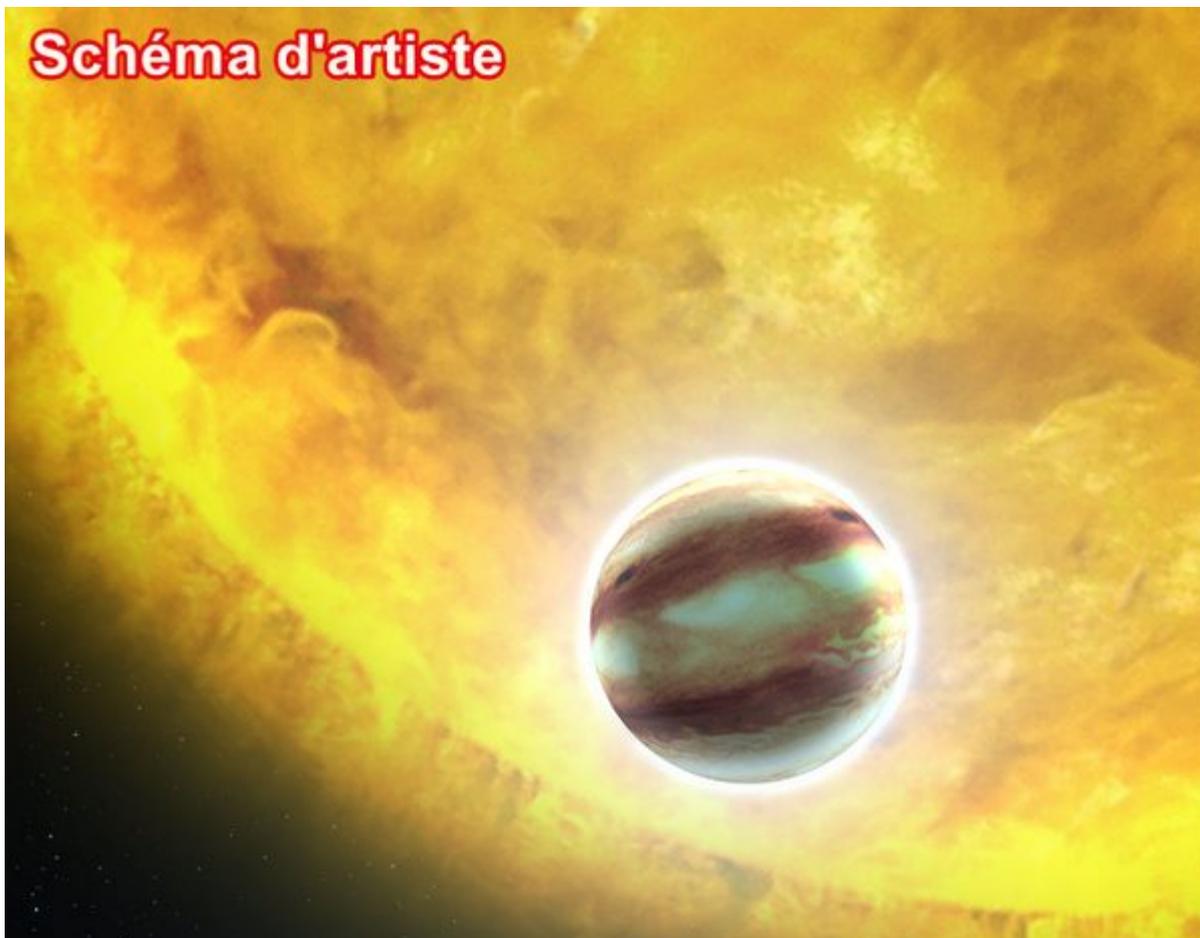
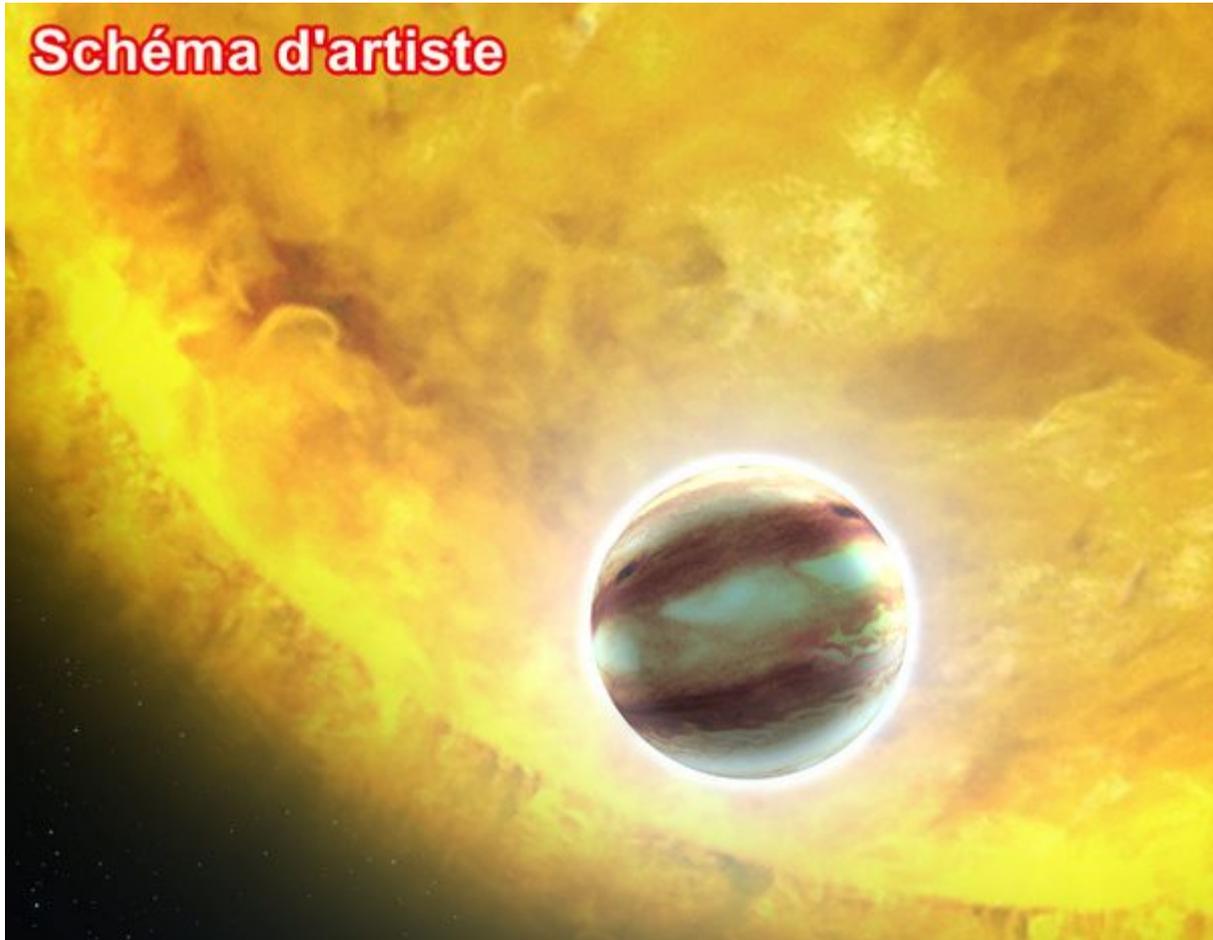


# Les planètes extrasolaires ou exoplanètes 2/2

écrit par Cachou | 27 mai 2024



## Schéma d'artiste



Dans cet article en deux parties consacré aux exoplanètes, la première avait présenté un petit quiz pour s'amuser, puis une introduction, l'historique des découvertes relatives aux exoplanètes, les premières découvertes des systèmes exoplanétaires, et enfin la diversité des exoplanètes.

Si tu veux lire ou relire cette première partie, [clique ici](#).

## LES EXOPLANÈTES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

Les plus de 5 500 exoplanètes connues ont permis d'amorcer une classification de ces objets. Les critères de celle-ci, déterminants pour caractériser les systèmes planétaires et comprendre l'histoire de leur formation, sont la masse de la planète et sa distance à l'étoile.

Le texte en *italique rouge* dans le cadre ci-dessous donne quelques précisions supplémentaires techniques. Tu peux ne pas le lire, il n'influencera pas la suite de la lecture de l'article. Dans ce cas, reprends après ce cadre, la lecture en lettres noires et droites.

*Voici les deux éléments importants pour déterminer une classification des exoplanètes :*

- *La masse de la planète. La masse des exoplanètes détectées varie entre quelques masses terrestres et environ 13 MJup. La distribution en masse des exoplanètes indique trois populations d'exoplanètes, respectivement autour des masses 0,03 MJup (9 MTerre), 1,5 MJup et 10 MJup. Les observations révèlent aussi l'existence de nombreuses planètes dont la masse est intermédiaire entre celle de la Terre et celle de Jupiter et dont aucun équivalent n'existe dans le système solaire.*

- *Sa distance à l'étoile. La distance des exoplanètes à leur étoile varie entre quelques centièmes et plusieurs centaines d'unités astronomiques – par comparaison, dans le système solaire, les planètes orbitent entre 0,38 ua (Mercure) et 30 ua (Neptune). Ici encore, les limites de la technologie (on parle de biais de détection) tendent à privilégier certaines configurations : outre le fait que les méthodes indirectes ne détectent que des planètes distantes au plus de quelques unités astronomiques de leur étoile, elles se sont surtout intéressées à des étoiles âgées de plusieurs milliards d'années, par analogie avec le système solaire. De son côté, l'imagerie directe ne permet actuellement de détecter que des planètes gazeuses géantes et massives, relativement éloignées de leur étoile (plus de 10 ua) et âgées de quelques dizaines de millions d'années seulement (ce qui leur confère une luminosité propre, car elles ne se sont pas encore totalement refroidies). En d'autres termes, une exploration exhaustive des populations exoplanétaires et de leur importance relative est un programme qui ne fait que*

*débuter*

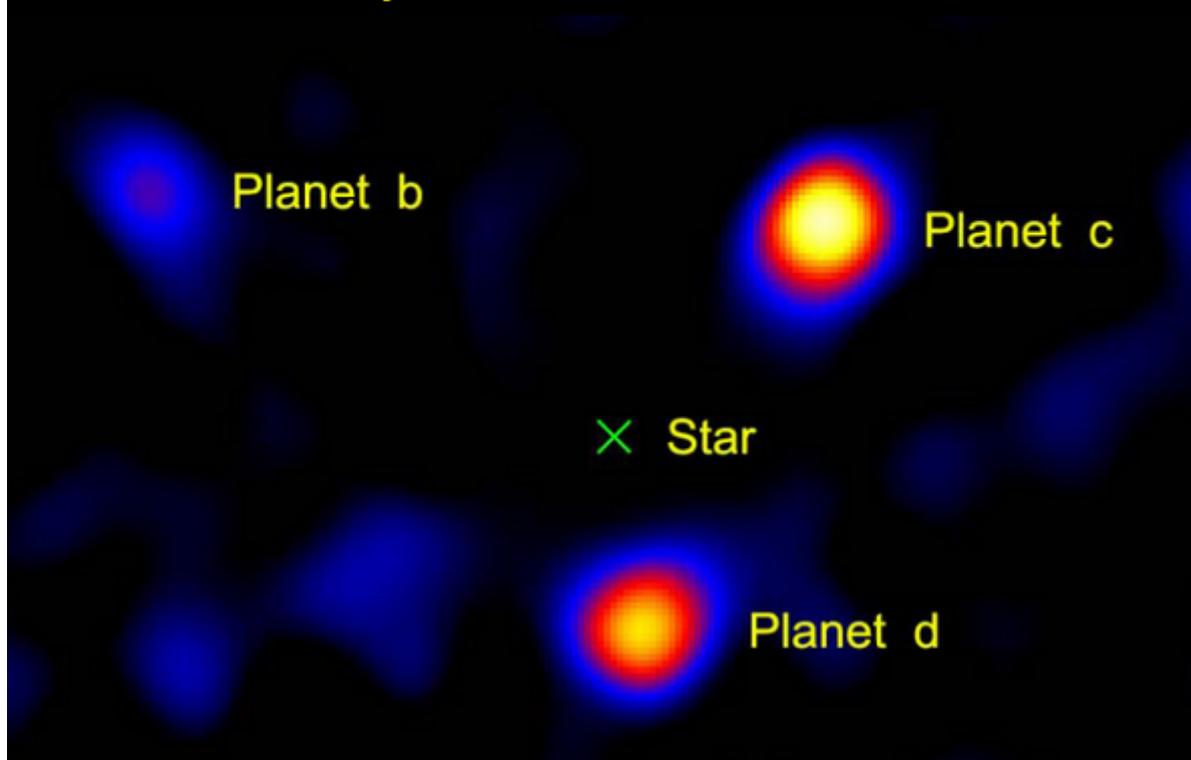
*Tout va bien, mon ami astronome ? Oui, alors, c'est parti, on continue notre article !*

Les données actuelles concernant la masse des exoplanètes et leur distance à l'étoile sont encore limitées. Cependant elles montrent déjà une grande diversité de ces objets par rapport au système solaire.

Malgré les nombreuses classifications en cours d'élaboration actuellement, se trouvent de nombreux cas particulièrement intéressants et inattendus, comme cette nouvelle classe appelée "Jupiters chauds", ou encore "Pégasides" par référence à 51 Pegasi b, première exoplanète détectée comme expliqué ci-dessus. Ces exoplanètes évoluent très près de leur étoile.

Plusieurs centaines de systèmes planétaires multiples ont été identifiées par les méthodes indirectes autour d'étoiles d'âge comparable à celui du Soleil (quelque 4,5 milliards d'années), ou plus âgées, et un système a été découvert en imagerie directe autour de la jeune étoile HR 8799 (environ 60 millions d'années).

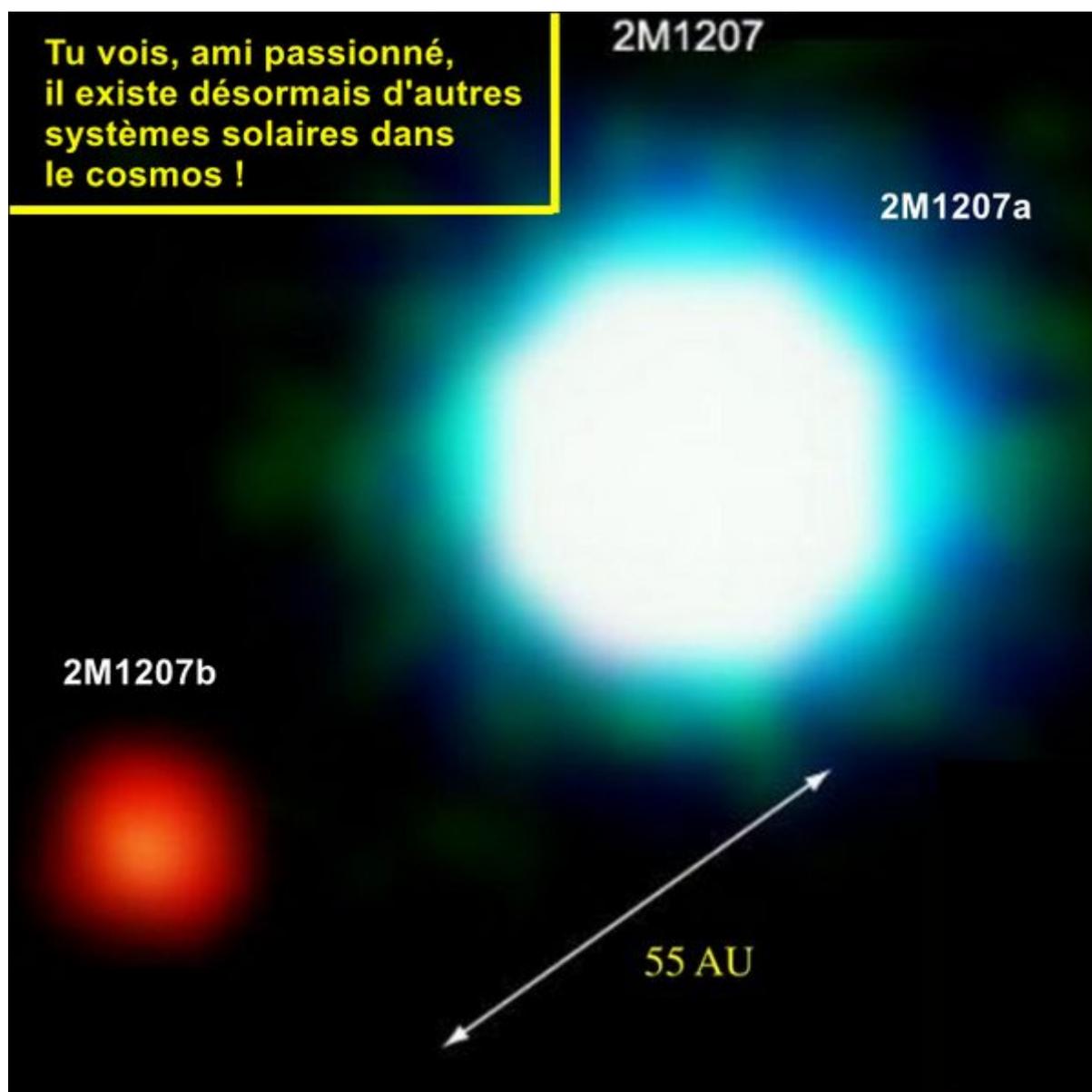
**Photographie faite à l'observatoire du Mont Palomar en Californie le 14 avril 2010. L'étoile HR 8799 (marquée par un X) est cachée pour ne pas être gênée par sa lumière. On peut ainsi voir trois des quatre planètes identifiées.**



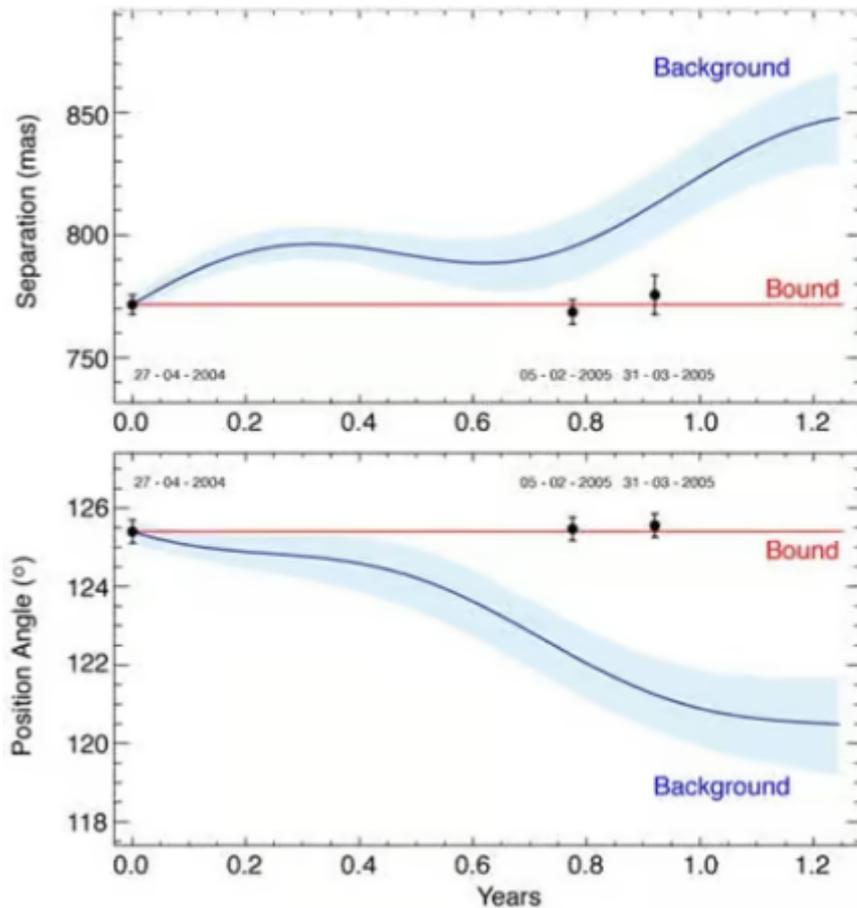
Une équipe internationale d'astronomes confirment qu'un objet détecté et photographié autour d'une naine brune, en avril 2004, est une exoplanète et non pas un simple 'objet rouge' dont la nature n'apparaissait pas clairement. Lors de sa découverte, les astronomes ne parvenaient pas à savoir si l'objet était lié à la naine brune, ou s'il s'agissait d'un objet bien plus lointain comme une galaxie ou une étoile froide d'un type particulier.

Ils ont maintenant acquis la certitude qu'il s'agit d'une planète géante, approximativement 5 fois plus massive que

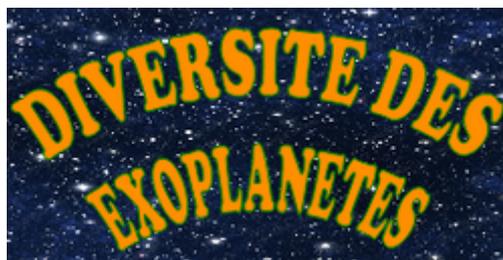
Jupiter. Le petit système solaire (2M1207) se situe près de la constellation de l'Hydre, à quelque 200 années-lumière de la Terre. La planète baptisée 2M1207b est plus de 100 fois plus faible que son étoile parent (2M1207a). Le spectre de l'exoplanète révèle des traces de molécules d'eau ce qui tend à montrer qu'il s'agit d'un monde froid.



Ces observations ont montré que les deux objets sont gravitationnellement liés.

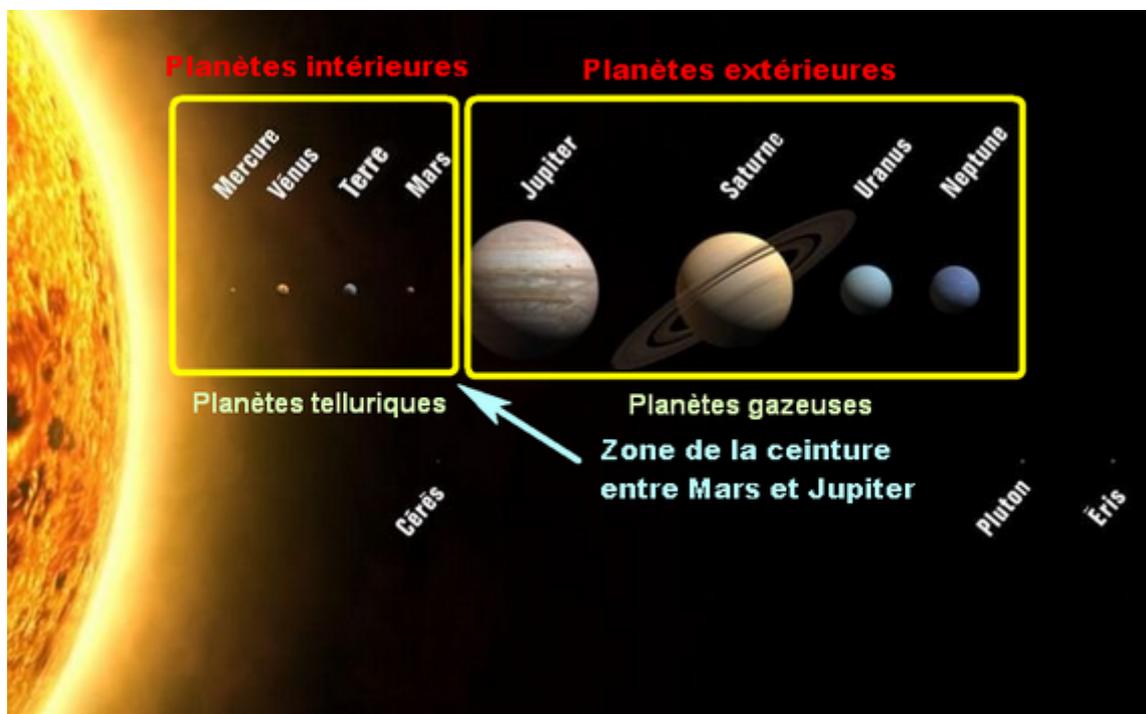


Ce graphique montre la position relative de 2M1207b par rapport à 2M1207a à trois époques différentes (avril 2004, février et mars 2005). Ne regarde, ma cousine, sur ce schéma que la ligne rouge. Sur cette dernière, on voit, durant cette période de temps, un déplacement identique des deux objets dans le cosmos. Ils sont donc liés. C'est donc un système solaire avec une exoplanète.



Une grande variété de configurations est observée. On a trouvé des configurations inverses de notre système solaire, comme par exemple, des systèmes constitués de géantes **gazeuses**

**proches** de leur étoile et d'exoplanètes **moins massives** à **l'extérieur** alors que, dans le système solaire, les planètes telluriques orbitent toutes plus près du Soleil que les géantes qui sont beaucoup plus massives.



**Il faut noter que les orbites des exoplanètes au sein d'un système multiple (cas de HR 8799) ne peuvent être quelconques : elles doivent être compatibles avec la stabilité dynamique de l'ensemble à long terme, sous l'effet des forces de gravitation.**

Cela dit, les études des systèmes multiples détectés à ce jour autour d'étoiles analogues au Soleil sont encore très imprécises. Ceci est très probablement dû au fait que les méthodes actuelles ne permettent pas de détecter de véritables analogues à la Terre ou à Mars, et parce que les durées de mesures disponibles ne sont pas suffisamment longues pour détecter, par les méthodes indirectes, des analogues à Saturne Uranus ou Neptune, dont les périodes de révolution sont de plusieurs décennies.



Si la masse et les propriétés orbitales des exoplanètes détectées commencent à être bien précisées, les propriétés physiques (atmosphère, océans, structure interne) le sont beaucoup moins, car les observations y donnent bien moins directement accès.

Deux méthodes sont possibles :

1. l'une fondée sur la combinaison des mesures issues de la vélocimétrie (mesure de la vitesse) et du transit (passage d'une planète devant son étoile)
2. l'autre sur l'étude spectroscopique des atmosphères planétaires.

Lorsqu'une exoplanète a été détectée à la fois par transit et vélocimétrie, son rayon et sa masse sont calculables, et l'on en déduit immédiatement sa masse volumique moyenne. **Cette information est cruciale car elle renseigne sur l'état physique de l'exoplanète.**

Les exoplanètes de très grand rayon et de faible densité sont principalement gazeuses, et elles sont qualifiées de géantes. Les exoplanètes de quelques masses terrestres seulement, ayant un petit rayon (quelques rayons terrestres) et une grande densité, appelées super-Terres, n'ont pas d'équivalent dans le système solaire ; elles ne sont pourtant pas rares.

Le texte en *italique rouge* dans le cadre ci-dessous donne quelques précisions supplémentaires techniques. Tu peux ne pas le lire, il n'influencera pas la suite de la lecture de l'article. Dans ce cas, reprends après ce cadre, la lecture en lettres noires et droites.

*Avec ce même critère de densité moyenne, une autre catégorie d'exoplanètes a été proposée, les « planètes-océans ». Celles-ci, de densité inférieure à celle des planètes telluriques et de rayon un peu plus grand, seraient recouvertes sur toute leur surface d'une couche d'eau liquide, épaisse de plusieurs dizaines de kilomètres. Enfin, les exoplanètes de densité et de masse très comparables à celles de la Terre, appelées telluriques, sont solides et rocheuses.*

*Il convient de préciser que le détail de l'intérieur des exoplanètes (structure interne) demeure inconnu, car les deux quantités mesurées (rayon et masse) sont insuffisantes pour prétendre le décrire de façon unique. En effet, bien souvent, plusieurs modèles différents de l'intérieur peuvent reproduire les observables disponibles (ce qu'on désigne par la « dégénérescence des modèles »).*

*Si la description de la structure interne des exoplanètes demeure très difficile, celle des atmosphères l'est moins, grâce aux études spectroscopiques, conduites sur un nombre toutefois encore très limité de cas : quelques Jupiters chauds et quelques exoplanètes éloignées de leur étoile.*

*Tout va bien, mon ami astronome ? Oui, alors, c'est parti, on continue notre article.*

*Les atmosphères des Jupiters chauds sont étudiées en comparant les spectres ultraviolet, visible ou infrarouge du rayonnement de l'étoile avant et pendant un transit, que celui-ci soit primaire (la planète passe entre l'étoile et l'observateur terrestre), ou secondaire (planète, étoile et observateur sont toujours alignés, mais la planète passe cette fois derrière l'étoile). Lors de ces transits, la lumière de l'étoile interagit avec l'atmosphère de l'exoplanète, qu'elle y soit absorbée ou diffusée, et cette lumière doit donc être affectée. Par exemple, lorsque des éléments chimiques sont présents dans*

*l'atmosphère de la planète, ils créent, dans le spectre de la lumière reçue de l'étoile, des absorptions caractéristiques ; ces dernières vont donner des informations sur la présence et l'abondance de ces éléments.*

*Or, dans plusieurs cas, les spectres obtenus sont plats et ne contiennent pas les raies spectrales que les atomes et molécules de l'atmosphère planétaire devraient produire. Ce résultat inattendu est attribué à la présence, dans l'atmosphère exoplanétaire, de nuages de poussières ou de brouillards, qui masquent les raies spectrales. Néanmoins, plusieurs constituants ont été détectés dans les atmosphères de certains Jupiters chauds, tels que le carbone, l'oxygène, le sodium, le fer, le magnésium, l'eau, le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, le méthane, etc. Notons que, du fait de leur proximité à l'étoile, les atmosphères des Jupiters chauds sont soumises à des rayonnements X très énergétiques, ainsi qu'au bombardement de particules (vent stellaire). Le rayonnement ultraviolet de l'étoile, notamment dans l'intense raie Lyman- $\alpha$  qu'émet l'hydrogène, affecte significativement les couches supérieures de l'atmosphère exoplanétaire, provoquant chauffage, ionisation, réactions photochimiques. Ainsi, les atmosphères des Jupiters chauds sont sans doute très différentes de celles des Jupiters plus éloignés de leur étoile. L'intensité du rayonnement stellaire peut même dans certains cas provoquer une évaporation de l'atmosphère. Enfin, pour ces exoplanètes qui tournent aussi près de leur étoile, on observe d'importantes variations de température entre le jour et la nuit, qui doivent induire des vents considérables au sein de l'atmosphère.*

Les planètes gazeuses situées loin de leur étoile offrent la possibilité d'étudier des atmosphères moins intensément exposées à la lumière de celle-ci. Le couplage entre spectroscopie et optique adaptative a fourni des spectres de grande qualité qui, dans l'atmosphère de plusieurs planètes, révèlent des molécules telles que l'eau, le monoxyde de carbone, le méthane... Des nuages localisés de poussières, dont certains évoluent au cours du temps, ont également été mis en évidence. De nouvelles études de type « météorologie » débutent donc sur ces planètes.

Le scénario accepté de formation des planètes du système solaire considère que celles-ci se sont constituées dans un disque de gaz et de grains microscopiques de poussières, tournant autour d'un Soleil n'ayant pas encore atteint son état d'équilibre. Au sein de ce disque se seraient développés des grains de plus en plus gros, puis des corps solides appelés planétésimaux, d'une dimension atteignant quelques kilomètres, formant les briques de base de la formation des planètes.

Deux zones sont à distinguer dans ce disque :

1. une zone externe, dans laquelle les molécules contenant de l'hydrogène – élément le plus abondant dans le disque –, Les planètes gazeuses situées loin de leur étoile offrent la possibilité d'étudier des atmosphères moins intensément exposées à la lumière de celle-ci. Le couplage entre spectroscopie et optique adaptative a fourni des spectres de grande qualité qui, dans l'atmosphère de plusieurs planètes, révèlent des molécules telles que l'eau, le monoxyde de carbone, le méthane... Des nuages localisés de poussières, dont certains évoluent au cours du temps, ont également été mis en évidence. De nouvelles études de type « météorologie » débutent donc sur ces planètes., sont organisées sous forme de glaces.

2. une zone interne, dans laquelle ces molécules sont dans un état liquide ou gazeux.

On appelle « ligne des glaces » la région qui sépare ces deux zones. Sa distance à l'étoile varie en fonction de la température de celle-ci, et donc de sa masse (plus la masse de l'étoile est importante, plus sa température est élevée), et de son âge (l'étoile se refroidissant au cours du temps).

Dans le cas du Soleil, cette distance est aujourd'hui d'environ 3 ua et marque la séparation entre la région où se trouvent les planètes telluriques et celle où orbitent les planètes géantes.

Au-delà de la ligne des glaces, la densité de matière solide disponible augmentant de manière très importante et abrupte, les planétésimaux pourraient s'agréger rapidement entre eux pour former des noyaux solides d'une dizaine de masses terrestres, lesquels devenant à leur tour assez massifs pour attirer, en quelques millions d'années au plus, de très grandes quantités de gaz, formant ainsi les planètes géantes et gazeuses.

En deçà de cette ligne des glaces, les planétésimaux se seraient agglomérés plus lentement, en quelques dizaines de millions d'années, pour former des planètes telluriques bien moins massives et rocheuses.

Tout va bien, mon cousin ?



Ami passionné, l'astronomie n'a pas fini de se développer. Et zou, une nouvelle spécialité : l'exoplanétologie. Eh oui! En effet, depuis 1995, la multiplication des découvertes

d'exoplanètes a donné naissance à une discipline nouvelle, l'exoplanétologie. Ce domaine de recherche a évolué très rapidement grâce à l'accumulation d'observations dues à des méthodes s'affinant sans cesse, à l'amélioration des modèles théoriques et des simulations numériques, et à des expériences en laboratoire testant certains processus physico-chimiques.

## CONCLUSION

Nous savons désormais que les exoplanètes ne sont pas rares dans l'Univers. Les données recueillies révèlent déjà une diversité de constitution et de propriétés de ces corps célestes que le seul exemple du système solaire n'avait pas permis d'imaginer. Pourtant, nous sommes encore bien loin d'avoir exploré la diversité de ces systèmes planétaires.

A la prochaine

Bye bye !

Professeur Têtenlair