exoplanètes sont répertoriées. De quoi permettre à l'auteur de cet article de procéder à un classement par grandes catégories, de transmettre des informations sur les périodes orbitales, les masses, les conditions potentielles, relatives à l'apparition et au développement de la vie.

Des exoplanètes par milliers

En 1995, les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz annonçaient leur découverte de 51 Peg b, première planète détectée autour d'une étoile similaire au Soleil. Ce résultat, obtenu à l'Observatoire de Haute-Provence et pour lequel ils se sont vus attribuer le Prix Nobel de physique en 2019, a provoqué une véritable révolution en astrophysique. Les exoplanètes, dont pas grand monde ne doutait de l'existence mais qui restaient inobservables jusque-là, sont par la suite devenues un sujet de recherche pour des astronomes de plus en plus nombreux à travers le monde. Les programmes d'observation visant à détecter et caractériser de nouvelles exoplanètes se sont multipliés, de même que les études théoriques et les simulations visant à mieux comprendre leurs modes de formation et d'évolution.

C'est la méthode des vitesses radiales qui a tout d'abord permis les détections les plus nombreuses, cette première place étant par la suite prise par la méthode des transits. De nombreuses caractéristiques des systèmes exoplanétaires peuvent être déduites au moyen de ces deux techniques d'observation. D'autres méthodes, comme l'imagerie directe ou les microlentilles gravitationnelles, permettent également de détecter des exoplanètes, en nombre plus faible mais en apportant d'autres types de contraintes.

En vingt-cinq ans, ce sont plus de 4 000 planètes extrasolaires qui ont été détectées et caractérisées avec ces différentes méthodes. Ces détections très nombreuses montrent l'omniprésence des planètes dans notre galaxie ; il semblerait que la plupart des étoiles en hébergent. Ces résultats révèlent également une très grande diversité de planètes. Si certaines sont similaires aux planètes du Système solaire, beaucoup d'autres montrent des propriétés très différentes, certaines parfois surprenantes et insoupçonnées.

La figure ci-dessous présente la masse des exoplanètes connues en fonction de leur période orbitale. Trois catégories d'exoplanètes apparaissent clairement sur cette figure : les planètes géantes et tempérées (en haut à droite), les jupiters chauds (en haut à gauche), et les petites planètes (en bas). Ces trois familles sont discutées ici, tout en gardant en tête que la classification des planètes est appelée à évoluer à l'avenir, avec les nouvelles découvertes et leurs probables surprises.

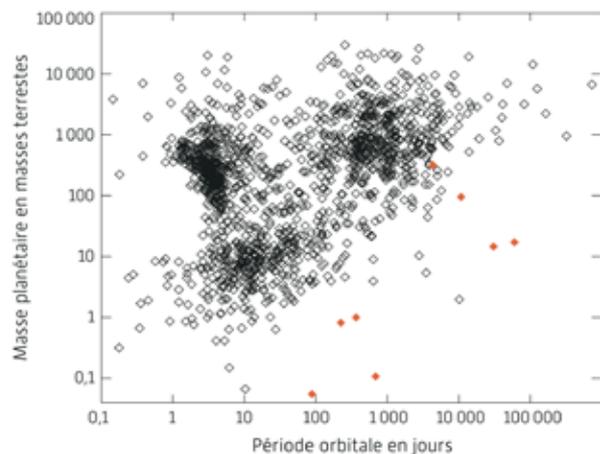


Fig.1. Masses et périodes orbitales des planètes extrasolaires connues. On voit trois grandes populations d'exoplanètes : les planètes géantes et tempérées (en haut à droite), les jupiters chauds (en haut à gauche), et les petites planètes (en bas). Les huit planètes du Système solaire sont indiquées en rouge pour comparaison (© Guillaume Hébrard).

Les exoplanètes géantes et tempérées Des planètes similaires à nos Jupiter et Saturne ?

Les géantes tempérées sont des planètes ayant une taille similaire à celle de Jupiter ou Saturne, et une masse voisine ou même supérieure à celles de ces deux planètes du Système solaire ; elles peuvent atteindre des centaines ou des milliers de masses terrestres. Elles mettent plusieurs centaines de jours ou même plusieurs années à faire le tour de leur étoile. Les géantes tempérées ont donc des propriétés

apparemment semblables à Jupiter ou Saturne et constituent ainsi les exoplanètes connues les plus analogues à celles du Système solaire.

Peu chauffées par leur étoile du fait de leur éloignement à celle-ci, ces planètes restent froides, à des températures généralement en dessous de 0 °C. Il doit probablement s'agir de géantes gazeuses composées essentiellement d'hydrogène et d'hélium, avec éventuellement un noyau solide.

Des exoplanètes ordinaires...

Il semble que 5 à 15 % des étoiles hébergent ce type de planètes géantes tempérées. Elles sont donc assez communes, sans être omniprésentes. Leur fréquence reste difficile à établir précisément. On les trouve préférentiellement autour d'étoiles riches en éléments chimiques lourds, ce qui pourrait être la signature de leur formation par accrétion.

La plupart des planètes géantes tempérées connues ont été décelées au moyen de mesures de vitesses radiales réalisées sur plusieurs années. Quelques-unes ont également été trouvées par microlentilles gravitationnelles. On n'en connaît encore peu identifiées grâce à leurs transits, ceux-ci étant d'autant moins probables que la planète est éloignée de son étoile. Quant aux planètes observées en imagerie directe, elles sont toutes de ce type. Avec la poursuite de tous ces programmes d'observation, des géantes de périodes de plus en plus longues vont continuer à être découvertes à l'avenir.

À l'instar de Jupiter et Saturne, il est possible que des exoplanètes géantes et tempérées hébergent des satellites ou des anneaux. L'environnement proche de certaines d'entre elles est donc sondé au moyen de différentes techniques pour tenter de détecter ces petits corps. Aujourd'hui cependant, aucune détection de satellites ou d'anneaux n'a été confirmée autour d'une planète extrasolaire ; ces objets ne sont observés pour l'instant que dans le Système solaire.

...mais sur des orbites souvent perturbées

Beaucoup de ces planètes géantes tempérées sont dans des systèmes multiplanétaires, comme dans le Système solaire. Mais alors que Jupiter ou Saturne ont des orbites quasicirculaires, beaucoup des exoplanètes géantes et tempérées ont des orbites excentriques, parfois même extrêmement allongées. Cela pourrait être la signature d'histoires mouvementées pour beaucoup d'entre elles, qui ont pu subir les interactions gravitationnelles d'autres planètes ou d'étoiles associées.

En effet, si on adopte une approximation simple, un système planétaire est composé d'une étoile et d'une planète en interaction gravitationnelle mutuelle, l'orbite de la planète autour de l'étoile suivant les lois de Kepler et étant parfaitement périodique et stable. Dans la réalité, les choses sont souvent plus compliquées. Des effets de marées peuvent se produire entre la planète et son étoile, plusieurs planètes peuvent être présentes autour de l'étoile et interagir gravitationnellement entre elles, ou encore la planète peut être perturbée par la présence de satellites, d'un disque circumstellaire ou d'une autre étoile. Des études dynamiques tentent de comprendre et de modéliser ce type d'effets, et de prédire les variations des paramètres orbitaux qu'ils peuvent produire sur de longues échelles de temps.

Enfin, une autre particularité est la faible abondance des planètes géantes sur des périodes orbitales de quelques mois, bien qu'elles soient *a priori* plus facilement détectables que celles ayant des orbites plus longues. Les géantes sont de nouveau plus nombreuses sur des périodes de quelques jours, c'est-à-dire dans le domaine des jupiters chauds discuté ci-dessous. Ce manque de planètes géantes entre le domaine des jupiters chauds et celui des géantes tempérées a été baptisé la « Vallée des périodes ».

Les jupiters chauds

Des exoplanètes extrêmes

Les jupiters chauds sont des planètes géantes, avec des tailles et des masses similaires à celles de Jupiter, mais sur des orbites très proches de leur étoile. Elles en font le tour en quelques jours alors que Jupiter a une période orbitale de près de 12 ans. Les jupiters chauds reçoivent donc beaucoup d'énergie de leur étoile hôte et leur température avoisine les 1 000 °C, contrairement aux géantes tempérées qui sont bien plus froides. Elles subissent également la forte gravité de leur étoile ce qui a pour effet de circulariser leur orbite ; les jupiters chauds sont quasiment tous sur des orbites très peu excentriques.

Du fait de leurs propriétés, la détection des jupiters chauds est particulièrement efficace par les méthodes des vitesses radiales ou des transits. Ces exoplanètes ont donc été les premières à être découvertes et étudiées, et elles continuent à l'être abondamment. Aujourd'hui, des centaines de jupiters chauds ont été identifiées par des programmes d'observation les visant plus particulièrement. Seule une étoile sur cent accueille un jupiter chaud cependant : ce type de planète n'est donc en fait pas particulièrement fréquent autour des étoiles.

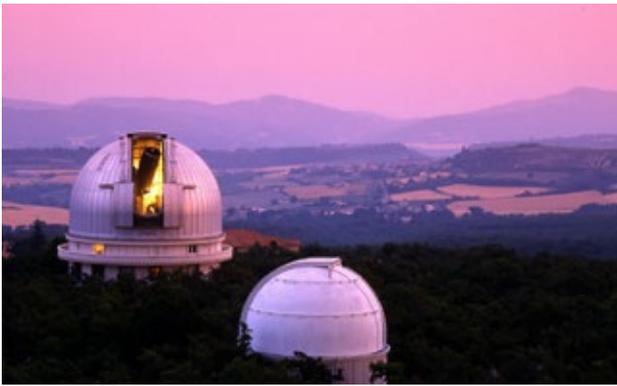


Fig.2. L'Observatoire de Haute-Provence. C'est avec le télescope de 193 cm (au deuxième plan) de cet observatoire qu'a été découverte en 1995 la première exoplanète, le jupiter chaud 51Peg b (© OHP / OSU Institut Pythéas / CNRS / AMU).

Des planètes inattendues

Étant inexistant dans le Système solaire, les jupiters chauds sont des planètes dont la découverte a constitué une surprise. De plus, les modèles théoriques semblent interdire la formation de géantes gazeuses si proches de leur étoile hôte, leurs constituants principaux devant alors être vaporisés. Ces planètes se sont donc vraisemblablement formées plus loin de leur étoile, par exemple à la position actuelle des géantes tempérées, puis ont migré par la suite vers leur étoile.

Différents processus sont à même d'expliquer que des planètes puissent se rapprocher (ou même s'éloigner) de leur étoile hôte au cours du temps. Ces phénomènes sont dus à des interactions de la planète avec son étoile, avec un disque circumstellaire, avec d'autres planètes ou une seconde étoile dans le système. Étudiée depuis longtemps dans le cas du Système solaire, la migration des planètes l'est d'autant plus depuis que les exoplanètes sont observées, notamment les jupiters chauds.

Le disque de gaz et de poussière qui entoure l'étoile après sa formation peut freiner les planètes peu massives et ainsi les faire migrer vers leur étoile. Mais la planète peut être suffisamment massive pour absorber de la matière du disque et y créer une tranchée ; le freinage cesse alors mais la planète peut reprendre sa migration, vers l'intérieur ou l'extérieur suivant les propriétés du disque. Par la suite, des interactions gravitationnelles entre une planète et d'autres planètes ou étoiles dans le système peuvent également modifier son orbite. Dans certaines configurations extrêmes, une planète peut même se faire éjecter de son système.

Ainsi, il est probable que les planètes géantes tempérées aient migré pour devenir des jupiters chauds, et qu'elles en soient donc les précurseurs.

Mais si cette migration vers l'intérieur semble bien établie, de nombreuses inconnues demeurent concernant les détails de ses différentes étapes. On ne sait pas bien, par exemple, quels processus principaux gouvernent l'arrêt de la migration qui permet de les observer à leur position actuelle. On peut de plus se demander quels résidus de planètes pourraient survivre à l'évaporation d'une planète géante s'approchant trop de son étoile. Il est également possible que beaucoup de jupiters chauds soient finalement tombés sur leur étoile.

Les pionniers de l'exoplanétologie

Les jupiters chauds ont joué un rôle important dans l'histoire de l'exoplanétologie et ont notamment montré la grande synergie entre la méthode des vitesses radiales et celle des transits. Elles ont également permis de nombreuses « premières », à commencer par la découverte de la première exoplanète, mais également la première planète en transit, le premier système multiplanétaire, les premières détections de la lumière émise par une exoplanète et même de ses phases...

Ce sont également les jupiters chauds qui ont permis les premières études d'atmosphères exoplanétaires. On peut ainsi observer des espèces chimiques dans ces atmosphères parfois en évaporation, y mesurer la température ou la pression, étudier les processus physiques qui s'y produisent. Ces observations se font notamment lorsque la planète passe juste devant ou derrière son étoile hôte ; ces configurations particulières peuvent en effet permettre de distinguer le spectre de la planète de celui de l'étoile. Dans des atmosphères d'exoplanètes, on a ainsi déjà détecté plusieurs dizaines d'espèces atomiques, ioniques et moléculaires, identifié des processus de chauffage ou de refroidissement, ou encore décelé des variations qui pourraient s'apparenter à des phénomènes météorologiques...

Les jupiters chauds ont d'autre part permis les premières mesures d'obliquités de systèmes exoplanétaires. L'obliquité est l'angle entre le plan orbital d'une planète et le plan équatorial de son étoile hôte, ce dernier étant déterminé par la rotation stellaire¹. Si les orbites planétaires sont généralement alignées avec le plan équatorial de leur étoile², des orbites non alignées ont fini par être décelées, notamment pour des jupiters chauds. Certaines

¹ À ne pas confondre avec l'obliquité d'une planète, angle entre le plan de son orbite et le plan de son équateur.

² On peut mesurer l'angle entre le plan orbital d'une planète et le plan équatorial de son étoile hôte en observant spectralement le transit de la planète devant son étoile, profitant du fait que la rotation stellaire a une signature spectrale.

planètes sont même en orbite polaire, passant au dessus des pôles de leur étoile ; d'autres sont en orbite rétrograde, c'est-à-dire tournant autour de leur étoile dans le sens contraire de la rotation stellaire.

Différents phénomènes pourraient expliquer ces orbites obliques. Ceux qui provoquent la migration des planètes pourraient également modifier leur obliquité, et ainsi désaligner une orbite initialement parallèle au disque protoplanétaire. À l'inverse, l'étoile pourrait avoir basculé par rapport à son orientation initiale.

Les petites exoplanètes

Des super-terres aux neptunes tièdes

Si les planètes géantes présentent deux populations distinctes, à courtes et longues périodes orbitales, les petites planètes semblent elles être abondantes dans toutes les gammes de périodes.

Ces petites exoplanètes ont des tailles caractéristiques allant de une à cinq fois celle de la Terre, et des masses comprises entre une et trente masses terrestres. Au-delà de cette masse supérieure limite, correspondant à dix pour cent de la masse de Jupiter, les planètes sont moins abondantes, jusqu'à devenir de nouveau abondantes dans le domaine des géantes. En masse comme en taille, les petites planètes sont donc bien distinctes des planètes géantes.

Mais ces petites planètes montrent une grande diversité de propriétés. Il y a d'une part des planètes telluriques, semblables à la Terre ou souvent un peu plus grosses et massives, et d'autre part des planètes de taille et masse similaires à celles de Neptune ou Uranus ou légèrement plus faibles, mais plus chaudes et pour l'essentiel gazeuses. Ces petites exoplanètes, que l'on peut nommer super-terres ou neptunes tièdes, sont totalement absentes du Système solaire.

La grande majorité des petites planètes a été identifiée par vitesses radiales et transits, sur des orbites qui ont tendance à être plus circulaires que celles des planètes géantes. Leurs périodes s'étalent de quelques jours à quelques mois. Elles existent certainement également sur de plus longues périodes mais leur détection demandera beaucoup de temps. Quelques petites planètes éloignées de leur étoile hôte ont cependant déjà été découvertes notamment par microlentilles gravitationnelles. Enfin, les petites planètes sont souvent situées dans des systèmes multiplanétaires.

L'omniprésence des petites planètes

Difficiles à déceler et à caractériser précisément, les petites planètes sont cependant clairement les plus abondantes dans notre galaxie. Si on considère

toutes les exoplanètes connues, puis que l'on tente de corriger des différences de sensibilité de chacune des méthodes utilisées pour les repérer, on constate que les planètes sont d'autant plus abondantes que leurs masses et leurs tailles sont petites. Cette tendance est la même quelle que soit la méthode de détection considérée.

Cette répartition en masse et en taille des planètes favorisant les petites planètes est en accord avec les modèles de formation et d'évolution des systèmes planétaires, qui prédisent une plus grande efficacité à former de petites planètes.

Si les chiffres ne sont pas encore connus avec une très bonne précision, il semble que l'on puisse d'ores et déjà conclure que la plupart des étoiles de notre galaxie hébergent une ou plusieurs petites planètes. La découverte de ces petites planètes, super-terres ou neptunes tièdes, apparemment très communes mais totalement absentes du Système solaire, constitue un résultat majeur de l'exoplanétologie.

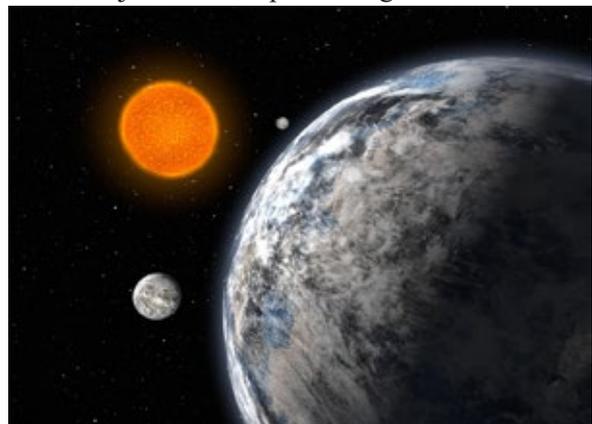


Fig.3. Trois super-Terres en orbite autour d'une étoile. Cette vue d'artiste présente trois exoplanètes telluriques un peu plus grosses et massives que la Terre, qui font le tour de leur étoile en quelques jours (© ESO).

La densité des petites planètes

Ces petites exoplanètes présentent une gamme de densités très étendue. Les plus denses sont des planètes telluriques, probablement composées de fer, de roches, éventuellement en fusion, les plus massives d'entre elles étant les super-terres. Certaines pourraient être entourées d'une fine couche atmosphérique. D'autres petites planètes ont une densité dix fois plus faible et sont donc probablement composées d'une épaisse atmosphère d'hydrogène et d'hélium entourant un noyau solide ; ces planètes auraient ainsi une structure voisine de celle de Neptune ou Uranus.

Une planète de quelques masses terrestres peut donc être une super-terre ou une mini-neptune, suivant que sa densité est plus ou moins élevée. Les

planètes grosses comme un peu moins de deux fois la Terre pourraient constituer la limite entre ces deux régimes. Il existe également des petites planètes de densité intermédiaire ; certaines pourraient être des planètes-océans, avec un cœur solide et une épaisse couche d'eau liquide entourée d'une atmosphère.

Les petites exoplanètes regroupent probablement des astres de natures bien différentes. L'exploration de cette population de petites planètes ne fait que commencer.

Vers des planètes potentiellement habitables ?

Parmi ces nombreuses et diverses petites exoplanètes, on peut se demander lesquelles pourraient présenter des conditions permettant l'apparition et le développement de formes de vie. Il semble qu'une planète potentiellement habitable devrait tout d'abord être tellurique afin que la vie puisse se développer à sa surface sans être écrasée par une trop grande gravité. Elle devrait de plus être entourée d'une atmosphère pour protéger cette surface et permettre les échanges. Du fait de son orbite, elle devrait également n'être ni trop proche, ni trop éloignée de son étoile pour permettre la présence d'eau liquide à sa surface.

Les conditions nécessaires à cette habitabilité demeurent cependant multiples et complexes. Elles sont reliées à l'impact du rayonnement de l'étoile hôte, ce dernier dépendant du type d'étoile et pouvant varier avec le temps. Elles peuvent

également dépendre de processus atmosphériques sur la planète, par exemple l'effet de serre, ou encore de mécanismes géologiques ou d'interactions entre différentes espèces.

Dans ce contexte, les petites étoiles revêtent un intérêt particulier pour la recherche des planètes habitables. Il est en effet plus aisé de détecter des planètes telluriques autour d'étoiles moins massives et plus petites que le Soleil. Ces étoiles, les naines rouges, sont les plus abondantes dans notre galaxie. Étant d'autre part moins chaudes que le Soleil, leurs planètes peuvent en être assez proches tout en permettant la présence d'eau liquide à leur surface. Des planètes potentiellement favorables à l'apparition de la vie pourraient donc être en orbite proche autour d'étoiles naines rouges. De nombreux instruments et programmes d'observation sont mis en place pour étudier les planètes autour de ce type d'étoiles.

Les progrès vont sans aucun doute se poursuivre dans ces thématiques, en associant l'astrophysique avec d'autres disciplines scientifiques, et en mêlant observations, théories, modèles, simulations, expérimentations... S'il est bien sûr difficile d'être trop affirmatif sur ce point particulièrement spéculatif, il semble cependant aujourd'hui raisonnable d'anticiper que ces recherches pourraient permettre, peut-être d'ici à quelques décennies seulement, de détecter les signatures de formes de vies extraterrestres sur des planètes extrasolaires. ■