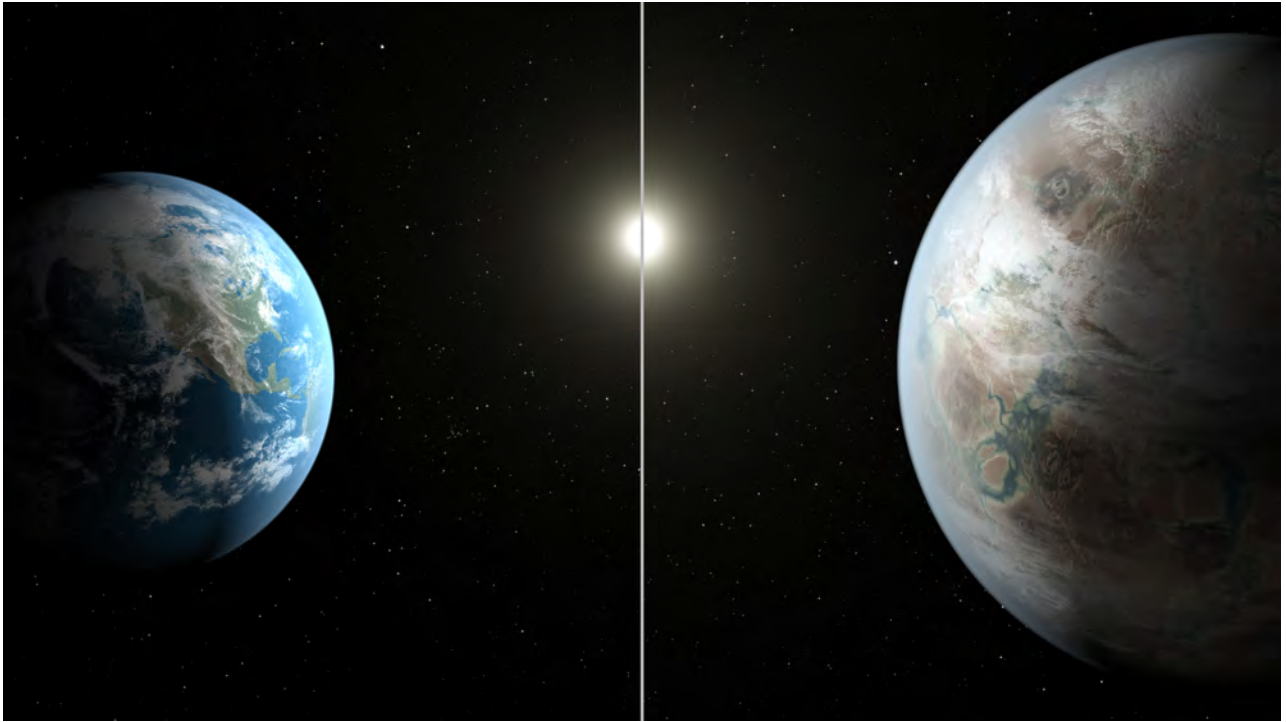


LES EXOPLANÈTES



Introduction
Les différentes méthodes de détection
Le télescope spatial Kepler
Résultats et typologie



Les exoplanètes

I Introduction

Une **exoplanète**, ou **planète extrasolaire**, est une planète située en dehors du système solaire, c'est à dire une planète qui est généralement en orbite autour d'une étoile autre que notre Soleil.

L'existence de planètes situées en dehors du Système solaire est évoquée dès le XVI^e siècle par **Giordano Bruno**. Ce moine novateur et provocateur du XVI^e siècle a eu des intuitions foudroyantes qu'il assénait avec force et conviction, en opposition farouche contre le dogme du géocentrisme qui prévalait depuis Aristote et Ptolémée. Son entêtement lui vaudra le bûcher pour hérésie en 1600. Voir le paragraphe qui lui est consacré dans notre document « **une histoire de l'astronomie** ».

Dès 1584 (Le Banquet des cendres), Bruno adhère, contre la cosmologie d'Aristote, à la cosmologie de Copernic (1543), à l'héliocentrisme : double mouvement des planètes sur elles-mêmes et autour du Soleil, au centre. Mais Bruno va plus loin : il veut renoncer à l'idée de centre : « *Il n'y a aucun astre au milieu de l'univers, parce que celui-ci s'étend également dans toutes ses directions* ». Chaque étoile est un soleil semblable au nôtre, et autour de chacune d'elles tournent d'autres planètes, invisibles à nos yeux, mais qui existent. « *Il est donc d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept « terres » [la Terre, la Lune, les cinq planètes alors connues : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne] que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche* ». (Giordano Bruno, *L'Infini, l'Univers et les Mondes*, 1584).

Le monde est infini, sans clôture. Contre Copernic, Bruno « abolit » la sphère des étoiles fixes, puisque dans toutes les directions, à l'infini, le vide immense est parsemé d'étoiles. « Intuition remarquable, dit un commentateur. Pour la première fois dans l'histoire de la pensée humaine, le ciel acquiert une profondeur. Plus exactement, c'est la notion même de ciel qui s'évanouit, pour laisser place à celle d'espace homogène, c'est-à-dire identique à lui-même, dans toutes les directions ».

Bruno est le premier à postuler, contre la doctrine de l'Église de l'époque, la **pluralité de mondes habités** dans son ouvrage *De l'infinito universo et Mondi*. Il postule que les étoiles sont des soleils, plus petits car éloignés, et que ceux-ci peuvent abriter d'autres créatures à l'image de Dieu.

« *Ainsi donc les autres mondes sont habités comme l'est le nôtre ? demande Burchio. Fracastorio, porte-parole de Bruno répond : « Sinon comme l'est le nôtre et sinon plus noblement. Du moins ces mondes n'en sont-ils pas moins habités ni moins nobles. Car il est impossible qu'un être rationnel suffisamment vigilant puisse imaginer que ces mondes innombrables, aussi magnifiques qu'est le nôtre ou encore plus magnifiques, soient dépourvus d'habitants semblables et même supérieurs* ». (Giordano Bruno, *L'Infini, l'Univers et les Mondes*).

Contrairement à Copernic, il n'appuie pas ses dires sur des preuves mathématiques. « Concernant la mesure du mouvement [des corps célestes], la géométrie ment plutôt qu'elle ne mesure » (De immenso). Il se fie au jugement de l'intellect : « C'est à l'intellect qu'il appartient de juger et de rendre compte des choses que le temps et l'espace éloignent de nous. »

Giordano Bruno est le champion de l'idée d'infini.

« *Nous déclarons cet espace infini, étant donné qu'il n'est point de raison, convenance, possibilité, sens ou nature qui lui assigne une limite* ». (Giordano Bruno, *L'Infini, l'Univers et les Mondes*).

Mais ce n'est qu'au cours du XIX^e siècle que les exoplanètes deviennent l'objet de recherches scientifiques. Beaucoup d'astronomes supposent qu'elles peuvent exister, mais aucun moyen technique d'observation ne permet de prouver leur existence. La distance, mais aussi le manque de luminosité de ces

objets célestes si petits par rapport aux étoiles autour desquelles ils orbitent, rendaient leur détection impossible. Ce n'est que dans les années 1990 que les premières exoplanètes sont détectées, de manière indirecte, puis, depuis 2008, de manière directe. La plupart des exoplanètes découvertes à ce jour orbitent autour d'étoiles situées à moins de 400 années-lumière du Système solaire. Au 23 janvier 2016, 1.935 exoplanètes ont été confirmées dans 1.109 systèmes planétaires dont 1.212 dans 482 systèmes planétaires multiples. Plusieurs milliers d'exoplanètes supplémentaires découvertes au moyen de télescopes terrestres ou d'observatoires spatiaux, dont Kepler, sont en attente de confirmation. En extrapolant à partir des découvertes déjà effectuées, il existerait au moins 100 milliards de planètes rien que dans notre galaxie. La découverte d'exoplanètes va en accélérant, dans la mesure où cette discipline est en plein essor, soutenue par les progrès des très grands télescopes terrestres comme ceux du VLT au Chili et ceux d'Hawaï. Encore plus efficace est le travail confié au **télescope spatial Kepler** (lancé en mars 2009), spécifiquement conçu pour rechercher les exoplanètes. Nous consacrons un chapitre entier à ce télescope et à ses découvertes plus loin dans ce document.

Les méthodes de détection utilisées sont principalement la méthode des vitesses radiales qui déduit la présence d'une planète à travers l'incidence de son attraction gravitationnelle sur la vitesse radiale de son étoile et la méthode du transit qui identifie une planète lorsque celle-ci passe devant son étoile en mesurant l'affaiblissement de l'intensité lumineuse de l'astre. Un biais découlant de ces méthodes a abouti à la détection d'une majorité de planètes aux caractéristiques très différentes de celles présentes dans le Système solaire, en particulier de planètes gazeuses très proches de leur étoile hôte. Ces nouveaux types de planète ont néanmoins entraîné une remise en cause radicale des modèles de formation des systèmes planétaires qui avaient été élaborés en se basant sur le seul Système solaire. Depuis que les méthodes de détection se sont améliorées, les études visent également à mettre en évidence des planètes aux caractéristiques proches de celles de la Terre orbitant dans la zone habitable de leur étoile.

Terminologie

Le terme exoplanète a été enregistré dans *Le Petit Robert* dès 1998 comme équivalent français de l'anglais *exoplanet*. Le premier organisme scientifique à l'avoir employé serait le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) dans un communiqué de presse du 21 avril 2004. Antérieurement, il avait fait son apparition dans des revues de vulgarisation scientifique.

Définition

Communément, on appelle « planète extrasolaire » toute planète orbitant autour d'une autre étoile que le Soleil. Cependant, cette définition, bien que simple et instinctive, n'est pas *stricto sensu* la définition exacte utilisée aujourd'hui dans le milieu astronomique. En fait, tout dépend de ce que l'on considère réellement comme une « planète » hors de notre Système solaire...

En effet, la définition officielle d'une planète adoptée en août 2006 par l'Union astronomique internationale (UAI) ne concerne que les objets du Système solaire et ne s'applique pas aux exoplanètes. À l'heure actuelle, la seule définition de l'UAI qui concerne les exoplanètes est une définition de travail donnée en 2002 et modifiée en 2003. Cette définition, plus générale et qui concerne **toutes** les planètes y compris nos propres planètes du Système solaire, contient les critères suivants :

- Les objets avec une masse vraie en deçà de la masse limite permettant la fusion thermonucléaire du deutérium (actuellement calculée comme valant 13 fois la masse de Jupiter pour des objets de métallicité solaire) qui orbitent autour d'étoiles ou de rémanents stellaires sont des « planètes » (peu importe comment ils se sont formés). La masse/taille minimale requise pour qu'un objet extrasolaire soit considéré comme une planète devrait être la même que celle utilisée dans notre Système solaire.
- Les objets substellaires avec des masses vraies au-delà de la masse limite permettant la fusion thermonucléaire du deutérium sont des « naines brunes », peu importe comment ils se sont formés ou où ils se trouvent.
- Les objets flottant librement dans de jeunes amas stellaires avec des masses en deçà de la masse limite permettant la fusion thermonucléaire du deutérium ne sont pas des « planètes », mais sont des « sous-naines brunes » (ou quelque nom qui soit plus approprié).

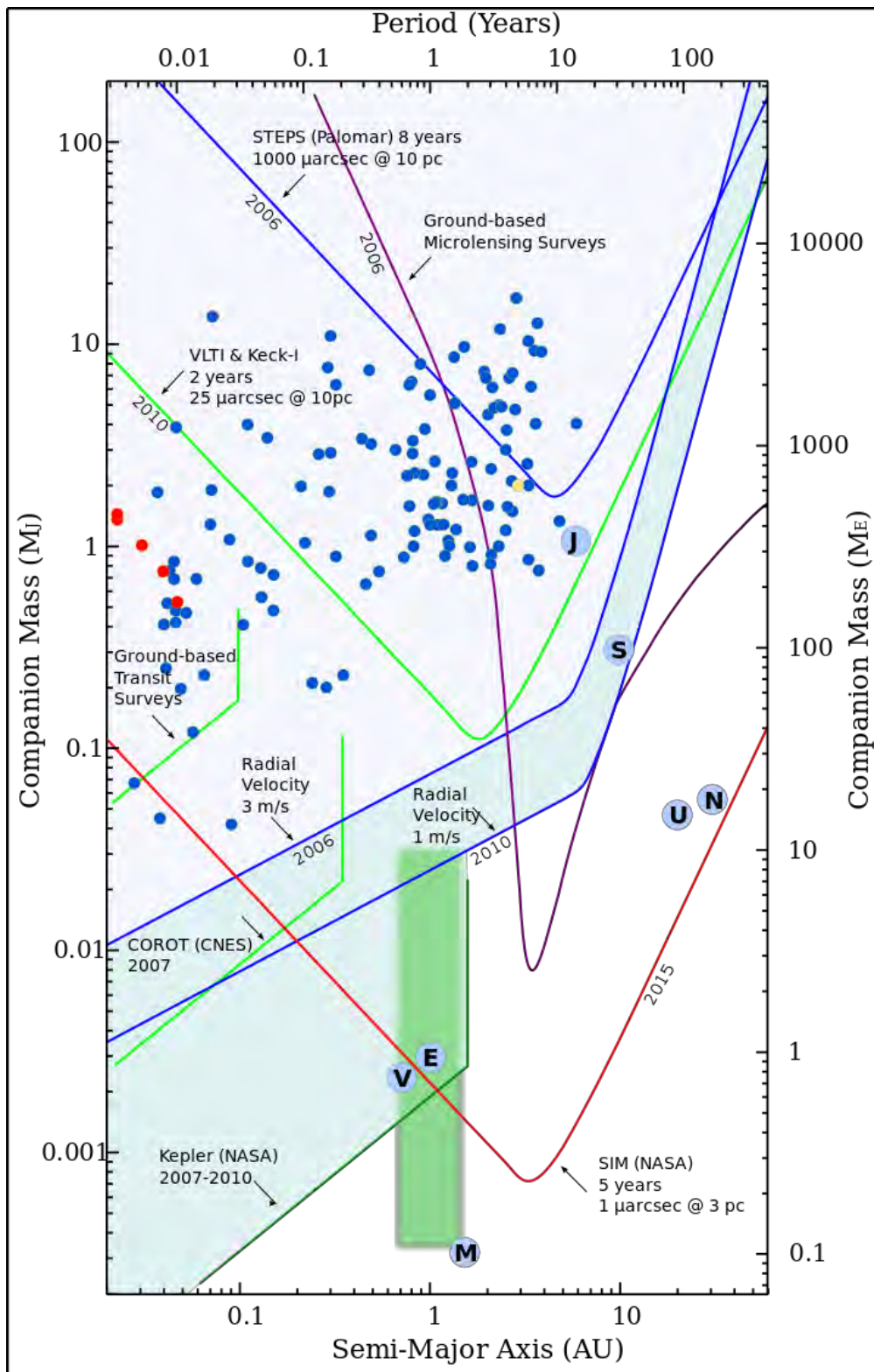
De façon cohérente, les « planètes » du Système solaire au sens de la définition précédente sont les huit objets définis comme « planètes » au sens de la résolution du 24 août 2006. Et de la même façon, une « planète extrasolaire » est alors définissable comme une planète, toujours au sens de la définition générale, située hors du Système solaire. Cet article suit la définition précédente. Par conséquent ne sont traitées que les planètes qui orbitent autour d'étoiles ou de naines brunes. Plusieurs détections d'objets de masse planétaire qui ne sont en orbite autour d'aucun autre corps ont aussi été annoncées. Certains de ces objets ont peut-être appartenu à un système planétaire autour d'une étoile avant d'en être éjectés.

Cependant, la définition de travail de l'UAI n'est pas acceptée par tout le monde. Une définition alternative considère que les planètes devraient être distinguées des naines brunes sur la base de leur formation. Il est largement admis que les planètes géantes se forment par accrétion à partir d'un noyau et que ce procédé peut parfois produire des planètes de masse supérieure au seuil de fusion du deutérium; des planètes massives de cette sorte ont peut-être déjà été observées. Ce point de vue admet également la possibilité des sous-naines brunes, qui ont des masses planétaires mais se forment à la manière des étoiles par effondrement direct d'un nuage de gaz.

De plus, la séparation à 13 masses joviennes n'a aucune signification physique précise. La fusion du deutérium peut se produire dans des objets de masse inférieure à cette limite. La quantité de deutérium fusionné dépend également de la composition de l'objet. *L'Encyclopédie des planètes extrasolaires* inclut les objets jusqu'à 25 fois la masse de Jupiter, considérant que « le fait qu'il n'y ait aucune particularité autour de 13 MJup dans le spectre de masse observé renforce le choix d'oublier cette limite de masse », et l'Exoplanet Data Explorer inclut les objets allant jusqu'à 24 masses joviennes en précisant que « La distinction à 13 masses de Jupiter du Groupe de travail de l'UAI n'est pas physiquement motivée pour des planètes avec un cœur rocheux.

II Les méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes de détection



La recherche de planètes est limitée par la sensibilité. Dans la figure ci-dessus on voit les limites de sensibilité des méthodes de vitesse radiale, des méthodes astrométriques, des méthodes par micro-lentille gravitationnelle, et celles du transit. Les zones colorées montrent les progrès espérés dans la détection de planètes de type « terre » entre 2006 et 2010. Les planètes du Système Solaire sont aussi indiquées, ainsi que la zone ciblée de recherche d'exoplanètes. Les cercles colorés indiquent les planètes trouvées par la vitesse radiale (bleus), le transit (rouge) et les micro-lentilles gravitationnelles (jaune). Les planètes découvertes sur ce diagramme représentent les découvertes jusqu'au 31 août 2004

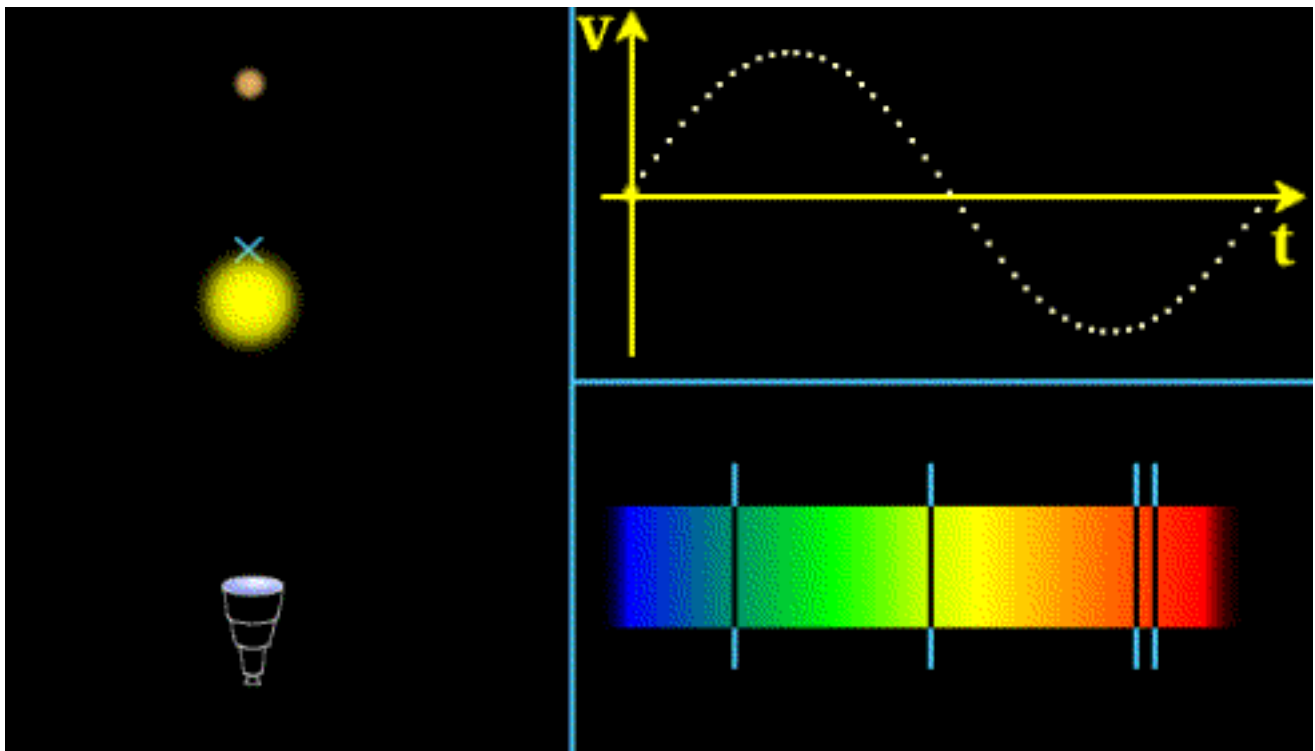
Détecter une exoplanète de manière directe n'est pas une chose facile, et ce pour plusieurs raisons :

- une planète ne produit pas de lumière : elle ne fait que diffuser celle qu'elle reçoit de son étoile, ce qui est bien peu.
- la distance qui nous sépare de l'étoile est de loin bien plus importante que celle qui sépare l'exoplanète et son étoile : le pouvoir séparateur des instruments de détection doit donc être très élevé pour pouvoir les distinguer.

Ainsi, les seules méthodes de détection qui fonctionnaient jusqu'à très récemment sont appelées méthodes « indirectes », car elles ne détectent pas directement les photons venant de la planète. Il existe plusieurs méthodes, présentes et futures pour détecter une exoplanète. La plupart sont détectées depuis les observatoires au sol.

A) Méthode interférométrique

Cette méthode repose sur les interférences destructives de la lumière de l'étoile. En effet, la lumière de l'étoile étant cohérente dans les deux bras de l'interféromètre, il est possible d'annuler l'étoile dans le plan image permettant ainsi de détecter un éventuel compagnon. Cette méthode a permis de détecter et confirmer quelques exoplanètes. Cependant, la stabilité des interféromètres disponibles actuellement ne permet pas d'atteindre des contrastes suffisamment importants pour détecter des planètes de type Terre.



Le déplacement des raies sombres dans le spectre de l'étoile est la signature du mouvement de la planète et de l'étoile autour de leur centre de gravité

B) Par la vitesse radiale

La **méthode des vitesses radiales**, également appelée **spectroscopie Doppler**, **vélocimétrie Doppler** ou encore **spectrovélocimétrie**, est une méthode spectroscopique utilisée pour mesurer la vitesse relative d'objets, le long de l'axe de visée. Elle complète les mesures astrométriques (dans le plan du ciel) en donnant la troisième composante de la vitesse.

Aujourd'hui, cette technique est notamment utilisée dans la recherche d'exoplanètes, où la précision de cette technique est poussée à l'extrême : la précision aujourd'hui atteinte est de l'ordre du mètre par seconde, voir moins, pour des instruments tels que HARPS. Elle implique l'observation de l'effet Doppler-Fizeau dans le spectre de l'étoile autour de laquelle une planète orbite. Il est extrêmement difficile d'observer une planète extra solaire directement. Le rayonnement indirect de la planète est très faible, comparé au rayonnement direct de son étoile, avec les distances interstellaires, nos télescopes sont éblouis par le rayonnement de l'étoile. De plus ces exoplanètes sont souvent trop petites et trop proches de

leur étoile pour pouvoir être observées directement. D'ailleurs, les premières observations directes remontent seulement à 2004 et 2005. En conséquence, la majorité des exoplanètes sont détectées en utilisant des méthodes indirectes, telle la spectroscopie Doppler. Presque toutes les planètes extra solaires connues à ce jour ont été découvertes ou confirmées grâce à cette méthode.

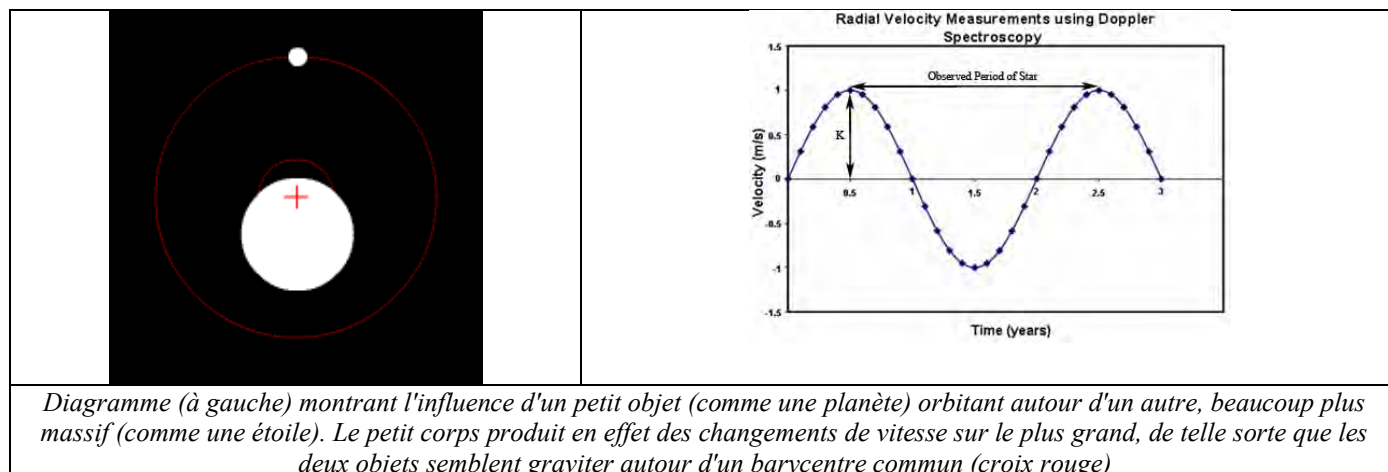
Historique

Isaac Newton étudia la décomposition de la lumière à travers un prisme en 1666-1672. Cette étude a depuis servi dans de nombreux domaines, et notamment en astronomie, où la spectroscopie Doppler est utilisée au moins depuis 1867, lorsque William Huggins et sa femme Margaret utilisèrent cette technique pour mesurer les mouvements de plusieurs objets par rapport à la Terre. Bien que les premières observations ne donnèrent pas de résultats étant donnée la précision limitée des instruments (Huggins l'estime à 16 km/s si l'objet s'éloigne, 32-40 km/s si l'objet s'approche), cette technique finit par porter ses fruits et permit la découverte de nombreux compagnons stellaires puis, bien plus tard, substellaires. En 1952, Otto Struve propose d'utiliser de puissants spectromètres pour détecter des planètes lointaines. Il décrit comment une planète géante, telle que Jupiter, pourrait provoquer de légères oscillations auprès de son étoile, comme deux objets célestes gravitant autour d'un barycentre commun¹. Il prédit que la lumière émise par l'étoile subirait de petits changements dus à l'effet Doppler, eux-mêmes causés par des variations périodiques de la vitesse radiale de l'étoile. Ces variations seraient détectables par un spectromètre très sensible, et se traduiraient comme une alternance de redshifts et de blueshifts très légers sur la lumière de l'étoile. Cependant, les instruments de l'époque ne peuvent mesurer la vitesse radiale d'un objet qu'avec une marge d'erreur de 1000 m/s ou plus, ce qui les rendaient inutiles dans la détection de nouvelles planètes². Les changements de vitesse radiale attendus sont en effet très petits (Jupiter cause au Soleil un changement de 13 m/s sur une période de 12 ans, et la Terre un changement de 0,09 m/s sur une période de 1 an) ce qui implique des observations à long terme avec des instruments de très haute résolution.

Les progrès des technologies de spectrométrie et d'observation effectués durant les années 80 et 90 ont abouti à des instruments capables de telles recherches. La première exoplanète découverte, orbitant autour d'une étoile semblable au Soleil, 51 Pegasi b, fut détectée en octobre 1995 en utilisant la spectroscopie Doppler³. Depuis, plus de 200 planètes extrasolaires ont été identifiées, et la plupart grâce des programmes de recherches basés au Keck, au Lick et à d'autres observatoires Anglo-Australiens, ainsi que des équipes basées au *Geneva Extrasolar Planet Search*, en utilisant la méthode des vitesses radiales.

Méthode

Une série d'observations sont effectuées sur le spectre de la lumière émise par l'étoile. Des variations dans ce spectre peuvent être détectées, lorsque la longueur d'onde de certaines raies d'absorption spectrales augmente et diminue de façon régulière sur un intervalle de temps donné. Ces variations peuvent être révélatrices de changements dans la vitesse radiale, celle-ci pouvant être altérée par la présence d'une planète en orbite autour de l'étoile, causant l'effet Doppler-Fizeau sur la lumière émise par l'étoile. Si une planète extrasolaire est détectée, sa masse peut être déterminée à partir des changements de vitesse radiale de son étoile. Un graphique de la vitesse radiale, mesurée par rapport au temps donnera une courbe caractéristique (courbe sinusoïdale dans le cas d'une orbite circulaire), et l'amplitude de la courbe permettra de calculer la masse de la planète.



Le graphique à droite illustre la courbe sinusoïdale créée en utilisant la spectroscopie Doppler pour observer une étoile imaginaire autour de laquelle graviterait une planète sur une orbite circulaire. Des observations sur une étoile réelle engendreraient un graphe similaire, bien que l'excentricité orbitale déformerait la courbe et compliquerait les calculs ci-dessous, et que le bruit de mesure rendrait la courbe moins "lisse". La vitesse de l'étoile théorique montre une variation périodique de 1 mètre par seconde de demi-amplitude, suggérant une masse qui est en orbite autour d'elle. En utilisant la troisième loi de Kepler, la période observée de l'orbite de la planète autour de l'étoile (correspondant à la période à laquelle le spectre de l'étoile se modifie) peut être utilisée afin de déterminer la distance séparant la planète de l'étoile. Ceci peut se faire grâce à l'équation suivante :, où

$$r^3 = \frac{GM_*}{4\pi^2} P^2$$

- **r** est la distance séparant la planète de l'étoile,
- **G** est la constante gravitationnelle,
- **M*** est la masse de l'étoile,
- **P** est la période citée plus haute.

Ayant à présent déterminé **r**, la vitesse de la planète autour de l'étoile peut être calculée en utilisant la loi de Newton sur la gravitation : $V_{Pl} = \sqrt{GM_*/r}$ où V_{Pl} est la vitesse de la planète.

$$M_{Pl} = \frac{M_* V_*}{V_{Pl}}$$

La masse de la planète peut alors être calculée à partir de sa vitesse :

où V_* est la vitesse observée de l'étoile principale. La vitesse Doppler observée, $K = V_* \sin(i)$, où i est l'inclinaison de l'orbite de la planète par rapport au plan du ciel. Ainsi, en supposant qu'on ait une valeur pour l'inclinaison de la planète et pour la masse de l'étoile, les changements dans la vitesse radiale de l'étoile peuvent être utilisés pour calculer la masse d'une exoplanète.

Évolution de la précision

Date	Précision	Instrument (télescope)	Commentaire
1867	16-40		
1938	0.5 km/s		Meilleure précision atteinte
1953	~750 m/s		
1977	300 m/s	CORAVEL (Suisse de 1 m à l'OHP)	Pour une étoile G, mV=7, 3 min de pose. 500 m/s pour B=13.
1981	200 m/s	CORAVEL (Danois de 1,54 m à La Silla)	Pour une étoile G, mV=7, 3 min de pose. Précision de 100 m/s pour mV=7 et 10 min de pose.
1993	7 m/s	ÉLODIE (1,93 m de l'OHP)	
1998	7 → 2	CORALIE (Euler 1,2 m)	
2003	1 m/s	HARPS (3,6 m de l'ESO)	
2006	7 m/s	SOPHIE (1,93 m de l'OHP)	
?	2 m/s	SOPHIE+ (1,93 m de l'OHP)	
(2016-	0,1 m/s	ESPRESSO (VLT)	
(20??)	0,02 m/s	HIRES (E-ELT)	

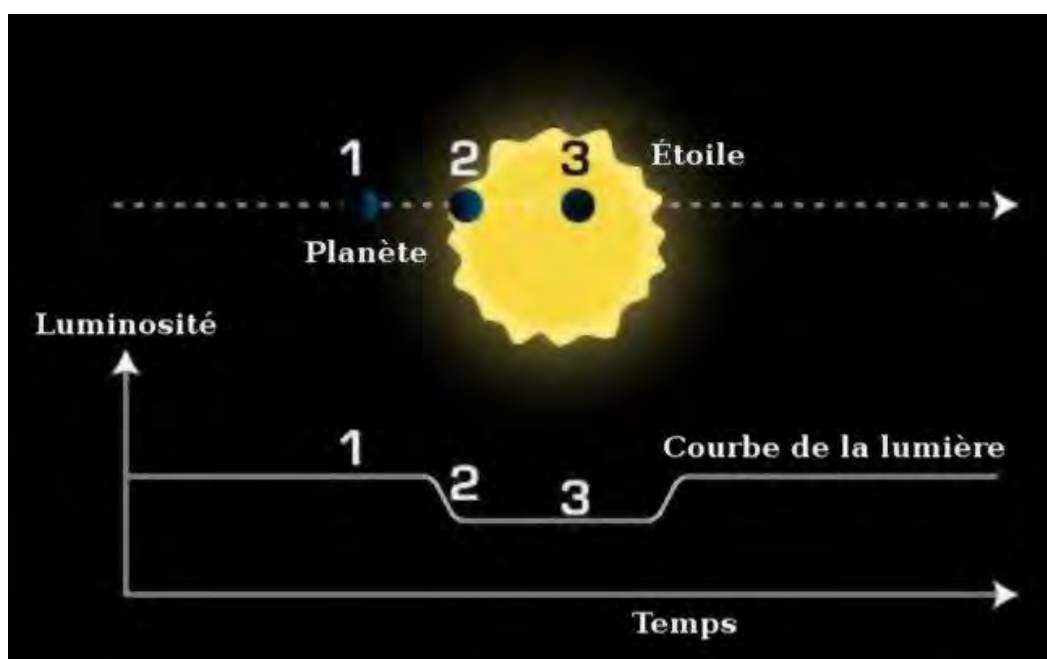
Problèmes

Le problème majeur inhérent à la méthode est qu'il mesure uniquement le mouvement de l'étoile sur la ligne de visée, et dépend donc de l'inclinaison de l'orbite de la planète ; dans le cas où celle-ci est inconnue, il n'est pas possible de déterminer exactement la masse de la planète par cette méthode. Si le plan orbital de la planète est bel et bien aligné avec la ligne de mire de l'observateur, les variations de la vitesse radiale mesurées correspondent alors à la vraie valeur. Dans le cas contraire, lorsque le plan orbital et la ligne de mire ne sont pas alignés, l'effet que la planète a sur l'étoile sera en réalité plus grand

que ce qui a été mesuré à travers les changements de vitesse radiale de l'étoile. Par conséquent, la vraie masse de la planète sera plus grande que prévue. Afin de corriger cet inconvénient, et déterminer par la même occasion la vraie masse de l'exoplanète, les mesures de vitesse radiale doivent être combinées avec des mesures astrométriques. Celles-ci suivront le mouvement propre de l'étoile dans le plan du ciel, qui est perpendiculaire à la ligne de visée. Ces mesures astrométriques permettent aux chercheurs de vérifier si des objets qui semblent être des planètes de masse élevée ne sont pas plutôt des naines brunes. Un autre problème est que l'enveloppe de gaz peut se dilater et se contracter (de manière périodique dans certains cas), et certaines étoiles sont variables. La spectroscopie Doppler ne convient pas pour trouver des planètes autour de ce type d'étoile, parce que de tels changements dans le spectre de l'étoile peuvent masquer le petit effet causé par la planète. Cette méthode est la meilleure pour détecter des objets très massifs orbitant près de leur étoile, appelés Jupiters chauds, qui ont un fort effet gravitationnel sur l'étoile et causent donc de grands changements dans sa vitesse radiale. L'observation de nombreuses raies spectrales et de nombreuses périodes orbitale permet d'augmenter le rapport signal sur bruit des observations, ce qui amplifie les changements causés par une planète plus petite ou plus lointaine; mais la détection de planètes telluriques similaires à la Terre reste impossible avec les instruments actuels.

C) Par le transit

1 - Transit primaire (méthode indirecte)



Le transit de la planète devant son étoile fait varier la luminosité de cette dernière

Cette méthode de détection indirecte est basée sur l'étude de la luminosité de l'étoile. En effet, si celle-ci varie périodiquement cela peut provenir du fait qu'une planète passe devant. Elle a été proposée pour la première fois en 1951 par Otto Struve de l'observatoire Yerkes de l'université de Chicago. Elle a été proposée à nouveau à deux reprises : en 1971 par Frank Rosenblatt de l'université Cornell, puis en 1980 par William Borucki du centre de recherche Ames de la NASA, en Californie. Bien que la variation de luminosité d'une étoile soit plus facilement repérable que la variation de sa vitesse radiale, cette méthode se révèle peu efficace en termes de quantité de planètes détectées par rapport à la somme des étoiles observées. En effet, on ne peut l'utiliser que dans le cas où nous observons le système stellaire quasiment par la tranche. On peut montrer que pour des orientations aléatoires de l'orbite, la probabilité géométrique de détection par cette méthode est inversement proportionnelle à la distance entre l'étoile et la planète. On estime à 5 % des étoiles avec une exoplanète la quantité détectable avec cette méthode. Cependant, elle a l'avantage de ne nécessiter l'usage que de télescopes de dimensions raisonnables. Dans notre propre Système solaire, on peut aussi observer des transits de planètes : les transits de Vénus et de Mercure ne peuvent cependant être observés tout au plus que quelques fois par siècle. C'est par cette méthode que la plupart des planètes extrasolaires ont été détectées.

2 - Transit secondaire (méthode semi-directe)

Le principe repose sur le transit secondaire, c'est-à-dire quand la planète passe *derrière* l'étoile. Dans ce cas on peut détecter les photons provenant de l'hémisphère éclairé de la planète, ce qui fait de cette méthode une méthode en semi-directe. En résumé, on étudie le signal lumineux provenant d'une planète éclipsée par son étoile et l'on retire ensuite le signal lumineux émis par l'étoile (que l'on a mesuré auparavant), on obtient alors la signature de la planète. La première détection du transit secondaire a été faite avec le télescope spatial Hubble en 2003 sur l'étoile HD 209458. Récemment, des équipes d'astronomes ont réussi à détecter deux exoplanètes de manière directe, par l'utilisation du satellite Spitzer. Celles-ci, qui étaient déjà connues, ont été repérées grâce à la lumière infrarouge qu'elles émettaient.

Cela ouvre de nouvelles opportunités dans le domaine de l'observation. En effet, les chercheurs vont désormais pouvoir essayer de comparer certaines caractéristiques essentielles des exoplanètes repérées jusque-là, telles que la couleur, la réflectivité et la température. Ceci permettra de mieux comprendre la manière dont celles-ci viennent à se former.

D) Par astrométrie

Elle repose sur la détection des perturbations angulaires de la trajectoire d'une étoile. Plus la masse de la planète, et la distance qui sépare l'étoile de la planète sont grandes, plus le système est proche de nous et donc visible. Cette méthode, bien qu'elle soit connue depuis longtemps, n'avait pas encore été utilisée en raison des infimes variations qu'elle devait repérer. Mais ce sera bientôt chose possible avec notamment la mise en place du mode double champ du Very Large Telescope Interferometer (VLTi) appelé PRIMA. Le but de l'astrométrie est de mesurer les positions, les parallaxes, et les mouvements propres des corps célestes. Projeté sur le ciel, le mouvement d'une étoile apparaît comme une ellipse d'angle α (en arcsec)

$$\alpha = \frac{M_p}{M} \times \frac{a}{d}$$

par rapport au demi grand axe a : avec a en UA et d la distance à la Terre en pc.

Pour un système Soleil-Jupiter situé à 10 pc, $\alpha \sim 0,5$ milliarcsec, et pour un système Soleil-Terre à la même distance, $\alpha \sim 0,3$ microarcsec. Dans un futur proche avec le développement de l'optique adaptative et de l'interférométrie visuelle, les mesures au sol pourront atteindre un niveau de précision de l'ordre de 20 microarcsec ce qui correspond à une planète de 66 Mt gravitant à 1 UA de son étoile située à 10 pc. Cette méthode présente l'avantage suivant : si M et d sont connus, ainsi que a (méthode des vitesses radiales), on peut en tirer M_p sans avoir besoin de connaître i .

Elle est aussi accompagnée d'inconvénients :

- la précision des mesures doit être meilleure que 1 milliarcsec, ce qui limite les observations aux étoiles plus proches que 10 pc.
- la turbulence atmosphérique limite les mesures depuis le sol.
- elle est sensible aux variations du centre photométrique (centre de la tâche la plus lumineuse) dues à l'activité de l'étoile.

A ce jour, aucune détection n'a été confirmée.

E) Par l'effet de microlentille gravitationnelle



Microlentille gravitationnelle d'une planète extrasolaire

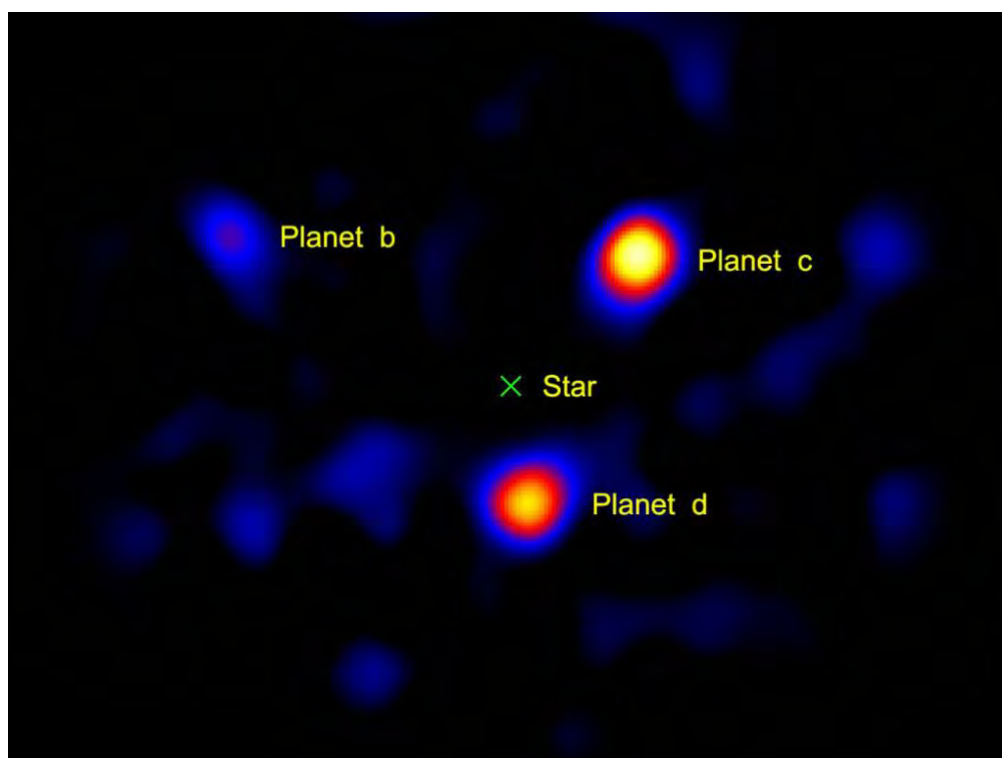
L'effet de microlentille gravitationnelle se produit lorsque le champ gravitationnel d'une étoile déforme l'espace-temps, ce qui dévie la lumière issue d'une étoile distante située derrière, à la manière d'une lentille. Cet effet n'est visible que si les deux étoiles sont pratiquement alignées. De tels événements sont donc rares, d'une durée de quelques jours à quelques semaines, à cause du mouvement relatif entre les étoiles et la Terre. On a, au cours de ces 10 dernières années, observé plus d'un millier de cas. Si l'étoile qui agit comme une lentille possède une planète, le champ de cette dernière peut avoir un effet qui, bien que faible, soit détectable. Puisque cela nécessite un alignement relativement exceptionnel, on doit suivre en permanence les étoiles lointaines afin d'avoir un nombre d'observations suffisant. Cette méthode, qui détecte ces « microlentilles gravitationnelles », fonctionne bien mieux pour les planètes proches de la Terre et du centre de la Galaxie, où de nombreuses étoiles forment l'arrière-plan.

En 1991, l'astronome polonais Bohdan Paczyński de l'université de Princeton proposa cette méthode. Les premières découvertes arrivèrent en 2002, quand un groupe d'astronomes polonais (Andrzej Udalski, Marcin Kubiak et Michał Szymański de Varsovie, et Bohdan Paczyński) au cours du projet OGLE (*Optical Gravitational Lensing Experiment*), ont réussi à la mettre en œuvre. Durant un mois, ils ont trouvé plusieurs planètes candidates, mais la qualité des observations faisant défaut, elles ne furent pas confirmées. Depuis, on a détecté 4 planètes extrasolaires avec cette méthode. En 2006 c'est encore la seule méthode permettant de détecter des planètes similaires à la Terre.

En février 2008 cette méthode avait permis de détecter six exoplanètes : OGLE-2005-BLG-071L³, OGLE-2005-BLG-390L b première planète légère sur orbite large, OGLE-2005-BLG-169L et deux exoplanètes autour de l'étoile OGLE-2006-BLG-109.

Un inconvénient est qu'il est impossible de reproduire une observation : les alignements sont uniques. D'ailleurs, les planètes découvertes peuvent se situer à plusieurs kiloparsecs, rendant impossible leur observation par d'autres méthodes. Les observations sont généralement effectuées avec des réseaux de télescopes robotisés. En plus du projet OGLE, le groupe MOA (*Microlensing Observations in Astrophysics*) tente d'améliorer cette approche. Le projet PLANET/RoboNet (*Probing Lensing Anomalies NETwork*) est encore plus ambitieux. Il propose une surveillance permanente et à tout endroit du globe, capable de saisir n'importe quel alignement et de détecter des planètes de la masse de la Terre. Cette technique permet d'observer des astres de masse même relativement faible, puisque les observations ne s'appuient pas sur la radiation reçue.

F) Par imagerie directe



Système planétaire HR 8799 observé le 14 avril 2010 à l'observatoire du Mont Palomar en Californie

L'utilisation combinée de systèmes de correction en temps réel (optique adaptative) et de la coronagraphie permet maintenant d'observer directement la lumière parvenant de la planète. La coronagraphie est une technique utilisée pour atténuer la lumière d'une étoile, ce qui permet ensuite d'observer des objets moins brillants gravitant autour. Utilisée en complément d'une optique adaptative, elle permet de découvrir des planètes qui orbitent autour d'étoiles pourtant des millions de fois plus lumineuses.

D'énormes efforts sont consacrés actuellement à l'amélioration de ces techniques d'optique adaptative, de coronagraphie stellaire, et de traitement d'image, afin de développer une imagerie astronomique à très haut contraste capable de détecter des exoplanètes de la taille de la Terre. En outre, cette technique permet d'analyser des photons parvenant directement de la planète, ce qui pourra donner des informations importantes sur les conditions atmosphériques et surfaciques de ces planètes.

La première photographie optique d'une exoplanète (2M1207 b) a lieu en 2004 à l'aide du VLT. Cependant, elle orbite autour d'une étoile peu brillante (une naine brune), 2M1207 et est détectée non pas par coronagraphie, mais par imagerie infrarouge. La première découverte par coronagraphie est publiée le 13 novembre 2008 dans la revue *Science*. Prise par le télescope spatial Hubble et traitée par l'équipe de l'astronome Paul Kalas, la planète a une masse probablement proche de celle de Jupiter. Baptisée Fomalhaut b, elle est en orbite autour de l'étoile Fomalhaut dans la constellation du Poisson austral (Piscis Austrinus) à environ 25 années-lumière. Fomalhaut b est distante d'environ dix fois la distance séparant Saturne du Soleil. Cette découverte est annoncée en même temps et dans la même revue que celle de l'équipe de l'astronome canadien Christian Marois concernant la première observation directe, à 129 années lumière, d'un système stellaire entier composé de trois planètes géantes photographiées dans l'infrarouge autour de l'étoile HR 8799.

Techniques d'imagerie haut contraste

1) Optique adaptative « extrême »

L'optique adaptative consiste à utiliser un senseur de front d'onde et une optique déformable (en général un miroir déformé par des actuateurs) afin de corriger en temps réel la turbulence atmosphérique, qui limite la résolution de tous les télescopes terrestres de plus de quelques dizaines de centimètres de diamètre. Elle est implémentée sur tous les grands télescopes tels que le VLT, le Keck, etc., et arrive actuellement à atteindre la moitié de la limite de résolution physique imposée par la diffraction, dans l'infrarouge (bande H). Or imager une planète, très peu lumineuse et très proche de son étoile, implique que l'on puisse les résoudre au maximum, et surtout qu'aucune lumière de l'étoile ne fuie au-delà de la limite de diffraction. Les miroirs déformables utilisés aujourd'hui ne permettent pas une telle performance : ils ne se déforment ni assez rapidement (boucle de correction, tournant à quelques centaines de Hertz, trop lente), ni assez finement (pas assez d'actuateurs). On en vient aujourd'hui à mettre en place des systèmes beaucoup plus performants, comprenant jusqu'à trois miroirs déformables à 1 064 actuators, et des senseurs de front d'onde bien plus rapides et précis que les analyseurs de Shack-Hartmann le plus souvent utilisés. Les derniers systèmes d'optique adaptative sortis des laboratoires des grands observatoires font état d'une qualité optique atteignant 80 % de la limite imposée par la diffraction dans les mêmes conditions. Bien entendu, une autre solution existe pour ne pas être soumis à la turbulence atmosphérique : envoyer un télescope dans l'espace. Une optique active (miroir déformable à mouvement lent) est toujours nécessaire pour corriger les légers défauts des optiques du télescope, mais on atteint sans aucun problème la limite de diffraction. Voilà pourquoi les scientifiques attendent beaucoup du nouveau télescope spatial James Webb de la NASA, successeur de Hubble (6 fois plus gros), qui embarquera plusieurs instruments à haut contraste comprenant des coronographes stellaires.

2) Coronographes stellaires

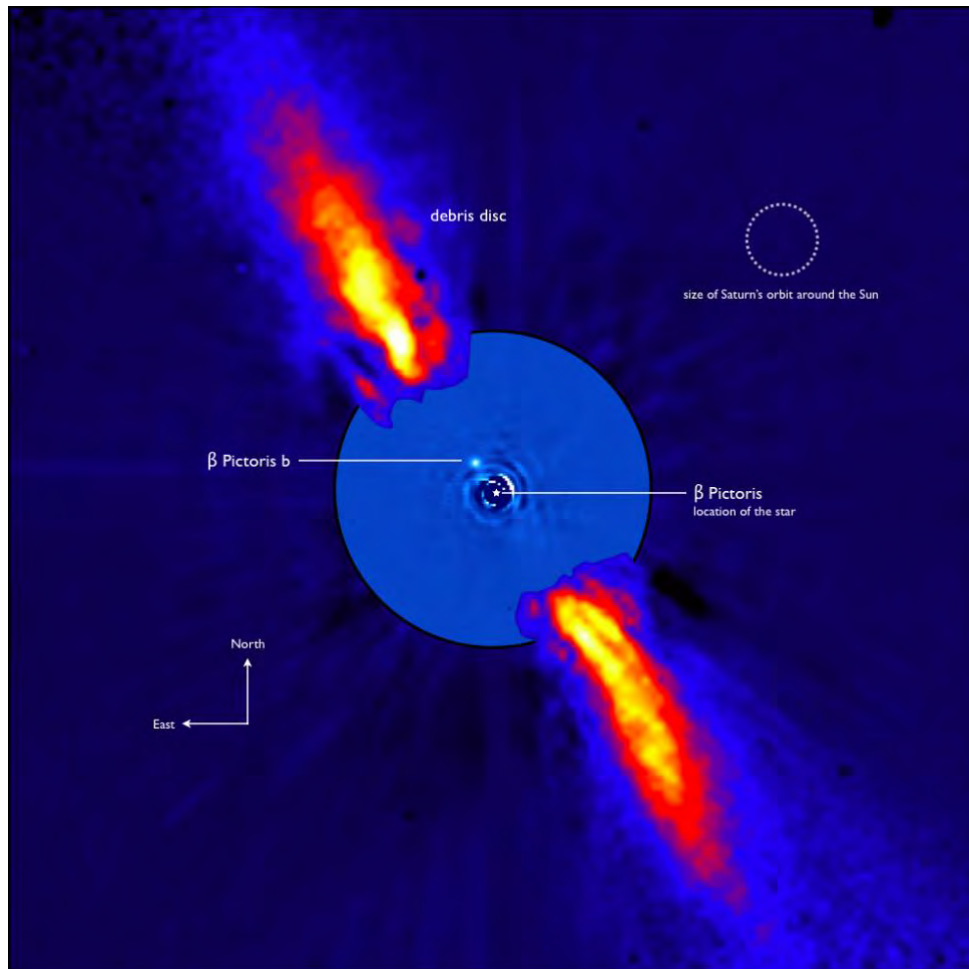
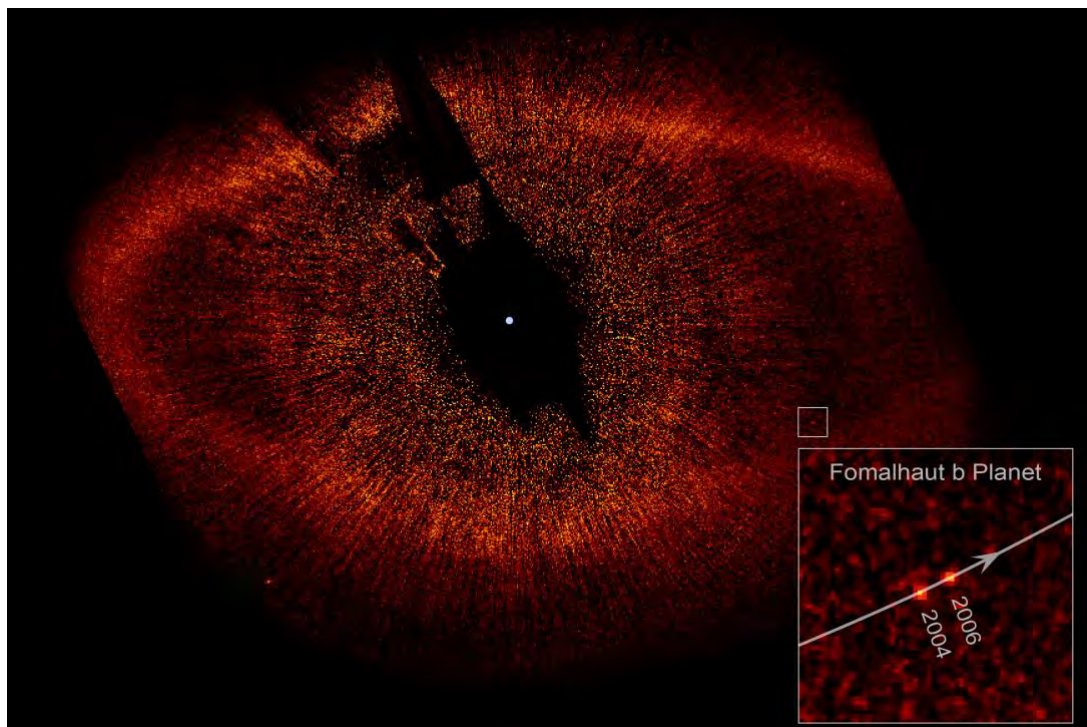
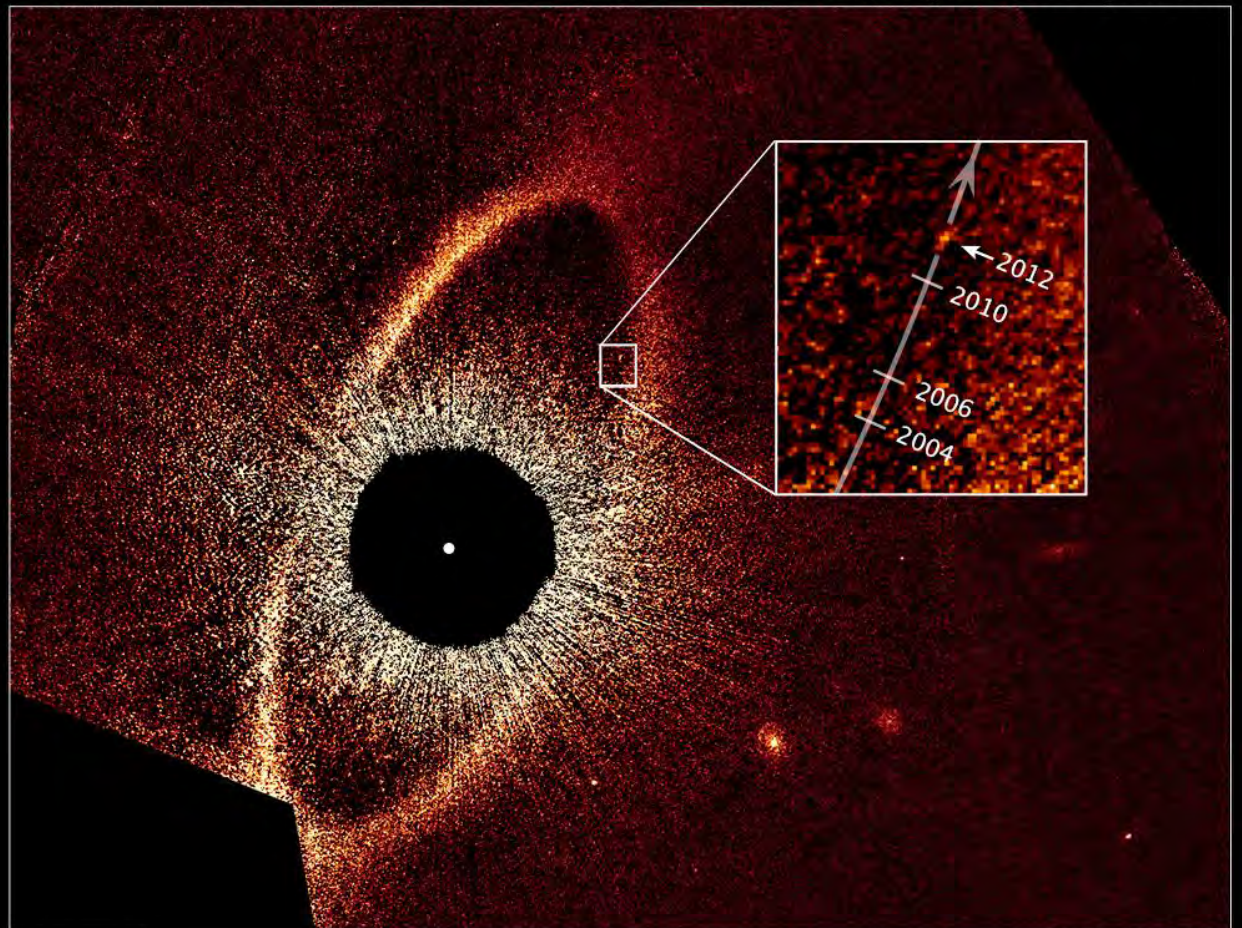


Image coronagraphique du système Beta Pictoris



Disque de poussières autour de Fomalhaut A, et situation de la planète Fomalhaut b, image du coronographe de l'Hubble Space Telescope. Fomalhaut b est une planète confirmée en orbite autour de l'étoile Fomalhaut A. Elle est la première exoplanète à avoir été détectée au moyen d'une photographie optique. La photographie, prise par le télescope spatial Hubble est publiée le 13 novembre 2008.



NASA and ESA

STScI-PRC13-01a

Pour détecter une planète un milliard de fois moins lumineuse que son étoile, même si la caméra utilisée est extrêmement sensible, il faut absolument éclipser l'étoile si on veut avoir une chance de distinguer la planète du bruit ambiant (bruit de photons, bruit de détection, résidu de l'optique adaptative). Il faut donc cacher ou « éteindre » la lumière fuyant autour de l'étoile, et seulement celle de l'étoile, le plus près possible de celle-ci. Reproduire une éclipse, donc, en utilisant des coronographes, inventés par Bernard Lyot au milieu du XX^e siècle pour observer la couronne solaire. Il s'agit d'un véritable défi, puisque la diffraction empêche le masquage d'une source avec un aussi petit cache (qui ne cache que l'étoile et pas la planète) : la lumière « fuit », même avec un système optique parfait. De nombreux coronographes ont été développés pour contourner ce problème : ils utilisent des caches un peu modifiés (dérivés du principe de Lyot), essaient d'éliminer la diffraction en adoucissant les bords du faisceau lumineux avant le cache, ou jouent sur des interférences de la lumière de l'étoile sur elle-même. Par exemple, à la fin des années 2000, l'exoplanète Fomalhaut b a été découverte par un tel instrument. Une autre technique a aussi été envisagée, consistant à placer dans l'espace un vaisseau occulteur à grande distance du télescope. Voici la plupart des principes développés jusqu'à aujourd'hui, ainsi que leurs performances et faiblesses :

a) Coronographes de Lyot modifiés

- Cor. Lyot apodisé : amélioration facile du Lyot, mais contraste moyen.

b) Coronographes à apodisation

- Cor. à pupille reformée : meilleur contraste démontré actuellement (qqs milliards), mais transmission moyenne. (JPL, USA)
- PIAA (apodisation par miroirs) : très bon contraste potentiellement, visibilité très près de l'étoile, mais sensibilité aux aberrations, et faible bande passante (en longueurs d'onde). (Subaru/JPL, USA)

c) Coronographes interférentiels

- Cor. à annulation ou *nulling* : assez bon contraste, mais peu de visibilité près de l'étoile. (nombreux systèmes développés à travers le monde)

- 4QPM (Masque de phase à 4 cadrans) : très bon contraste potentiel, mais faible bande passante, et grande sensibilité à la largeur et au centrage de l'étoile. Possibilité d'amélioration en utilisant plusieurs 4QPM à la chaîne. (Obs. Meudon, France)
- OVC (Cor. à vortex optique) : équivalent au précédent en qualité, moins de sensibilité à la taille de l'étoile.

d) Occulteur extérieur

- Occultation quasi-parfaite mais grandes difficultés de réalisation.

Par ailleurs, on associe parfois une optique active au coronographe, afin de corriger les petits défauts inhérents à ses optiques.

3) Imagerie spéciale ou traitement d'image

Les coronographes laissent pour la plupart toujours passer les rayons lumineux aberrants (défauts des optiques, erreurs de correction de la turbulence), et la lumière résiduelle de l'étoile, visible sous forme de grains de speckle (« tavelures » en français), est encore souvent 1 000 fois plus lumineuse que la planète à observer.

Les speckles provenant des aberrations de l'atmosphère ou du télescope lui-même, peuvent être moyennés ou corrigés par l'optique adaptative, mais il reste souvent des speckles statiques dus aux aberrations des optiques du coronographe. C'est la suppression de ces derniers speckles statiques que visent les techniques qui suivent, en particulier.

a) Imagerie différentielle simultanée

- En polarisation : on image l'étoile et ses environs pour deux directions de polarisation de la lumière. La lumière de l'étoile n'est pas polarisée, mais celle d'une planète / d'un disque de poussière peut l'être. En faisant la différence des deux images, on ne voit plus que les objets renvoyant une lumière polarisée.
- En longueurs d'onde : une planète peut avoir des bandes d'absorption, alors que le spectre de l'étoile est, en comparaison, très continu. En imageant à deux longueurs d'onde différentes, on peut, de même, révéler une planète.

b) Imagerie différentielle en rotation

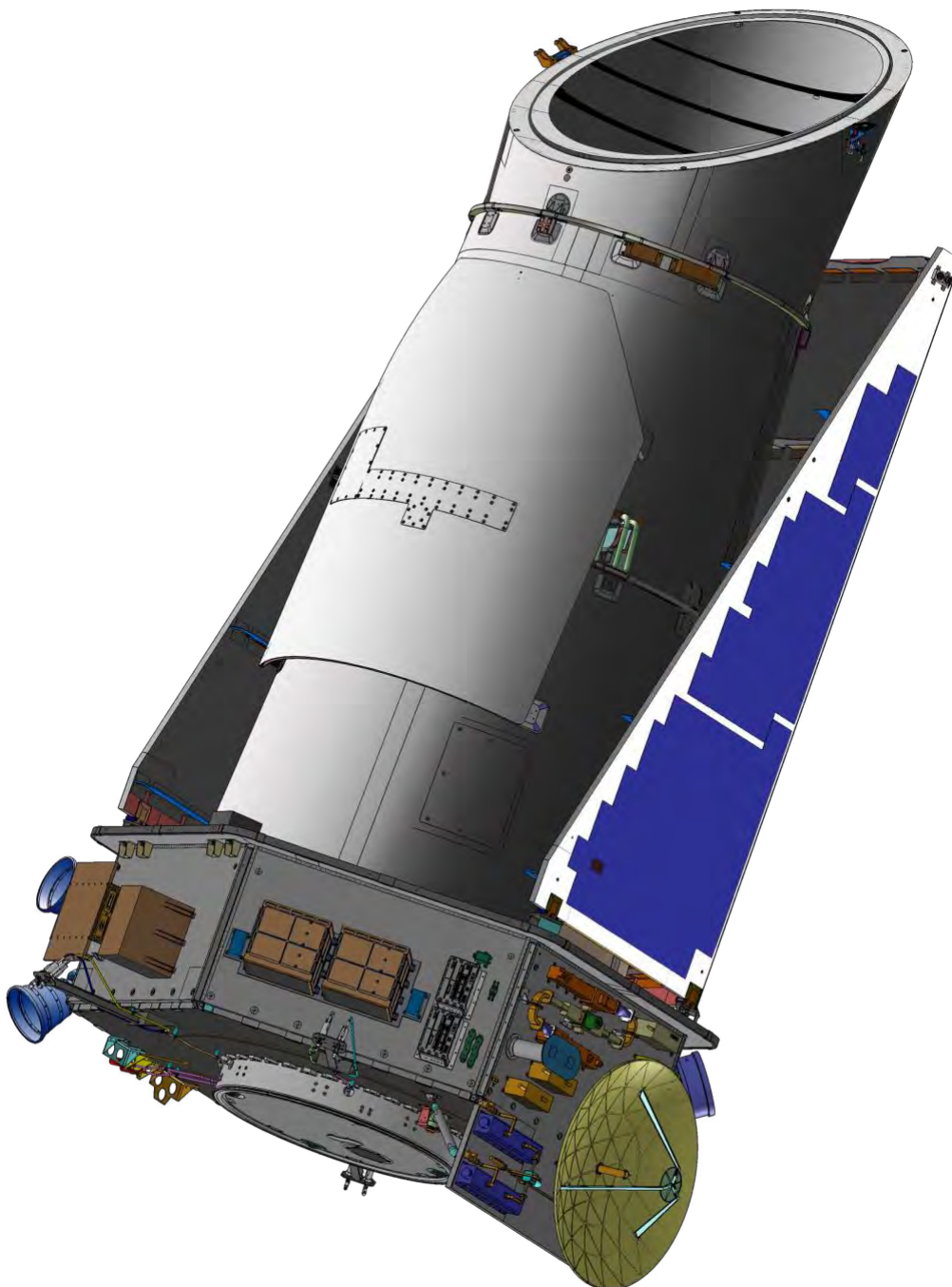
- Les speckles proviennent du système optique, et sont fixes par rapport à la caméra. Mais on peut faire tourner le télescope sur son axe, en gardant l'étoile au centre. Les planètes autour d'une étoile tournent, dans ce cas, alors que les speckles ne tournent pas. Des différences d'images permettent ici aussi de les révéler.

c) Self-coherent camera (Obs. Meudon, France)

- La Self-coherent camera est un instrument qui module spatialement les grains de speckles en les frangeant par un système d'interférences de type Fizeau à deux ouvertures. Pour ce faire, la Self-coherent camera extrait une partie de la lumière stellaire et la fait interférer avec les grains de speckles. Comme la lumière de l'étoile et celle de la planète ne sont pas cohérentes, elles n'interfèrent pas et l'image enregistrée contient les grains de speckles frangés (ou modulés spatialement) et l'image de la planète qui n'est pas modulée. En traitant l'image dans le domaine de Fourier (fréquences spatiales), il est possible d'extraire le terme non modulé, c'est-à-dire l'image de la planète. Il est également possible d'utiliser la modulation spatiale des grains de speckles pour contrôler un système de correction actif qui minimise l'énergie de ces grains de speckles dans l'image finale, et ainsi augmente le contraste dans les images. De cette manière, des planètes de très faible intensité par rapport à leur étoile hôte peuvent être détectées. La Self-coherent camera est actuellement encore en développement et est envisagée pour plusieurs instruments pour des télescopes terrestres et spatiaux.

III Le télescope spatial Kepler

Kepler est un télescope spatial développé par l'agence spatiale américaine, la NASA, pour détecter des exoplanètes et lancé en 2009. Le satellite, qui pèse un peu plus d'une tonne, utilise la méthode des transits en observant les étoiles à l'aide de son télescope de 0,98 mètre de diamètre qui travaille dans les longueurs d'ondes visibles (comme Hubble). Celui-ci est équipé d'un détecteur de 95 millions de pixels qui lui permet de mesurer la luminosité d'une étoile avec une précision photométrique de 20 ppm pour une étoile de magnitude apparente de 12. *Kepler* a pour objectif de détecter des planètes de type terrestre en observant en permanence la luminosité de 145.000 étoiles situées dans une région fixe de la Voie lactée de 115 degrés carrés. En juillet 2013, Kepler avait détecté 134 planètes confirmées par d'autres observations gravitant autour de 76 étoiles ainsi que plusieurs milliers non confirmées. Kepler est la dixième mission du programme Discovery de la NASA consacrée aux missions scientifiques de faible coût.



Le télescope spatial Kepler

Caractéristiques de Kepler

Organisation	NASA
Domaine	Détection d'exoplanètes par photométrie
Masse	1 039 kg
Lancement	7 mars 2009 3:49:57 UTC
Fin de mission	Initialement 2012, étendue jusqu'en 2016
Orbite	Héliocentrique
Localisation	Sur l'orbite de la Terre, en retard par rapport à celle-ci
Période orbitale	372,5 jours
Type	Télescope de Schmidt
Diamètre	0,95 m
Champ	105 deg ²

Kepler est un télescope spatial développé par la NASA dont l'objectif est de découvrir des planètes telluriques et autres petits corps qui orbitent autour d'autres étoiles de notre galaxie, la Voie lactée. Le véhicule spatial, nommé en l'honneur de l'astronome allemand du XVII^e siècle Johannes Kepler, a été lancé le 7 mars 2009 et placé en orbite héliocentrique. Depuis fin mai 2013, à la suite d'une panne de deux de ses volants d'inertie, il a été mis dans un mode de fonctionnement dégradé. Ce mode ne permet pas l'obtention de nouvelles données scientifiques, mais il le conserve dans une position dans laquelle les contacts depuis le sol sont possibles. L'observatoire Kepler est « spécifiquement conçu pour inspecter **une section de notre région de la Voie lactée** (essentiellement dans les constellations du Cygne et de la Lyre) afin de découvrir des douzaines de planètes de la taille de la Terre à l'intérieur ou proches de la zone habitable et déterminer combien parmi les milliards d'étoiles dans notre galaxie ont de telles planètes ». Un photomètre surveille continuellement la brillance de plus de 145 000 étoiles de la séquence principale dans un champ d'observation fixe. Cette donnée est transmise à la Terre puis analysée pour détecter des obscurcissements périodiques causés par des planètes extrasolaires qui passent devant leur étoile. En janvier 2013 on dénombre un total de 2 740 planètes candidates. Des astronomes du Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics ont également utilisé les données de la mission Kepler pour estimer qu'« au moins 17 milliards » de planètes telluriques se trouvent dans la Voie lactée.

Kepler fait partie du programme Discovery de la NASA qui se focalise sur des missions de science fondamentale à budget relativement réduit. La construction et la mise en service du télescope ont été gérées par le Jet Propulsion Laboratory de la NASA, la société Ball Aerospace, basée à Boulder (Colorado), étant responsable du système de vol de Kepler. Le Ames Research Center est chargé du développement des systèmes au sol, de la gestion de la mission depuis décembre 2009 et de l'analyse des données scientifiques. La mission avait une durée de vie initialement prévue de 3 ans et demi, mais en 2012 elle a été étendue jusqu'en 2016, en partie à cause de difficultés dans le traitement et l'analyse de l'énorme volume de données collectées par le véhicule spatial. Le 10 janvier 2011, la plus petite exoplanète alors connue, Kepler-10 b, une planète tellurique, a été découverte à l'aide des observations de Kepler; depuis, plusieurs exoplanètes de taille comparable voire plus petites que la Terre ont été identifiées, telles que Kepler-20 f, Kepler-20 e, voire des corps à l'existence fortement suspectée, en janvier 2012, tels que Kepler-42 b, Kepler-42 c et Kepler-42 d, cette dernière étant à peine plus grande que Mars. Le 27 janvier 2015 les scientifiques découvrent un système planétaire de 11,2 milliards d'années avec cinq exoplanètes qui tournent autour d'une étoile solaire. Le système Kepler-444 est à ce jour le système le plus ancien identifié de la voie lactée.

Caractéristiques techniques

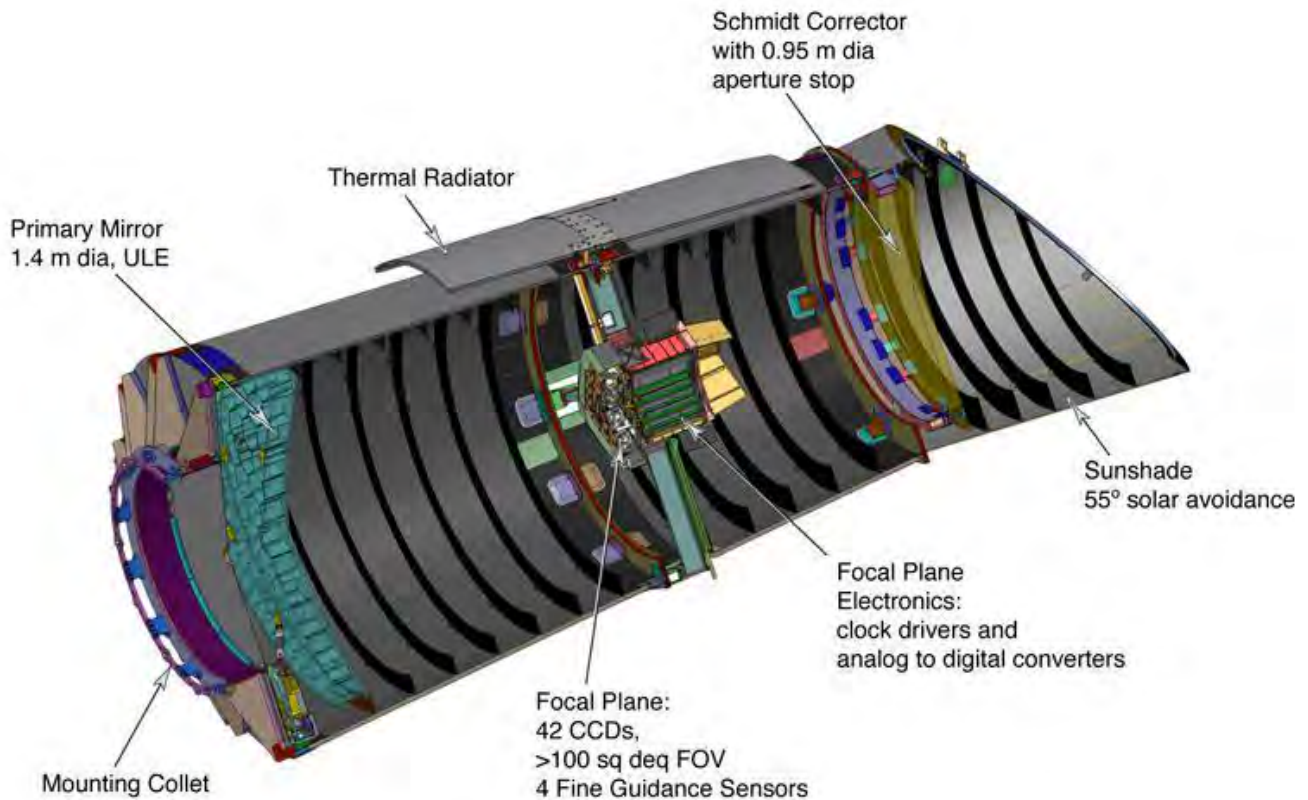
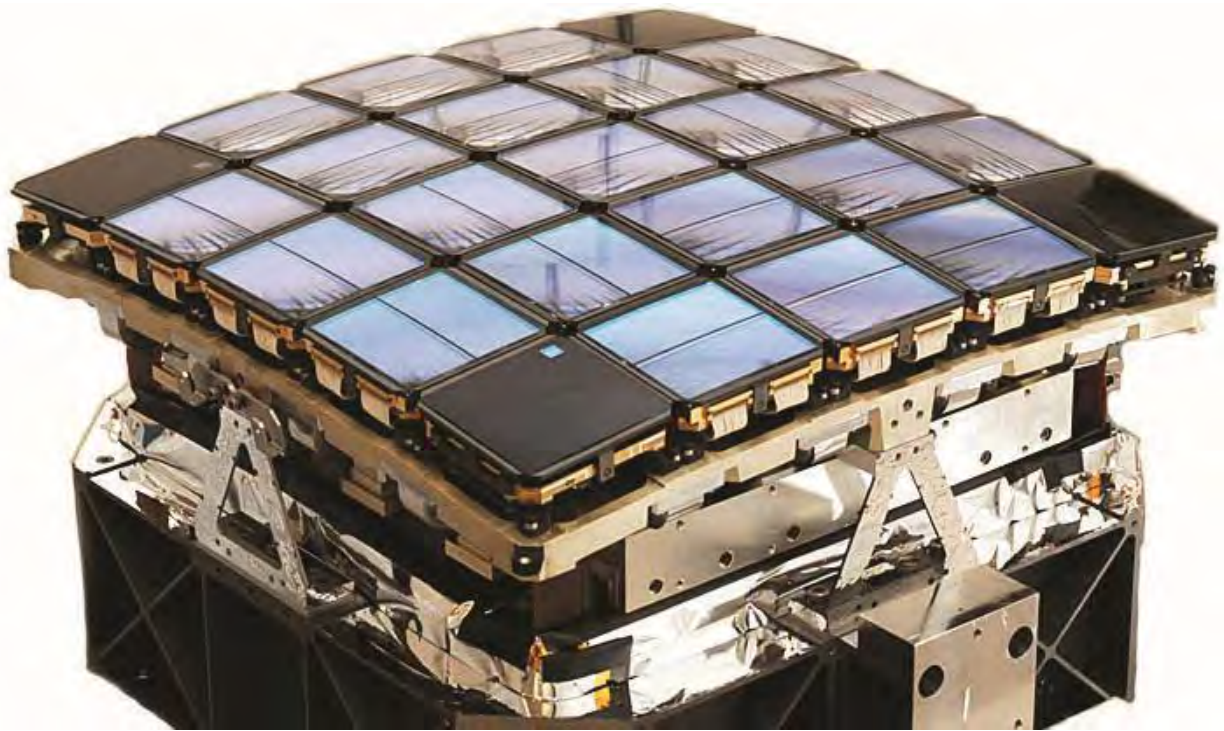


Schéma de l'intérieur de l'observatoire Kepler

Le véhicule spatial a une masse de 1 039 kilogrammes, une ouverture de 0,95 mètre et un miroir primaire de 1,4 mètre, afin de mesurer les courbes de lumière des étoiles. Son énergie est fournie par un panneau solaire délivrant une puissance de 651 watts.

Partie optique

À l'époque de son lancement, *Kepler* disposait du plus grand miroir parmi tous les télescopes situés au-delà de l'orbite terrestre. Kepler a un champ d'observation de 105 deg^2 (environ 12 degrés en diamètre), ce qui équivaut à peu près à la taille du poing observé bras tendu. Sur l'ensemble de ce champ, 105 degrés sont de qualité scientifique, avec un vignettage inférieur à 11 %. Afin de fournir une excellente photométrie, les images ne sont pas parfaitement nettes, mais légèrement défocalisées. L'objectif de la mission est une précision photométrique différentielle combinée (en anglais CDPP pour *Combined Differential Photometric Precision*) de 20 ppm (partie par million) pour une étoile de type solaire $m(V)=12$ et un temps d'intégration de 6,5 heures, bien qu'à ce jour les observations soient loin de cet objectif. Un transit de type terrestre produit un changement de luminosité de 84 ppm et dure 13 heures lorsqu'il traverse le centre de l'étoile.



*Le détecteur matriciel au plan focal (en anglais staring array) de Kepler
Le dispositif est courbe pour tenir compte de la courbure de champ de Petzval*

Le plan focal de la caméra est constitué de 42 capteurs CCD chacun comportant 2200×1024 pixels, ce qui en fit à l'époque la plus grande caméra jamais lancée dans l'espace, avec un total de 95 mégapixels. Ce détecteur matriciel est refroidi par des caloducs connectés à un radiateur externe. Les CCD sont lus toutes les six secondes (pour limiter la saturation) et co-additionnés à bord pendant 30 minutes. Cependant, bien qu'au moment de son lancement *Kepler* ait eu le taux de transmission de données le plus élevé de toutes les missions de la NASA, la somme des 95 millions de pixels effectuée en 30 minutes représente plus de données que ce qui peut être stocké et renvoyé sur Terre. L'équipe scientifique a donc pré-sélectionné les pixels appropriés associés à chaque étoile d'intérêt, ce qui représente environ 5 % des pixels. Les données de ces pixels sont alors requantifiées, compressées et stockées, avec d'autres données auxiliaires, dans l'enregistreur à mémoire statique de 16 gigaoctets. Les données qui sont stockées et retransmises vers la Terre incluent les étoiles scientifiquement étudiées, les étoiles de mode p, le niveau de noir, les images d'arrière-plan et de plein champ.

Historique

En janvier 2006, le lancement du projet fut reporté de huit mois à cause de coupes budgétaires et de consolidations à la NASA. Il fut à nouveau reporté de quatre mois en mars 2006 du fait de nouveaux problèmes de budget. Durant cette période, l'antenne à grand gain conçue pour être montée sur cardan fut changée pour un modèle fixé à l'ossature du vaisseau afin de réduire le coût et la complexité, ceci au prix d'un jour d'observation par mois. Le télescope *Kepler* fut lancé le 7 mars 2009 à 03:49:57 UTC (6 mars, 10:49:57 pm EST) à bord d'une fusée Delta II depuis la base de lancement de Cap Canaveral, en Floride. Le lancement fut un succès total et les trois étapes furent complétées vers 04:55 UTC. L'enveloppe du télescope fut larguée le 7 avril 2009 et les images de la première lumière furent prises le lendemain. Le 20 avril 2009, il fut annoncé que l'équipe scientifique de *Kepler* avait conclu qu'un affinage supplémentaire du focus augmenterait considérablement le rendement scientifique. Le 23 avril 2009, il fut annoncé que le focus avait été optimisé avec succès en bougeant le miroir primaire de 40 micromètres vers le plan focal et en l'inclinant de 0.0072 degrés. Le 12 mai 2009, à 5:01 pm heure du Pacifique (17:01 UTC-8), *Kepler* compléta sa phase de mise en service avec succès et débuta sa recherche de planètes autour d'autres étoiles. Le 19 juin 2009, le vaisseau envoya avec succès ses premières données scientifiques vers la Terre. Il fut découvert que *Kepler* était entré en mode de sécurité le 15 juin. Un second événement de mode de sécurité se produisit le 2 juillet. Dans les deux cas l'événement fut déclenché par une *réinitialisation de processeur*.

Le vaisseau repris son fonctionnement normal le 3 juillet et les données scientifiques qui avaient été collectées depuis le 19 juin furent retransmises vers la Terre ce jour là. Le 14 octobre 2009, il fut déterminé que la cause de ces événements de mise en sécurité était une alimentation électrique à basse tension qui alimente le processeur du RAD750.

Le 12 janvier 2010, une partie du plan focal a transmis des données anormales, suggérant un problème avec son module MOD-3 qui couvre 2 des 42 CCD de *Kepler*. À partir d'octobre 2012, le module fut considéré comme étant « en panne », mais la couverture de l'instrument excédait toujours les objectifs scientifiques.

Kepler télécharge à peu près 12 gigaoctets de données environ tous les mois. Un exemple d'un tel téléchargement se déroula les 22 et 23 novembre 2010. Le 14 juillet 2012, l'une des quatre roues de réaction utilisée pour le pointage de précision du télescope est tombée en panne. Comme *Kepler* n'a besoin que de trois roues de réaction pour pointer correctement le télescope il peut continuer à fonctionner, mais une autre panne le laisserait dans l'incapacité de poursuivre sa mission. Il s'agit d'une menace potentielle pour l'extension de la mission.

Le 17 janvier 2013 la NASA a annoncé que l'une des trois roues de réaction restantes montrait des signes d'une friction accrue, et que *Kepler* interromprait son fonctionnement pendant 10 jours comme possible méthode pour corriger le problème. Si cette seconde roue devait aussi tomber en panne, la mission *Kepler* prendrait fin. Le 29 janvier 2013, la NASA signala le succès du rétablissement du mode de collecte scientifique. Le 15 août 2013, la NASA déclare officiellement renoncer à réparer les deux roues endommagées, ce qui marque l'arrêt définitif du fonctionnement du télescope. L'analyse des données se poursuivra en revanche sur plusieurs années.

Performances

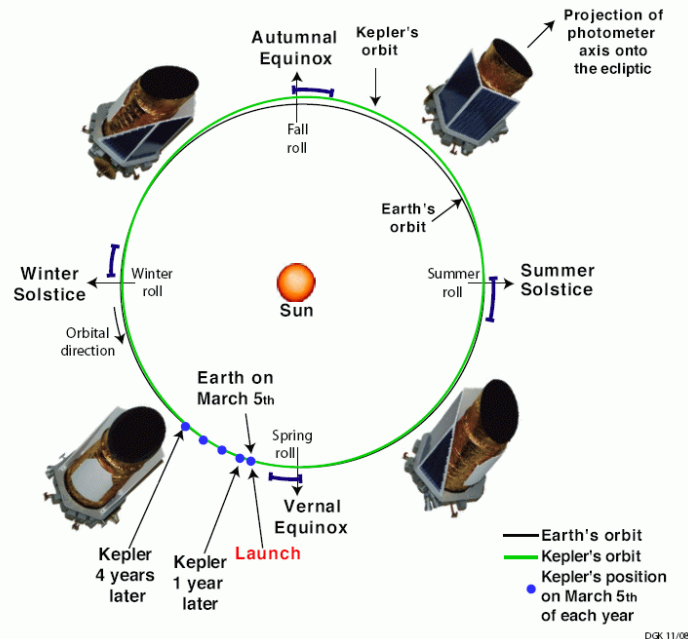
En termes de performance photométrique, *Kepler* fonctionne bien, beaucoup mieux que n'importe quel télescope terrestre, mais encore loin des objectifs fixés lors de sa conception. L'objectif était une précision photométrique différentielle combinée (en anglais CDPP pour *combined differential photometric precision*) de 20 parties par million (ppm) pour une étoile de magnitude 12 après 6,5 heures d'intégration. Cette estimation fut développée en tenant compte de 10 ppm pour la variabilité stellaire, soit à peu près la valeur correspondant au Soleil. La précision obtenue pour cette observation a une large amplitude, selon l'étoile et la position sur le plan focal, avec une médiane de 29 ppm.

L'essentiel du bruit additionnel se manifeste à cause d'une variabilité des étoiles elles-mêmes qui s'avère être plus grande que supposé (19,5 ppm au lieu des 10 ppm attendus), le reste étant dû à des sources de bruit liées à l'instrument et qui sont plus importantes que les prédictions. Un travail est en cours afin de mieux comprendre, et peut-être éliminer par recalibrage, le bruit de l'instrument. Puisque le signal d'une planète de la taille de la Terre est si proche du niveau du bruit (seulement 80 ppm), un bruit plus important implique que chaque transit individuel constitue seulement un événement avec un écart-type de 2,7 au lieu des 4 escomptés. Il en résulte que davantage de transits doivent être observés pour qu'une détection soit certaine. Les estimations scientifiques ont indiqué qu'une mission de 7 à 8 ans, au lieu des 3,5 ans planifiés au départ, serait nécessaire pour trouver toutes les planètes de taille terrestre en transit. Le 4 avril 2012, l'extension de la mission Kepler jusqu'à l'année fiscale 2016 a été approuvée ce qui évite les occultations par la Terre, la pollution lumineuse, les perturbations gravitationnelles et cinétiques inhérentes à l'orbite terrestre.

Le photomètre pointe vers une zone située dans les constellations boréales du Cygne, de la Lyre et du Dragon qui se trouve nettement au-dessus du plan de l'écliptique, de sorte que la lumière du Soleil n'entre jamais dans le photomètre tandis que le vaisseau orbite autour du Soleil. Ce champ d'observation n'est pas non plus obscurci par des objets de la ceinture de Kuiper ou de la ceinture d'astéroïdes. Il s'agit aussi de la direction du système solaire autour du centre de la Voie Lactée. Ainsi, les étoiles qui sont observées par *Kepler* ont à peu près la même distance au centre galactique que le système solaire et sont également proches du plan galactique. Ce fait est important si la position dans la Voie Lactée est liée à l'habitabilité, comme le suggère l'hypothèse de la Terre rare. L'orbite de *Kepler* a été décrite par la NASA comme étant en arrière de la Terre (en anglais : *earth-trailing orbit*). Avec une période orbitale de 372,5 jours, *Kepler* tombe doucement plus loin en arrière de la Terre.

Mise en œuvre

Le centre de contrôle de *Kepler* est le LASP situé dans la ville de Boulder (Colorado). Les panneaux solaires du vaisseau sont tournés pour faire face au Soleil lors des solstices et des équinoxes, de manière à optimiser la quantité de lumière solaire qu'ils reçoivent, ainsi que pour maintenir le radiateur orienté vers l'espace profond. Ensemble, le LASP et le constructeur du vaisseau, *Ball Aerospace & Technologies Corp.*, contrôlent le véhicule spatial depuis un centre des opérations de la mission situé sur le campus de l'Université du Colorado. Le LASP réalise l'organisation essentielle de la mission ainsi que la collecte initiale et la distribution des données scientifiques. Le coût initial du cycle de vie de la mission a été estimé à 600 millions de dollars américains, en tenant compte de la levée de fonds pour les 3,5 années d'exploitation. En 2012, la NASA a annoncé que la mission *Kepler* serait financée jusqu'en 2016.



Orbite de Kepler. Les panneaux solaires du vaisseau sont ajustés aux solstices et aux équinoxes

Télécommunications

La NASA contacte le vaisseau, via la liaison de communication par bande X, deux fois par semaine pour le diriger et mettre à jour ses statuts. Les données scientifiques sont téléchargées une fois par mois en utilisant la liaison par bande K_a avec un taux de transfert maximum d'approximativement 550 kbit/s. Le vaisseau *Kepler* conduit ses propres analyses partielles à bord et ne transmet que les données scientifiques jugées nécessaires à la mission, ceci afin de conserver de la bande passante.

Gestion des données

Les données télémétriques scientifiques collectées pendant les opérations de la mission, au LASP, sont envoyées pour traitement au *Data Management Center* (centre de gestion des données) de *Kepler*, situé au Space Telescope Science Institute (STScI) de l'Université Johns-Hopkins à Baltimore. Ces données sont décodées et converties par le DMC en lots de données scientifiques au format FITS non calibré, lesquels sont alors transmis au *Science Operations Center* (SOC) du Ames Research Center (ARC) de la NASA pour calibration et traitement final. Le SOC développe et utilise les outils nécessaires pour traiter les données scientifiques dont fera usage le *Science Office* (SO, pour *bureau scientifique* en anglais) de *Kepler*.

En conséquence, le SOC développe le logiciel de traitement de la chaîne de données, basé sur les algorithmes scientifiques développés par le SO. Au cours des opérations, le SOC :

1. Reçoit les données calibrées des pixels de la part du DMC.
2. Applique les algorithmes d'analyse pour produire les courbes de lumière de chaque étoile.
3. Réalise les recherches de transits pour la détection de planètes (en anglais *threshold-crossing events*, ou TCEs).
4. Réalise ensuite la validation des données pour les planètes candidates, par l'évaluation de la cohérence des divers lots de données en tant que méthode pour éliminer les détections de faux positifs.

Le SOC évalue également la performance photométrique de façon régulière et fournit les métriques de performance au SO et au *Mission Management Office* (en anglais : Bureau de gestion de la mission). Finalement, le SOC développe et maintient les bases de données scientifiques du projet, ce qui inclut les catalogues et les données traitées. Il retourne les lots de données calibrées et les résultats scientifiques au DMC pour archivage à long terme, et distribution aux astronomes du monde entier via la *Multimission Archive* du STScI.

Champ d'observation

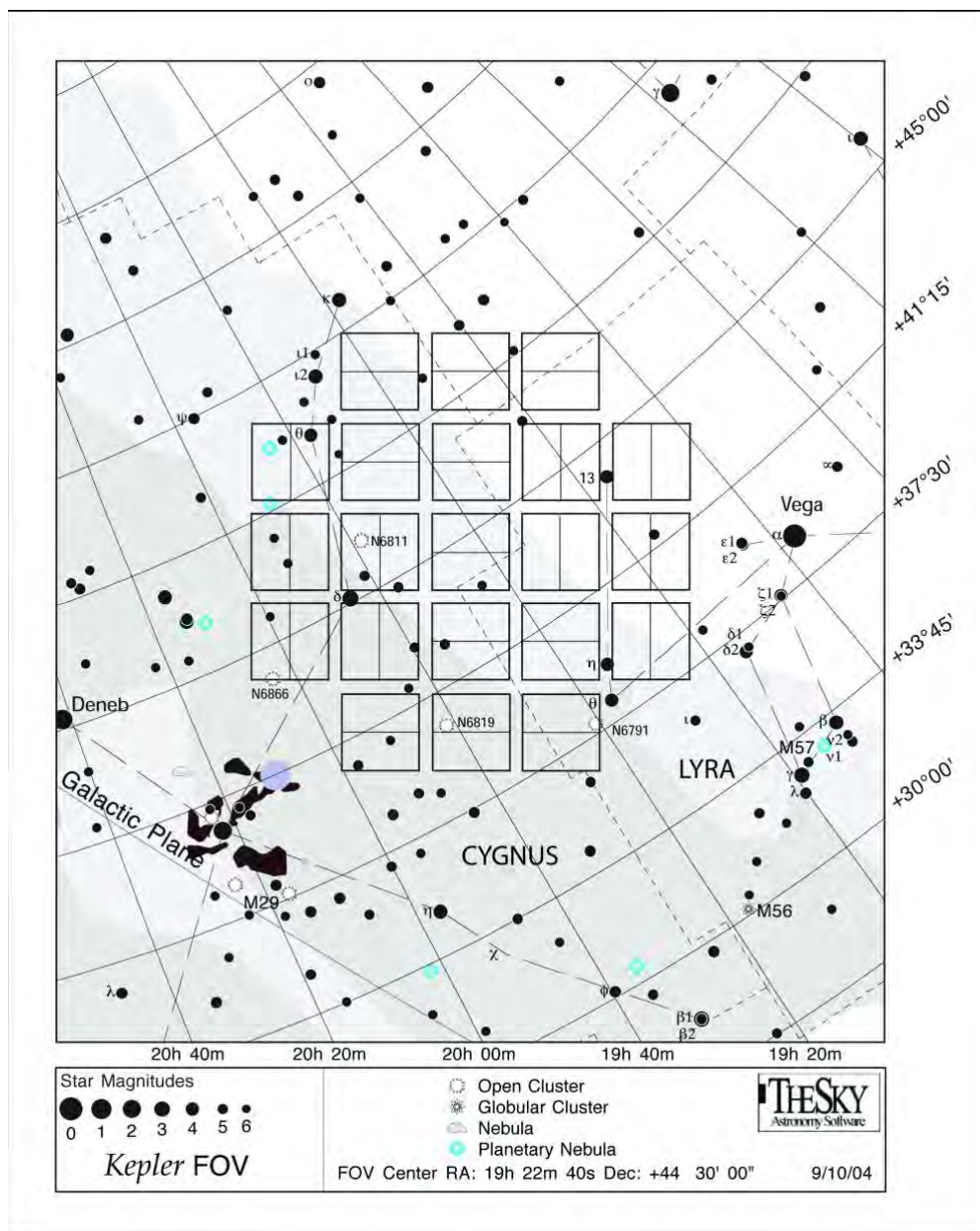


Diagramme de la zone étudiée par Kepler avec les coordonnées célestes

Kepler a un champ d'observation (en anglais FOV pour *Field Of View*) qui est fixe dans le ciel. Le diagramme ci-contre, à droite, montre les coordonnées célestes, la zone visée par les champs du détecteur ainsi que la localisation de quelques étoiles brillantes, avec le Nord céleste situé dans le coin supérieur gauche. Le site web de la mission propose un calculateur qui détermine si un objet donné se trouve dans le champ d'observation et, si c'est le cas, l'endroit où il apparaîtra dans le flux de données de sortie du détecteur photographique. Les données sur les planètes extrasolaires candidates sont soumises au Kepler Follow-up Program, ou KFOP (pour Programme de suivi de Kepler, en anglais) afin de conduire des observations complémentaires. Le champ d'observation de Kepler couvre 115 degrés carrés, soit environ 0,28 % du ciel, ou « environ deux cuillères de la Grande Ourse ». Ainsi, il faudrait à peu près 400 télescopes tels que Kepler pour couvrir l'ensemble du ciel vu de la Terre.

Objectifs et méthodes

L'objectif scientifique de *Kepler* est d'explorer la structure et la diversité des systèmes planétaires. Ce véhicule spatial observe un grand échantillon d'étoiles afin d'atteindre plusieurs objectifs clés :

- Déterminer combien de planètes, de taille équivalente ou supérieure à la Terre, se trouvent à l'intérieur ou à proximité de la zone habitable d'étoiles aux types spectraux très variés. De telles planètes sont souvent appelées *Goldilocks planets* en anglais, en référence à l'histoire de Boucles d'or et les Trois Ours (la petite fille nommée *Boucles d'or* devant régulièrement choisir entre trois objets de tailles différentes, ignorant ceux qui sont trop extrêmes, c'est-à-dire trop grands ou trop petits, trop chauds ou trop froids, et choisissant systématiquement celui qui se trouve au milieu car il est « juste comme il faut »).
- Déterminer l'étendue des tailles et des formes des orbites de ces planètes.
- Estimer combien de planètes se trouvent dans des systèmes à étoiles multiples.
- Déterminer l'étendue de l'orbite, de la luminosité, de la taille, de la masse et de la densité des planètes géantes à courte période orbitale.
- Identifier les membres additionnels de chaque système planétaire découvert en utilisant d'autres techniques.
- Déterminer les propriétés de ces étoiles qui abritent des systèmes planétaires.

La plupart des exoplanètes précédemment détectées par d'autres projets étaient des géantes gazeuses, principalement de la taille de Jupiter et plus grandes. *Kepler* est conçu pour rechercher des planètes 30 à 600 fois moins massives, plus proches de la masse de la Terre (Jupiter est 318 fois plus massive que la Terre). La méthode utilisée qui est la méthode des transits, implique l'observation des transits astronomiques répétés de planètes devant leurs étoiles, ce qui cause une légère réduction de la magnitude apparente de l'étoile, de l'ordre de 0,01 % pour une planète de la taille de la Terre. Le degré de cette baisse d'éclat peut être utilisé pour déduire le diamètre de la planète, et l'intervalle de temps entre les transits peut être utilisé pour déduire la période orbitale de la planète, données à partir desquelles peuvent être calculés son demi-grand axe orbital (à l'aide des lois de Kepler) et sa température (en utilisant des modèles de radiation stellaire).

La probabilité pour que l'orbite d'une planète se trouve aléatoirement placée le long de la ligne de visée vers l'étoile correspond au diamètre de l'étoile divisé par le diamètre de l'orbite. Pour une planète de type terrestre qui transite à 1 UA d'une étoile de type solaire, la probabilité est de 0,465 %, ou environ 1 sur 215. À 0,72 UA (qui correspond à la distance orbitale de Vénus par rapport au Soleil) la probabilité est légèrement plus importante; de telles planètes pourraient être semblables à la Terre si leur étoile est de type G, suffisamment ancienne, légèrement moins massive et lumineuse que le Soleil, telle que Tau Ceti. De plus, comme les planètes d'un système donné tendent à orbiter sur des plans similaires, la possibilité de détections multiples autour d'une seule étoile est en fait assez élevée. Par exemple, si une mission du même type que *Kepler* était conduite par des extraterrestres et qu'elle observait la Terre transiter devant le Soleil, il y a 12 % de chances pour qu'elle repère également un transit de Vénus.

Le champ d'observation de 115-deg² de *Kepler* lui donne une probabilité bien plus élevée de détecter des planètes de type terrestre que le télescope spatial Hubble, qui a un champ d'observation de seulement 10 arcminutes. De plus, *Kepler* est dédié à la détection de transits planétaires, tandis que le télescope spatial Hubble est utilisé pour aborder une large variété de questions scientifiques, et n'observe que rarement un seul champ stellaire en continu. Parmi environ un demi-million d'étoiles situées dans le champ d'observation de *Kepler*, à peu près 150 000 étoiles ont été sélectionnées pour observation, et elles sont observées simultanément, le vaisseau mesurant les variations de leur éclat toutes les 30 minutes. Cela offre une meilleure chance de voir un transit. De plus, la probabilité de 1 sur 215 signifie que si 100 % des étoiles observées avaient le même diamètre que le Soleil, et que chacune avait une planète tellurique de type terrestre sur une orbite identique à celle de la Terre, *Kepler* en trouverait environ 465; mais si seulement 10 % des étoiles observées sont de la sorte, alors il en découvrirait 46. La mission est bien adaptée pour déterminer la fréquence de planètes similaires à la Terre orbitant autour d'autres étoiles. Du fait que *Kepler* doit observer au moins trois transits pour confirmer que la baisse d'éclat d'une étoile a été causée par une planète en transit, et comme les planètes les plus grandes donnent un signal qui est plus facile à vérifier, les scientifiques s'attendaient à ce que les premiers résultats rapportés soient des planètes

de la taille de Jupiter sur des orbites serrées. Les premières d'entre elles ont été rapportées après seulement quelques mois d'activité. Des planètes plus petites et plus éloignées de leur étoile seront plus longues à observer et il est estimé que la découverte de planètes comparables à la Terre doit prendre trois ans ou plus. Une fois que *Kepler* a détecté une signature de type transit, il est nécessaire d'écarter les faux positifs avec des tests complémentaires comme la spectroscopie Doppler. Bien que *Kepler* a été conçu pour la photométrie, il s'avère qu'il est capable d'astrométrie et que de telles mesures peuvent aider à confirmer ou écarter des planètes candidates.

En plus des transits, les planètes orbitant autour de leurs étoiles subissent des changements de variation de la lumière reflétée (comme la Lune, elles traversent des phases de pleines à nouvelles et ainsi de suite; leur orbite n'est pas non plus parfaitement circulaire et elle peut même être inclinée par rapport à la ligne de visée). Puisque *Kepler* ne peut résoudre la planète de son étoile, il voit seulement la lumière combinée, et l'éclat de l'étoile hôte semble changer à chaque orbite de façon périodique. Bien que l'effet soit minime (la précision photométrique requise pour observer l'approche d'une planète géante étant à peu près la même que pour détecter une planète de taille terrestre en transit devant une étoile de type solaire) les planètes de la taille de Jupiter sont détectables par les télescopes spatiaux sensibles comme *Kepler*. Sur le long terme cette méthode pourrait aider à trouver davantage de planètes que la méthode des transits, car la variation de lumière reflétée selon la phase orbitale est largement indépendante de l'inclinaison orbitale de la planète, et elle ne requiert pas que la planète passe devant le disque de l'étoile. De plus, la fonction de phase d'une planète géante est également fonction des propriétés thermiques de son atmosphère s'il y en a une. Donc, la courbe de phase pourrait contraindre d'autres propriétés planétaires, telle que la taille et la distribution des particules atmosphériques. Les données collectées par *Kepler* sont également utilisées pour étudier les étoiles variables de différents types et faire de l'astérosismologie, en particulier sur des étoiles manifestant des oscillations de type solaire.

Résultats de la mission à ce jour

À ce jour, l'observatoire *Kepler* est exploité activement. Les premiers résultats principaux ont été annoncés le 4 janvier 2010. Comme attendu, les découvertes initiales étaient toutes des planètes à courte période orbitale. Tandis que la mission se poursuivait, davantage de planètes candidates à plus longues périodes ont été trouvées.

2009

La NASA a tenu une conférence de presse pour parler des premiers résultats scientifiques de la mission *Kepler* le 6 août 2009. Lors de cette conférence de presse, il fut révélé que *Kepler* avait confirmé l'existence de l'exoplanète HAT-P-7b déjà identifiée par la méthode des transits, et qu'il fonctionnait suffisamment bien pour découvrir des planètes de taille terrestre. Comme la détection de planètes par *Kepler* dépend de l'observation de très petits changements d'éclats, les étoiles qui varient en éclat par elles-mêmes (étoiles variables) n'entrent pas dans le cadre de cette recherche. À partir des quelques premiers mois de données, les scientifiques de la mission *Kepler* ont déterminé qu'environ 7 500 étoiles de la liste initiale des cibles sont de telles étoiles variables. Elles ont été retirées de la liste et seront remplacées par d'autres candidates. Le 4 novembre 2009, le projet *Kepler* a diffusé publiquement les courbes lumineuses des étoiles abandonnées. Les six premières semaines de données ont révélé cinq planètes précédemment inconnues, toutes très proches de leurs étoiles. Parmi les résultats notables se trouvait l'une des planètes à plus faible densité alors découvertes, deux étoiles naines blanches à faible masse qui furent initialement rapportées comme étant des membres d'une nouvelle classe d'objets stellaires et une planète bien caractérisée orbitant autour d'une étoile binaire.

2010

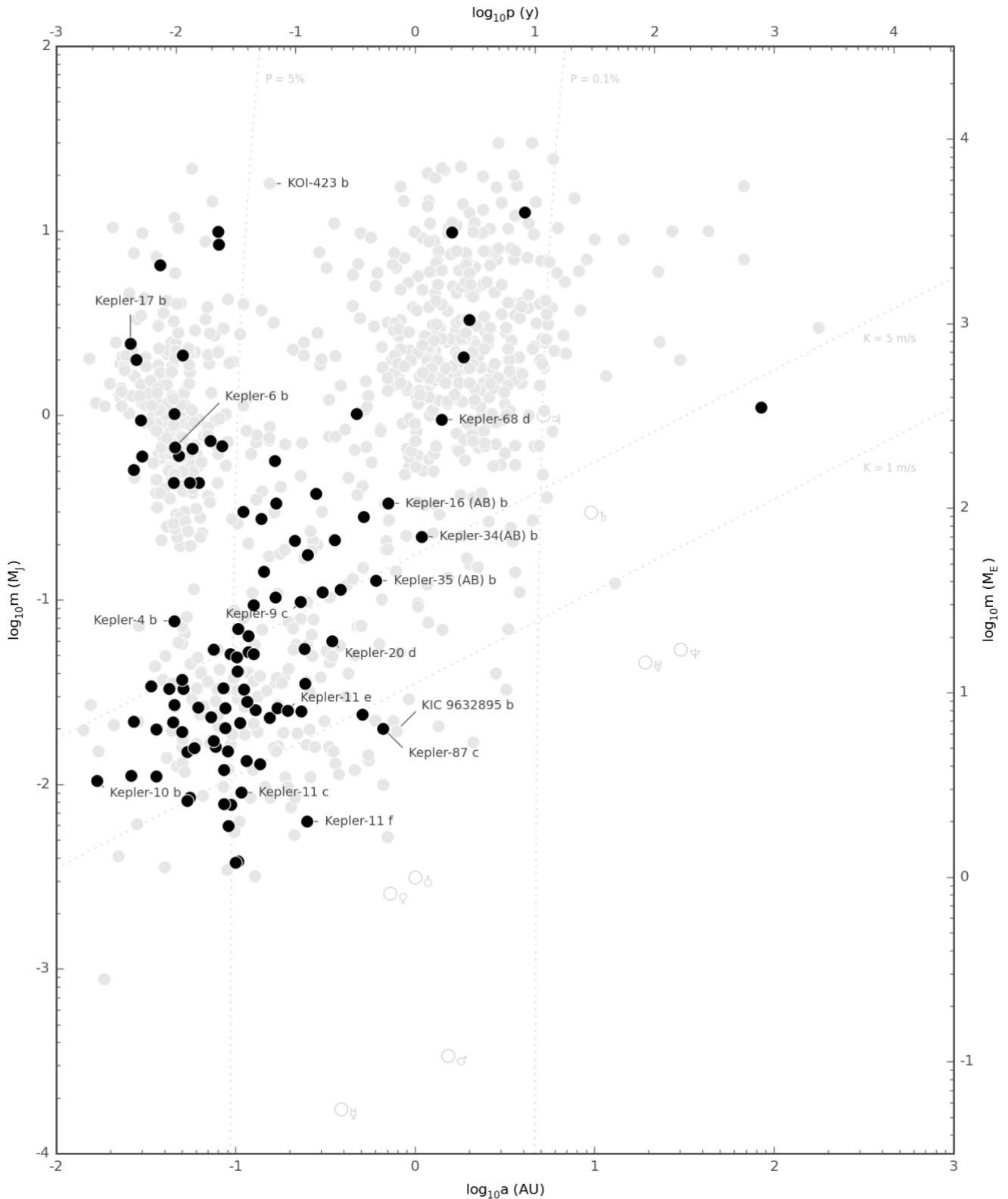
Le lundi 4 janvier 2010, les responsables de mission annonçaient la découverte par *Kepler* de ses cinq premières exo-planètes, soit les planètes des étoiles Kepler-4 à Kepler-8. Le 15 juin 2010, la mission *Kepler* a rendu publiques ses données sur la totalité d'environ 156 000 étoiles cibles pour la recherche planétaire, à l'exception de 400. Parmi ce premier lot de données, 706 cibles avaient des exoplanètes candidates viables, avec des tailles variant d'aussi petites que la Terre jusqu'à plus grandes de Jupiter. L'identification et les caractéristiques de 306 des 706 cibles furent communiquées. Les cibles fournies comprenaient 5 systèmes candidats à planètes multiples. Les données pour les 400 cibles restantes avec des candidats planétaires devaient être publiées en février 2011. (Pour les détails sur cette dernière

publication, voir les résultats de la mission en 2011 ci-dessous.) Néanmoins, les résultats de *Kepler*, basés sur les candidats de la liste publiée en 2010, impliquaient que la plupart des planètes candidates avaient des rayons inférieurs à la moitié de celui de Jupiter. Ces résultats impliquaient aussi que les petites planètes candidates, avec des périodes inférieures à 30 jours, étaient bien plus communes que les grandes planètes candidates avec des périodes similaires et que les découvertes faites à partir d'observatoires au sol fournissent un échantillon de la population la plus grande, c'est-à-dire les plus grandes planètes dans la distribution des tailles. Ceci contredisait les théories plus anciennes qui avaient suggéré que les petites planètes et celles de type terrestre seraient relativement peu fréquentes. Sur la base des données de *Kepler* alors étudiées, une estimation d'environ 100 millions de planètes habitables dans notre galaxie pouvait être réaliste. Toutefois, certains bulletins des médias traitant de la conférence TED à l'origine de cette information ont conduit à des malentendus, en partie dus, semble-t-il, à la confusion concernant l'expression « similaires à la Terre » (*Earth-like* en anglais). À titre de clarification, une lettre du Directeur du Ames Research Center de la NASA, pour le *Kepler Science Council* (Conseil Scientifique de Kepler) datée du 2 août 2010, déclare que : « L'analyse des données actuelles de *Kepler* ne soutient pas l'affirmation selon laquelle *Kepler* a trouvé la moindre planète similaire à la Terre ». En 2010, *Kepler* a identifié deux systèmes contenant des objets plus petits et plus chauds que leur étoile parente : KOI-74 et KOI-81. Ces objets sont probablement des étoiles naines blanches faiblement massives produites par de précédents épisodes de transferts de masse dans leurs systèmes.

En 2010, l'équipe de *Kepler* a publié un article scientifique qui fournissait les données pour 312 planètes extrasolaires candidates autour de 306 étoiles distinctes. Seulement 33,5 jours de données étaient disponibles pour la plupart des candidates. La NASA a également annoncé que les données concernant 400 candidates supplémentaires n'étaient pas divulguées, afin de permettre aux membres de l'équipe de *Kepler* de réaliser des observations supplémentaires. Les données pour ces candidates ont finalement été rendues publiques le 2 février 2011.

2011

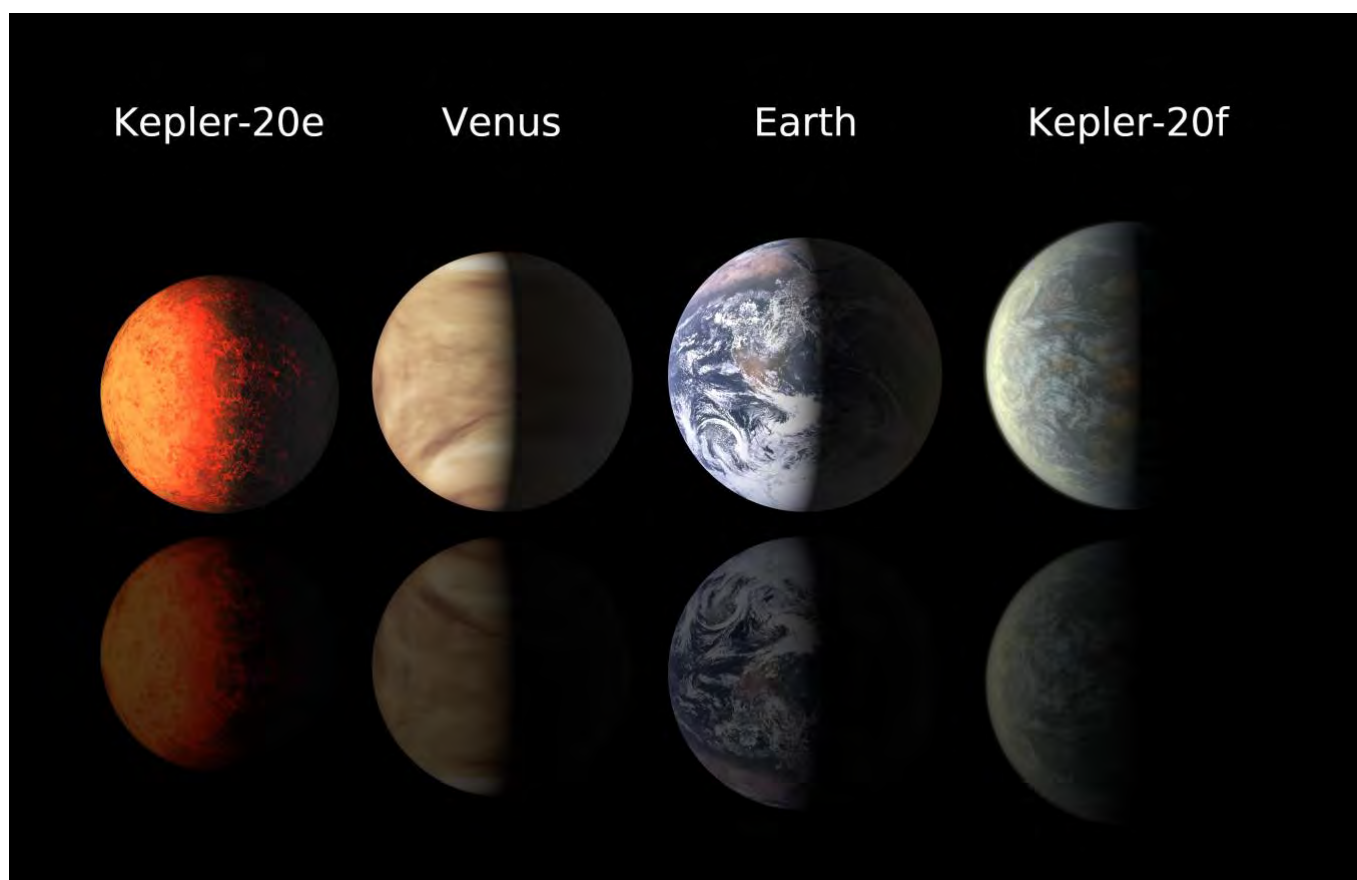
Le 2 février 2011, l'équipe de *Kepler* annonçait les résultats d'analyses des données extraites entre le 2 mai et le 16 septembre 2009. Ils avaient alors trouvé 1.235 candidats planétaires tournant autour de 997 étoiles hôtes. (Les nombres qui suivent supposent que les candidats sont vraiment des planètes, bien que les articles scientifiques officiels les appellent seulement candidats ou candidates. Des analyses indépendantes ont indiqué qu'au moins 90 % d'entre eux sont de vraies planètes et non des faux-positifs). 68 planètes étaient approximativement de la taille de la Terre, 288 étaient de la taille d'une Super-Terre, 662 de la taille de Neptune, 165 de la Taille de Jupiter et 19 jusqu'à deux fois la taille de Jupiter. 54 planètes se trouvaient dans la zone habitable, dont 5 avec une taille inférieure à deux fois celle de la Terre. Par contraste avec les travaux précédents de recherche d'exoplanètes, à peu près 74 % des planètes alors découvertes par *Kepler* étaient plus petites que Neptune, très probablement du fait que les travaux antérieurs découvraient plus facilement les grandes planètes que les petites.



Graphique montrant des exoplanètes dans le champ d'observation de Kepler, dans le contexte de toutes les planètes découvertes (au 3 octobre 2010), avec des scénarios de probabilités de transits indiqués à titre d'exemple

Cette publication du 2 février 2011 de 1.235 planètes extrasolaires en incluait 54 qui pourraient être dans la zone habitable. Il n'y avait auparavant que deux planètes dont on pensait qu'elles se trouvaient en zone habitable, aussi ces nouvelles découvertes ont représenté une énorme expansion du nombre potentiel de planètes favorables à la vie (planètes à la bonne température pour permettre à l'eau d'exister à l'état liquide). Toutes les candidates en zone habitable découvertes jusqu'alors orbitaient autour d'étoiles significativement plus petites et plus froides que le Soleil (les candidates habitables autour d'étoiles de

type solaire nécessitaient quelques années de plus pour accumuler les trois transits nécessaires à leur détection). De toutes les nouvelles planètes candidates, 68 faisaient 125 % de la taille de la Terre et moins, ou étaient plus petites que toutes les exoplanètes découvertes auparavant. Dans le cadre de la mission, la taille d'une planète de type terrestre ou d'une super-Terre est définie comme « inférieure ou égale à 2 rayons terrestres (R_t) ». Six planètes candidates de ce type sont dans la zone habitable. Une étude plus récente a montré par la suite que l'une de ces candidates (KOI 326.01) est en fait bien plus grande et plus chaude que ce qui avait été rapporté en premier lieu. La fréquence des observations de planètes était plus élevée pour des exoplanètes deux ou trois fois plus grandes que la Terre, et a ensuite décliné en proportion inverse de la surface planétaire. La meilleure estimation (en mars 2011), après avoir tenu compte des biais d'observation, était que 5,4 % des étoiles accueillent des planètes de la taille de la Terre, 6,8 % accueillent des candidates super-Terres, 19,3 % accueillent des candidates de la taille de Neptune et 2,55 % accueillent des candidates de la taille de Jupiter ou plus grandes. Les systèmes à plusieurs planètes sont communs; 17 % des étoiles hôtes ont des systèmes à candidates multiples et 33,9 % de toutes les planètes sont dans des systèmes à planètes multiples.



Un comparatif de la taille des exoplanètes Kepler-20 e et Kepler-20 f avec Vénus et la Terre

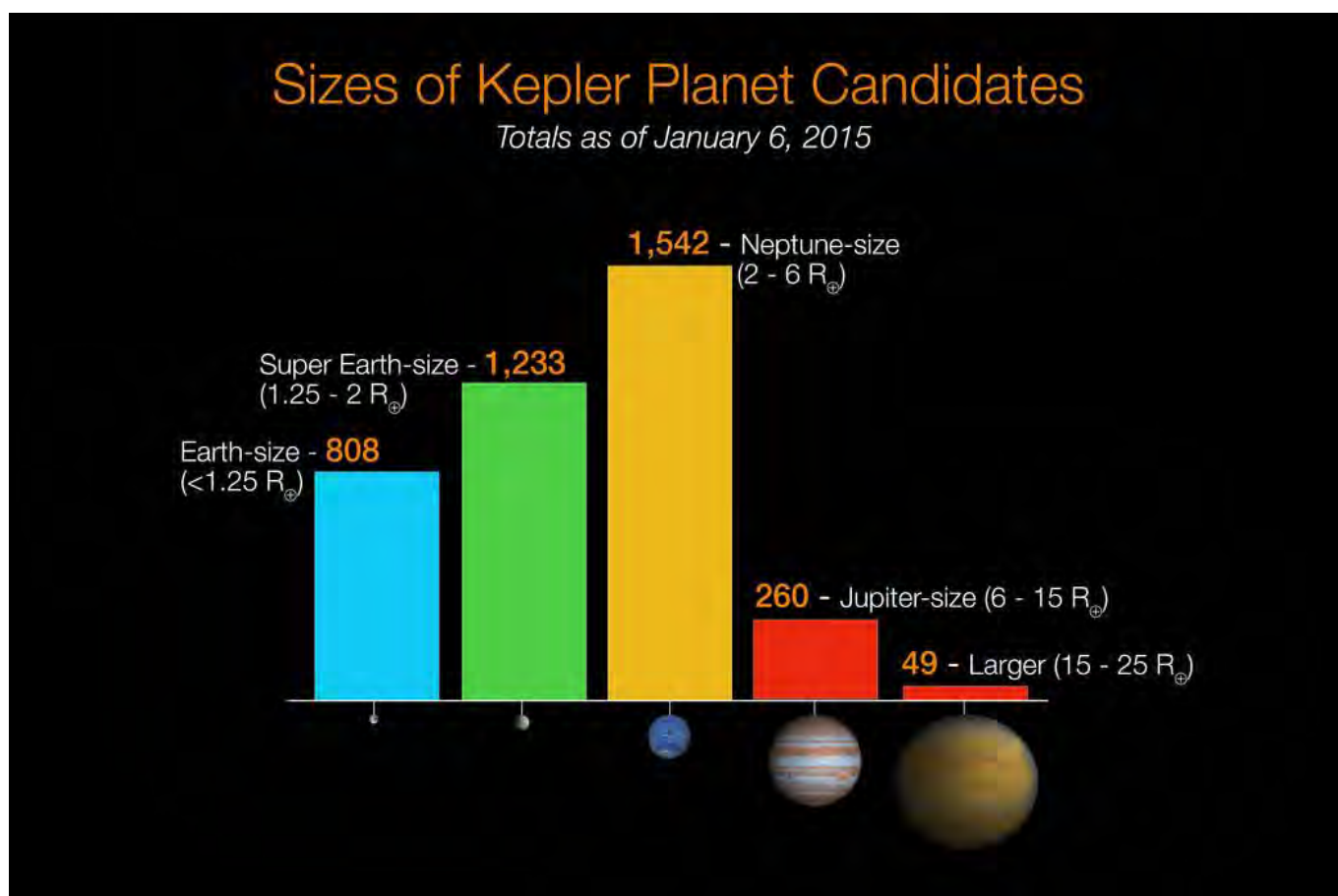
Vers le 5 décembre 2011, l'équipe de *Kepler* annonça la découverte de 2.326 candidats planétaires, dont 207 étaient similaires en taille à la Terre, 680 étaient de la taille de super-Terres, 1 181 étaient de la taille de Neptune, 203 étaient de la taille de Jupiter et 55 plus grands que Jupiter. Comparés aux chiffres de 2011, les nombres de planètes de taille terrestre ou de la taille de super-Terres avaient augmenté respectivement de 200 % et de 140 %. De plus, 48 candidats planétaires avaient été trouvés dans les zones habitables des étoiles étudiées, marquant une diminution par rapport aux chiffres de février. Ceci était dû au critère plus strict en usage dans les données de décembre. Le 20 décembre 2011, l'équipe de *Kepler* a annoncé la découverte des premières exoplanètes telluriques, Kepler-20 e et Kepler-20 f, en orbite autour d'une étoile semblable au Soleil, Kepler-20.

Sur la base des découvertes de *Kepler*, l'astronome Seth Shostak a estimé en 2011 que « dans les mille années-lumière autour de la Terre » il y a « au moins 30 000 » planètes habitables. Également à partir de ces découvertes, l'équipe de *Kepler* a estimé qu'il y a « au moins 50 milliards de planètes dans la Voie Lactée » dont « au moins la moitié sont dans la zone habitable ». En mars 2011, des astronomes du Jet

Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA ont signalé qu'environ « 1,4 à 2,7 % » de toutes les étoiles de type solaire sont supposées avoir des planètes semblables à la Terre « dans la zone habitable de leur étoile ». Cela signifie qu'il y a « deux milliards » de ces « analogues terrestres » dans notre seule galaxie, la Voie lactée. Les astronomes du JPL ont aussi noté qu'il y a « 50 milliards d'autres galaxies », ce qui donne potentiellement plus d'un trilliard de « planètes analogues à la Terre » si toutes les galaxies ont un nombre de planètes similaire à celui de la Voie lactée.

2012

En janvier 2012, une équipe internationale d'astronomes a signalé que chaque étoile dans la Voie lactée pourrait abriter « en moyenne... au moins 1,6 planètes », suggérant que plus de 160 milliards de planètes, chacune en orbite autour d'une étoile, pourraient exister dans notre seule galaxie. *Kepler* a aussi enregistré de lointaines super-éruptions stellaires, certaines d'entre elles étant 10 000 fois plus puissantes que l'exceptionnelle tempête de Carrington. Les super-éruptions pourraient être déclenchées par des planètes joviennes orbitant près de leur étoile. La technique de variation du moment de transit (TTV pour *Transit Timing Variation* en anglais), qui a été utilisée pour découvrir Kepler-9 d a gagné en popularité pour confirmer les découvertes d'exoplanètes. Une planète dans un système à quatre étoiles a également été confirmée et il s'agit de la première découverte d'un tel système.



Tailles des planètes candidates découvertes par Kepler, basées sur 2.740 candidates en orbite autour de 2 036 étoiles au 6 janvier 2015 (NASA)

À partir de 2012, il y avait un total de 2 321 planètes candidates. Parmi celles-ci, 207 sont de taille similaire à la Terre, 680 sont de la taille de super-Terres, 1 181 sont de la taille de Neptune, 203 de la taille de Jupiter et 55 plus grandes que Jupiter. De plus, 48 planètes candidates ont été trouvées dans les zones habitables des étoiles étudiées. L'équipe de *Kepler* a estimé que 5,4 % de toutes les étoiles abritent des planètes candidates de la taille de la Terre, et que 17 % de toutes les étoiles possèdent plusieurs planètes. En décembre 2011, deux des planètes telluriques candidates, Kepler-20 e et Kepler-20 f, ont été confirmées en tant que planètes orbitant un jumeau du Soleil : Kepler-20.

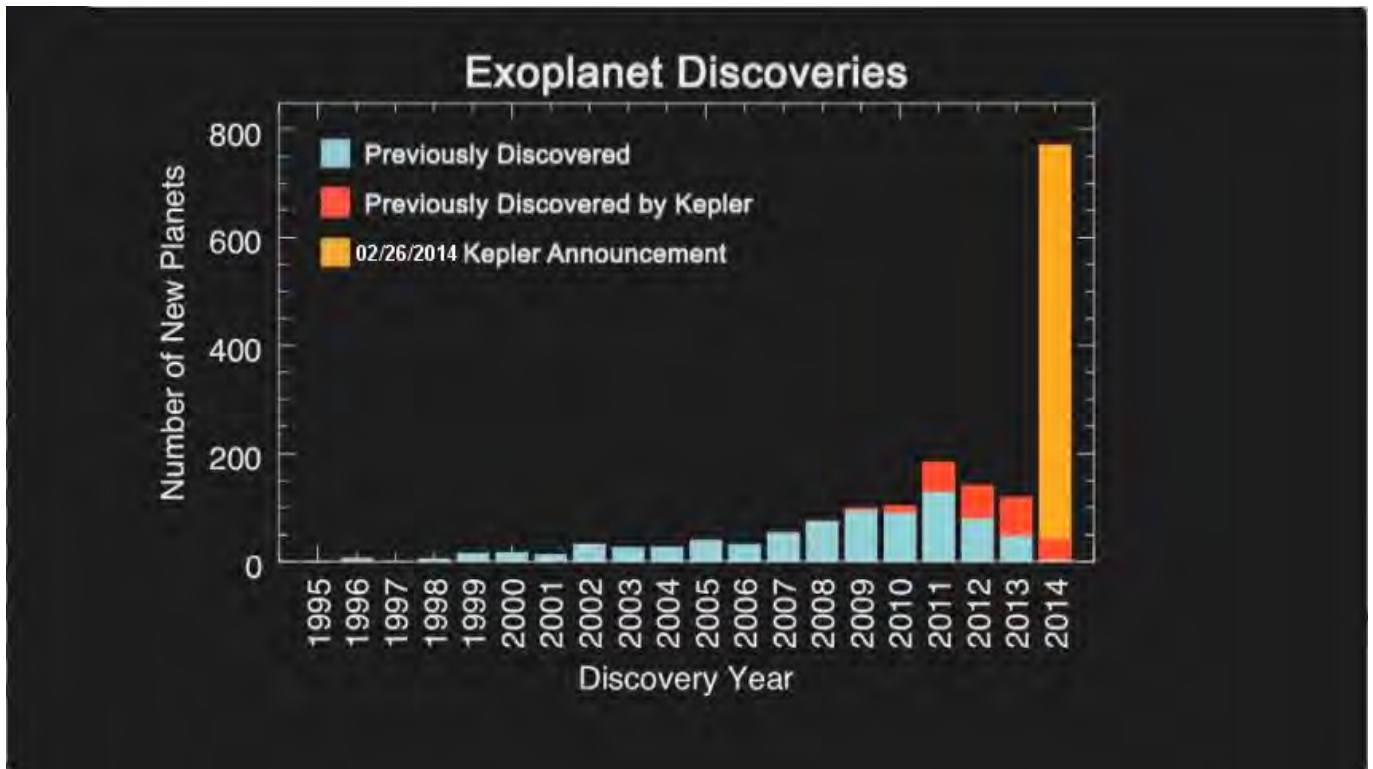
2013

Selon une étude publiée en janvier 2013 par des astronomes de Caltech, la Voie lactée contient au moins une planète par étoile, ce qui induit 100 à 400 milliards d'exoplanètes. L'étude, basée sur les planètes orbitant autour de Kepler-32, suggère que les systèmes planétaires pourraient être communs autour des étoiles de notre galaxie. La découverte de 461 planètes supplémentaires a été annoncée le 7 janvier 2013. Plus *Kepler* observe longtemps, plus il peut détecter de planètes à longues périodes orbitales. « Depuis que le dernier catalogue de Kepler a été publié en février 2012, le nombre de candidates découvertes dans les données de Kepler a augmenté de 20 pourcents et totalise maintenant 2 740 planètes potentielles en orbite autour de 2 036 étoiles ». Une nouvelle planète candidate a été annoncée le 7 janvier 2013 sous la dénomination de KOI-172.02. Confirmée trois mois plus tard, le 18 avril 2013, elle est alors renommée en tant que Kepler-69 c. Il s'agit d'une Super-Terre en orbite autour d'une étoile semblable au Soleil dans la zone habitable et qui pourrait être « une parfaite candidate pour abriter de la vie extraterrestre ».

À la même date du 18 avril 2013, deux autres planètes remarquables sont annoncées : Kepler-62 e et sa voisine Kepler-62 f. Elles orbitent toutes les deux dans la zone habitable de leur étoile Kepler-62, à 1 200 années-lumière du système solaire. Il s'agit là encore de Super-Terres, mesurant respectivement 1,6 et 1,4 fois le rayon terrestre. Elles font partie d'un système à cinq planètes et pourraient, l'une comme l'autre, être entièrement recouvertes d'un océan. Le 15 mai 2013, la NASA a annoncé que le vaisseau spatial avait été paralysé par l'échec d'une roue de réaction qui le maintient dans la bonne direction. Une deuxième roue avait déjà échoué, et le vaisseau spatial nécessite trois roues (sur un total de quatre) pour être opérationnel. D'autres essais en juillet et août ont déterminé que bien que *Kepler* était capable d'utiliser ses roues à réaction endommagées, il était incapable de collecter de nouvelles données scientifiques. Les scientifiques travaillant sur le projet *Kepler* ont déclaré qu'ils avaient encore beaucoup de données à analyser et que de nouvelles découvertes pourraient encore être faites dans les deux prochaines années. Bien qu'aucune nouvelle donnée scientifique n'ait été recueillie depuis le problème, soixante-trois nouvelles candidates ont été annoncées en juillet 2013 sur la base des observations recueillies précédemment. Les découvertes comprenaient la taille médiane des planètes candidates devenant de plus en plus petite par rapport au début 2013, résultats préliminaires à la découverte de quelques objets circumbinaires et de planètes dans la zone habitable.

2014

Le 13 février, plus de 530 planètes candidates ont été annoncées résidant autour des systèmes planétaires simples. Plusieurs d'entre elles étaient proches de la taille de la Terre et sont dans la zone habitable. Ce chiffre a été plus tard augmenté de 400 en juin 2014. Le 26 février, les scientifiques ont annoncé que les données de *Kepler* ont confirmé l'existence de 715 nouvelles exoplanètes. Une nouvelle méthode statistique de confirmation appelée « vérification par la multiplicité », qui est basé sur le nombre de planètes autour de plusieurs étoiles, sont en fait de véritables planètes. Cela a permis la confirmation plus rapide de nombreuses candidates qui font partie des systèmes planétaires multiples. 95% des exoplanètes découvertes étaient plus petites que Neptune et quatre, dont Kepler-296 f, étaient inférieures à 2 1/2 la taille de la Terre et étaient dans la zone habitable où les températures de surface sont adaptées pour l'eau liquide. En mars, une étude a montré que les petites planètes avec des périodes orbitales de moins de 1 jour sont généralement accompagnées par au moins une planète supplémentaire avec la période orbitale de 1 à 50 jours. Cette étude a également noté que les planètes avec des périodes de rotation ultra-courtes sont presque toujours inférieures à 2 rayons terrestres à moins qu'elles soient de type "Jupiter Chaude" désalignées. Les données de *Kepler* ont aussi aidé les scientifiques à observer et à comprendre les supernovas; des mesures ont été recueillies toutes les demi-heures de sorte que les courbures de lumière ont été particulièrement utiles pour l'étude de ces types d'événements astronomiques. Le 17 avril, l'équipe *Kepler* a annoncé la découverte de Kepler-186 f, la première planète de taille comparable à celle de la Terre située dans la zone habitable. Cette planète est en orbite autour d'une naine rouge. En juillet 2014, les premières découvertes utilisant les données déjà recueillies par *Kepler* ont été rapportées sous la forme d'étoiles binaires. Ces découvertes ont été obtenues à partir d'un ensemble de données d'ingénierie de Kepler qui avait été recueilli avant la campagne 0 en préparation de la mission principale K2. Le 23 septembre 2014, la NASA a indiqué que la mission K2 avait terminé la campagne 1, la première série officielle d'observations scientifiques, et que la campagne 2 était en cours.



Histogramme d'exoplanètes découvertes. La barre jaune montre les planètes nouvellement annoncées, y compris celles vérifiées par la technique de la multiplicité (26 février 2014)

2015

Le 27 janvier les scientifiques découvrent un système planétaire de 11,2 milliards d'années avec cinq exoplanètes qui tournent autour d'une étoile de type solaire. Le système Kepler-444 est à ce jour le système le plus ancien identifié de la Voie lactée, de plus elles se trouvent dans la zone habitable.

Publication des données

L'équipe de *Kepler* avait initialement promis de publier les données au bout d'un an d'observations. Toutefois, ce programme a été changé après le lancement, avec une planification de la publication des données s'étalant jusqu'à trois ans après leur collecte. Il en a résulté des critiques considérables qui ont conduit l'équipe scientifique de *Kepler* à diffuser le troisième trimestre de leurs données un an et six mois après leur collecte. Les données allant jusqu'à septembre 2010 (trimestres 4, 5 et 6) ont été rendues publiques en janvier 2012.

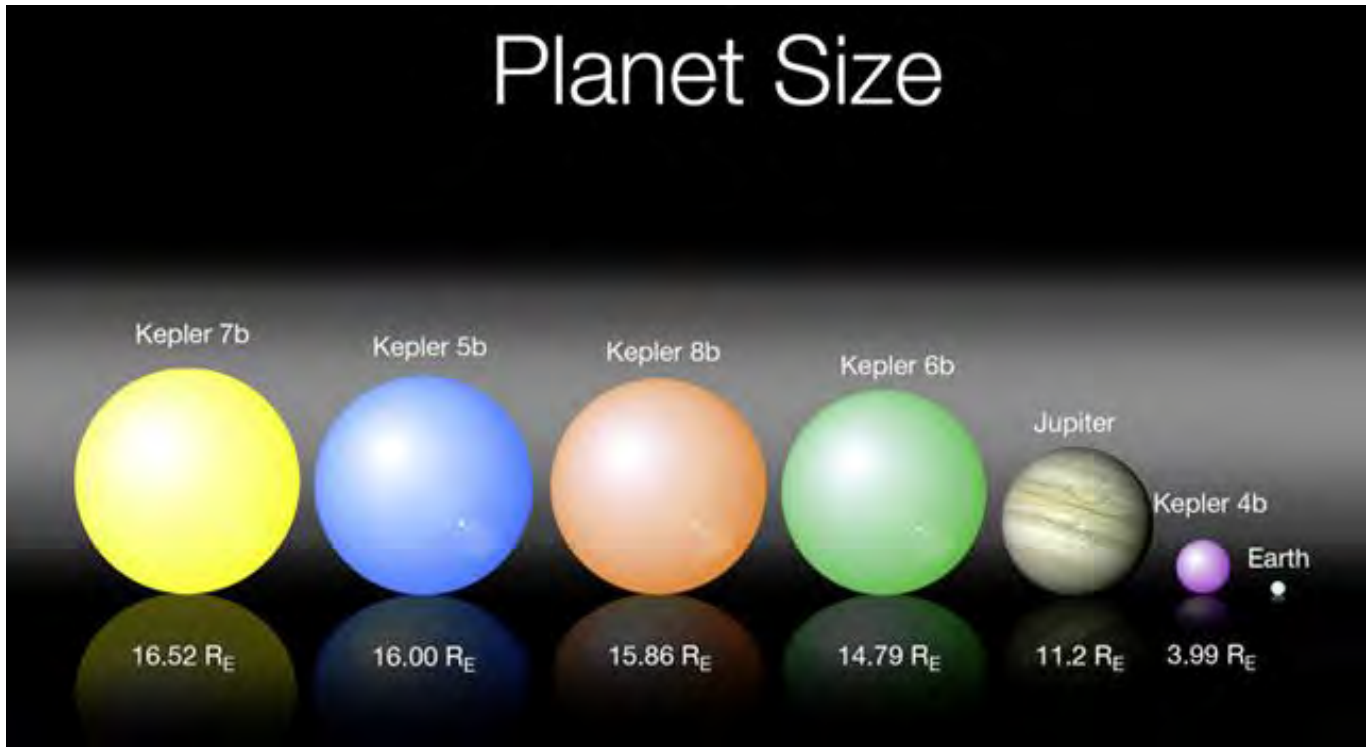
Participation scientifique citoyenne

Depuis décembre 2010, les données de la mission *Kepler* ont été utilisées pour le projet « Planethunters.org » de Zooniverse, qui permet à des volontaires de rechercher des transits dans les courbes lumineuses des images de *Kepler*, afin d'identifier des planètes que les algorithmes informatisés pourraient manquer. Vers le mois de juin 2011, les utilisateurs avaient trouvé 69 planètes candidates potentielles qui n'avaient pas été reconnues auparavant par l'équipe de la mission *Kepler*. L'équipe envisage de créditer publiquement les amateurs qui repèrent de telles planètes. En janvier 2012, le programme de la BBC intitulé *Stargazing Live* (en anglais : observation des étoiles en direct) a diffusé un appel public au volontariat pour analyser les données de Planethunters.org à la recherche de nouvelles exoplanètes potentielles. Cela a conduit à la découverte d'une nouvelle planète de la taille de Neptune par deux astronomes amateurs. Cette planète portera leurs deux noms et s'appellera donc *Threapleton Holmes B*. Selon certaines sources, 100 000 autres volontaires étaient engagés dans la recherche de Planethunters.org à la fin janvier 2012, analysant plus d'un million d'images de *Kepler*. PlanetQuest, un projet de calcul distribué utilisant la plate-forme BOINC, devrait également permettre d'analyser les données recueillies par *Kepler*.

État de la mission

En avril 2012, un comité indépendant de scientifiques seniors de la NASA a recommandé que la mission *Kepler* soit prolongée jusqu'en 2016. Selon leur analyse, il était nécessaire que les observations de *Kepler* se poursuivent au moins jusqu'en 2015 pour accomplir tous les objectifs scientifiques déclarés. Le 14 novembre 2012, la NASA a annoncé l'achèvement de la mission première de *Kepler* et le début de sa mission étendue, qui pourrait durer jusqu'à quatre ans. Le 15 août 2013, la NASA annonce son intention de renoncer à réparer les deux gyroscopes défectueux du télescope, signifiant de fait la fin de celui-ci.

Exoplanètes confirmées



Les cinq premières exoplanètes de Kepler à l'échelle

Outre la découverte de centaines d'exoplanètes candidates, le satellite *Kepler* a également signalé 26 exoplanètes dans 11 systèmes qui n'ont pas encore été ajoutées à l'*Extrasolar Planet Database* (base de données des planètes extrasolaires). Les exoplanètes découvertes à partir des données de *Kepler*, mais confirmées par des chercheurs extérieurs, incluent KOI-423b¹³⁸, KOI-428b, KOI-196b, KOI-135b, KOI-204b, KOI-254b, KOI-730 et Kepler-42 (KOI-961). L'acronyme « KOI » indique que l'étoile est un Kepler Object of Interest, c'est-à-dire en anglais un objet d'intérêt de *Kepler*. Aussi bien CoRoT que *Kepler* ont mesuré la lumière réfléchie par des planètes. Cependant, ces planètes étaient déjà connues puisqu'elles transitent devant leur étoile. Les données de *Kepler* ont permis la première découverte de planètes par cette méthode : KOI 55.01 et 55.02.

Kepler Input Catalog

Le *Kepler Input Catalog* (ou KIC) désigne le catalogue des entrées de *Kepler*. Il s'agit d'une base de données publiquement consultable d'environ 13,2 millions de cibles utilisées pour le *Kepler Spectral Classification Program* et la mission *Kepler*. Le catalogue seul n'est pas utilisé afin de trouver des cibles pour *Kepler*, car une partie seulement des étoiles listées (soit environ un tiers du catalogue) peut être observée par le vaisseau lui-même. Les *Kepler Objects of Interest* (KOI) forment un sous-ensemble du *Kepler Input Catalog* (KIC). Pour être un KOI, une étoile doit montrer une perte de luminosité périodique.

IV Résultats, typologie, situation actuelle

A) Nomenclature concernant les exoplanètes

1) Nomenclature actuellement utilisée

Le nommage normalisé des exoplanètes est une extension de celui utilisé par le *Washington Multiplicity Catalog* (WMC) pour les systèmes d'étoiles multiples, norme qui a été adoptée par l'UAI. Selon cette norme, le membre le plus brillant d'un système reçoit la lettre « A ». Les composants distincts qui ne sont pas compris dans « A » sont nommés « B », « C », etc. Les sous-composants sont désignés par un ou plusieurs suffixes ajoutés à celui du sous-système, en commençant par des lettres minuscules pour le deuxième niveau hiérarchique puis des nombres pour le troisième. Suivant une extension de la norme précédente, le nom d'une exoplanète est normalement formé en ajoutant une lettre minuscule au nom de l'étoile hôte de ladite planète. La première planète découverte se voit attribuer la désignation « b » (la lettre « a » étant réservée à l'étoile) puis les planètes suivantes sont nommées avec les lettres suivantes dans l'ordre alphabétique. Si plusieurs planètes du même système sont découvertes en même temps, la plus proche de l'étoile reçoit la première lettre suivante, et ainsi de suite en s'éloignant de l'étoile.

Si une planète orbite un membre d'un système binaire, la lettre capitale de l'étoile est alors suivie par une minuscule pour la planète. Plusieurs exemples sont aujourd'hui connus, tels 16 Cygni B b et HD 178911 B b. Les planètes en orbite autour de l'étoile primaire (étoile « A ») devraient avoir un « A b » à la suite du nom du système, comme pour HD 41004 Ab. Cependant, le « A » est parfois omis, en particulier lorsque la seconde étoile a été découverte après la (ou les) planète(s); par exemple la première planète découverte autour de l'étoile principale du système binaire Tau Bootis est habituellement appelée simplement Tau Bootis b.

Si l'étoile hôte est une étoile simple, on peut toujours considérer qu'elle possède un « A » dans sa désignation, bien qu'il ne soit habituellement pas écrit. La première exoplanète trouvée autour d'une telle étoile est alors considérée comme étant un sous-composant secondaire dudit système recevant la désignation « A b ». Par exemple, 51 Peg A a est l'étoile hôte du système 51 Peg et la première exoplanète est alors 51 Peg A b. La plupart des exoplanètes se trouvant dans des systèmes unistellaires, la désignation implicite « A » est généralement absente, ne laissant simplement que la minuscule à la suite du nom du système : 51 Peg b. Le « a » pour l'étoile est également le plus souvent omis, nommant par un petit abus l'étoile du nom du système, ici par exemple 51 Peg.

Quelques exoplanètes se sont vu attribuer des noms qui ne se conforment pas à la norme précédente. Par exemple, les planètes qui orbitent le pulsar PSR 1257 sont souvent nommées avec des capitales plutôt qu'avec des minuscules. Par ailleurs, le nom du système lui-même peut suivre plusieurs systèmes de nommage différents. Dans les faits, un certain nombre d'étoiles parmi lesquelles Kepler-11 n'ont reçu leur nom que grâce à leur inclusion dans un programme de recherche de planètes, n'étant jusque-là référencées que par leurs coordonnées célestes. Cependant Hessman *et al.* fit la remarque que le système implicite utilisé pour les noms d'exoplanètes tombait totalement en échec avec la découverte de planètes circumbinaires. Ils notent que les découvreurs des deux planètes autour de HW Virginis ont essayé de contourner le problème de nommage en les appelant « HW Vir 3 » et « HW Vir 4 », c'est-à-dire comme étant les troisième et quatrième objets (stellaires ou planétaires) découverts dans le système. Ils notent également que les découvreurs des deux planètes autour de NN Serpentis ont été confrontés à de multiples suggestions émanant de diverses sources officielles et choisirent finalement d'utiliser les désignations « NN Ser c » et « NN Ser d ». Hessman *et al.* ont alors proposé deux règles afin de remédier à ce problème. Ils notent que, en suivant ces deux règles, 99 % des noms actuels de planètes autour d'étoiles simples sont conservés comme des formes informelles de la forme provisoire sanctionnée par l'UAI. Ils renommeraient simplement Tau Bootis b officiellement en Tau Bootis Ab, en conservant la forme précédente pour un usage informel. Pour faire face aux difficultés liées aux planètes circumbinaires, la proposition contient deux règles supplémentaires, où l'utilisation de parenthèses autour du nom du couple d'étoiles centrales est à privilégier dans le cas de planètes dans cette situation. Ils indiquent que cela ne nécessite le changement de nom complet que de deux systèmes exoplanétaires : les planètes autour HW Virginis serait rebaptisé HW Vir (AB) b et (AB) c tandis que ceux autour NN Serpentis serait rebaptisé NN Ser (AB) b et (AB) c. En outre, les seules planètes circumbinaires connues antérieurement

autour de PSR B1620-26 et DP Leonis peuvent presque conserver leurs noms (PSR B1620-26 b et DP Leonis b) comme des formes officielles informelles de la forme « (AB) b » où la désignation « (AB) » est laissée de côté.

2) De nouvelles difficultés

À la suite de la récente découverte de PH1b, de nouvelles difficultés sont apparues. En effet, cette planète tourne autour d'un système binaire faisant lui-même partie d'un système double-double (système binaire de systèmes binaires) nommé KIC 4862625. Les auteurs de l'article annonçant sa découverte ont évité ce problème en la nommant de façon provisoire « PH1 » (Planet Hunters 1), du nom du programme l'ayant découverte. En effet, PH1 tourne autour de la paire KIC 4862625 A (aussi notée KIC 4862625 Aa+Ab ou encore KIC 4862625 Aab, normalement A(ab) de façon plus correcte, pour bien indiquer les deux composantes), composée des étoiles individuelles KIC 4862625 Aa et KIC 4862625 Ab, et l'autre paire est nommée KIC 4862625 B (aussi KIC 4862625 Ba+Bb ou KIC 4862625 Bab) et composée de KIC 4862625 Ba et KIC 4862625 Bb. La logique exposée ci-dessus plaide en la faveur d'un nommage de la forme KIC 4862625 A(ab)I ou KIC 4862625 (Aa+Ab)I, les chiffres romains étant l'étape suivante usuelle après les lettres minuscules. Cependant cela rompt avec le nom habituel des exoplanètes avec une lettre minuscule en plaçant la planète au même niveau que d'éventuels satellites d'autres planètes ne tournant autour que d'une seule étoile ou d'un système multiple « simple ». Quoi qu'il en soit, on peut remarquer que l'équipe de l'*Encyclopédie des planètes extrasolaires* l'a déjà nommée de façon systématique KIC 4862625 b, nom on ne peut plus ambigu (autour de quelle(s) composante(s) la planète tourne-t-elle exactement ?) mais évitant le problème sus-mentionné. L'UAI ayant le dernier mot, ce sera à elle de prendre la décision finale attribuant le nom officiel à la planète.

B) Autres systèmes de nommage

1) Autres systèmes « catalogue »

Une autre nomenclature, souvent vue dans les œuvres de science-fiction, utilise les chiffres romains dans l'ordre des positions des planètes de l'étoile. Cela a été inspiré par un ancien système pour nommer les lunes des planètes extérieures, telles que « Jupiter IV » pour Callisto. Mais un tel système n'est pas pratique pour un usage scientifique, puisque de nouvelles planètes peuvent être trouvées plus près de l'étoile, changeant alors tous les chiffres. Cependant, ces chiffres romains semblent être la forme qui sera utilisée pour désigner les satellites de planètes extrasolaires, mais en conservant l'ordre de la numérotation suivant l'ordre de découverte comme pour les planètes ou les lunes de notre propre Système solaire.

2) Noms populaires

Enfin, plusieurs planètes ont reçu de façon non officielle de « vrais » noms à la façon de ce qui se fait dans notre Système solaire : on peut notamment citer Osiris (HD 209458 b), Bellérophon (51 Pegasi b), Zarmina (Gliese 581 g) et Mathusalem (PSR B1620-26 b). Wladimir Lyra, de l'Institut Max-Planck d'astronomie, a proposé des noms provenant pour la plupart de la mythologie gréco-romaine pour les 403 candidates planètes extrasolaires connues en octobre 2009. Cependant l'Union astronomique internationale (UAI) avait annoncé qu'elle n'avait aucun projet d'assigner des noms de ce genre aux planètes extrasolaires, considérant que ce n'est pas pratique. L'Union astronomique internationale, seul arbitre dans le processus de nomenclature par sa commission 53, ne reconnaît pas les noms donnés aux planètes extrasolaires *via* des sites marchands. Elle annonce cependant le 19 août 2013 sa décision de donner des noms populaires aux exoplanètes, en invitant le public à lui suggérer des noms. En 2015, un vote dédié aux associations astronomiques, puis un vote grand public est mis en place par l'Union astronomique internationale afin de nommer les exoplanètes via le concours NameExoWorlds.

C) Historique

1) Prémices

La question « Sommes-nous seuls dans l'Univers ? » est ancienne. Elle entraîne la question de savoir s'il existe ou non d'autres planètes sur lesquelles pourraient se développer d'autres formes de vie. Au XVI^e siècle, Giordano Bruno, partisan de la théorie de Nicolas Copernic selon laquelle la Terre et les autres planètes seraient en orbite autour du Soleil, a mis en avant une théorie selon laquelle les étoiles sont telles le Soleil et ainsi accompagnées de planètes. Au XVIII^e siècle, Isaac Newton fait de même dans le *General Scholium*, la conclusion de ses *Principia* : « Et si les étoiles fixes sont les centres de systèmes

semblables, ils seront alors tous construits selon le même concept et sujets à la domination de l'*Un*. » (« And if the fixed stars are the centers of similar systems, they will all be constructed according to a similar design and subject to the dominion of *One* »). Christiaan Huygens est le premier astronome à envisager l'utilisation des instruments d'observation afin de détecter de telles planètes. À la fin du XX^e siècle, grâce aux progrès technologiques des télescopes, tels que les détecteurs à couplage de charge (CCD), le traitement d'image, ainsi que le télescope spatial Hubble, qui permettent des mesures plus précises du mouvement des étoiles, beaucoup d'astronomes espéraient détecter des planètes extrasolaires. Dans les années 1980 et au début des années 1990, quelques annonces sont faites mais démenties après vérification. Il faut attendre l'année 1995 pour que la découverte de la première exoplanète soit confirmée.

2) « Découvertes » rétractées

Des découvertes d'exoplanètes ont été revendiquées dès le XIX^e siècle. Plusieurs annonces parmi les plus anciennes impliquent l'étoile binaire 70 Ophiuchi. En 1855, le capitaine W. S. Jacob à l'observatoire de Madras de la *British East India Company* relève des anomalies qui rendent la présence d'un « corps planétaire » dans ce système « hautement probable ». Dans les années 1890, Thomas J. J. See de l'université de Chicago et de l'*United States Naval Observatory* énonce que les anomalies prouvent l'existence d'un corps sombre dans le système de 70 Ophiuchi, avec une période orbitale de 36 ans autour de l'une des étoiles. Néanmoins, Forest Ray Moulton publie alors un article prouvant qu'un système à trois corps avec de tels paramètres orbitaux serait hautement instable. Durant les années 1950 et 1960, Peter van de Kamp du Swarthmore College fait une autre série remarquée de revendications de détection, cette fois pour des planètes en orbite autour de l'étoile de Barnard. De nos jours, les astronomes considèrent généralement tous les anciens rapports de détection comme erronés. En 1991, Andrew G. Lyne, M. Bailes et S.L. Shemar ont revendiqué la découverte d'une planète de pulsar en orbite autour de PSR B1829-10, en utilisant la mesure des infimes variations de la périodicité des pulsars, qui permettent de calculer les principaux paramètres orbitaux des corps responsables de ces perturbations (*chronométrie de pulsar*). L'annonce a brièvement fait l'objet d'une attention intense, mais Lyne et son équipe l'ont ensuite rétractée.

3) Découvertes

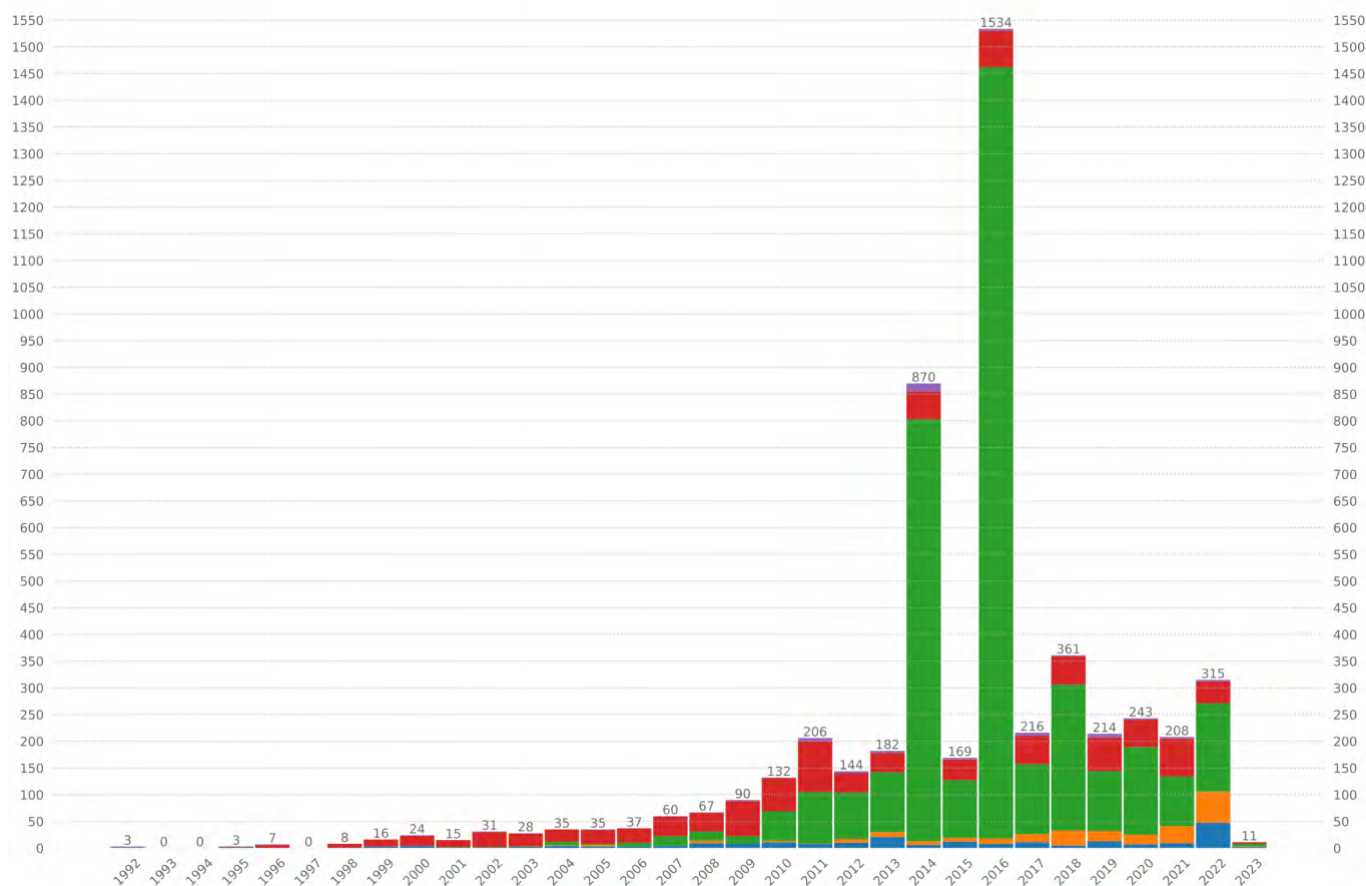
Le premier objet de masse planétaire confirmé fut annoncé dans la revue *Nature* le 4 mai 1989 par David W. Latham, Robert P. Stefanik, Tsevi Mazeh, Michel Mayor et Gilbert Burki autour de l'étoile de type solaire nommée HD 114762 : il s'agit de HD 114762 b, un objet d'une masse minimale de 11 fois la masse de Jupiter qui peut donc, selon l'inclinaison de son orbite et la définition adoptée, être une planète ou une naine brune.

En septembre 1990, Aleksander Wolszczan et Dale Frail (du radiotélescope d'Arecibo) découvrent plusieurs planètes autour du pulsar PSR B1257+12, qu'ils annoncent le 9 janvier 1992. Le 6 octobre 1995 Michel Mayor et Didier Queloz (de l'observatoire de Genève) ont annoncé la découverte du premier objet dont la masse en fait sans nul doute une planète en orbite autour d'une étoile de type solaire : le Jupiter chaud nommé 51 Pegasi b, en orbite autour de l'étoile 51 Pegasi. Cette découverte a été faite grâce à des observations qu'ils ont réalisées à l'observatoire de Haute-Provence grâce à la méthode des vitesses radiales. Ce système, situé dans la constellation de Pégase, se trouve à environ 40 années-lumière de la Terre.

Depuis lors, près de 2000 planètes ont été détectées, et plus de 3000 candidats supplémentaires sont en attente de confirmation. Plus de la moitié ont été découvertes à l'université de Genève par des équipes internationales. Le premier système où l'on a détecté plusieurs planètes était Upsilon Andromedae, dans la constellation d'Andromède. Le deuxième fut 55 Cancri.

La majorité des planètes détectées pour l'instant sont des géantes gazeuses ayant une orbite très excentrique, certaines se sont finalement révélées être des naines brunes.) Le fait de découvrir essentiellement des géantes gazeuses proches de leur étoile est généralement interprété comme un biais de l'observation : il est beaucoup plus simple de découvrir une planète massive tournant rapidement autour de son étoile par la méthode de la vitesse radiale qui détecte la planète en interpolant sa présence par les fluctuations de la trajectoire de l'étoile. Au premier semestre 2005, une polémique a agité le monde astronomique. Des équipes de la NASA et de l'ESO ont annoncé des découvertes grâce au VLT et au

télescope spatial Spitzer. Finalement, il semble que l'Europe a bien obtenu les premières images directes de planètes extrasolaires. En l'occurrence, elles orbitent autour de la naine brune GPCC-2M1207 et de l'étoile GQ Lupi. Cela dit, le compagnon de GQ Lupi est probablement une naine brune. En novembre 2009, le « mystère du lithium » est résolu grâce aux données compilées sur les exoplanètes et leurs étoiles. Garik Israelian : « Nous venons de découvrir que la quantité de lithium dans les étoiles semblables au Soleil dépend de la présence, ou non, de planètes. » Les étoiles à planètes contiennent moins de 1 % de la quantité de lithium des autres étoiles. Par la suite, l'emballage médiatique concernant de prétendues découvertes d'exoplanètes habitables fait l'objet de critiques.



Évolution du nombre d'exoplanètes découvertes chaque année selon la méthode de détection (mise à jour : février 2023)

Évolution du nombre d'exoplanètes découvertes chaque année selon la méthode de détection (dernière mise à jour : janvier 2020). Vitesses radiales Transit astronomique Synchronicité Imagerie directe Microlentilles gravitationnelles .

4) Types d'exoplanètes

Les différents types de planètes sont soit avérés ou bien demeurent pour le moment hypothétiques. Il y a plusieurs classifications. D'abord, une classification structurelle range les planètes dans des catégories par rapport à leur composition, telles planète tellurique ou planète gazeuse, ou par rapport à leur masse, telles sous-Terre ou super-Jupiter. D'un autre côté, une autre classification range les planètes selon leur température : Jupiter chaud, Jupiter froid, etc. Une troisième classification est faite par rapport à la position, par exemple : planète Boucles d'or, objet libre de masse planétaire. Il existe aussi des catégories transverses, par exemple planète à période de révolution ultra-courte. Dès l'an 2000, des classifications taxinomiques sont aussi suggérées. En 2000, la classification de Sudarsky établit cinq classes de planètes et ne concerne que les géantes gazeuses, sur la base de modèles numériques reposant sur les types d'atmosphères les plus probables pour ce genre de corps. En 2012, la taxonomie de Plávalová donne une description symbolique des principales caractéristiques d'une planète afin de pouvoir effectuer une comparaison rapide entre les diverses propriétés de ces objets.

5) Liste d'exoplanètes – Inventaire



90 % des planètes découvertes à ce jour l'ont été dans un rayon de 2 000 années-lumière autour du Soleil, ce qui est très réduit à l'échelle galactique (image jpl-NASA)

Au 19 avril 2014 on recense 1.783 exoplanètes dans 1.105 systèmes planétaires dont 460 multiples. La Voie lactée posséderait à elle seule plus de 100 milliards de planètes voire plus de 200 milliards. Par ailleurs, même si aucun n'a encore été formellement identifié, nombre d'entre elles possèdent certainement des satellites. Selon une étude publiée en novembre 2013 dans les *Proceedings of the National Academy of Sciences*, le nombre de planètes semblables à la Terre présentes dans notre galaxie est estimé à environ 8,8 milliards. Le 26 février 2014 la NASA annonce la confirmation de 715 nouvelles exoplanètes détectées grâce au télescope spatial *Kepler*. Ce faisant, le nombre d'exoplanètes confirmées passe la barre des 1.700. Au printemps 2015, on recense 1.120 étoiles avec planètes, 463 systèmes multiples, 450 géantes gazeuses, 1 061 Jupiters chauds, 206 super-Terres et 92 planètes terrestres.

D) Quelques exoplanètes remarquables :

1990

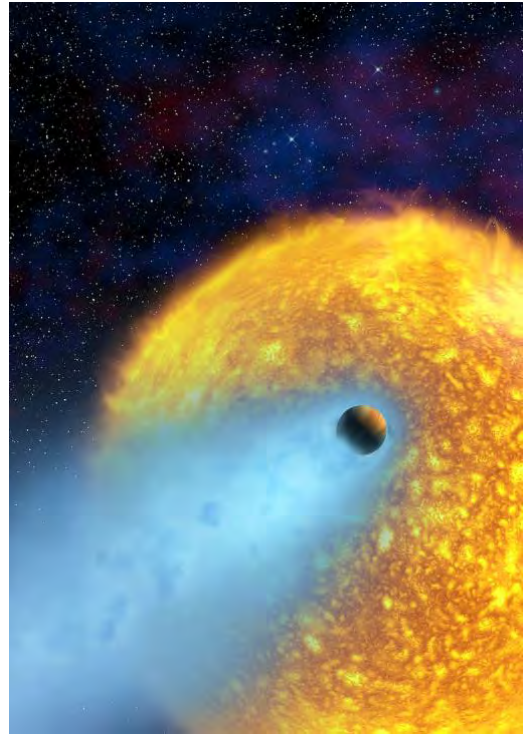
- En 1990, Aleksander Wolszczan découvre les premières exoplanètes grâce au radiotélescope d'Arecibo. Elles gravitent autour du pulsar PSR B1257+12 situé dans la constellation de la Vierge. Ce système abrite quatre exoplanètes.

1995

- En octobre 1995, Michel Mayor et Didier Queloz annoncent avoir découvert la première exoplanète en orbite autour d'une étoile similaire au Soleil (comprendre : une étoile de la séquence principale) : 51 Pegasi b.

1999

- C'est en 1999 que l'on détecte la première géante gazeuse, Osiris, contenant de l'oxygène et du carbone dans son atmosphère. Cette planète étant très proche de son étoile, elle voit son atmosphère être *soufflée* par cette dernière. Ce phénomène a poussé les scientifiques à imaginer une classe particulière d'exoplanètes, les planètes chthoniennes, qui sont des résidus rocheux de géantes gazeuses à l'atmosphère soufflée par leur étoile.



Vue d'artiste représentant l'évaporation d'Osiris

2005

- En 2005, pour la première fois, des astronomes ont pu discerner la lumière émise directement par deux planètes, malgré la lueur éblouissante et toute proche de leurs étoiles. Jusqu'alors, les découvertes n'étaient qu'indirectes, en regardant les perturbations exercées par les planètes sur leurs étoiles ou en mesurant une baisse de luminosité lors d'un transit. Cette fois, deux découvertes presque simultanées ont été faites par deux équipes différentes observant des planètes différentes. Mais comme les deux équipes ont toutes deux utilisé le télescope spatial infrarouge américain Spitzer, la Nasa a décidé de profiter de l'occasion pour annoncer les deux découvertes en même temps. Il est cependant important de préciser que les deux exoplanètes observées avaient déjà été détectées auparavant grâce à la technique de la vitesse radiale.
- Le 14 juillet 2005, l'astrophysicien Maciej Konacki du California Institute of Technology (Caltech) a annoncé dans la revue *Nature* la découverte d'une exoplanète (HD 188753 Ab) dans un système de trois étoiles qui se trouve à 149 années-lumière de la Terre. Grâce au télescope Keck 1 de Hawaï, il a pu trouver cette planète dont la révolution autour de son étoile se fait en moins de quatre jours. Les modèles actuels (juillet 2005) de formation des planètes n'expliquent pas comment une telle planète peut se former dans un environnement si instable d'un point de vue gravitationnel. Cette planète a été surnommée « planète Tatooine » par son découvreur en hommage à la planète du même nom dans la saga *Star Wars*.

2006

- Le 26 janvier 2006, le Probing Lensing Anomalies NETwork (PLANET) dirigé par le Français Jean-Philippe Beaulieu a découvert la planète OGLE-2005-BLG-390L b qui semble être la première exoplanète tellurique connue. Cette planète se situe à 22 000 années-lumière de la Terre. Sa masse vaut environ cinq fois celle de la Terre, sa température (moyenne de surface) est estimée à -220°C (53 K), ce qui laisse supposer qu'il s'agit d'une planète solide.
- Le 17 mai 2006, une équipe de chercheurs de planètes (dont Michel Mayor fait partie) annonce la découverte, grâce au spectrographe HARPS, de trois planètes de type « neptunien » (le « Trident de

Neptune ») autour de l'étoile de type solaire HD 69830. Les masses sont respectivement de 10, 12 et 18 fois la masse terrestre (ce qui est relativement faible, Jupiter fait 317 fois la masse de la Terre). Ce système possède probablement une ceinture d'astéroïdes à environ 1 UA de l'étoile.

- Le 4 août 2006, Ray Jayawardhana et Valentin Ivanov ont repéré, grâce au New Technology Telescope de 3,5 m de l'observatoire de La Silla de l'Observatoire européen austral (ESO), Oph 162225-240515, un système double à deux naines brunes tournant l'une autour de l'autre et flottant librement dans l'espace.

- Le 25 août 2006, une planète, Mu Arae d ou la *Vénus de Mu Arae*, de 14 masses terrestres a été découverte. Cette masse étant en deçà d'une limite théorique de 15 masses terrestres en dessous de laquelle une planète peut être tellurique, les scientifiques pensent qu'il peut s'agir d'une très grosse planète rocheuse, la première de ce type qui serait donc découverte. Néanmoins, il peut tout aussi bien s'agir d'une très petite planète gazeuse.

- Le 18 septembre 2006, une équipe d'astronomes du Smithsonian annonce la probable découverte d'un nouveau type de planète : avec un rayon équivalent à 1,38 fois celui de Jupiter mais n'ayant même pas la moitié de sa masse, c'est l'exoplanète la moins dense jamais découverte. Cela lui confère une densité inférieure à celle du liège. L'objet est baptisé HAT-P-1 b; son étoile est l'astre principal d'un système double, situé à quelque 450 années-lumière de la Terre dans la constellation du Lézard et connu sous le nom ADS 16402. Les deux étoiles sont similaires au Soleil mais plus jeunes, environ 3,6 milliards d'années.

- Le 5 octobre 2006, Kailash Sahu, du Space Telescope Science Institute de Baltimore, et ses collègues américains, chiliens, suédois et italiens auraient découvert, grâce au télescope spatial Hubble, 5 exoplanètes d'une nouvelle classe baptisées « planètes à période de révolution ultra-courte » (USPP : *Ultra-Short-Period Planet*) parce qu'elles font le tour de leur astre en moins d'une journée terrestre, 0,4 jour (moins de 10 heures) pour la plus rapide. Les objets semblent être des planètes gazeuses géantes de faible densité similaires à Jupiter, tournant autour d'étoiles plus petites que le Soleil.

2007

- Le 25 avril 2007, le télescope *Harp*s de 3,6 m de l'observatoire de La Silla de l'ESO au Chili annonce la découverte d'une planète « de type terrestre habitable » : Gliese 581 c, orbitant autour de l'étoile Gliese 581 située à seulement 20,5 années-lumière de la Terre. Trois laboratoires associés du CNRS ont participé à la découverte, avec des chercheurs de l'Observatoire de Genève et du Centre d'astronomie de Lisbonne.

- Le 8 novembre 2007, une équipe d'astronomes conduite par Debra Fischer (San Francisco State University) et Geoffrey Marcy (University of California, Berkeley) a découvert une cinquième planète autour de 55 Cancri, une étoile située à 41 années-lumière dans la constellation du Cancer, faisant de ce système, le plus « peuplé » en exoplanètes connu à ce jour.

2008

- Le 2 janvier 2008, l'Institut Max-Planck de recherche sur le Système solaire (Heidelberg en Allemagne) annonce avoir découvert une jeune planète en formation dans le disque circumstellaire de TW Hydrae, une étoile de moins de 10 millions d'années qu'elle frôle à moins de 0,04 unité astronomique, soit 25 fois moins que la distance entre la Terre et le Soleil. L'étude de cette planète gazeuse dix fois plus massive que Jupiter devra permettre de mieux comprendre la formation des planètes. Il s'agit de la première planète détectée autour d'une étoile de moins de 100 millions d'années. Cette découverte, qui a été faite grâce au spectrographe Feros installé sur l'observatoire de La Silla (ESO) au Chili, pourrait remettre en cause la « théorie de la migration » qui établissait que les exoplanètes de type « Jupiter chaud » se formaient à une distance beaucoup plus éloignée de leur étoile et ne s'en rapprochaient qu'ensuite.

- MOA-2007-BLG-192L b devient la planète extrasolaire la plus légère connue après PSR 1257+12 A (planète en orbite autour d'un pulsar). C'est une terre glacée 3,3 fois plus massive (seulement) que la Terre en orbite autour d'une naine rouge ou une naine brune. Elle a été découverte par microlentille gravitationnelle.

- Le 13 novembre 2008 est annoncée la découverte de la première planète extrasolaire, Fomalhaut b, par visualisation directe sur une photographie coronographique provenant du télescope spatial Hubble.
- Toujours le 13 novembre 2008 est annoncée la découverte, par les télescopes Keck et Gemini à Hawaï, d'un système de 3 planètes, HR 8799, et ce grâce à la technique d'imagerie directe.

2009

- Le 3 février 2009 est annoncée la découverte par le satellite CoRoT de CoRoT-7 b, la plus petite des exoplanètes jamais observées à ce jour qui fait près de deux fois le diamètre de la Terre et rentrant dans la catégorie des Super-Terre. Très proche de son étoile où elle accomplit une révolution en 20 heures, elle est également très chaude avec une température comprise entre 1 000 et 1 500 °C.
- Le 16 décembre 2009 est annoncée la découverte de la planète Gliese 1214 b, qui serait composée d'une grande quantité d'eau, autour de l'étoile Gliese 1214.

2010

- Le 24 août 2010 est annoncée la découverte d'un système de 5 à 7 planètes autour de l'étoile HD 10180 (dans la constellation de l'Hydre mâle). À ce jour, c'est l'étoile possédant le plus grand nombre de planètes dans un système extrasolaire.
- Le 26 août 2010 est annoncée la découverte du premier transit multiple (2 planètes) autour de l'étoile Kepler-9.
- Le 29 septembre 2010 est annoncée la découverte de Gliese 581 g, sixième exoplanète découverte autour de la naine rouge Gliese 581, qui en raison de sa masse (environ 3 à 4 fois celle de la Terre), de ses températures, de sa localisation dans la zone habitable à 0,146 UA, et de sa possibilité de retenir une atmosphère, est à ce moment l'exoplanète présentant la plus haute habitabilité et probabilité d'abriter des formes de vie.
- Le 18 novembre 2010 est annoncée la découverte de HIP 13044 b, planète géante, elle se trouve à quelque 2 200 années-lumière de la Terre, autour de l'étoile HIP 13044, dans la constellation du Fourneau. Découverte particulière car c'est la première détection d'un système planétaire d'origine extragalactique (originaire d'une autre galaxie) à la suite de la fusion cosmique entre la Voie lactée et cette autre galaxie (il y a six à neuf milliards d'années).

2011

- Le 3 février 2011 est annoncée la découverte du système planétaire de Kepler-11, contenant six planètes en transit sur des orbites particulièrement serrées.
- Le 29 avril 2011 est annoncée la détection du transit de 55 Cancri e, une super-Terre autour d'une étoile visible à l'œil nu.
- Le 19 mai 2011 est annoncée la découverte par micro lentille gravitationnelle d'une importante population de planètes errantes, éjectées par leur étoile. Elles seraient environ deux fois plus nombreuses que les étoiles de la séquence principale.
- Le 21 octobre 2011 : observation d'une géante gazeuse en formation assez similaire à Jupiter : LkCa 15 b.
- Le 20 décembre 2011 est annoncée la découverte des deux premières planètes de taille terrestre, Kepler-20 e et Kepler-20 f, ayant respectivement un rayon de 0,868 et 1,034 fois celui de la Terre, dans un système comptant désormais au moins cinq planètes.

2012

- Le 11 janvier 2012 sont découvertes trois planètes dont la taille est comprise entre celle de Mars et de Vénus, autour de Kepler-42 (encore appelée KOI-961 à l'époque).
- Le 18 décembre 2012 est annoncée la découverte de 5 planètes en orbite autour de l'étoile Tau Ceti dont les masses sont évaluées respectivement à 2, 3,1, 3,6, 4,3 et 6,6 masses terrestres et dont les périodes seraient respectivement de 13,9, 35,4, 94, 168 et 640 jours. Deux d'entre elles, Tau Ceti e et Tau Ceti f, sont dans la zone habitable du système.

2013

- Le 7 janvier 2013, des astronomes affiliés à la mission Kepler annoncent la découverte de KOI-172.02, une candidate au titre d'exoplanète moins de deux fois plus grande que la Terre et qui orbite en zone habitable autour d'une étoile de type G. Il s'agit de la première planète de ce type découverte par l'instrument Kepler car elle orbite autour d'une étoile de même type que le Soleil.

2014

- Le 17 avril, la découverte grâce au télescope spatial *Kepler* de cinq planètes autour de l'étoile naine rouge Kepler-186 est annoncée. Ces cinq planètes, de taille proche de celle de la Terre, sont toutes probablement rocheuses. Parmi ces planètes, Kepler-186 f, la plus éloignée de l'étoile, se trouve en plus dans la zone habitable de Kepler-186.

2015

- Au printemps, 21 planètes ont été répertoriées, portant toutes le nom principal de Kepler, le satellite ayant permis leur découverte, et numérotées de 434b à 447b.
- Le 23 juillet 2015, la NASA annonce la détection via son télescope spatial *Kepler* d'une nouvelle planète nommée Kepler-452 b, à 1.400 années-lumière de notre système solaire, que plusieurs paramètres (type spectral de l'étoile hôte, dimensions de l'orbite, dimensions de la planète qui en font une super-Terre) rapprochent globalement de la Terre davantage que toute autre exoplanète connue à ce jour.

.../...

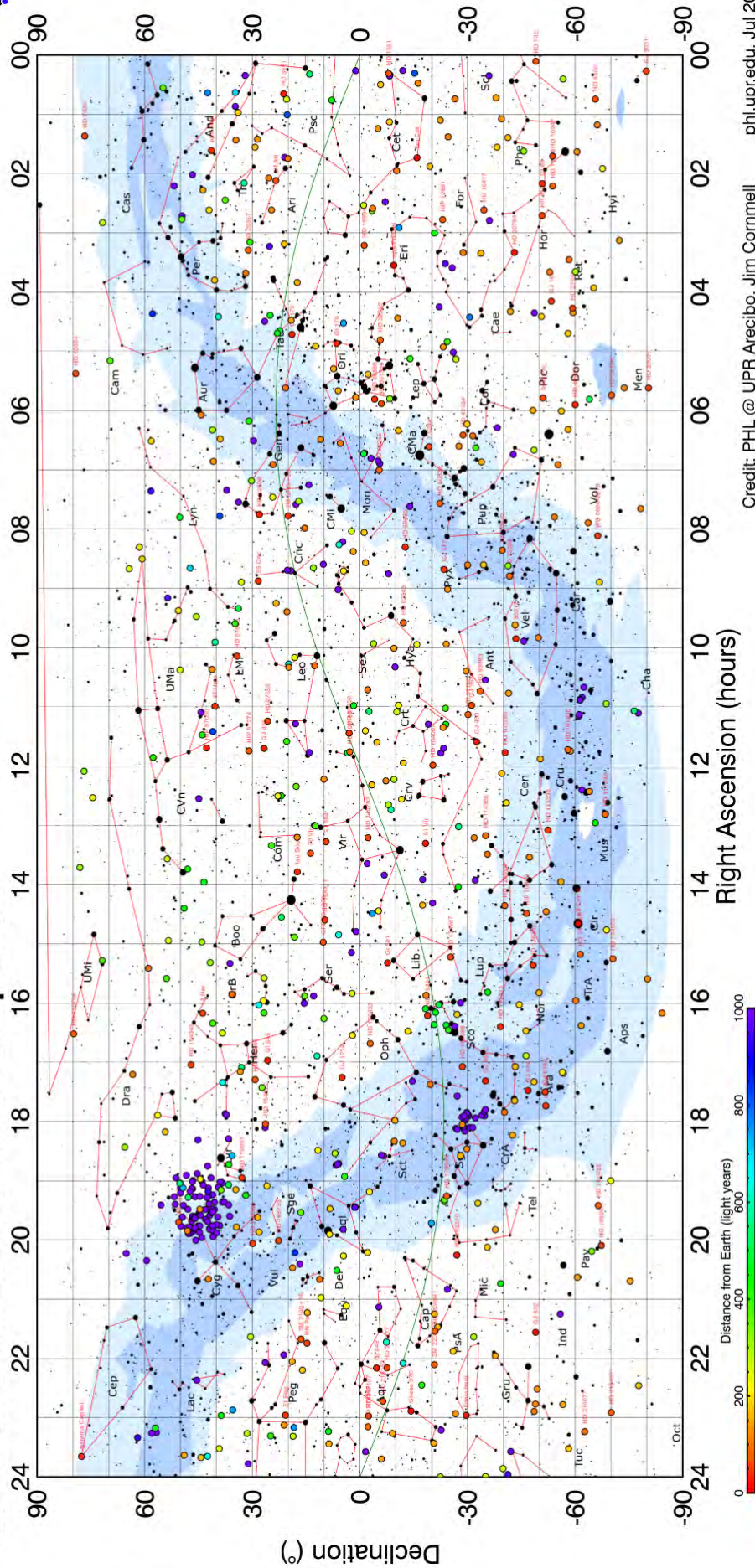
A la date du 13 mars 2023, on décompte un total de 5.333 exoplanètes certifiées dans 3.932 systèmes planétaires différents dont 855 sont des systèmes multiples (et comptent donc 2 exoplanètes ou plus).

Méthode de découverte	Nb Planètes	Nb Systèmes	dont multiples
Astrométrie ou vitesse radiale	1050	775	181
Transit	3732	2760	630
Imagerie	217	118	8
Lentille gravitationnelle	228	208	10
Timing (pulsars)	48	41	5
Divers	58	30	21
Total	5333	3932	855

Exoplanètes découvertes depuis la première (en 1995) : Une tous les 2,37 jours
Exoplanètes découvertes en 2023 : Une tous les 3,31 jours

Le gros inconvénient de ces chiffres est qu'ils changent en permanence !

Location of All the Stars with Exoplanets



Credit: PHL @ UPR Arecibo, Jim Cornwell

phl.upr.edu, Jul 2013

Emplacement (dans notre ciel) de toutes les étoiles dotées d'exoplanètes (juillet 2013)

Table des matières

I	Introduction.....	1
II	Les méthodes de détection des exoplanètes	4
A)	Méthode interférométrique.....	5
B)	Par la vitesse radiale	5
C)	Par le transit	8
1-	Transit primaire (méthode indirecte)	8
2-	Transit secondaire (méthode semi-directe).....	9
D)	Par astrométrie.....	9
E)	Par l'effet de microlentille gravitationnelle	9
F)	Par imagerie directe.....	10
1)	Optique adaptative « extrême »	11
2)	Coronographes stellaires.....	12
3)	Imagerie spéciale ou traitement d'image.....	14
III	Le télescope spatial Kepler	15
IV	Résultats, typologie, situation actuelle.....	31
A)	Nomenclature concernant les exoplanètes	31
1)	Nomenclature actuellement utilisée.....	31
2)	De nouvelles difficultés	32
B)	Autres systèmes de nommage	32
1)	Autres systèmes « catalogue ».....	32
2)	Noms populaires	32
C)	Historique	32
1)	Prémices	32
2)	« Découvertes » rétractées	33
3)	Découvertes	33
4)	Types d'exoplanètes.....	34
5)	Liste d'exoplanètes – Inventaire.....	35
D)	Quelques exoplanètes remarquables :.....	35
	Emplacements d'étoiles dotées d'exoplanètes	40
	Table des Matières	41