

Les exoplanètes : de nouveaux mondes

Michaël Gillon

Astrophysique et Traitement de l'Image
Institut d'Astrophysique et de Géophysique
Université de Liège
Sart-Tilman, Bât B5c, B-4000 Liège 1
E-mail : gillon@astro.ulg.ac.be

1. Introduction

L'être humain s'est interrogé depuis des temps immémoriaux sur l'existence d'autres mondes que le nôtre. Cette question a fasciné les philosophes, les scientifiques et les poètes de toutes les époques.

Metrodorus de Chios affirmait déjà 400 ans avant Jésus-Christ dans son ouvrage *De la Nature* qu'il n'était « pas plus naturel de n'avoir qu'un seul épi de blé dans un champ que d'avoir un seul monde habité dans l'Univers. » Peu après, Epicure postulait dans sa *Lettre à Hérodoté* : " Ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'Univers. Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents. " D'autres exemples ne manquent pas, comme Albert le Grand, théologien et philosophe allemand du XIII^e siècle, Giordano Bruno, brûlé sur le bûcher de l'Inquisition le 17 février 1600 à Rome pour ses affirmations sur le sujet, ou encore Bernard le Bouyer de Fontenelle, auteur des *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686).

Lorsque l'on découvre que le soleil n'était qu'une étoile comme les autres, de grands scientifiques comme Christiaan Huygens (1629-1695) se demandèrent ce qui pouvait empêcher les autres étoiles d'avoir leur propre cortège de planètes. Huygens proposa même l'utilisation du télescope pour découvrir de telles planètes. Pourtant, tout cela restait du domaine de la pure spéculation.

En rupture avec les siècles précédents, le XX^e siècle a vu se développer les outils nécessaires pour étayer un début de réponse par des éléments issus de l'observation. De 1938 à 1962, Piet Van de Kamp, un astronome hollandais, consacra une grande partie de sa carrière à l'étude de plus de 2000 plaques photographiques de l'étoile de Barnard, une étoile proche du soleil au fort mouvement propre. Il proposa en 1963 qu'une oscillation dans son mouvement était dû à la présence d'un compagnon planétaire. Il annonça en avoir

découvert un deuxième en 1969, toujours autour de la même étoile. Cependant, ces découvertes furent sérieusement mises en doute par la suite, pour être finalement récusées par la communauté scientifique. En janvier 1992, l'astronome Alexander Wolszczan annonça la découverte des deux premières exoplanètes, découverte confirmée par la suite. Cependant, l'existence de ces deux planètes à l'extérieur du système solaire ne souleva pas vraiment l'enthousiasme des foules. En effet, elles orbitent autour d'un pulsar, le résidu compact de l'explosion d'une étoile en supernova. Soit un astre extrême, bien différent de notre soleil. Cette découverte eut cependant le mérite de montrer que des planètes peuvent exister dans un environnement fort différent de notre Système Solaire.

Une découverte d'un tout autre retentissement fût annoncée en 1995 : un astronome suisse, Michel Mayor, et son étudiant, Didier Queloz, venaient de découvrir une planète géante en orbite autour de 51 Pegasi, une étoile de type solaire ! Cette planète surprit tout le monde, car elle ne cadrerait vraiment pas avec la théorie de formation des systèmes planétaires alors en vigueur : il s'agit en effet d'une planète analogue à Jupiter, mais presque collée à son étoile, à une distance de 0.05 UA^1 , soit 20 fois plus petite que la distance Terre-Soleil, et accomplissant son orbite autour de l'étoile en ... un peu plus de quatre jours ! Son existence fut cependant confirmée par une équipe américaine, qui s'empressa d'annoncer à son tour la détection de deux autres planètes. Les découvertes allaient alors s'enchaîner à un rythme soutenu, pour dépasser la centaine à ce jour.

La recherche de planètes extrasolaires comporte deux aspects fondamentaux : premièrement, ses résultats nous donnent des informations capitales pour comprendre les probabilités et les mécanismes de formation des systèmes planétaires. Ils nous renseignent aussi de manière indirecte sur nos origines. Le second aspect est la recherche de planètes semblables à la Terre, situées de manière stable dans la zone propice à la vie telle que nous la connaissons. Hormis les planètes découvertes en 1992 autour d'un pulsar, toutes les exoplanètes découvertes à ce jour sont des planètes géantes dont les plus légères ont une masse comparable à celle de Saturne. Nos instruments n'ont pas encore la sensibilité nécessaire pour détecter des planètes de type terrestre, mais de nombreux projets visent à atteindre cet objectif. Avec comme but ultime la détection d'éventuelles formes de vie sur ces autres Terres ...

Nous présentons dans la section suivante les méthodes utilisées pour découvrir les exoplanètes, ainsi que les projets dans ce domaine. Le dernier paragraphe est consacré à la synthèse des connaissances acquises grâce à ces découvertes, et à nos conclusions.

2. Les moyens de détection

Ce chapitre est consacré à la détection et à la caractérisation des planètes extrasolaires, mais discute également les observations de disques protoplanétaires.

Les paramètres utilisés sont la masse M , le rayon R et la luminosité L , avec les indices $*$ et p se référant à l'étoile et à la planète, respectivement. Les paramètres orbitaux seront la période P , le demi-grand axe a , l'excentricité e , l'inclinaison orbitale par rapport au plan du ciel i ($i = 0^\circ$: plan de l'orbite perpendiculaire à la ligne de visée, $i = 90^\circ$: plan de l'orbite parallèle à la ligne de visée), et la distance au système solaire d .

¹ UA = Unité Astronomique, la distance moyenne Terre-Soleil, d'une valeur de 149597870 km

2.1. Imagerie

Ce terme indique la détection directe de l'image de la planète, obtenue grâce à la réflexion de la lumière de l'étoile. Il s'agit d'un défi immense, dont la difficulté peut être comprise par une simple formule :

$$\frac{L_p}{L} = p(\lambda, \alpha) \left(\frac{R_p}{a} \right)^2 \quad (1)$$

où L est la luminosité, λ la longueur d'onde, α l'angle entre l'étoile et l'observateur vu depuis la planète, et $p(\lambda, \alpha)$ est l'albédo géométrique, une fonction dépendant de la phase et des propriétés dispersives de l'atmosphère de la planète. Cette formule nous donne le rapport des éclats de la planète et de l'étoile, l'inverse du contraste à atteindre à une certaine longueur d'onde pour « voir » la planète. Ce rapport est minuscule, de l'ordre de 10^{-9} pour une planète comme Jupiter à distance angulaire maximale. Observée depuis le sol, une planète jumelle de Jupiter à 5 parsec serait séparée de 1 seconde d'arc² de son étoile. Son signal serait perdu dans le profil de diffraction du télescope, et surtout dans le profil de « seeing » dû à la turbulence atmosphérique (de l'ordre de 1 seconde d'arc). Dans ces conditions, obtenir une image directe de la planète n'est pas possible. Mais des efforts sont engagés dans plusieurs directions pour « voir » les exoplanètes.

Une première amélioration consiste à observer à des longueurs d'onde où le rapport des luminosités planète-étoile est plus grand que dans le visible. La région infra-rouge est la plus prometteuse, puisque ce rapport y est de 10^{-6} au lieu de 10^{-9} dans le visible.

Les effets néfastes de la turbulence atmosphérique peuvent être traités en utilisant la technique d'optique adaptative, pour obtenir une résolution limitée uniquement par la diffraction. Une solution alternative est la déconvolution des images, un traitement informatique postérieur à l'observation permettant de corriger les effets de l'atmosphère. Bien sûr, la solution la plus simple, mais aussi la plus coûteuse, est de s'affranchir physiquement de l'atmosphère, en observant depuis l'espace.

L'interférométrie utilise quant à elle le caractère ondulatoire de la lumière. Plusieurs faisceaux sont combinés destructivement ou constructivement afin de respectivement réduire le signal de l'étoile ou augmenter le signal de la planète, ces deux effets permettant d'améliorer le contraste entre les deux objets.

Les progrès techniques devraient nous permettre dans un proche avenir de réaliser des images d'exoplanètes massives proches depuis le sol, en combinant l'optique adaptative, l'interférométrie et l'utilisation de grands télescopes, comme le VLT au Chili ou le Keck à Hawaï. Le projet de très grand télescope (OWL, 100 mètres de diamètre) nous donnera, s'il se concrétise, le moyen de détecter des planètes telluriques autour d'une centaine d'étoiles proches.

Les projets les plus ambitieux concernent l'espace. La NASA et l'ESA étudient des projets d'interféromètres spatiaux capables de détecter des planètes de type terrestre et d'en obtenir des spectres basse résolution afin, entre autre, d'y chercher d'éventuelles traces de vie (projet TPF/Terrestrial Planet Finder pour la NASA, et Darwin pour l'ESA). Ces missions utiliseraient l'interférence destructive dans l'infrarouge, bien qu'une utilisation parallèle dans le visible ne soit pas exclue. Il s'agirait pour les deux missions d'envoyer une flottille de petits télescopes dont les signaux seraient combinés, la base de l'interféromètre

² Une seconde d'arc = un 3600° de degré d'arc

pouvant être réglée par les mouvements relatifs des différents télescopes. Le défi technologique est immense, et ces deux missions ne sont pas prévues avant 2015. De nombreux projets intermédiaires ont été prévus afin de préparer TPF et Darwin. Une collaboration entre l'ESA et la NASA et la fusion des deux missions en une n'est pas à exclure.

Signalons pour finir que des projets plus ambitieux encore ont été proposés, des réseaux interférométriques au sol ou dans l'espace, avec une base de 10 à 100 km afin de résoudre l'image de la surface de la planète. Ces projets semblent irréalistes à l'heure actuelle, bien plus à cause de leur coût pharaonique que du défi technologique soulevé ...

2.2 Perturbation dynamique de l'étoile

Il ne s'agit plus ici de détecter la planète de façon directe, mais de déduire son existence de façon indirecte en analysant la perturbation dynamique engendrée sur son étoile. A cause de la présence de la planète, l'étoile se déplace en effet sur une orbite elliptique dont un des foyers est le centre de masse du système étoile-planète. Le demi-grand axe de cette ellipse est proportionnel au rapport M_p/M_* . Ce mouvement entraîne une perturbation périodique de trois observables : **(1)** la vitesse radiale de l'étoile, **(2)** sa position astrométrique et **(3)** le temps d'arrivée d'un éventuel signal périodique. Nous allons passer en revue l'utilisation de ces trois types de signaux, en commençant par celui qui a permis de découvrir la grande majorité des exoplanètes connues : la méthode des vitesses radiales.

2.2.1. Vitesse radiale (VR)

Cette méthode est de loin celle qui a apporté le plus de découvertes en matière d'exoplanètes. En effet, sur 120 exoplanètes découvertes autour d'étoiles de la séquence principale, 119 le furent par la méthode des vitesses radiales. L'amplitude de la perturbation en vitesse radiale due à une planète de masse largement inférieure à celle de son étoile et orbitant autour de celle-ci en orbite circulaire est donnée par la formule suivante :

$$K = 28.4 (P)^{-1/3} (M_p \sin i) (M_*)^{-2/3} \text{ ms}^{-1} \quad (2)$$

où P est la période en années, M_p en masses de Jupiter et M_* en masses solaires. P et a , le demi-grand axe de l'orbite, sont reliés par la troisième loi de Kepler :

$$P = (a)^3 (M_*)^{-1/2} \text{ années} \quad (3)$$

où a est en UA, et M_* à nouveau en masses solaires.

La formule (2) nous indique que la méthode privilégie des planètes massives à période courte (et donc, via (3), proches de leur étoile). De plus, elle ne nous permet de connaître qu'une limite inférieure de la masse de la planète si l'inclinaison n'est pas déterminée par une autre méthode. En effet, c'est $M_p \sin i$ et pas M_p qui apparaît dans la formule (2). L'amplitude de la perturbation est indépendante de la distance du système, mais le haut rapport signal-sur-bruit nécessaire pour détecter la perturbation limite les observations aux étoiles assez brillantes.

La mesure de la vitesse radiale d'une étoile repose sur l'effet Doppler-Fizeau. Lorsqu'un objet possède une vitesse radiale positive par rapport à un observateur (récession), les ondes électromagnétiques envoyées par l'objet seront perçues comme étant décalées vers les grandes longueurs d'onde (*redshift*). Si par contre l'objet s'approche de l'observateur, et donc possède une vitesse radiale négative, les ondes électromagnétiques envoyées par l'objet seront perçues comme étant décalées vers les petites longueurs d'onde (*blueshift*). Pour quantifier cet effet, on utilise un spectrographe qui va séparer la lumière de l'étoile en un spectre continu. La lumière de l'étoile provient de son centre, et doit franchir l'atmosphère stellaire avant de se propager dans l'espace interstellaire. L'atmosphère stellaire contient divers éléments qui vont absorber partiellement la lumière de l'étoile à des longueurs d'onde bien précises et entraîner la présence de raies d'absorption dans le spectre de l'étoile. Sur le spectrographe, ces raies seront plus ou moins décalées par rapport à leur position au repos, selon la vitesse radiale de l'étoile. On utilise alors le décalage de chaque raie pour obtenir une mesure très précise de la vitesse, selon une technique développée par l'Anglais Griffin et nommée corrélation croisée. Pour un exemple de courbe de vitesse radiale trahissant la présence d'une planète massive, voir **figure 1**.

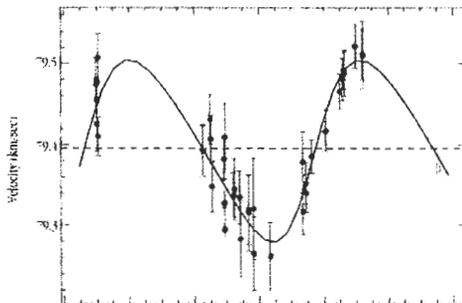


Figure 1. Courbe des vitesses radiales de l'étoile HD47536, dont les variations périodiques indiquent la présence d'une planète massive

L'amplitude de la perturbation due à Jupiter sur le Soleil, observé depuis une direction située dans le plan de l'orbite, serait de 12.5 ms^{-1} , avec une période P de 11.9 ans. Pour la Terre, l'amplitude chute à 0.1 ms^{-1} , avec une période P de 1 an. La précision maximale actuelle est d'environ 1 ms^{-1} , avec le spectrographe le plus performant (HARPS : High Accuracy Radial Velocity Planetary Searcher), installé au Chili. Cela nous donne accès à la découverte de planètes comparables à Saturne. La précision peut-elle être encore augmentée et nous permettre de détecter des planètes telluriques ? Les performances des spectrographes peuvent sans doute être améliorées, mais le principal problème proviendrait alors de l'étoile. Une étoile de type solaire subit des oscillations, radiales et non-radiales, dues à l'excitation stochastique de modes de vibration par la zone convective située sous l'atmosphère (modes de compression). De plus, son champ magnétique peut entraîner des effets comme l'éjection coronale de matière ou des inhomogénéités convectives sur la surface entraînant des variations de vitesse nuisibles à la précision de la méthode, appelé *jitter*, et qui sont comparables à ceux dus à une planète tellurique.

Les oscillations étant des perturbations de petite amplitude d'un état d'équilibre, l'observation de l'étoile sur un temps suffisamment long et en utilisant des temps de pose suffisamment courts pour suivre les oscillations devrait permettre de résoudre le problème des oscillations de l'étoile. En effet, en considérant un temps beaucoup plus grand que la

période caractéristique des oscillations (quelques minutes pour le soleil), on peut considérer que l'énergie gagnée et l'énergie perdue par les oscillations s'égalent, ce qui fournit une contrainte puissante. Cette stratégie a l'avantage que l'observation donne par la même occasion une grande quantité d'informations aux astérosismologistes³, ce qui permet de concevoir des programmes d'observation commun. Pour ce qui est du *jitter*, la seule solution à l'heure actuelle consisterait à choisir des étoiles cibles très peu actives.

Comme mentionné plus haut, la méthode des vitesses radiales ne nous donne qu'une limite inférieure sur la masse de l'exoplanète. Il faut savoir qu'une planète se définit comme un objet de masse insuffisante pour subir la fusion du deutérium. Cette masse limite est de $12 M_J$ (masse de Jupiter). Au-dessus, nous avons affaire à une naine brune, une étoile « ratée », incapable d'initier la fusion de l'hydrogène bien que la fusion du deutérium au sein de son noyau lui assure une certaine luminosité. Le domaine de masse des naines brunes s'étend de 12 à $80 M_J$. L'inclinaison n'est connue que pour un cas sur les 119 exoplanètes orbitant autour d'étoiles de la séquence principale et découvertes par vitesse radiale, et donc 118 exoplanètes sur les 119 pourraient ne pas être des planètes mais des naines brunes. Mais des considérations statistiques alliées à la rareté des naines brunes de faible masse nous laissent penser que la majorité des exoplanètes connues sont bel et bien des planètes.

2.2.2. Astrométrie

Cette méthode repose sur l'étude du mouvement de l'étoile. Comme mentionné plus haut, une étoile subit un mouvement périodique elliptique en présence d'une planète orbitant autour d'elle. L'orbite réelle projetée sur le plan du ciel sera une ellipse dont le demi-grand axe angulaire est donné par :

$$\alpha = \frac{M_p a}{M_* d} \quad (4)$$

où α est en seconde d'arc a en UA et d en parsec⁴. La méthode favorise la détection d'une exoplanète massive, orbitant loin autour d'une étoile peu massive relativement proche de nous. Pour pouvoir observer ce mouvement, il convient de retirer le mouvement propre de l'étoile (une droite), et son mouvement apparent parallactique (une ellipse due à la rotation de la Terre autour du Soleil). De plus, une ou plusieurs étoiles de référence sont nécessaires dans le champ observé. Jupiter orbitant autour du Soleil observée depuis une distance de 10 parsec entraînerait une amplitude astrométrique de 500 microsecondes d'arc, soit $5 \cdot 10^{-4}$ seconde d'arc (voir **Figure 2**). La Terre donnerait quant à elle une amplitude de 0.3 microseconde d'arc. De tel niveaux de précision ne sont pas encore à notre portée.

³ L'astérosismologie est la branche de l'astrophysique stellaire qui vise à obtenir des informations sur les processus physiques en action à l'intérieur des étoiles par l'étude des pulsations de ces dernières.

⁴ Un parsec = 3.26 années-lumière = $3.08 \cdot 10^{13}$ km

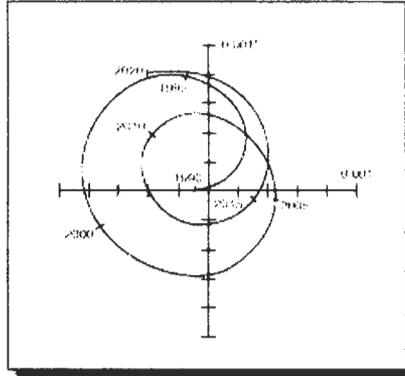


Figure 2. Déplacement astrométrique du Soleil dû à Jupiter observé depuis 10 parsec.

La méthode complémentaire bien celle des vitesses radiales. En effet, si a est connu par cette dernière, d par l'étude du mouvement parallactique et si M_* est estimé par le type spectral de l'étoile ou par un tracé évolutif, alors la méthode donne la masse de la planète sans ambiguïté, et nous donne donc l'inclinaison du système par la même occasion.

L'astrométrie depuis le sol n'a pas encore permis de détecter une exoplanète, la turbulence atmosphérique empêchant d'atteindre le niveau de précision nécessaire. Des instruments en cours de développement devraient, quant à eux, permettre d'atteindre un niveau de précision de 10 microsecondes d'arc, en utilisant l'interférométrie (Palomar, Keck, VLTI). Cependant, ces instruments ne seront utilisables que pour l'observation de champs très étroits, ce qui est un handicap. En effet, nous avons vu que la technique est d'autant plus efficace que le système étoile-planète est proche. Les étoiles proches sont pour la plupart situées dans des champs peu denses : un champ trop étroit risque de ne pas fournir d'étoiles de référence, nécessaires pour déterminer le mouvement de l'étoile étudiée. Ces instruments ne permettraient alors que la recherche d'exoplanètes autour d'étoiles doubles.

L'astrométrie spatiale peut permettre d'atteindre des précisions plus grandes encore. L'utilisation du système de guidage du Hubble Space Telescope (HST) a déjà permis de détecter le mouvement d'une étoile due à une planète qui avait été découverte auparavant par la méthode des vitesses radiales, ce qui a fourni par la même occasion l'inclinaison du système.

L'analyse des résultats du satellite Hipparcos a permis de poser des limites maximales de masse pour certaines exoplanètes connues, mais sa précision de l'ordre de la milliseconde d'arc est insuffisante pour réellement contraindre les systèmes exoplanétaires proches ou pour permettre de nouvelles découvertes. Deux missions spatiales ambitieuses sont en phase de préparation et devraient atteindre des précisions astrométriques inégalées (μ as). Il s'agit de la mission SIM de la NASA, et de la mission GAIA de l'ESA. Ces deux missions utiliseront l'interférométrie depuis l'espace pour étudier les systèmes planétaires connus et en découvrir de nouveaux. En supposant que seulement 4-5 % des étoiles de type solaire ont une planète de la masse de Jupiter, GAIA devrait pouvoir détecter 10 000 systèmes planétaires de périodes comprises entre 1 et 10 ans, pour des étoiles jusqu'à la 15^{ème} magnitude.

La détection de planètes telluriques par la méthode astrométrique depuis l'espace pourrait sembler possible si la limite de précision de la μs était franchie dans l'avenir. Cependant, l'éclat d'une étoile n'est pas uniforme sur toute sa surface, des inhomogénéités de température dues à la convection et au champ magnétique existent : pour le Soleil, il s'agit des fameuses taches solaires. Le mouvement dû à la rotation, l'apparition et la disparition ou les variations d'éclat de ces taches engendreraient un mouvement du photocentre de l'étoile qui pourrait masquer un éventuel mouvement dynamique dû à la présence d'une planète tellurique.

2.2.3. Mesure des différences de temps de trajet : les pulsars à planètes

Les mouvements orbitaux d'un astre entraînent une variation périodique du temps d'arrivée du signal lumineux qui nous parvient. Cependant, tout comme la méthode astrométrique nécessite des étoiles de référence, la mesure d'une variation du délai temporel d'arrivée du signal nécessite une référence temporelle extrêmement précise. Les pulsars conviennent parfaitement dans ce rôle. Ce sont des étoiles à neutrons présentant un champ magnétique très intense et en rotation très rapide, résidus de l'explosion d'étoiles massives arrivées à la fin de leur vie. Ils émettent des faisceaux étroits d'émission radio parallèles à leur axe dipolaire magnétique. Cet axe n'étant pas parfaitement aligné avec l'axe de rotation, ces faisceaux sont perçus comme des pulses intenses observés à la fréquence de rotation du pulsar, si bien sûr le faisceau intercepte l'observateur durant sa rotation. On peut distinguer deux classes de pulsars radios : les 'normaux' avec une période de l'ordre d'une seconde, et les pulsars millisecondes. Ces derniers sont très rares, on n'en connaît que quelques dizaines, mais la régularité de leur signal en fait de véritables standards temporels. Cet avantage permet de chronométrer d'infimes variations dans l'arrivée du signal, qui pourraient être dues à la présence d'une planète beaucoup plus légère que la Terre. Si l'on suppose une orbite circulaire perpendiculaire au plan du ciel et une masse de 1.35 masse solaire pour le pulsar, l'amplitude de la perturbation temporelle observée sera de :

$$\tau_p = 1.2 M_p (P)^2 \text{ ms} \quad (5)$$

où P est en année et M_p en masse terrestre. Pour des pulsars millisecondes, la méthode est assez sensible pour détecter des objets d'aussi faible masse que la Lune ou même un gros astéroïde.

C'est par cette méthode que le premier système exoplanétaire fut découvert en 1992 autour du pulsar milliseconde PSR 1257 + 12, par Alexander Wolszczan et son équipe. Il s'agit de deux planètes orbitant autour du pulsar, avec des masses comparables à celle de la Terre (2.8 et 3.4 masses terrestres). Leurs orbites sont quasi circulaires, et le rapport de leurs périodes est de 3/2, indiquant un effet de résonance orbital. Une troisième planète fût détectée par la suite, de masse beaucoup plus faible : 0.02 masse terrestre (soit l'équivalent de la Lune) avec une orbite plus interne. Dernièrement, la possibilité d'existence d'une ceinture d'astéroïdes autour du système a été avancée par Wolszczan.

Il est clair que cette méthode, applicable uniquement à une population faible d'étoiles très spéciales, n'apportera pas beaucoup d'autres découvertes. En fait, on ne connaît qu'un autre cas : PSR B1620-26. C'est un système binaire, formé d'un pulsar et d'une naine blanche, autour duquel tourne une planète de 2.5 masses joviennes. Cette

dernière fut sans doute capturée gravitationnellement par le système. Quant à la présence de planètes autour du pulsar PSR 1257+12, nous y reviendrons dans le chapitre 3.

2.3. Photométrie : transits

Le concept de la méthode du transit est simple : une exoplanète passant devant son étoile va entraîner une diminution de l'éclat de celle-ci, cet effet se répétant à la même période que celle de l'orbite de l'exoplanète. Pour un transit observé dans un système Jupiter/Soleil, la variation de luminosité serait d'environ 2 %, soit 0.02 magnitude (mag). Pour qu'un transit soit observé, il faut bien sûr que le système possède une inclinaison d'environ 90°, ce qui rend la probabilité d'observation relativement faible. Cette probabilité augmente si le demi-grand axe de l'orbite diminue et si le rayon de la planète augmente : un système avec une grosse planète très proche d'une étoile n'aura pas besoin d'avoir une inclinaison d'exactly 90° pour provoquer un transit. Cette faible probabilité requiert cependant d'observer un très grand nombre d'étoiles pour avoir une chance de détecter une exoplanète. C'est aussi cette faible probabilité qui explique que sur 123 exoplanètes connues, seules trois ont été détectées par cette méthode. La géométrie du système n'est pas le seul facteur déterminant la probabilité de détection, l'amplitude de la chute de luminosité intervient bien sûr aussi. Elle est approximée par :

$$\frac{\Delta L}{L} \approx \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 \quad (6)$$

en supposant une brillance uniforme sur la surface de l'étoile. Si R_* , le rayon de l'étoile, peut être estimé en utilisant la classification spectrale, R_p peut être obtenu par l'équation (6). Si au moins deux transits successifs ont été observés, P est connu. M_* peut être estimé en utilisant un tracé d'évolution stellaire ou la classification spectrale. P et M_* nous donnent a , le demi-grand axe de l'orbite, par la troisième loi de Kepler. On voit que l'association de cette méthode avec la méthode des vitesses radiales permet de déterminer la masse et le rayon de la planète : l'inclinaison étant proche de 90° et pouvant être estimée plus précisément en analysant la durée du transit, on connaît alors la masse de la planète et non plus seulement une limite inférieure. Le système est alors complètement contraint. Ce cas ne s'est présenté que pour une exoplanète, orbitant autour de l'étoile HD 209458. Une exoplanète géante orbitant très près de l'étoile fut détectée par vitesse radiale. L'observation photométrique ultérieure a révélé un phénomène de transit, confirmant de façon claire la nature planétaire de l'objet (voir **Figure 3**). L'obtention de la masse et du rayon de cette planète a permis d'estimer sa densité : il s'agit bien d'une géante gazeuse proche de son étoile, une « Hot Jupiter » comme 51 Peg b⁵. Remarquons que certaines des propriétés physiques et chimiques de l'atmosphère d'une exoplanète sont accessibles durant le transit. On a détecté dans le cas de HD 209458 b la présence de sodium et d'hydrogène dans l'exosphère (très haute atmosphère dont une partie s'échappe de l'attraction gravitationnelle) par leur absorption de la lumière stellaire mesurable durant le transit.

⁵ Le nom d'une exoplanète s'obtient en ajoutant une lettre en minuscule à celui de l'étoile. La première exoplanète découverte autour d'une étoile obtiendra la lettre b, la deuxième c, et ainsi de suite. Si deux exoplanètes sont découvertes en même temps autour d'une étoile, c'est la plus massive qui obtiendra la lettre b.

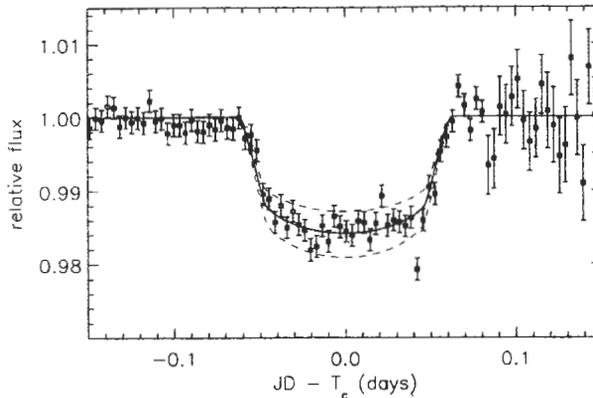


Figure 3. Courbe de lumière de HD209458 montrant le transit de HD209458 b. Cette courbe montre l'évolution de l'intensité lumineuse en fonction du temps.

La photométrie depuis le sol souffre de la présence de l'atmosphère, diminuant la précision photométrique et élargissant les images des étoiles. Ce dernier effet est particulièrement nuisible car il entraîne l'apparition de « faux-positifs ». En effet, si une étoile binaire ne peut être séparée d'une étoile brillante, si on les retrouve toutes deux dans la même « tache » au niveau du détecteur, le passage d'une composante de la binaire devant l'autre va entraîner une chute de la luminosité dont l'effet sera fortement amoindri par la présence de l'étoile brillante : l'effet sera le même qu'une exoplanète transitant devant une étoile brillante. On parle de « blends » pour indiquer ce mélange des étoiles dans la même image au niveau du détecteur. En cas de blend, un transit planétaire ne sera pas détectable car le phénomène est amoindri par la présence de la lumière de l'étoile contaminatrice. De nombreux projets de détection depuis le sol existent depuis de plusieurs années, mais la moisson est bien faible : un seul projet, OGLE, a permis de détecter un transit planétaire, OGLE-TR-56b, encore controversé, et tout récemment deux autres transits confirmés ensuite par vitesse radiale. Il convient de remarquer que ces trois exoplanètes forment une nouvelle catégorie d'exoplanètes, les « Very Hot Jupiters » (VHJ), en raison de leur distance à l'étoile extrêmement faible. Ce sont de grosses planètes gazeuses orbitant autour de leur étoile en un peu plus d'un jour ! Les VHJ paraissent très rares, c'est pourquoi elles n'avaient pas encore été détectées par vitesse radiale. Jusqu'à tout récemment, cette dernière méthode ne pouvait étudier que des étoiles très brillantes, et donc très proches, or leur nombre n'était pas suffisant pour que la probabilité qu'elles contiennent une VHJ soit significative.

Toutes les autres détections à ce jour se sont révélés être des « blends ». Pourquoi ? Nous avons mentionné plus haut que la probabilité d'observer un transit est très faible. Pour maximiser cette probabilité, on est obligé d'observer des champs très encombrés. Or, l'examen à haute résolution angulaire de ces champs (par exemple par déconvolution) révèle que beaucoup de sources sont des « blends » de plusieurs étoiles : un transit planétaire est inobservable dans ces conditions, mais la probabilité d'observer un « faux-positif » est maximisée. Seules les étoiles légèrement blendées et possédant une énorme planète orbitant vraiment très près d'elles ont une faible chance de donner lieu à une détection exoplanétaire, ce que confirment les trois exoplanètes découvertes par le projet OGLE.

La déconvolution n'est pas la seule solution : observer depuis l'espace en est une autre. Deux missions sont en phase de préparation dans ce domaine : COROT, un projet du CNES et de l'ESA, et Kepler, un projet plus ambitieux de la NASA. COROT est un minisatellite qui, outre son objectif principal de sismologie stellaire, recherchera des exoplanètes en observant plus de 50 000 étoiles de magnitude inférieure à 15.5, chacune durant cinq mois. COROT est doté d'un télescope de 27 cm qui observera cinq champs les uns à la suite des autres, durant 150 jours, pour une durée totale de la mission de 2.5 ans. Avec une précision photométrique proche de 10^{-3} , les simulations indiquent que COROT a le potentiel de détecter des planètes telluriques « chaudes », orbitant près de leur étoile, si leur rayon est au moins deux fois supérieur à celui de la Terre. La mission permettra aussi de détecter de nombreuses planètes gazeuses (100 au moins sont prévues). Le lancement de COROT est prévu pour 2006. Kepler est une mission similaire, quoique plus ambitieuse, dont le lancement est prévu pour 2007. Avec son télescope de 1 m et son champ de vue de 12° , Kepler observera de façon continue 800 000 étoiles de la séquence principale de magnitude inférieure à 14. Sa précision photométrique sera d'environ 10^{-5} , ce qui lui permettra de détecter des planètes similaires à la Terre : environ 500 selon les prévisions. De très nombreuses planètes plus massives devraient aussi être découvertes par Kepler. Cette mission devrait nous informer directement sur l'abondance des planètes telluriques, et constitue donc une étape importante avant la mission DARWIN.

2.4. Photométrie et astrométrie : microlentille gravitationnelle

Le phénomène de lentille gravitationnelle est un effet prévu par la théorie de la relativité générale d'Einstein : un objet massif courbe l'espace-temps dans son voisinage, et de ce fait dévie les rayons lumineux passant à proximité. Il agit comme une lentille qui fait converger des rayons lumineux initialement parallèles issus d'une source lointaine. Si une étoile passe juste devant un objet lointain émettant de la lumière dans notre direction, et si l'étoile est à distance correcte entre la source et l'observateur pour jouer le rôle de lentille, l'observateur verra un accroissement lent de la luminosité de l'objet émetteur, suivi d'une diminution tout aussi lente. Cet événement est achromatique, ce qui permet de le distinguer d'une variabilité intrinsèque de la source. Si une planète orbite autour de l'étoile lentille, une structure fine peut être détectée dans la signature photométrique de l'objet source avec une probabilité non négligeable : $\sim 17\%$ pour une planète de type Jupiter. Plus la masse de la planète décroît, plus le signal devient faible et bref : pour une planète de type Terre, la probabilité de détection chute à $\sim 2\%$. En cas de détection, les mesures donnent accès au rapport M_p/M_* .

Les avantages de la méthode sont de pouvoir détecter des planètes telluriques grâce à sa grande sensibilité, et son efficacité jusqu'à des distances très grandes (des milliers de parsec). De plus, c'est la seule méthode qui ne requiert pas de lumière provenant de l'étoile autour de laquelle orbite la planète ou de la planète elle-même. Mais la méthode a un gros inconvénient : une observation ne peut être répétée, ce qui rend l'étude ultérieure du système par une autre méthode nécessaire.

De nombreuses campagnes de photométrie ont été organisées depuis 1993 afin de détecter des phénomènes de microlentilles gravitationnelles. Citons EROS, OGLE, MACHO, DUO et MOA. Le but de ces campagnes, à la base, n'était pas de détecter des exoplanètes, mais toute trace d'objets sombres et massifs capable d'expliquer la dynamique de notre galaxie. Il semble en effet qu'une grosse partie de la matière de la Voie Lactée soit

non lumineuse, et se trouve en majorité dans le halo de notre galaxie : c'est l'énigme de la matière sombre. Ce problème se pose d'ailleurs à l'échelle de l'Univers tout entier et préoccupe fortement les cosmologistes. Plusieurs centaines d'événements ont été enregistrés par les projets cités ci-dessus, dont une poignée pourrait montrer les signes de la présence d'une exoplanète. Mais seul un événement a été tout récemment confirmé comme dû à une exoplanète orbitant autour d'une étoile. Il s'agit d'un objet observé par OGLE puis par MOA, ce qui a permis de donner du poids à l'interprétation exoplanétaire. Dans les autres cas, l'interprétation en terme d'exoplanète peut être contestée tant qu'il n'y a pas d'observation pour la confirmer. La méthode des vitesses radiales ne peut jouer ce rôle, car les objets jouant le rôle de lentille sont bien trop faibles pour donner lieu à un rapport signal-sur-bruit suffisant. Remarquons aussi que les corps peu lumineux composés de matière connue, comme les naines brunes ou les planètes, ne peuvent expliquer qu'une partie minime de la matière sombre.

En plus de la manifestation photométrique d'un événement de lentille microgravitationnelle, un effet de léger déplacement du photocentre de la source en arrière-fond peut aussi être détecté par astrométrie. L'effet prévu est trop faible pour être détecté par les moyens actuels, mais devrait être à la portée des futurs interféromètres à champ étroit, spatiaux (SIM, GALIA) ou non.

2.5. Disques protoplanétaires

De nombreuses étoiles sont observées entourées d'un disque de grandes dimensions (1000 UA ou plus). Tout porte à croire que ces disques se mettent en place lors de la formation de l'étoile, après la contraction d'une région d'un nuage moléculaire géant. Ces disques sont constitués d'un mélange de poussières et de gaz, et vont voir se former en leur sein le cortège de planètes qui va entourer l'étoile, pour finalement devenir moins denses, voire même disparaître. Les disques les plus massifs sont en toute logique observés autour d'étoiles jeunes. Remarquons cependant qu'une fraction importante d'étoiles évoluant depuis longtemps sur la séquence principale conservent un disque de poussières et de gaz. Notre Soleil en possède un également, alimenté constamment par les poussières provenant de collisions entre astéroïdes et par les poussières et les gaz issus des comètes. Ces disques sont particulièrement mis en évidence par leur émission dans l'infrarouge due aux particules de poussières chauffées par l'étoile centrale. Remarquons d'ailleurs que Véga, une étoile qui était réputée pour sa grande stabilité photométrique et, de ce fait, utilisée comme étoile standard de référence, se révéla posséder un excès d'émission dans l'infrarouge qui permit de détecter son disque.

L'étoile β Pictoris est le prototype des étoiles à disque, celui-ci ayant été découvert par les observations infra-rouges du satellite IRAS. La zone interne de ce disque semble dépourvue de gaz et de poussières. Cela pourrait s'expliquer par la présence de planètes s'étant formées à partir de la matière « manquante » sur les observations.

Des mesures Doppler indiquent que ces disques sont en rotation. On observe sur certains disques une ou plusieurs zones circulaires dépourvues de poussières, interprétées comme les signes de la présence d'une planète, ou alors des déformations de la surface du disque qui pourraient également indiquer la présence d'une planète. Les observations indiquent que la plupart des étoiles arrivent sur la séquence principale entourées d'un disque de poussières et de gaz, qui disparaît ou devient très peu dense en environ 400 millions d'années. Remarquons cependant que certaines étoiles très jeunes sont observées

sans disque, ce qui semble indiquer qu'une étoile peut se former sans s'entourer de matière circumstellaire.

3. Synthèse des découvertes actuelles et conclusions

A l'heure actuelle, 123 exoplanètes ont été découvertes autour d'étoiles de la séquence principale. Toutes sont des planètes de masse élevée, la plus petite ayant une masse d'au moins deux fois celle d'Uranus. La distribution de masse voit son maximum tendre vers les masses faibles (jusqu'à $0.2 M_j$), les objets de masse plus importantes que Jupiter étant sensiblement moins nombreux. La véritable distribution n'est bien sûr pas connue : les instruments actuels n'ont pas la sensibilité pour détecter des planètes moins massives qu'Uranus, et les masses que nous connaissons ne sont en fait que des limites inférieures (pour 118 exoplanètes sur 123), par le fait que la méthode des vitesses radiales ne nous permet pas de connaître l'inclinaison du système. Cependant, le fait que la distribution actuelle augmente vers les masses faibles nous porte à penser que les planètes peu massives doivent être bien plus nombreuses que les planètes de masse plus importantes que Jupiter.

Nous pouvons diviser cet échantillon en quatre groupes: **(1)** des planètes analogues à Jupiter, aussi bien en période qu'en distance à leur étoile, sur des orbites peu excentriques; **(2)** des planètes possédant des orbites très excentriques; **(3)** des "Jupiters chauds", c'est-à-dire des planètes géantes quasiment collées à leur étoile, en orbite quasiment circulaire ; et enfin, **(4)** des « Jupiters très chauds », encore plus proches de leur étoile et détectées par transit (OGLE). Le premier groupe cadre bien avec nos théories standards de formation planétaire, les trois autres beaucoup moins.

Les théories de formation de systèmes planétaires prévoyaient la découverte de planètes massives situées loin de leur étoile et en orbite très peu excentrique, quasiment circulaire. Ces théories étaient basées sur l'observation du seul cas de système planétaire connu, le nôtre. Nous avons vu que la méthode reine en matière de détection d'exoplanètes, la méthode des vitesses radiales, voyait sa sensibilité augmenter pour des périodes courtes. Il est donc normal que cette méthode soit biaisée vers la détection de planètes massives proches de leur étoile. Mais l'existence même de ces « Jupiters chauds » nous force à concevoir des scénarios de migration, car une planète semblable à Jupiter ne peut pas se former très près de son étoile. En effet, une fois son noyau réfractaire solide formé, elle n'y trouvera pas assez de gaz pour acquérir sa masse énorme. Il faut donc admettre que les « Jupiters chauds » se forment à distance respectable de leur étoile, puis migrent vers celle-ci pour des raisons encore obscures. Cette migration doit avoir des effets négatifs sur l'éventuelle population de planètes telluriques orbitant autour de l'étoile. Certaines de ces planètes doivent se fondre littéralement dans la planète géante en migration. Les simulations indiquent cependant qu'une fraction des planètes telluriques peuvent échapper à ce triste sort et garder une orbite stable. Remarquons qu'à la fois les simulations et les observations portent à croire que les étoiles ayant un « Jupiter chaud » sont plutôt l'exception que la règle. On estime à moins d'un pourcent la fraction d'étoiles de la séquence principale possédant un tel objet. Le processus migratoire semble donc dépendre de paramètres précis et assez peu fréquents, car la fraction d'étoiles à planètes massives est supposée beaucoup plus élevée.

Pour ce qui est des « Jupiter très chauds », tout semble indiquer qu'elles sont encore bien plus rares que les « Jupiter chauds ». On n'en observe aucune dans le voisinage

solaire, où les recherches par vitesse radiale se sont concentrées jusqu'à présent, et cela malgré la relative facilité de leur détection puisqu'elles présentent de courtes périodes et des masses élevées. Elles ont été toutes les trois détectées par transit, en observant en direction du bulbe galactique dans des champs très encombrés. Pour la méthode des transits, elles présentent une probabilité relativement importante (~ 17%) de pouvoir occulter leur étoile car elles y sont quasiment collées. Mais les « Jupiters chauds » ont une probabilité géométrique non négligeable également (~ 10%), et, si l'on extrapole les découvertes faites dans le voisinage solaire au bulbe galactique, ces dernières devraient être détectées en nombre important dans les campagnes photométriques comme OGLE. Or, OGLE n'en a pas encore détecté une seule, pas plus que les autres projets de recherche par transit. Il faut se garder de conclure trop vite, mais on peut se poser la question suivante : la méthode des transits ne souffre-t-elle pas d'un handicap important en se tournant vers des champs encombrés ? Certes, elle augmente de cette façon la probabilité de *pouvoir* observer des transits, mais peut-être ne les observe-t-elle pas à cause de la contamination de la lumière des étoiles présentant une occultation par la lumière d'autres étoiles proches dans l'image. C'est le phénomène de *blend* dont nous parlions plus haut. Il existe cependant une autre explication au problème soulevé ci-dessus. On peut imaginer que les « Jupiters chauds » sont encore bien plus rares loin du voisinage solaire, mais que par contre les « Jupiters très chauds » sont nettement moins rares près du bulbe galactique que près du Soleil. Cette proposition *ad hoc* ne repose cependant pas, à notre connaissance, sur des bases théoriques solides.

Le potentiel gravitationnel d'une étoile circularise les orbites des planètes orbitant très près d'elle, et c'est pourquoi les « Jupiters chauds » ont une orbite circulaire. Par contre, nombreuses sont les exoplanètes de période supérieure à 10 jours à posséder une orbite à l'excentricité marquée. On peut légitimement s'interroger devant ce fait, car bien qu'elles orbitent loin du Soleil, les planètes géantes du système solaire ont des orbites quasiment circulaires. Dans le cas d'une exoplanète découverte dans un système binaire, cela peut s'expliquer par l'interaction de la deuxième étoile sur l'orbite de la planète. Mais dans le cas d'une exoplanète orbitant autour d'une étoile isolée, l'explication est plus difficile et nous oblige à admettre que nous comprenons encore bien mal les processus intervenant dans la formation et l'évolution d'un système planétaire. Mais la découverte de la première exoplanète orbitant autour d'une étoile de la séquence principale remonte à moins de dix ans, et au rythme où ce domaine de recherche se développe, nous pouvons avancer, sans nous risquer beaucoup, que notre compréhension de ces phénomènes sera largement meilleure dans une dizaine d'années.

Je terminerai par un petit mot sur le sujet qui passionne le plus grand nombre : la vie extraterrestre. Comme mentionné dans le paragraphe deux, la recherche d'exoplanètes telluriques est l'objectif de nombreuses missions spatiales (COROT étant la première à venir). Un projet bien plus ambitieux est la mission Darwin/TPF qui cherchera directement des biosignatures sur d'autres Terres. Parallèlement, nous allons continuer à fouiller notre propre système solaire, et principalement Mars, à la recherche de traces de vie, passée ou présente. Dans le cas d'un résultat positif, cela ne répondra pas à la question « sommes-nous seuls dans l'Univers ? », mais cela améliorera notre définition de la vie et notre estimation de sa probabilité à apparaître. Savoir, dans un proche avenir, si d'autres civilisations existent dans notre galaxie ne sera possible que si une de celles-ci communique avec nous : c'est ce qu'espèrent les radioastronomes scrutant le ciel dans le cadre du projet SETI. Pour l'instant, silence radio ...

Remerciements

L'auteur remercie Pierre Magain et Frédéric Courbin pour leur soutien et leurs conseils.

GLOSSAIRE

Année-lumière : distance parcourue en un an par la lumière dans le vide, soit environ 10 000 milliards de kilomètres.

Astérosismologie : la branche de l'astrophysique visant à l'obtention d'informations sur la structure interne des étoiles par étude des oscillations stellaires.

Astrométrie : la branche de l'astronomie s'occupant de la détermination de la position des objets dans le ciel. Plusieurs choses sont calculées :

- (1) La **parallaxe**, qui est le mouvement apparent de l'objet dû à la rotation de la Terre autour du Soleil.
- (2) Le **mouvement propre**, qui est le changement de la position de l'objet année après année dû à son déplacement tangentiel par rapport au Soleil.
- (3) L'éventuelle **perturbation**, qui est le résidu du mouvement de l'objet après avoir retiré la parallaxe et le mouvement propre. Cette perturbation est due à l'influence gravitationnelle d'un corps orbitant autour de l'objet. Pour la détection d'exoplanètes, l'astrométrie est particulièrement sensible aux planètes orbitant loin de leur étoile, alors que la méthode des **vitesse radiales** est plus sensible aux planètes proches de leur étoile.

Blueshift : le décalage de la longueur d'onde des raies du spectre d'un objet s'approchant de l'observateur. Les raies sont décalées vers les plus basses longueurs d'ondes.

Centre de masse (barycentre) : le point autour duquel deux objets liés gravitationnellement orbitent. Si les deux objets sont de masses égales, alors le centre de masse se trouve exactement à mi-distance entre eux. Plus les masses sont inégales, plus le centre de masse se trouve proche de l'objet le plus massif. Le centre de masse du système Soleil-Jupiter se trouve juste au-dessus de la surface du Soleil. C'est suffisant pour entraîner un léger mouvement du Soleil, qui révélerait éventuellement l'existence de Jupiter à un astronome extraterrestre situé sur une planète orbitant autour d'une étoile proche.

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales, l'agence spatiale française.

COROT : Convection, Rotation and planetary Transit (convection, rotation et transit planétaire), mission spatiale (**CNES – ESA**) visant à l'étude de la structure interne des étoiles par **astérosismologie** et à la détection d'exoplanètes par la méthode du **transit** photométrique. Le lancement de COROT est prévu en 2006.

Darwin : mission spatiale de l'**ESA** visant à la détection d'exoplanètes telluriques et à l'étude de leur atmosphère par spectroscopie. Elle se composera d'une flotille interférométrique se plaçant loin du soleil (au moins 5 UA) et opérant dans l'infrarouge. La flotille sera constituée de six télescopes d'au moins 1.5 mètres, d'un laboratoire de recombinaison et d'un satellite de télécommunication avec la Terre. Le lancement est prévu pour 2014.

Disque d'accrétion : nuage de gaz et de poussières qui se forme autour d'une étoile naissante. La majorité de sa matière est accrétée par l'étoile, tandis que le reste est transformé en un disque protoplanétaire, qui comme son nom l'indique, peut permettre la formation de planètes.

ESA : European Space Agency (Agence Spatiale Européenne).

ESO : European Southern Observatory (Observatoire Austral Européen), organisation européenne intergouvernementale pour la recherche astronomique. L'ESO regroupe dix pays membres. Ses installations d'observation sont situés au Chili, tandis que son centre administratif se trouve à Garching, en Allemagne.

GAIA : mission spatiale **astrométrique** de l'ESA visant à déterminer la position d'un milliard d'étoiles avec une précision encore jamais atteinte, et à la détection d'exoplanètes. Le lancement du satellite GAIA est prévu pour 2010.

HST : Hubble Space Telescope (téléscope spatial Hubble), doté d'un miroir primaire de 2.4 mètres. Lancé en 1990, le HST orbite à 600 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre. Il a apporté d'innombrables informations aux astronomes depuis sa mise en service.

IRAS : InfraRed Astronomical Satellite (satellite astronomique infra-rouge), projet commun aux USA, à la Grande-Bretagne et aux Pays-Bas. Ce satellite fut lancé en 1983 et a conduit à la découverte de 350 000 nouvelles sources astronomiques infra-rouge.

Jitter : terme recouvrant l'ensemble des phénomènes intrinsèques à une étoile entraînant un bruit au niveau de la **vitesse radiale**. Il peut s'agir entre autre de l'effet dû à des éjections de matière ou aux oscillations de la surface de l'étoile.

Keck : observatoire américain installé à Hawaï et disposant de deux télescopes géants dotés d'un miroir de 10 mètre de diamètre.

NASA : National Aeronautics and Space Administration. Agence spatiale américaine.

OGLE : Optical Gravitational Lensing Experiment, (expérience de recherche de lentilles gravitationnelles dans le domaine optique), projet de recherche astronomique démarré en 1992, qui visait dans sa conception à observer des phénomènes de microlentilles gravitationnelles, mais qui s'est orienté également vers la recherche de transits photométriques planétaires.

OWL : Overwhelmingly Large telescope (telescope extrêmement grand). Projet de l'ESO de télescope géant doté d'un miroir de 100 mètres de diamètre.

Parsec : unité de distance correspondant à 3.26 **années-lumière**.

Photométrie : la branche de l'astrophysique s'occupant de la détermination de la luminosité des astres.

Redshift : le décalage de la longueur d'onde des raies du spectre d'un objet s'éloignant de l'observateur. Les raies sont décalées vers les plus hautes longueurs d'ondes.

Seeing : effet de dispersion spatiale de la lumière d'un objet observé depuis le sol dû à la turbulence atmosphérique, dégradant la résolution des images et, de ce fait, la précision **photométrique** et **astrométrique**.

SIM : Space Interferometry Mission (mission spatiale interférométrique), mission **astrométrique** de la NASA qui devrait atteindre la précision nécessaire pour détecter d'éventuelles planètes de type terrestre autour des 250 étoiles les plus proches du Soleil. Son lancement est prévu en 2009.

SETI : Search for Extraterrestrial Intelligence (recherche d'intelligence extraterrestre). Projet visant à rechercher d'éventuels signaux radios émis par une intelligence extraterrestre technologique. Financé actuellement par des fonds privés, SETI utilise le radiotélescope d'Arecibo (Puerto Rico) pour scruter le ciel à la recherche d'un signal

artificiel. Tout particulier disposant d'internet peut télécharger un programme d'analyse des signaux reçus et contribuer au projet SETI depuis chez lui, dans le cadre de SETI@home.

TPF : Terrestrial Planet Finder (découvreur de planètes de type terrestre), mission de la NASA très similaire à la mission **Darwin** de l'ESA. Ces deux missions devraient fusionner en une seule mission commune aux deux agences spatiales.

Transit : phénomène de diminution faible de la luminosité d'une étoile dû au passage d'une planète entre l'étoile et l'observateur. HD209458 est la première étoile possédant une planète (découverte par la méthode des **vitesse radiales**) à avoir permis l'observation d'un transit planétaire.

Unité astronomique (UA) : une unité très utilisée de mesure de longueur, correspondant à la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, i.e. 149 597 870 km. Une **année-lumière** vaut un peu plus de 63 000 unités astronomiques.

VLT : Very Large Telescope (très grand télescope), observatoire de l'ESO situé à Paranal, dans le nord du Chili, composé de quatre télescopes disposant chacun d'un miroir de 8.2 mètre de diamètre, ainsi que de trois télescopes auxiliaires mobiles dotés d'un miroir de 1.8 mètre de diamètre.

VLTI : Very Large Telescope Interferometer (interféromètre du très grand télescope), installation interférométrique du VLT utilisant deux ou plus des télescopes et combinant la lumière reçue par ces différents télescopes selon les principes de l'interférométrie afin de disposer d'une résolution accrue.