

HD 209458b une exoplanète à l'allure de comète

Tel Icare, dont les ailes ont fondu pour s'être trop approché du Soleil, la planète HD209458b perd une partie de son atmosphère, surchauffée par la très grande proximité de son étoile. Ce phénomène inattendu a été mis au jour par une équipe de l'IAP, grâce au spectrographe STIS du HST, qui a observé l'étoile dans la raie Ly α de l'hydrogène

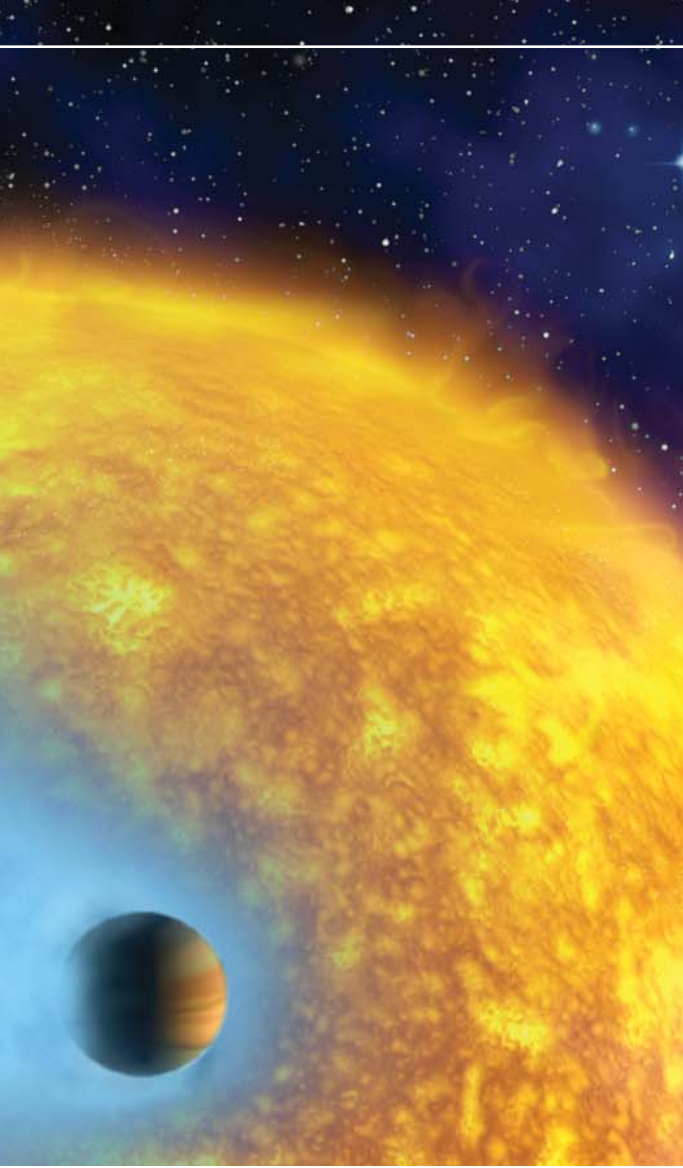
par **Roger Ferlet**
Institut d'Astrophysique de Paris

Il y a environ 2400 ans, Épicure écrivait à Hérodote : « *les mondes sont en nombre infini, les uns semblables à celui-ci, les autres dissemblables ; (...) il n'y a nulle part d'obstacle à cette infinité* ». Mais peu après, la pensée d'Aristote prévalut et une chape de plomb s'abattit sur le sujet pendant près de 2000 ans. En 1600 encore, Giordano Bruno fut accusé d'hérésie par l'Inquisition et brûlé en place publique à Rome pour, pense-t-on, avoir affirmé la même croyance en l'infini du nombre d'étoiles et des mondes en orbite. Plus près de nous, Camille Flammarion se fit tout au long de sa vie l'apôtre de la "Pluralité des Mondes". L'existence de planètes gravitant autour d'autres étoiles que le Soleil n'est donc pas une préoccupation récente. Cependant aujourd'hui, non seulement on peut dire que Bruno avait raison, mais les moyens se mettent aussi en place pour étudier scientifiquement ces planètes extra-solaires.

La détection des exoplanètes

Le moyen le plus direct de détecter des planètes extra-solaires (ou exoplanètes) serait de les photographier. Cependant, la différence d'éclat entre la planète et son étoile est énorme : un rapport d'un milliard entre le Soleil et Jupiter dans le visible ! Malheureusement, un tel éblouissement empêche encore toute détection à proximité immédiate d'une étoile, même avec les meilleurs instruments actuels et l'optique adaptative. Mais les progrès techniques, en particulier dans l'espace, rendront bientôt possible la vision directe d'exoplanètes.

Il est donc encore nécessaire de se rabattre sur des méthodes indirectes. En fait, un système étoile-planète tourne autour de son centre de gravité commun. Étant donné la différence de masse entre les deux objets, ce centre de gravité est très proche du centre de l'étoile : celle-ci va faire un très petit tour à vitesse réduite, tandis que la planète fera un grand tour à grande vitesse. Dès les années trente, on a cherché à détecter ce mouvement de l'étoile induit par l'influence gravitationnelle de la planète, en



l'étoile HD 209458

Position (J2000)	AD 22 ^h 03 ^m 18,8 ^s - Dec : +18 [°] 53 ^m 04 ^s
Constellation	Pégase
Distance à la Terre	46 parsec (150 a.l.)
Type Spectral	F8-G0V
Description	Type solaire
Température en surface	6000°C
Magnitude apparente	7,65
Masse	1,05 Masse solaire
Rayon d'étoile	1,15 rayon solaire
Age de l'étoile	5,2 milliards d'années

la planète HD 209458 b

Méthode de détection	vitesse radiale
Excentricité	<0,04
Période orbitale	3,524738 ± 0,000015 jours
Durée du transit	3 heures
Distance à l'étoile	0,047 ua (7 million de km)
Inclinaison	86,6°
Rayon	1,35 ± 0,04 rayon de Jupiter (-96500 km)
Masse	0,69 masse de Jupiter (-220 masse terrestre)
Densité	0,35
Taille du lobe de Roche	2,7 rayons de HD209458b (3,6 de Jupiter)

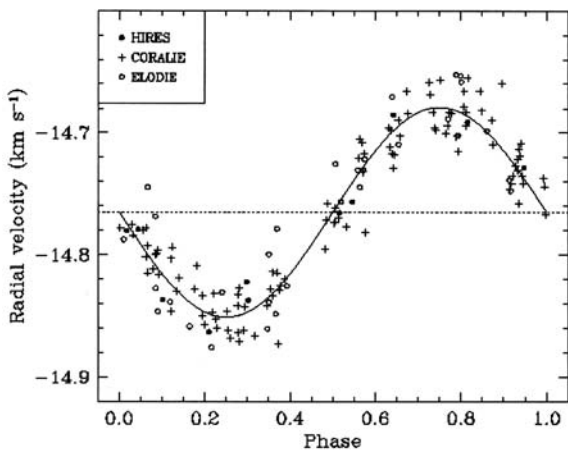
essayant de mesurer le déplacement du centre de l'étoile sur le plan du ciel. Mais ce déplacement est extrêmement faible – de l'ordre du millième de seconde d'angle – de sorte que même avec les moyens actuels il n'y a jamais eu de résultats confirmés. La aussi, de futures missions spatiales apporteront des résultats.

Les astronomes ont alors imaginé d'utiliser l'effet Doppler-Fizeau. Par cet effet, les longueurs d'onde (mesurées au repos en laboratoire) des raies des atomes de l'atmosphère de l'étoile sont légèrement modifiées, proportionnellement à leur vitesse radiale (la composante de leur vitesse dans notre direction). Au cours du mouvement de l'étoile autour du centre de gravité commun, sa vitesse radiale change, ce qui se traduit par des variations périodiques de longueur d'onde qu'on peut mesurer directement sur le spectre de l'étoile. Mais là aussi, les variations sont faibles. Par exemple, l'influence de Jupiter induit des variations de la vitesse radiale du Soleil de l'ordre de 47 km par heure. Pour évaluer correctement de telles variations, il faut être capable de mesurer des déplacements de l'ordre du cent milliardième de la longueur d'onde ! C'est un problème purement technique qui n'a été résolu que récemment et a produit un résultat en 1995 lorsque les deux astronomes de Genève Michel Mayor et Didier Queloz ont annoncé, grâce à des observations réalisées

Point sur la formation des planètes

Les étoiles se forment à partir de gigantesques nuages interstellaires de gaz et de poussières qui deviennent instables et s'effondrent sous l'effet de leur poids. À l'instar d'un patineur qui tourne de plus en plus vite au fur et à mesure qu'il se recroqueville, cette "nébuleuse primitive" finit par s'aplatir et prendre la forme d'un disque en rotation autour de la nouvelle étoile dont le très puissant vent ralentit sa propre rotation¹. Dans ce cadre, aucun astrophysicien ne doutait de l'existence très répandue de planètes formées dans ces disques.

Dans notre Système solaire, on distingue deux grandes familles de planètes : les planètes telluriques comme la Terre, petites, de densités élevées et proches du Soleil, et les planètes géantes comme Jupiter, beaucoup plus massives mais de faibles densités (essentiellement gazeuses) et plus loin du Soleil. Les grandes lignes du scénario de formation des planètes semblent maintenant relativement bien comprises; elles reposent sur la condensation et l'agglomération de grains de glaces poussiéreux solides qui peuvent grossir jusqu'à une dizaine de masses terrestres. La proto-planète qui atteint ce stade peut alors croître rapidement en captant par gravité le gaz situé dans l'anneau qu'elle parcourt autour de son étoile. On comprend pourquoi les planètes géantes sont éloignées du Soleil : tout simplement parce qu'il n'y a pas assez de matière dans un anneau proche du Soleil et parce que la glace ne peut pas rester solides en deçà de quelques unités astronomiques du Soleil (l'unité astronomique UA est la distance de la Terre au Soleil soit 150 millions de km). Les astronomes s'attendaient donc à trouver des planètes géantes ayant des périodes longues, de l'ordre de la dizaine d'années, comme Jupiter.



Vitesse radiale de l'étoile HD209458

à l'observatoire de Haute-Provence, la première détection d'une planète extra-solaire, autour de l'étoile 51 Pégase. Une controverse a entouré cette découverte car la théorie prévoyait des planètes de périodes supérieures à dix ans alors que les mesures donnaient une période de 4,2 jours pour 51 Peg ! D'autant que d'autres interprétations des variations de vitesses radiales pouvaient être envisagées. Mais rapidement, la multiplication des vérifications rendit le doute impossible. Il est également intéressant de

noter pourquoi les compétiteurs américains des suisses n'ont pas fait la découverte ; fidèles au paradigme des prédictions – ce qui est somme toute logique – ils faisaient des observations très espacées dans le temps, trop pour détecter des courtes périodes !

Jusqu'à très récemment, la méthode dite des "vitesses radiales" a été la seule à permettre de détecter des planètes extra-solaires². Aujourd'hui (mars 2003), on a identifié 105 exoplanètes tournant autour de

91 soleils ; douze systèmes comportent au moins deux planètes. Il s'agit exclusivement de grosses planètes (95 ont une masse minimum³ inférieure à dix fois celle de Jupiter) car la méthode n'est pas (encore ?) capable de débusquer de petits corps comme la Terre. Toutes sont à une distance de leur étoile inférieure à la distance de Jupiter au Soleil (5,2 ua), et pratiquement la moitié à une distance inférieure à 1 ua, mais jamais (à une exception près) à moins de 0,04 ua. Ce sont donc pour la plupart des objets avec des périodes courtes, voire très courtes (3 jours). De plus, leurs orbites sont souvent excentriques (très elliptiques) contrairement la aussi à notre système solaire. Bref, la surprise est de taille : les planètes extra-solaires connues sont radicalement différentes de ce qu'on attendait !

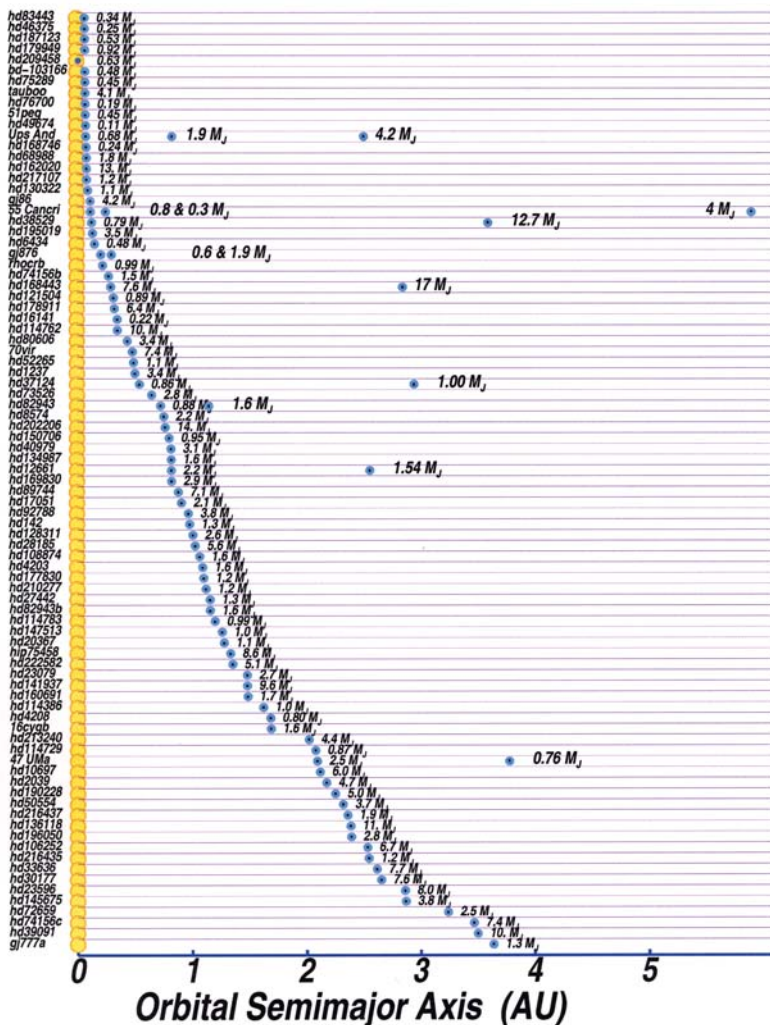
Des Jupiter chauds

Les exoplanètes les plus proches de leur étoile sont surnommées les "Jupiter chauds". Nous avons vu qu'elles n'ont pas pu se former là où on les trouve. Alors pourquoi donc ont-elles des périodes aussi courtes ? La réponse avait déjà été trouvée par deux théoriciens quinze ans avant la découverte de 51 Pégase ! Lorsqu'une planète géante a accreté tout le gaz dans l'anneau qu'elle parcourt autour de son étoile, elle ne grandit plus, mais sa masse

perturbe le disque de matière qui en retour perturbe l'orbite de la planète. Et en un temps de l'ordre de 100 000 ans (ce qui est court par rapport au temps de formation de la planète), la planète migre vers l'étoile. Curieusement, personne à l'époque n'en avait déduit la possibilité de trouver des planètes géantes à courtes périodes. Réduisant d'un facteur 100 la taille des orbites d'un bon nombre d'exoplanètes, cette migration apparaît très efficace. Mais alors pourquoi ne trouve-t-on quasiment pas de planètes à moins de 0,04 ua de leur étoile ?

Les "Jupiter chauds" sont tellement proches de leur étoile qu'il y a environ une chance sur dix pour que, vu de la Terre, ils passent devant leur étoile. On a alors affaire à un transit planétaire. Par exemple, le rayon de Jupiter étant dix fois plus petit que celui du Soleil, un transit de Jupiter devant le Soleil diminuerait la luminosité du Soleil de 1 %, ce qui est parfaitement mesurable. Et en effet, en octobre 1999 le premier² transit d'une exoplanète fut observé depuis le sol aux États-Unis puis avec le Télescope spatial Hubble (HST). Il s'agissait de l'exoplanète qui tourne autour de l'étoile de type solaire HD209458, située à 153 années-de-lumière de nous et visible avec une paire de jumelles dans la constellation de Pégase. Elle avait été détectée auparavant avec la méthode des "vitesses radiales" ; on connaissait donc le moment du transit et la masse de l'exoplanète (220 masses terrestres).

La mesure d'une baisse d'éclat de l'étoile de 1,5 % pendant trois heures permet alors de déduire le rayon de l'exoplanète : 1,35 fois celui de Jupiter et donc sa densité moyenne : 0,35 kg/dm³. Les "Jupiter chauds" sont donc bien des exoplanètes géantes gazeuses.





HD209458b la planète qui s'évapore

Cette planète extra-solaire est ainsi devenue le chouchou des astronomes car il devenait possible d'essayer de détecter son atmosphère en étudiant le spectre de la lumière qui l'a traversée, et ce sans attendre des années puisqu'elle repasse tous les 3,5 jours devant son étoile. C'est ainsi qu'en 2001, un des découvreurs de la planète, le canadien (travaillant à CalTech en Californie) David Charbonneau, a réussi avec ses collaborateurs à identifier la présence de sodium par une mesure difficile (car le sodium est peu abondant) réalisée avec le HST. Parallèlement, notre équipe de l'Institut d'Astrophysique de Paris a proposé de chercher plutôt l'hydrogène,

l'élément le plus abondant et le plus léger, donc susceptible d'être dans la haute atmosphère (le sodium étant lui dans la basse atmosphère). Malgré la compétition – six propositions d'observation avec le HST sur sept sont rejetées – notre demande fut acceptée, et nous avons pointé le spectrographe STIS de Hubble vers HD209458 pendant trois transits de sa planète en septembre et octobre 2001, plus des observations hors-transit pour servir de référence.

Même à l'altitude du télescope spatial (près de 600 km), il y a encore beaucoup d'atomes d'hydrogène de la haute atmosphère terrestre dont la signature spectrale vient contaminer le signal cherché de l'exoplanète. De

plus, ce signal se trouve dans l'ultraviolet, vers 121,5 nanomètres de longueur d'onde, domaine dans lequel HD209458 émet peu de photons. Finalement, après de multiples traitements longs et sophistiqués, faits et refaits par plusieurs membres de l'équipe, 900 photons étaient au rendez-vous, avec une nouvelle et énorme surprise à la clé. Alors que la baisse d'éclat de HD209458 dans le visible pendant le transit est de 1,5%, dans la lumière de l'hydrogène la diminution atteint 15%. Par conséquent, l'atmosphère d'hydrogène de cette exoplanète occulte une plus grande surface de son étoile (l'exoplanète apparaît environ trois fois plus grande que son diamètre visible); elle s'étend jusqu'à plus de 200 000 km, alors que sur Jupiter, qui a une masse et un diamètre analogues, l'atmosphère ne dépasse pas les 2000 km !

Cette exoplanète tourne à moins de 7 millions de km de son étoile, c'est-à-dire plus de 8 fois

*« les planètes extra-solaires connues
sont radicalement différentes de ce qu'on attendait ! »*

La méthode des vitesses radiales et la masse des exoplanètes

Il est bien connu que le mouvement des planètes du Système solaire est régi par le Soleil et permet de déterminer la masse de notre étoile ; mais on oublie souvent que le mouvement du Soleil lui-même est perturbé par les planètes qui l'entourent. C'est le mouvement de l'étoile centrale dû à la présence d'une ou de plusieurs planètes qui est étudié dans la recherche des planètes extra-solaires.

Étudions le cas simple d'une planète de masse M_p en interaction avec une étoile de masse M_E , et supposons que les deux astres décrivent des cercles autour de leur centre de gravité O , avec une période P . En utilisant la loi de gravitation universelle on obtient la relation suivante : $M_p^3 / (M_p + M_E)^2 = V_E^3 P / (2 \pi G)$ qui peut s'écrire :

$M_p^3 = V_E^3 P M_E^2 / (2 \pi G)$ lorsque $M_E \gg M_p$ (G est la constante de gravitation universelle).

Si la ligne de visée est dans le plan du mouvement des 2 corps, la vitesse radiale observée oscille entre $-V_E$ et $+V_E$ selon la position relative de l'étoile sur son orbite et la ligne de visée. Dans le cas plus général où la ligne de visée est inclinée d'un angle i par rapport à l'axe de l'orbite (voir figure ci-dessous) la vitesse radiale oscille entre $-V_E \sin i$ et $V_E \sin i$ (voir courbe de

vitesse radiale de HD209458 page XXX).

Les raies spectrales de l'étoile ont donc, à cause de l'effet Doppler, une longueur d'onde variable au cours du temps.

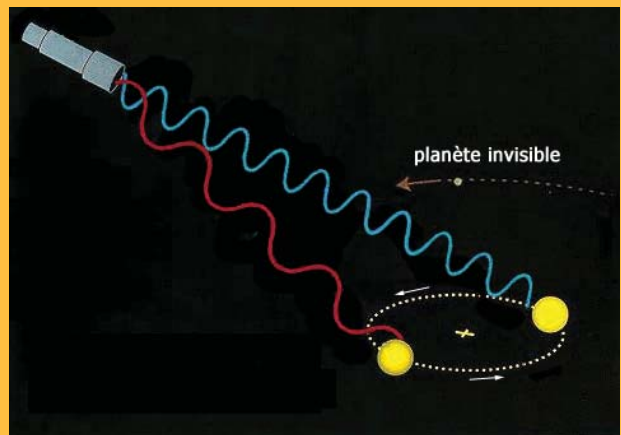
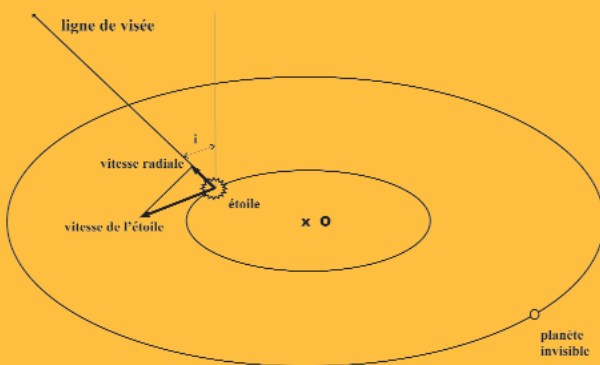
L'amplitude de cette variation permet de déterminer la vitesse radiale maximale de l'étoile $V_{r,E}$, soit $V_E \sin i$.

La relation déterminant la masse de l'étoile devient $M_p^3 = (V_{r,E} / \sin i)^3 P M_E^2 / 2\pi G$, soit : $M_p \sin i = M_E^{2/3} (P/2\pi G)^{1/3} V_{r,E}$. La mesure de $V_{r,E}$ associée à celle de sa période P et à l'évaluation de la masse M_E de l'étoile, permet de déterminer la quantité $M_p \sin i$. L'angle i étant inconnu on aura donc seulement une limite inférieure de la masse de la planète.

La perturbation provoquée par Jupiter sur le mouvement du Soleil est de $12,5 \text{ ms}^{-1}$, soit dans le visible un décalage Doppler de l'ordre de quelques cent millièmes de nanomètre.

L'observation de décalages si faibles nécessite des méthodes d'étalonnage très précises, utilisant des spectrographes à grande résolution. De nombreuses raies spectrales sont observées simultanément afin d'obtenir un ajustement spectral suffisamment précis.

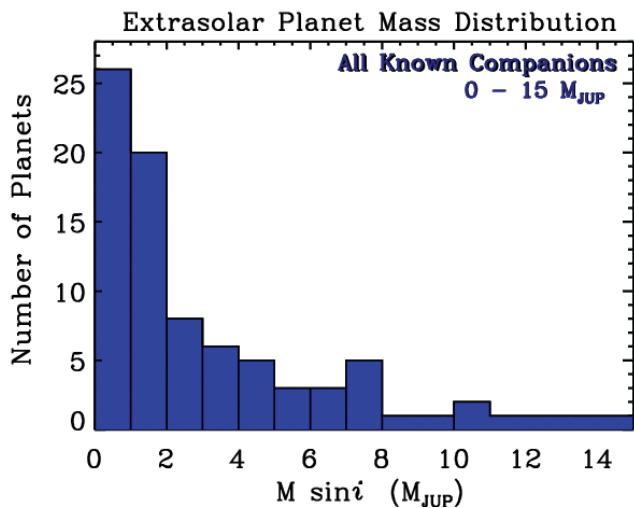
Pour en savoir plus, lire l'article de S. Ury "Les planètes extra-solaires" École CNRS de Goutelas XXIII 2000, édit. D. Egret, J.-L. Halbwegs et J.-M. Hameury.



plus près que Mercure du Soleil. Si elle était solide et sans atmosphère comme Mercure, on calcule que sa température de surface pourrait s'élever à 1 200 Kelvins. Mais c'est une géante gazeuse, et l'on a des raisons de penser que la température de la haute atmosphère de Jupiter, pourtant bien plus éloigné de son Soleil, peut probablement atteindre déjà quelques milliers de degrés. L'observation montre donc que l'atmosphère de l'exoplanète est très dilatée ; les atomes d'hydrogène s'élèvent à une altitude telle qu'ils atteignent et dépassent la limite de Roche, une surface critique située à 2,7 fois le rayon de la planète ou un atome ne sait plus s'il est gravitationnellement lié à la planète ou à l'étoile. Les atomes sont alors happés, poussés et accélérés par la pression de radiation de l'étoile et se dispersent dans une

queue étendue, à l'instar des magnifiques queues de gaz des comètes. Le décalage Doppler mesuré dans les spectres montre que les atomes s'évadent à plus de 360 000 km par heure comme si, en quelque sorte, l'atmosphère s'évaporait. Un phénomène totalement "interdit" par les modèles existants.

À partir des spectres du HST, il est possible d'estimer la quantité d'hydrogène qui s'échappe ; malheureusement, à cause des caractéristiques de l'absorption observée (effet de saturation), seulement une valeur minimale peut être calculée : 10 000 tonnes par seconde. Même si ce chiffre peut paraître gigantesque, ce n'est "rien" comparé à la masse de la planète ; à ce rythme-la, elle perdrait 0,1 % de sa masse en cinq milliards d'années ; elle pourrait donc vivre plus long-



temps que son étoile. Cependant, c'est un minimum et il est probable que le flot soit bien supérieur ; la planète pourrait perdre ainsi une fraction significative de sa masse. Les lois de la mécanique céleste nous disent qu'à ce moment-là, la planète a tendance à repartir en arrière. Ainsi, d'une part l'influence du disque de matière tend à faire migrer la planète vers son étoile, d'autre part la planète proche de son étoile peut perdre de la masse et s'en éloigner. Un équilibre pourrait donc se créer et la planète rester sur son orbite proche à condition de continuer à perdre de la masse.

Des planètes qui fondent

Ce phénomène d'évaporation pourrait donc expliquer pourquoi on ne trouve quasiment pas de planètes extra-solaires à moins de 7 millions de km de leur étoile, c'est-à-dire avec des périodes inférieures à trois jours. Plus proches, leur taux d'évaporation pourrait être bien supérieur. Après avoir perdu leur hydrogène, puis leur hélium, puis éventuellement des éléments plus lourds, il viendrait donc un moment où, tels des Icare cosmiques,

ces géantes se seraient dépouillées de tout leur gaz mettant à nu leur cœur solide d'une dizaine de masses terrestres (ou plutôt visqueux étant donné la chaleur régnante). Elles seraient devenues indétectables... jusqu'à ce que le futur satellite Corot du CNES qui doit être lancé en 2005 puisse peut-être les voir par la méthode du transit, et donc valider ou infirmer l'hypothèse.

D'autres mécanismes peuvent être invoqués pour conduire au même résultat. Par exemple, comme dans le système Terre-Lune où des effets de marées augmentent le moment cinétique de la Lune qui s'éloigne ainsi lentement de la Terre, les ondes de marées entre une géante et son étoile proche repoussent la planète. Mais il n'est pas sûr que ce mécanisme soit assez puissant pour contrebalancer la migration. Cependant, il agit et aide par ailleurs à dilater l'atmosphère de la planète, favorisant ainsi sa photo-évaporation. On pense d'ailleurs que des planètes géantes auraient pu finir leur vie dans leur étoile. En effet, les étoiles autour desquelles on trouve des planètes extra-solaires présen-

tent toutes jusqu'à maintenant une concentration en éléments lourds plus grande que la moyenne, peut-être le résultat d'un cannibalisme stellaire. C'est une des nombreuses questions qui restent posées et assurent un bel avenir à la planétologie comparée pour comprendre nos origines. ■

- 1 - L'étoile formée par effondrement au centre de la nébuleuse primitive doit donc tourner très rapidement. Or notre Soleil, formé ainsi, ne tourne pas vite. L'explication tient justement dans la masse emportée par le puissant vent du jeune Soleil (peut-être cent fois plus puissant que maintenant) qui ralentit ainsi sa vitesse de rotation.
- 2 - Si on exclut les "planètes" trouvées autour d'un pulsar grâce à la même méthode de détection de leur influence gravitationnelle sur le pulsar mais basée sur des mesures temporelles. Si on exclut aussi la variation photométrique de l'étoile Beta Pictoris, observée en 1981 et interprétée par l'occultation d'un corps (planète ou comète) mais qui n'a jusqu'à maintenant jamais été confirmée (par manque d'observations continues). Si cette occultation de Beta Pictoris était confirmée, elle deviendrait alors la première découverte (1981!) d'une exoplanète, par la méthode du transit.
- 3 - La méthode des "vitesses radiales" fournit en fait la valeur du produit de la masse de la planète par le sinus de l'angle d'inclinaison du plan de son orbite par rapport à l'observateur, angle *a priori* inconnu. On obtient donc formellement qu'une valeur inférieure de la masse de la planète (voir encadré page XXXX).

