

# Les planètes extrasolaires

par Roger Ferlet

Directeur de recherche au CNRS, Institut d'astrophysique de Paris, Université Pierre et Marie Curie

En novembre 1995 paraissait dans la prestigieuse revue *Nature* un article qui allait propulser les sciences planétaires non seulement à la pointe de l'astrophysique observationnelle et théorique mais aussi sur le devant de la scène médiatique. Il s'agissait de la découverte de la première<sup>1</sup> planète en orbite autour d'une étoile autre que notre Soleil. Grâce à des observations spectroscopiques réalisées à l'observatoire du CNRS de Haute Provence, les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Quéloz venaient en effet de détecter des variations périodiques de la vitesse radiale<sup>2</sup> de l'étoile 51 Pegasi, qu'ils interprétaient comme résultant du petit mouvement de rotation de cette étoile autour du centre de masse commun du système étoile-planète. Qui aurait imaginé à cette époque les progrès qui allaient suivre !

Dix ans après (1<sup>er</sup> juin 2005), 157 planètes extrasolaires sont connues, appartenant à 138 systèmes planétaires dont 14 avec deux ou plusieurs planètes. La plupart ont des masses comparables à celle de Jupiter car la méthode de détection (vitesses radiales) n'est pas assez précise pour «voir» des terres, ce qui ne veut pas dire qu'il n'en existe pas ! La plus petite actuellement détectée fait 14 fois la masse de la Terre. Outre la preuve de l'existence de planètes extrasolaires, près de quatre siècles après l'autodafé de Giordano Bruno en 1600 à Rome pour avoir affirmé la pluralité des mondes, la détection de 51 Peg b (la planète autour de 51 Peg) a apporté une autre surprise de taille. Elle orbite en effet son étoile à 0,05 UA (Unité Astronomique, la distance Soleil-Terre), c'est-à-dire avec une période d'un peu plus de 4 jours terrestres, à comparer à la douzaine d'années nécessaires à notre Jupiter pour faire une révolution autour du Soleil ! Environ 15 % des exo-planètes connues tournent à moins de 0,1 UA de leur étoile parente, donc avec des périodes de l'ordre d'une dizaine de jours ou moins. Elles sont ainsi chauffées<sup>3</sup> par leur étoile d'où leur nom de jupiters chauds. Cependant, avec le temps, on commence à en trouver avec des périodes plus longues ; le Système solaire ne semble donc pas si «anormal» de ce point de vue.

La surprise des jupiters chauds était d'autant plus extraordinaire que les modèles généralement acceptés pour rendre compte de la formation des systèmes planétaires (et du nôtre en particulier) ne savent pas fabriquer des planètes géantes aussi proches de leur étoile. A cela deux raisons principales : d'une part les grains de glaces solides nécessaires pour enclencher les processus d'accrétion qui conduiront des grains aux cailloux puis aux planétésimaux qui grossiront jusqu'aux planètes seraient

volatilisés trop près de l'étoile ; d'autre part il n'y a tout simplement pas assez de matière pour faire des grosses planètes dans un anneau orbital trop petit. Par conséquent, les théoriciens sont conduits à former les planètes loin de leur étoile puis à invoquer un mécanisme de migration vers l'intérieur du système. D'ailleurs identifié avant la découverte des exo-planètes, ce mécanisme repose sur les interactions gravitationnelles entre l'embryon de planète et le disque de matière à partir duquel il se forme.

La probabilité de voir depuis la Terre l'orbite d'un jupiter chaud «par la tranche» est d'environ 1 %. En septembre 1999, un petit télescope au sol a observé pour la première fois<sup>4</sup> le passage d'une planète extrasolaire - surnommée depuis Osiris - devant son étoile<sup>5</sup>. C'est ce qu'on appelle aussi une occultation ou parfois un transit, à l'instar du transit de Vénus devant le Soleil qui a été visible depuis une bonne partie de la Terre le 8 juin 2004. La grandeur de l'occultation (ou de la baisse d'éclat de l'étoile) est proportionnelle à la taille de la planète. Grâce à l'extrême précision du télescope spatial Hubble (HST), la photométrie du transit d'Osiris a permis la détermination de son rayon,  $1,5 \pm 0,06 R_{\text{Jupiter}}$  soit  $\approx 96\,500$  km, ce qui correspond à une occultation de 1,6 % de la lumière de l'étoile pendant trois heures (le transit de Jupiter devant le Soleil diminuerait la luminosité du Soleil de 1 %), ainsi que de sa période,  $3,524738 \pm 0,000015$  jours. La com-

<sup>1</sup> Si l'on exclut les objets détectés autour d'un pulsar au début des années quatre-vingt-dix par une méthode analogue de «timing».

<sup>2</sup> La vitesse radiale est la projection du vecteur vitesse sur la ligne de visée ; elle se déduit directement du décalage Doppler mesuré sur le spectre de l'étoile. L'amplitude des variations est proportionnelle à la masse de la planète, modulo  $\sin i$  où  $i$  est l'angle entre le plan de l'orbite et celui du ciel.

<sup>3</sup> Des températures d'équilibre de l'ordre de 1000 °K ou un peu plus sont estimées, en supposant des planètes solides sans atmosphère.

<sup>4</sup> Si l'on exclut la variation photométrique de l'étoile  $\beta$  Pictoris enregistrée en 1981 et interprétée en 1995 comme l'occultation par un corps (planète ou comète), mais qui n'a pas encore jusqu'à maintenant été confirmée.

<sup>5</sup> Il s'agit d'une étoile de type solaire - HD 209458 - située à 153 années-lumière du Soleil et visible avec une paire de jumelles dans la constellation de Pégase.

binaison avec la masse ( $0,66 \pm 0,03 M_{\text{Jupiter}}$  soit  $\approx 220$  masses terrestres) déduite des mesures de vitesses radiales a alors fourni la preuve définitive qu'au moins dans ce cas il s'agissait bien d'une planète géante gazeuse analogue à celles du Système solaire (densité  $0,35 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ ). Elle orbite à 0,047 UA de son étoile (7 millions de km, soit plus de 8 fois plus près que Mercure du Soleil), avec un angle de  $86,6^\circ$  entre le plan de l'orbite et celui du ciel.

Le transit photométrique est devenu maintenant une méthode à part entière de découverte d'exo-planètes. Il offre par ailleurs une situation idéale pour détecter une éventuelle atmosphère. En effet, si celle-ci existe, elle doit laisser une empreinte en absorption dans le spectre de l'étoile parente enregistré pendant le transit. Ainsi, en 2002, seulement sept ans après la découverte de 51 Peg b, la première détection de l'atmosphère d'une planète extrasolaire - celle d'Osiris - a été réalisée avec le HST dans la lumière jaune du sodium ( $0,0232 \pm 0,0057 \%$  en plus de 1,6 % correspondant au diamètre de la planète). Puis en 2003, c'est l'hydrogène de la haute atmosphère d'Osiris qui a été observé en ultraviolet, auquel se sont ajoutés en 2004 l'oxygène et le carbone. Et de nouveau une surprise de taille : la baisse d'éclat est 10 fois plus grande dans la lumière de l'hydrogène, 15 % au lieu de 1,6 % ! La haute atmosphère d'hydrogène d'Osiris s'étend donc très au-delà de son rayon (3,2 fois son rayon soit  $\approx 310\,000 \text{ km}$ ). Subissant la chaleur et les forces de marées de l'étoile, l'atmosphère d'Osiris se dilate suffisamment pour remplir le lobe de Roche<sup>6</sup>. Au-delà, les atomes ne sont plus gravitationnellement liés à la planète et donc s'échappent ; Osiris s'évapore !

En modélisant le phénomène, il est possible d'estimer le taux d'évaporation et plus généralement le temps de vie d'une planète donnée en fonction de sa masse et de sa distance orbitale. Pour des distances orbitales plus petites que 0,03-0,04 UA (ce qui correspond à des périodes inférieures à 2-3 jours) et des masses de l'ordre de  $0,5 M_{\text{Jupiter}}$  ou moins, les temps de vie ne dépassent pas un milliard d'années environ, ce qui implique que la nature de ces planètes évolue avec le temps<sup>7</sup>. Après leur formation à grandes distances, elles migrent vers leurs étoiles ; elles pourraient ainsi perdre une importante fraction de leur hydrogène (l'élément de loin le plus abondant) et devenir des neptunes chauds. Si la migration continue suffisamment, on peut même imaginer l'évaporation de toute l'atmosphère, ce qui laisserait apparent un éventuel noyau interne solide, peut-être de l'ordre d'une dizaine de masses terrestres, comme il en existe, pense-t-on, au cœur de Jupiter. Une nouvelle classe de planètes peut ainsi être prédite, encore indétectable avec les moyens instrumentaux actuels mais à la portée des missions spatiales programmées.

La première de ces missions spatiales sera le satellite «Corot» conduit par le CNES, dont le lancement est prévu en 2006<sup>8</sup> ; puis le projet «Kepler» de la NASA en 2007/8, et enfin la mission «GAIA» de l'ESA au mieux en 2011<sup>9</sup>. Au total, ce sont des milliers de planètes géantes, des dizaines de planètes cent fois plus petites que Jupiter

(dont la nouvelle classe prédite ci-dessus), et même des terres (hors de portée de la méthode des vitesses radiales), qui devraient être ainsi détectées par transit.

A plus long terme, c'est la caractérisation physique des planètes détectées qui sera poursuivie : atmosphère, surface (océans/continents...), entourage (satellites, anneaux), et bien évidemment la motivation ultime, les signatures biologiques. Le paradigme actuel, basé sur ce qu'on connaît sur Terre, n'envisage la vie qu'à travers la chimie du carbone dans de l'eau liquide comme solvant. Dans ce cadre, on prédit que la présence d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) liquide, de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) et d'ozone ( $\text{O}_3$ ) sur une planète, en quantités appropriées, implique l'existence de processus photosynthétiques produisant de l'oxygène. Il est souvent admis que le meilleur moyen pour identifier ces bio-signatures réside dans la spectroscopie des émissions planétaires dans l'infrarouge (IR). C'est pourquoi une ambitieuse mission spatiale, «Darwin», est projetée à l'horizon 2020, dans le but de faire des images et des spectres de planètes telluriques. Mais déjà, très récemment (avril 2005), la première image d'une planète extrasolaire a été réalisée, justement dans l'infrarouge où le contraste planète-étoile est plus favorable, grâce à l'optique adaptative qui équipe le «Very Large Telescope» (VLT) européen installé dans un désert chilien.

Cependant, l'approche IR est limitée par la quantité de photons venant de la planète. Ceci réduit énormément le nombre de planètes effectivement observables (les plus proches du Soleil seulement), multiplie les difficultés d'analyse, et rend presque impossible l'observation des atmosphères d'éventuels satellites. En fait, les seules observations réussies à ce jour d'une atmosphère extrasolaire (celle d'Osiris) ont été réalisées depuis l'espace, mais dans les domaines de longueurs d'onde visible et ultraviolet (UV) grâce à la spectroscopie en absorption pendant le transit. Cet outil se révèle en effet extrêmement puissant pour sonder ces atmosphères, en particulier celles de petites planètes. De plus, beaucoup de molécules possèdent des signatures spectrales dans le visible et l'UV, en particulier  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2^+$  et  $\text{O}_3$  (c'est l'ozone qui

<sup>6</sup> Le lobe de Roche est le volume situé à l'intérieur de la limite de Roche ; celle-ci correspond à la configuration en  $\infty$  des surfaces équipotentielles des deux masses étoile-planète. Sur cette limite, un atome ne sait plus s'il est lié gravitationnellement à la planète ou à l'étoile ; au-delà il n'est plus lié à la planète et peut donc s'en échapper.

<sup>7</sup> Une étoile de type solaire - et donc ses éventuelles planètes autour - a une durée de vie d'une dizaine de milliards d'années.

<sup>8</sup> Corot fera également de l'astérosismologie.

<sup>9</sup> GAIA sera aussi une mission d'astrométrie et de spectroscopie.

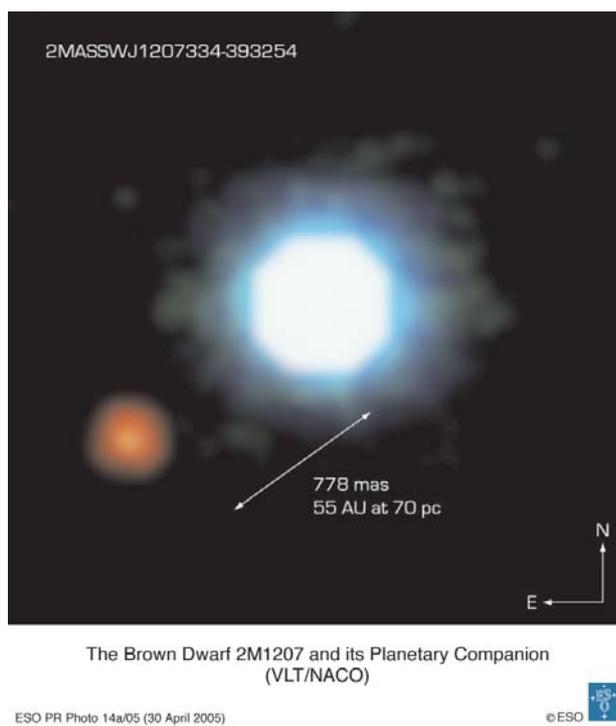


Fig. 1 : Première image d'une exoplanète, prise en infrarouge au VLT



Fig. 2 : Vision d'artiste de l'exoplanète Osiris en évaporation (Crédit : ESA/IAPI/CNRS)

absorbe en grande partie l'UV sur Terre). Une estimation préliminaire semble montrer que ces bio-signatures pourraient être observables (si elles existent) dans des planètes telluriques avec un télescope de la taille du successeur de HST prévu vers 2010.

Nous vivons une époque charnière formidable ! Après des milliers d'années de questionnement, l'humanité est enfin capable de trouver les toutes premières réponses à ses interrogations les plus fondamentales sur sa place

dans l'Univers. Le XXI<sup>e</sup> siècle sera le siècle de la découverte de la vie extraterrestre... si elle existe.

**Roger Ferlet**

Institut d'astrophysique de Paris - UMR 7095 CNRS -  
Université Pierre et Marie Curie - 98 bis boulevard Arago  
- 75014 Paris  
ferlet@iap.fr