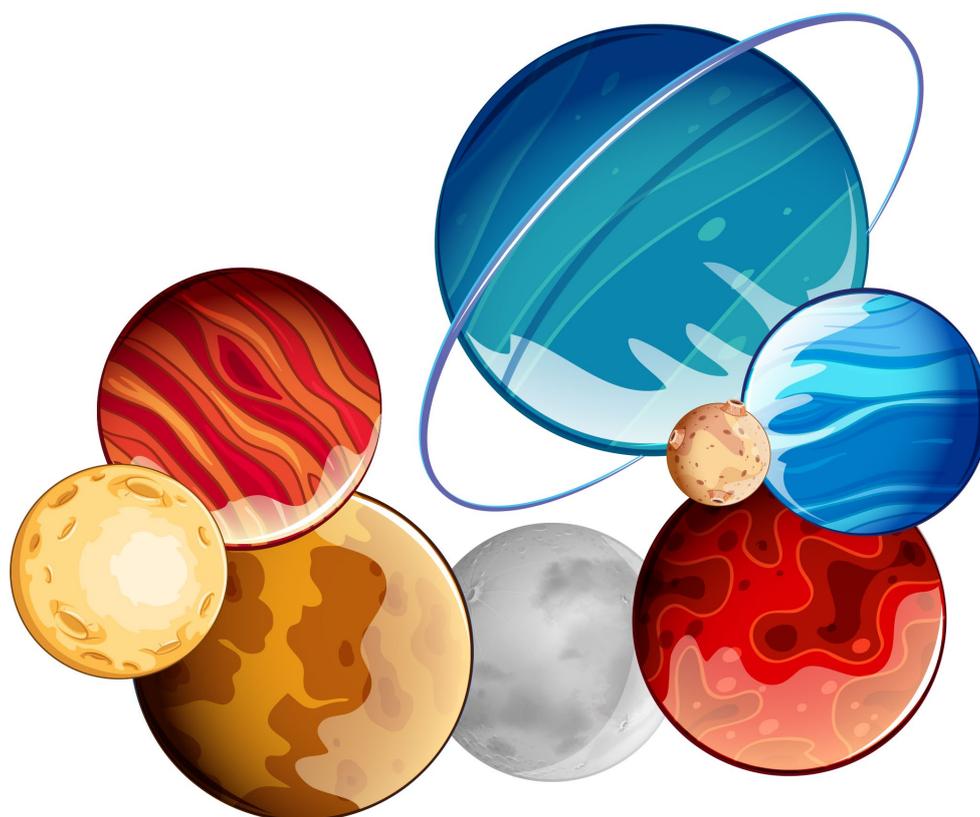


cité

**sciences
et industrie**

Les exoplanètes

Enseignants de coll ge et de lycée



Département  ducation et Formation
educ-formation@universcience.fr

2022

Sommaire

Les exoplanètes

1	La détection directe	4
2	La détection indirecte	7
	2.1 L'astrométrie	7
	2.2 La méthode des vitesses radiales	9
	2.3 Les transits planétaires	17
	2.4 Les microlentilles gravitationnelles	24
3	Récapitulatif des avantages et défauts des différentes méthodes de détection	26
4	La grande diversité des exoplanètes	28
5	Bibliographie et sitographie	
	5.1 Bibliographie	30
	5.2 Sitographie	33
	Annexe : quelques calculs d'angles	35

Les **exoplanètes**, ou **planètes extrasolaires**, sont des planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil. Elles ne font donc pas partie du système solaire et sont extrêmement lointaines. Leur existence a longtemps été suspectée, faisant écho à la question *Y a-t-il de la vie ailleurs que sur Terre ?* La découverte des premières exoplanètes dans la dernière décennie du XX^e siècle les a fait entrer de plain-pied dans la réalité astronomique.

Planète, étoile : un critère de masse

Des considérations théoriques indiquent qu'un astre 75 à 80 fois plus massif que la planète Jupiter possède des températures et des pressions suffisantes pour que s'enclenchent des réactions de fusion thermonucléaires de l'hydrogène (¹H) en son cœur : c'est une *étoile*.

Un corps céleste dont la masse est inférieure à environ 13 fois celle de Jupiter ne peut donner naissance à aucune réaction nucléaire : c'est une *planète*, d'après la définition utilisée en pratique par les chercheurs d'exoplanètes.

Les corps de masse intermédiaire ($13 M_{\text{Jupiter}} < m < 75-80 M_{\text{Jupiter}}$) sont appelés *naines brunes*. Leur masse est suffisante pour déclencher la fusion thermonucléaire du deutérium (²H, un isotope naturel stable de l'hydrogène) mais pas celle de l'hydrogène (¹H). La première fut détectée en 1995. Une naine brune peut, à une certaine époque, avoir réussi à démarrer des réactions de fusion, mais n'avoir jamais atteint un état stable et avoir fini par « s'éteindre ». C'est en quelque sorte une étoile avortée. Une fois la courte phase de réactions nucléaires terminée, la chaleur émise par une naine brune provient uniquement de sa contraction gravitationnelle.

Rappelons que la masse de la planète Jupiter vaut environ 318 fois la masse de la Terre. Il s'agit, et de loin, la planète la plus massive du système solaire. La limite des 13 masses joviennes est plus une règle empirique qu'une règle physique immuable. La quantité de deutérium consommée dépend, par exemple, de la composition chimique du corps céleste (celle-ci détermine l'opacité de l'atmosphère et donc le taux de refroidissement radiatif). Un catalogue d'exoplanètes comme l'Encyclopédie des planètes extrasolaires (<http://exoplanet.eu>) inclut ainsi des objets de masse bien supérieure à 13 masses joviennes.

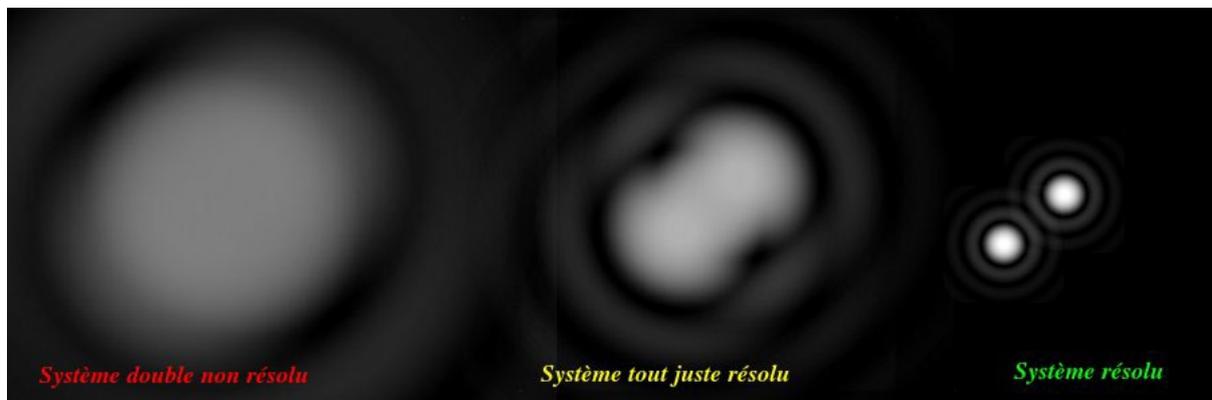
1 La détection directe

Réussir à prendre une photographie d'une planète comme Jupiter depuis une distance dix années-lumière revient à détecter... une luciole (Jupiter) tournant à un mètre d'un puissant phare (le Soleil), le tout à cent kilomètres de distance ! En raison des difficultés techniques considérables inhérentes à la détection directe, elle reste marginale mais semble promise à un très bel avenir.

Pour observer directement une exoplanète, l'astronome doit relever deux défis : réussir à séparer angulairement l'étoile de l'exoplanète et surmonter le gigantesque contraste en luminosité entre les deux astres.

Une séparation angulaire minuscule

La résolution angulaire θ atteinte par un instrument d'optique est fonction de son diamètre D et de la longueur d'onde λ à laquelle on observe selon la formule $\theta = \frac{1,22\lambda}{D}$. Si l'on exprime D et λ dans la même unité, la valeur de θ sort directement en radian. Il convient alors de la multiplier par $\frac{180}{\pi}$ pour l'avoir en degré, puis par 3600 pour l'obtenir en seconde d'arc ("). Établie théoriquement par le physicien Lord Rayleigh (1842 – 1919), cette formule confirma les résultats empiriques obtenus plus tôt par l'astronome William Rutter Dawes (1799 – 1868) en testant la limite de résolution angulaire d'observateurs sur des étoiles binaires serrées de luminosités égales.



Une étoile double n'est pas résolue par un télescope de petit diamètre. Elle l'est par un télescope de diamètre plus important. Crédit : ASM / [Benjamin Mollier](#).

La pupille d'un adolescent peut s'ouvrir jusqu'à 7 voire 8 mm lorsque sa vision est complètement adaptée à l'obscurité. Celle d'un jeune trentenaire se dilate jusqu'à 6,5 mm, l'ouverture diminuant d'environ 0,5 mm par décennie. Ainsi, la pupille d'un sexagénaire s'ouvrira jusqu'à 5 mm au mieux.

Prenons donc une pupille ouverte à 6,5 mm, qui observe à une longueur d'onde de 550 nm, un jaune-vert au cœur du spectre visible. Avec la formule de Rayleigh, on obtient alors une résolution de 21'' soit environ 0,35'. Compte-tenu de la variation de l'ouverture maximale de la pupille avec l'âge, du fait que la pupille n'est que rarement dilatée à son maximum et de l'étendue du spectre visible, on donne généralement la valeur de 1' (60'') au pouvoir de résolution de l'œil. Que représente 1' ? C'est l'angle sous-tendu par une pièce de 2 € vue à une distance un peu inférieure à 90 m.

Pour la même longueur d'onde :

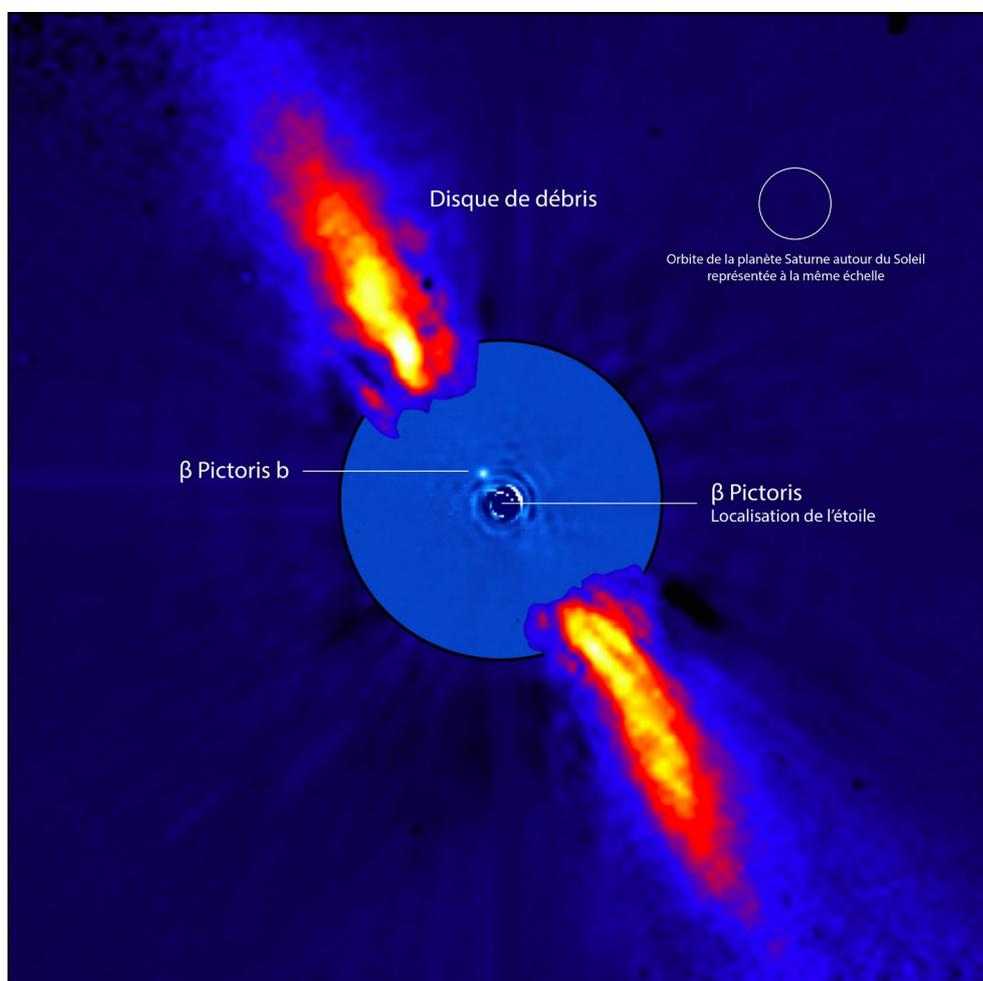
- une paire de jumelles de 50 mm de diamètre permet de voir des détails de 2,8'' ;
- un télescope de 8 pouces (203 mm) de diamètre descend à 0,68'' ;
- avec ses 2,4 m de diamètre, le télescope spatial *Hubble*, lui, atteint 0,058'' ;
- chacun des quatre éléments du *Very Large Telescope* (8,2 m) parvient à 0,017'' ;
- Enfin, l'*Extremely Large Telescope* européen touchera du doigt des détails de 0,0035'' avec son miroir primaire monstrueux de 39,3 m.

Les résolutions angulaires calculées sont théoriques, sauf pour le télescope *Hubble*, situé au-delà de notre atmosphère. En effet, pour évaluer la qualité véritable des images fournies par les instruments d'optique, il est d'obligatoire d'intégrer la turbulence atmosphérique, qui dégrade les images. On utilise pour cela le concept de « seeing », qui est une mesure de la qualité de la visibilité. Il s'évalue également en secondes d'arc. Il n'est pas rare d'avoir, en ville, un seeing de plusieurs secondes d'arc. Un télescope de 8 m n'y obtiendrait pas d'image plus précise qu'un télescope de 10 à 20 cm de diamètre ! Les conditions optimales d'observation se trouvent dans les observatoires de haute altitude (Mont Graham en Arizona, Cerro Paranal et Cerro Armazones au Chili, Mauna Kea sur l'île d'Hawaï, île de La Palma dans les Canaries) où le seeing descend parfois à quelques dixièmes de seconde d'arc. Un tel seeing n'est toutefois pas suffisant pour exploiter pleinement le potentiel des très grands télescopes. On a donc développé une technique appelée *optique adaptative*. Elle permet de corriger en temps réel les effets de la turbulence atmosphérique grâce à un miroir déformable à l'aide de pistons. Les instruments munis d'une optique adaptative peuvent alors atteindre leur résolution angulaire théorique.

Revenons à nos exoplanètes. La distance angulaire entre l'étoile et sa planète, observées depuis la Terre, est minuscule. Si l'on place, par la pensée, le système Soleil-Jupiter à la distance de l'étoile la plus proche du Soleil (environ 4 années-lumière), les deux astres seront séparés par 4'', soit un millième de degré. Ce pouvoir de résolution est théoriquement à la portée d'une simple paire de jumelles. Les deux composantes du système Soleil-Jupiter, placé à 100 années-lumière, seront séparées par 0,17''... à la portée théorique d'un télescope de 1 m de diamètre. Le système Soleil-Terre, vu dans les mêmes conditions, nécessitera un télescope de 5 m pour être résolu.

Un gigantesque contraste de luminosité

Le contraste en luminosité entre une étoile et sa planète est énorme. Ainsi, en lumière visible, le Soleil est un milliard de fois plus brillant que la Terre. L'idée est d'utiliser un coronographe, qui bloque la lumière de l'étoile centrale et permet d'extraire la planète du « bruit ambiant ». On crée donc une éclipse artificielle. Cette technique a permis de découvrir une centaine d'exoplanètes par détection directe : on en a désormais des photographies ! Les planètes découvertes à ce jour partagent des propriétés communes : elles sont « proches » de nous, jeunes (elles ne se sont pas encore refroidies et sont encore assez chaudes et donc relativement brillantes), éloignées de leur étoiles... et souvent observées dans l'infrarouge, là où le contraste de luminosité avec leur étoile est moins grand.



Une image en fausses couleurs de l'environnement de l'étoile β Pictoris, observé dans l'infrarouge proche. Très peu lumineux, cet environnement se révèle après soustraction du halo stellaire. La partie extérieure de l'image montre un disque de débris (des poussières) et sa partie interne, une source 1000 fois plus faible que l'étoile centrale. Il s'agit de l'exoplanète β Pictoris b. Elle est éloignée de son étoile d'environ 8 fois la distance qui sépare le Soleil de la Terre. Crédit : ESO / A.-M. Lagrange *et al.*

2 La détection indirecte

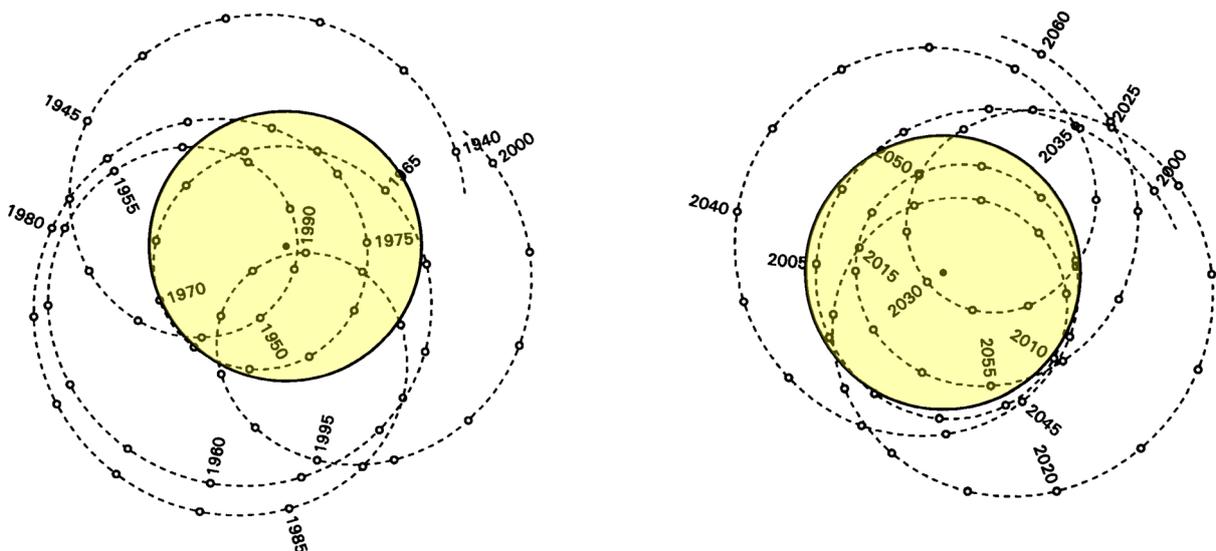
Ici, l'exoplanète n'est pas directement observable car trop peu lumineuse, trop proche de son étoile, etc. Ce n'est donc pas elle que l'on recherche directement mais les perturbations qu'elle induit sur le mouvement ou l'éclat ou de son étoile. Les astronomes extraient de ces perturbations les caractéristiques orbitales et physiques de l'exoplanète.

2.1 L'astrométrie

✚ Un détour par le système solaire

Le centre de masse du système solaire ne coïncide pas exactement avec le centre du Soleil. Toutefois, puisqu'à lui seul le Soleil est 745 fois plus massif que toutes les planètes réunies, il n'en est jamais très éloigné. Sa localisation précise dépend de la position des planètes sur leur orbite, les plus influentes étant, de très loin, les planètes géantes, massives et lointaines – la contribution de chaque planète au déplacement du centre de masse étant proportionnelle au produit de sa masse par sa distance au Soleil. Le centre de masse du système solaire se déplace ainsi souvent à l'intérieur du Soleil mais peut demeurer hors de son globe plusieurs années consécutives.

Les deux graphiques suivants, qui résultent de calculs, montrent le déplacement du centre de masse entre 1940 et 2000 (à gauche) puis entre 2000 et 2060 (à droite), par rapport à un Soleil supposé immobile, représenté en jaune. Le plan des schémas est celui dans lequel la Terre tourne autour du Soleil, c'est-à-dire le plan de l'écliptique. **Dans la réalité, c'est bien sûr le Soleil qui oscille autour du centre de masse.**



Illustrations adaptées du chapitre 26 *The Barycenter of the Solar System* de l'ouvrage de Jean Meeus, *Mathematical Astronomy Morsels*, éd. Willmann-Bell, 1997.

Lorsque les quatre planètes géantes sont quasiment alignées du même côté du Soleil, comme en 1983, leurs influences s'additionnent et le centre de masse du système solaire est au plus loin du centre du Soleil. Au contraire, lorsque Saturne, Uranus et Neptune sont alignées mais que l'énorme Jupiter se trouve de l'autre côté du Soleil comme en 1990, les influences s'annulent quasiment : le centre de masse se confond presque avec le centre du Soleil.

Hors du système solaire

Et si, l'espace d'un instant, nous nous prenions pour des observateurs extraterrestres ? Situés à quelques 50 années-lumière du système solaire, nous observons assidûment l'étoile « Soleil » pendant plusieurs années. Avec quelle précision angulaire devrions-nous déterminer la position de cette étoile sur le fond du ciel pour détecter la présence d'une ou de plusieurs planètes gravitant autour d'elle ?

Comme nous avons pu le constater dans le paragraphe précédent, le mouvement réflexe du Soleil possède une amplitude comparable à son diamètre... soit un peu plus d'un million de kilomètres. La détection formelle et claire d'un signal nécessite donc au minimum ce niveau de précision et, bien plus certainement, une précision dix fois supérieure. Bref, à 50 années-lumière de distance, il nous faudrait mesurer des variations angulaires sur la position du Soleil correspondant à des mouvements de l'ordre de la centaine de milliers de kilomètres pour lever toute ambiguïté.

Quel angle sous-tendent 100 000 km observés depuis une distance de 50 années-lumière ? Le calcul est proposé en annexe. Le résultat est 43,6 millièmes de seconde d'arc (43,6 μ as), soit l'épaisseur d'un cheveu (70 μ m) observé à... 330 km de distance. Il s'agit d'un angle très, très petit qu'il convient de comparer aux capacités de trois instruments emblématiques.

- 1) Le télescope spatial *Hubble*, lancé en 1990 et toujours en activité, peut atteindre une résolution comprise entre 50 et 100 millièmes de seconde d'arc (mas).
- 2) La mission spatiale astrométrique *Hipparcos* (1989-1993) a permis de définir la position de 120 000 étoiles avec une précision d'une milliseconde d'arc.
- 3) Enfin, la mission spatiale astrométrique *Gaia*, lancée en 2013, mesure en ce moment même la position, la distance et le mouvement propre d'un milliard d'étoiles dans notre galaxie. Lorsque sa mission sera achevée et ses données complètement traitées, nous connaîtrons la position des étoiles de son catalogue avec une précision d'environ 10 μ as pour les plus brillantes et 300 μ as pour les moins brillantes.

Ainsi, s'il demeure totalement hors de portée des télescopes *Hubble* et *Hipparcos*, un analogue du système solaire situé à 50 années-lumière pourrait être découvert par *Gaia*. Pour être plus rigoureux, *Gaia* mettrait en évidence l'existence de planètes géantes, massives et éloignées de leur étoile. Le signal des planètes telluriques, petites et proches de leur étoile, serait beaucoup trop faible pour être décelé...

Des simulations beaucoup plus complètes permettent d'ailleurs de penser que *Gaia* pourrait révéler plusieurs dizaines de milliers de planètes massives à longue période (de 1 à 15 fois la masse de Jupiter) jusqu'à environ 1500 années-lumière de distance.

En résumé, la présence d'une exoplanète entraîne un mouvement réflexe périodique de son étoile autour du centre de masse du système « étoile + exoplanète », mouvement d'autant plus important que la planète est massive et éloignée de son étoile. Ce mouvement n'est que marginalement accessible aux technologies actuelles puisqu'on ne compte qu'une dizaine d'exoplanètes découvertes ou confirmées par cette méthode. La mission spatiale astrométrique *Gaia*, en cours, devrait révolutionner nos connaissances.

2.2 La méthode des vitesses radiales

Le mouvement réflexe de l'étoile dû à la présence de la planète peut être détecté en analysant la lumière qui nous en parvient. Par effet Doppler, la longueur d'onde des raies spectrales de l'étoile est décalée tantôt vers les petites longueurs d'onde (vers le bleu) quand l'étoile se rapproche de nous, tantôt vers les grandes longueurs d'onde (vers le rouge) quand elle s'éloigne. La figure en page suivante illustre la méthode employée.

L'idée est de suivre dans le temps la position d'une certaine raie d'absorption dans le spectre de l'étoile étudiée, la localisation λ_0 de cette raie étant établie très précisément en laboratoire. En (a), on ne décèle pas d'écart en longueur d'onde entre la raie détectée dans le spectre stellaire et la raie mesurée en laboratoire : la vitesse de l'étoile ne comporte pas de composante radiale, c'est-à-dire que sa vitesse le long de la ligne de visée est nulle.

Entre (a) et (b), la raie se décale progressivement vers les courtes longueurs d'onde (l'étoile se rapproche de plus en plus vite de nous) pour atteindre un extremum en (b). La vitesse radiale est alors maximale. Entre (b) et (c), la raie rebrousse chemin vers λ_0 et la vitesse radiale diminue jusqu'à s'annuler en (c).

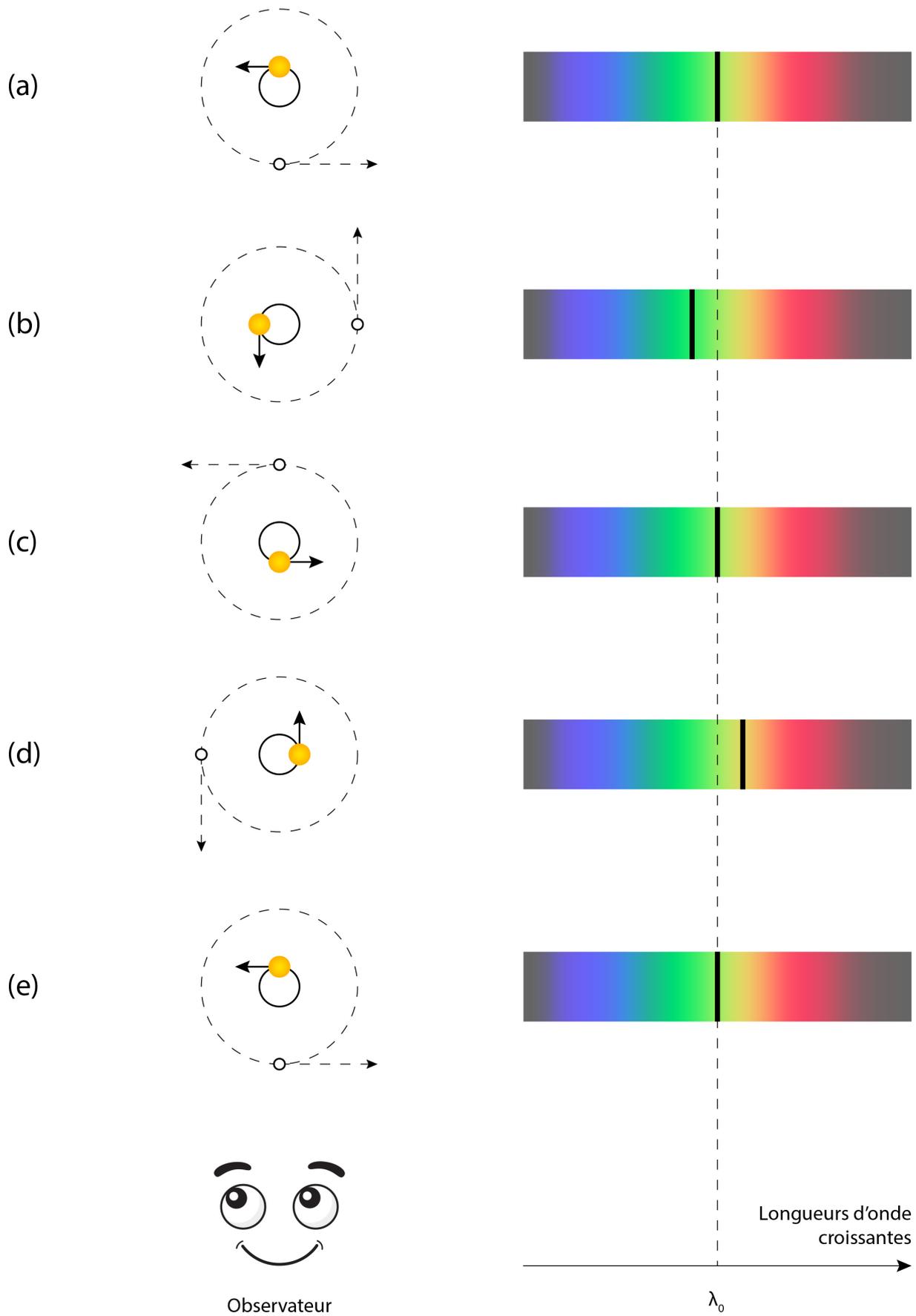
Entre (c) et (d), la raie se décale maintenant vers les grandes longueurs d'onde (l'étoile s'éloigne de plus en plus vite de nous) pour atteindre un extremum en (d). Comme en (b), la vitesse radiale est maximale mais de sens opposé. Enfin, entre (d) et (e), la raie rebrousse chemin vers λ_0 et la vitesse radiale diminue jusqu'à s'annuler en (e). Le cycle peut recommencer...

Le temps dont a besoin la raie spectrale pour faire un aller-retour complet autour de λ_0 n'est autre que le temps nécessaire à l'étoile pour boucler une révolution complète autour du centre de masse du système « étoile – exoplanète ». C'est donc également la période de révolution de l'exoplanète autour de son étoile.

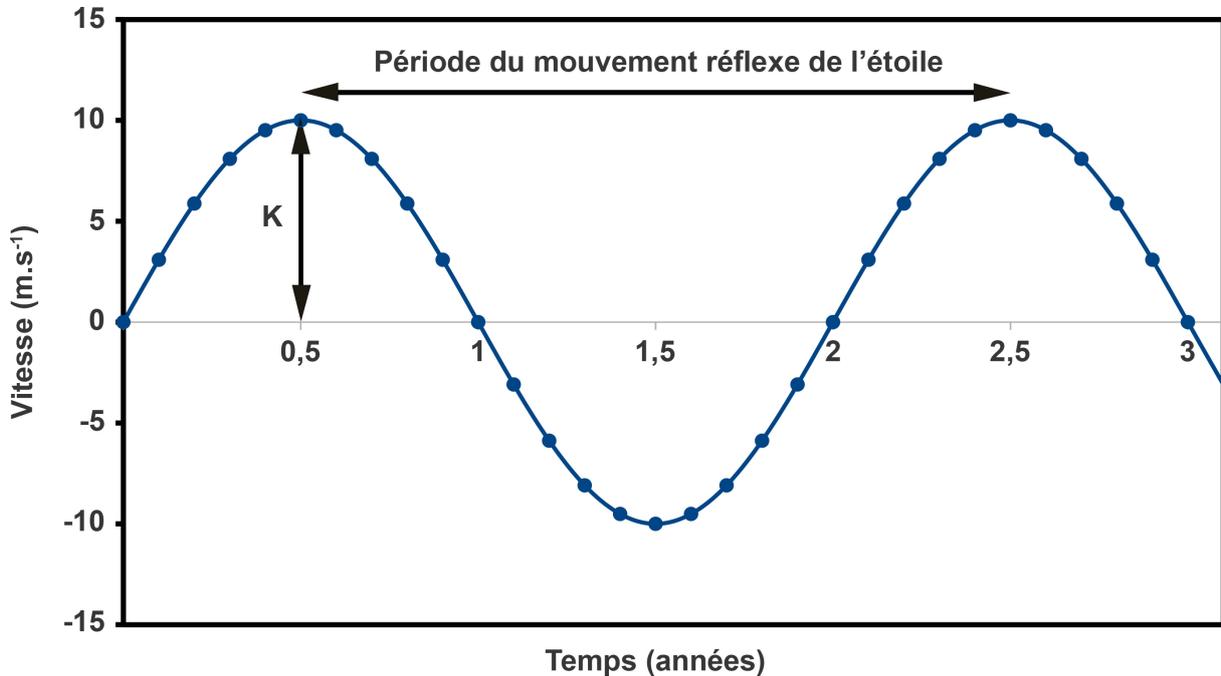
La formule suivante, non relativiste eu égard aux vitesses impliquées, permet de relier le décalage en longueur d'onde à la vitesse de l'étoile le long de la ligne de visée :

$$v = c \frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0}$$

où v est la vitesse radiale de l'étoile, c la vitesse de la lumière dans le vide, λ_0 la longueur d'onde de la raie spectrale considérée mesurée en laboratoire et λ la longueur d'onde de la même raie mesurée sur l'étoile. Une vitesse positive indique que l'étoile s'éloigne de nous et une vitesse négative, qu'elle se rapproche.



Il est d'usage de représenter la vitesse radiale de l'étoile étudiée en fonction du temps, comme dans le graphique ci-dessous. Il s'agit d'un exemple théorique, néanmoins réaliste, sur lequel nous allons travailler.



Quelles remarques appelle une telle courbe ? Quels paramètres orbitaux et physiques peut-on en extraire ?

- Tout d'abord, l'identification de la période orbitale de l'exoplanète est évidente. Elle s'élève ici à 2 ans.
- On constate ensuite que la semi-amplitude K de la sinusoïde se monte à une dizaine de mètres par seconde. C'est très petit ! Un spectrographe comme HARPS (pour *High Accuracy Radial velocity Planet Searcher*), installé depuis 2003 sur le télescope de 3,6 mètres de l'ESO (Observatoire européen austral), atteint la précision incroyable de l'ordre du mètre par seconde sur le long terme. C'est la vitesse d'un piéton peu pressé... Son successeur ESPRESSO (pour *Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanet and Stable Spectroscopic Observations*), monté depuis 2017 sur le Very Large Telescope de l'ESO, a été construit pour atteindre les 10 cm.s⁻¹ ! À titre de comparaison, Jupiter impose une vitesse réflexe au Soleil de 12,5 m.s⁻¹ et la Terre, de 8,9 cm.s⁻¹.
- On remarque enfin que la courbe ressemble fortement à une sinusoïde. Cela traduit le fait que l'exoplanète est en orbite circulaire autour de son étoile ou, tout du moins, que l'excentricité de son orbite est faible. Nous verrons plus tard l'exemple d'une courbe très différente qui indique une ellipticité orbitale très prononcée.

Grâce à la 3^e loi de Kepler, il est possible de déterminer la distance séparant l'étoile de sa planète. Celle-ci, dans sa formulation newtonienne, établit que :

$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

où R est ici le rayon du cercle décrit par la planète autour de l'étoile, T la période de révolution de la planète, G la constante gravitationnelle (valant approximativement $6,674 \cdot 10^{-11}$ SI) et M la masse de l'étoile. En toute rigueur, il faudrait remplacer M par $M + m$ où m est la masse de l'exoplanète. Toutefois, cette dernière est très vraisemblablement négligeable devant M et on peut l'oublier.

Pour notre exemple, supposons que la masse de l'étoile soit égale à celle du Soleil, soit $1,9885 \cdot 10^{30}$ kg. L'application numérique donne $R \approx 237$ millions de kilomètres. Voilà un résultat cohérent, sachant dans notre système solaire, la planète Mars met 1 an près de 11 mois pour faire un tour du Soleil à la distance moyenne de 228 millions de kilomètres.

Peut-on en savoir plus sur l'exoplanète elle-même ? **Peut-on, par exemple, connaître sa masse m** ? Cette demande ne semble pas extravagante puisque la semi-amplitude K de la sinusoïde est fonction, entre autres, de la masse de l'exoplanète : elle d'autant plus élevée que l'exoplanète est massive et proche de son étoile. L'expression exacte de K est :

$$K = \left(\frac{2\pi G}{T}\right)^{1/3} \frac{m \sin(i)}{(M + m)^{2/3} (1 - e^2)^{1/2}}$$

où G est la constante gravitationnelle, T la période de révolution de la planète, M la masse de l'étoile, m celle de la planète et e l'excentricité de son orbite. Dans notre exemple, l'orbite est circulaire ($e = 0$) et m est négligeable devant M .



Examinez les configurations suivantes, où i est l'angle entre le fond du ciel et le plan orbital de la planète, tel qu'il se présenterait vu depuis la Terre.

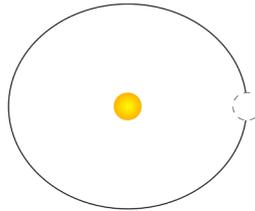
Plan orbital d'une planète de masse m
vu « par la tranche »

$$i = 90^\circ$$



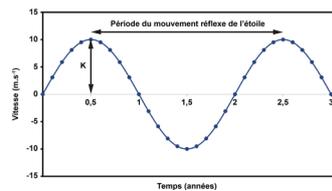
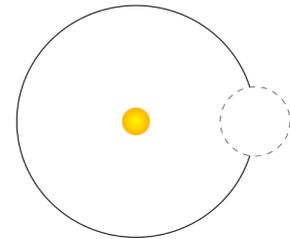
Plan orbital d'une planète de masse $2m$
vu depuis un point situé à 60° au-dessus
de ce plan

$$i = 30^\circ$$



Plan orbital d'une planète de masse $5m$
vu depuis un point situé à $78,5^\circ$ au-dessus
de ce plan

$$i = 11,5^\circ$$



La première étoile, à gauche, est entourée d'une planète de masse m et il se trouve que le système se présente à nous par la tranche. La deuxième étoile, au centre, est identique à la première. Elle est l'hôte d'une planète de masse $2m$. Ce deuxième système n'est pas vu par la tranche : il existe un angle de $i = 30^\circ$ entre le plan orbital de la planète et le plan de la feuille. Enfin, la troisième étoile, toujours identique à la première, est entourée d'une planète de masse $5m$. Le plan orbital de la planète vous fait presque face et l'angle i défini plus haut ne s'élève plus qu'à environ $11,5^\circ$.

Faites le calcul pour vous en convaincre : ces trois configurations conduisent exactement à la même courbe de vitesses radiales. Autrement dit, à partir de la seule courbe des vitesses radiales d'une étoile, il est impossible de calculer la masse exacte de l'objet qui la perturbe. Si, par malchance, nous observons sans le savoir le système quasiment « de face » (l'angle i est alors petit), on sous-estime gravement la masse de l'exoplanète. À tel point qu'elle pourrait ne pas en être une, mais plutôt une naine brune voire une étoile de faible masse !

La méthode des vitesses radiales est donc entachée d'un biais : elle ne donne accès qu'à la masse minimale des exoplanètes. Toutefois, s'il se trouve que le plan orbital de la planète se trouve exactement dans la ligne de visée de l'observateur, les variations de la vitesse radiale mesurées correspondent alors à la véritable valeur de leur masse.

En fait, le seul paramètre que l'on peut extraire de cette méthode est le produit $m \sin(i)$. Que vaut ce produit dans notre exemple théorique ? Rappelons que $K = 10 \text{ m.s}^{-1}$, $T = 2 \text{ ans}$, $e = 0$, $M = 1 M_{\text{Soleil}}$ et m est négligeable devant M . Il vient $m \sin(i) = 8,41 \cdot 10^{26} \text{ kg} \approx 141 M_{\text{Terre}} \approx 0,443 M_{\text{Jupiter}}$. La masse minimale de notre planète vaut donc 0,443 fois celle de Jupiter.

Grâce à la méthode des vitesses radiales, on a découvert plus de 1000 exoplanètes à ce jour, dont la première en 1995 à l'Observatoire de Haute-Provence, 51 Pegasi b. Elle a d'ailleurs valu à Michel Mayor et Didier Queloz, ses découvreurs, l'attribution du prix Nobel de physique 2019.

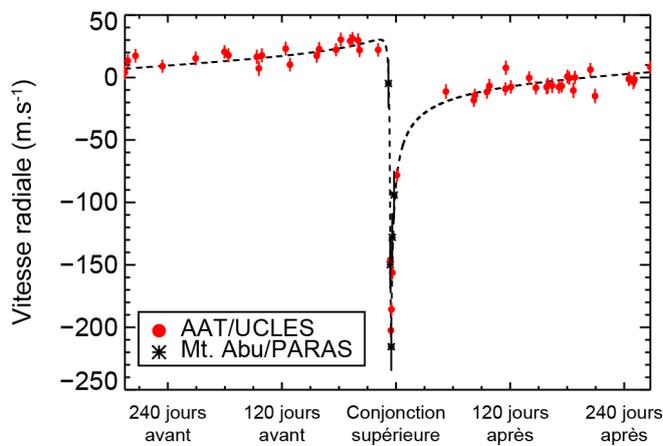
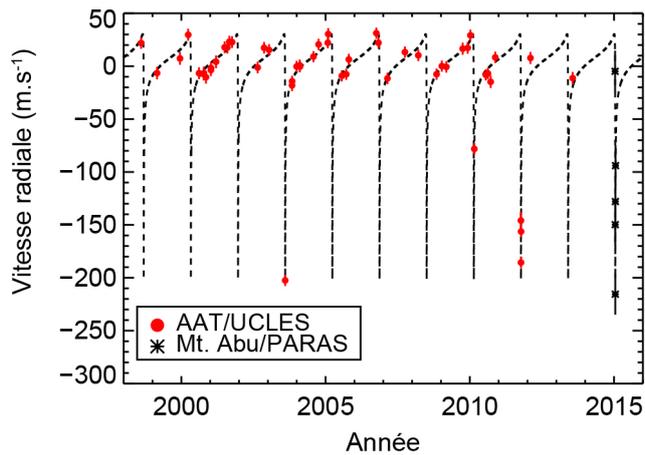
Un catalogue complet se trouve sur l'encyclopédie des planètes extrasolaires (<http://exoplanet.eu>). On a ainsi trouvé :

- des « Jupiter chauds », c'est-à-dire des planètes très massives dont la distance à leur étoile est très faible et se chiffre à quelques millions de kilomètres. Les modèles indiquent qu'elles n'ont jamais pu se former à des distances si réduites. On invoque donc des phénomènes de migration planétaire, phénomène qui décrit comment la planète, alors très jeune, aurait spiralé vers l'intérieur en interagissant avec le disque de gaz lui ayant donné naissance ;
- des planètes à l'orbite très elliptique, ce qui contraste singulièrement avec la quasi-circularité de l'orbite des planètes du système solaire. Il est vraisemblable qu'elles aient acquis leur orbite elliptique après une série de rencontres chaotiques avec d'autres planètes de leur système respectif, qui auraient été éjectées en retour ;
- de véritables systèmes planétaires. Ainsi, HD 10180 possède au moins sept planètes et peut-être neuf, bien que trois d'entre elles soient certainement des naines brunes.

Un exemple de planète à l'orbite très elliptique : HD 20782 b

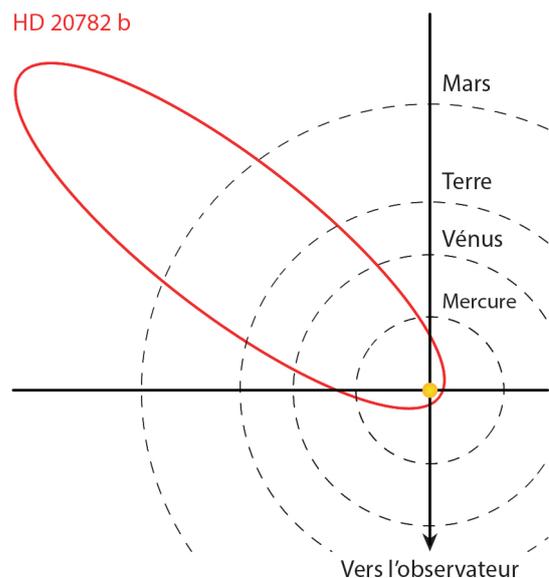
HD 20782 est une étoile située dans la constellation australe du Fourneau, à environ 115 années-lumière de nous. Sous nos latitudes, elle ne monte qu'à une dizaine de degrés de hauteur au-dessus de l'horizon. Trop peu lumineuse pour être visible à l'œil nu, elle est d'âge, de masse, de taille et de températures très similaires à ceux de notre Soleil. Elle est accompagnée de plusieurs planètes dont l'une, découverte en 2006 possède une masse minimale de $1,43 M_{\text{Jupiter}}$ et effectue sa révolution en 597 jours selon une orbite très elliptique (comme la plupart des comètes de notre système solaire). Sa trajectoire l'amène successivement dans des régions glaciales, à plus de 400 millions de kilomètres de son étoile, puis brûlantes, à seulement 9 millions de kilomètres d'elle. On est certain de la nature non stellaire de l'objet puisque des mesures astrométriques tirées des observations du satellite *Hipparcos* ont permis de montrer que $i > 1,22^\circ$ et que donc sa masse était inférieure à $1,43 M_{\text{Jupiter}} / \sin(i)$ soit environ $67 M_{\text{Jupiter}}$.

Les deux graphiques suivants révèlent la courbe de vitesses radiales de l'étoile et l'orbite de sa planète. Ils ont été adaptés de l'article de Stephen R. Kane *et al.*, *Evidence for reflected light from the most eccentric exoplanet known*, *The Astrophysical Journal*, Vol. 821, Issue 1 (2016).



Vitesses radiales de l'étoile HD 20782. La courbe du bas montre un zoom sur une seule période. Voyez combien la courbe diffère de la belle sinusoïde proposée à l'étude dans les pages qui précèdent ! De longues périodes de vitesses modérées forment ici un contraste saisissant avec de brèves et intenses phases de variations. Les données en rouge ont été obtenues avec UCLES, un spectrographe monté sur le télescope anglo-australien (AAT pour Anglo-Australian Telescope, observatoire de Siding Spring, Australie) de 3,9 mètres de diamètre. Les données en noir, elles, ont été obtenues avec PARAS, un spectrographe installé sur le télescope de 1,2 m de l'observatoire infrarouge du mont Abu dans l'État du Rajasthan en Inde.

Une vue du système HD 20782 depuis un point situé à la verticale du plan orbital de l'exoplanète. Son orbite a été reconstituée d'après les données tirées des vitesses radiales de son étoile. D'après la deuxième loi de Kepler, la planète passe l'essentiel du temps loin de son étoile. Le passage au périhélie, au contraire, est très rapide, en temps comme en vitesse, et donne naissance aux variations brusques de la vitesse radiale de l'étoile. Les orbites des planètes du système solaire sont montrées à titre de comparaison.

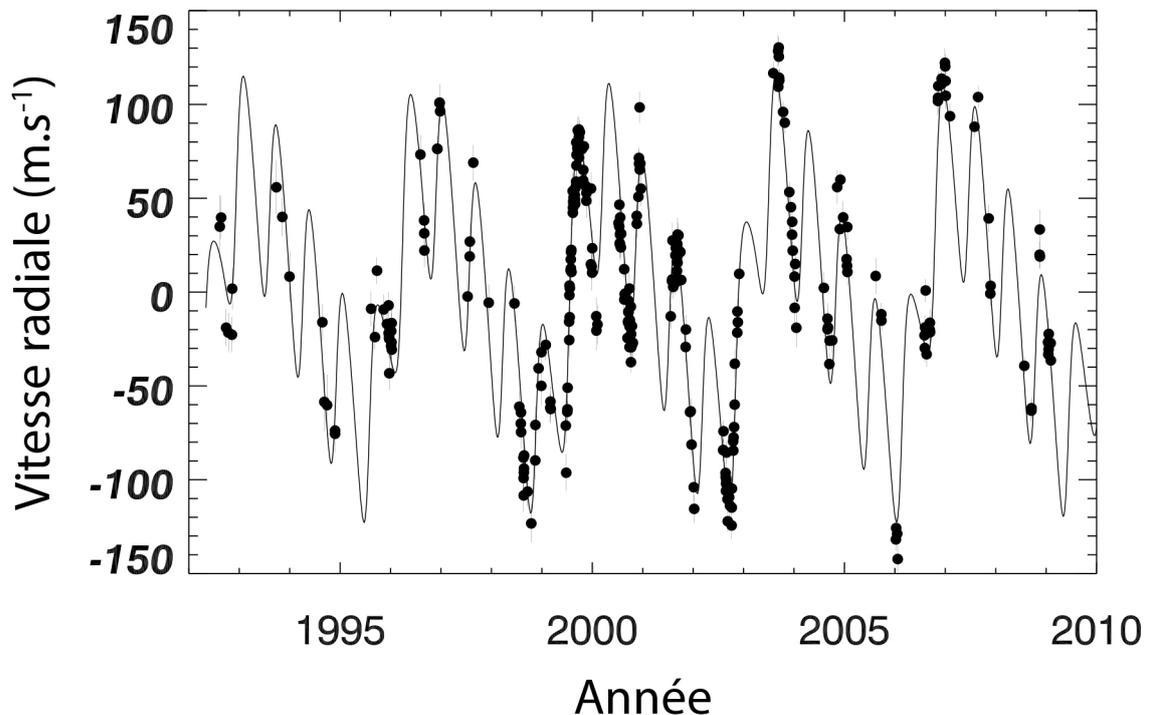


Un exemple de système planétaire : Upsilon Andromedae

Upsilon Andromedae est un système constitué de plusieurs étoiles visible sous la forme d'une étoile unique à l'œil nu. Sa composante la plus lumineuse est entourée d'au moins trois planètes.

En 1997, on lui découvrit une première planète. Avec une masse minimale de $0,7 M_{\text{Jupiter}}$ et une période de 4,617 jours, elle imposait à son étoile d'un mouvement réflexe dont la semi-amplitude s'élevait à environ 75 m.s^{-1} . On s'aperçut toutefois rapidement que le signal était modulé par un signal d'amplitude comparable mais de plus longue période, ce qui laissait l'espoir de découvrir des planètes supplémentaires, plus éloignées. Deux autres années d'observation permirent de se convaincre de l'existence de deux planètes de période respective 241 jours (≈ 8 mois) et 1281 jours ($\approx 3,5$ ans).

Sur les 741 étoiles possédant au moins une planète découverte par la méthode des vitesses radiales (avril 2022), 175 en possèdent plusieurs.



Mesures des vitesses radiales de l'étoile Upsilon Andromedae sur près de 20 ans. Les points noirs figurent ces mesures et la courbe représente le modèle le mieux adapté aux observations. Le signal de la planète la plus proche, dont la période est de 4 jours, a été soustrait pour plus de clarté.

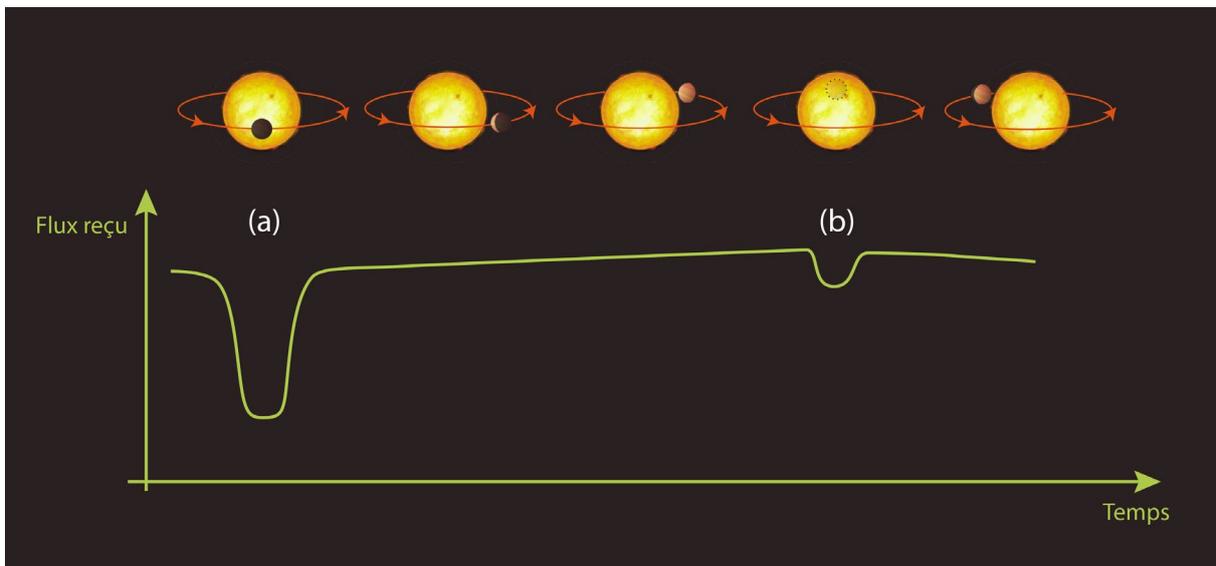
Adapté de l'ouvrage *Exoplanets*, éd. University of Arizona Press, 2010.

2.3 Les transits planétaires

Si, par chance, la Terre se situe dans le plan de l'orbite d'une exoplanète, celle-ci passe alors régulièrement devant son étoile. Ce transit se manifeste par une diminution périodique et mesurable de l'éclat de l'étoile (quelques pour-cent tout au plus), due au masquage partiel de sa lumière par la planète.

Bien évidemment, il faut s'assurer que la baisse périodique de luminosité de l'étoile ne soit pas provoquée par le passage de taches stellaires liées à l'activité de l'étoile, au transit d'une naine brune ou d'une étoile de faible masse ou encore au transit rasant d'une étoile dans un système binaire à éclipses. Pour éliminer ces possibles « faux positifs » qui peuvent facilement concerner 10 à 20 % des transits, il convient de confirmer ou d'infirmer les candidats à l'aide de techniques complémentaires, comme la méthode des vitesses radiales.

Plus de 3 500 exoplanètes ont été découvertes grâce à leurs transits puis confirmées. Le plus gros moissonneur est, à ce jour, le télescope spatial américain *Kepler* (2009-2018). Bénéficiant de conditions d'observation parfaites, il enregistra continûment la luminosité d'environ 150 000 étoiles sur une petite portion du ciel représentant 0,3 % de la sphère céleste. Doté d'un photomètre pouvant détecter des variations de luminosité de 0,004 %, *Kepler* a permis la découverte de près de 2700 exoplanètes.



Représentation schématique d'un transit planétaire. (a) est le transit primaire, (b) est le transit secondaire. Notez la faible augmentation du flux total reçu entre (a) et (b), due à la phase croissante de la planète.

Quelles informations peut-on retirer d'un transit planétaire ? Définissons d'abord les quatre paramètres fondamentaux d'un transit planétaire : la **probabilité** qu'une exoplanète se manifeste par un transit, la **profondeur** du transit, sa **fréquence** et sa **durée**.

- La **probabilité** qu'une exoplanète passe devant son étoile pour un observateur lointain, c'est-à-dire qu'elle se manifeste par un transit, s'exprime par la formule

$$P = \frac{(R_P + R_S)}{a} \approx \frac{R_S}{a}$$

où a est le demi-grand axe de l'orbite de la planète, R_P le rayon de la planète et R_S le rayon de l'étoile.

- Pour ce même observateur, la **profondeur** du transit D a pour expression

$$D \approx \left(\frac{R_P}{R_S}\right)^2.$$

- La troisième loi de Kepler permet de calculer la période de révolution T de la planète connaissant sa distance à l'étoile et la masse de cette dernière. L'inverse de cette période fournit la **fréquence** f du transit.

$$f \approx \frac{\sqrt{GM_S}}{2\pi a^2}$$

où G est la constante gravitationnelle et M_S la masse de l'étoile.

- Enfin, la **durée** du transit Δt a pour expression

$$\Delta t \approx T \frac{R_S}{\pi a}$$

Évaluons ces quatre paramètres pour le système Soleil-Terre, tel qu'il pourrait être observé à distance par un hypothétique astronome extraterrestre. On prendra donc $R_P = 6\,378$ km, $R_S = 696\,000$ km, $M_S = 2 \cdot 10^{30}$ kg, $a = 150 \cdot 10^6$ km, $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ m³.kg⁻¹.s⁻².

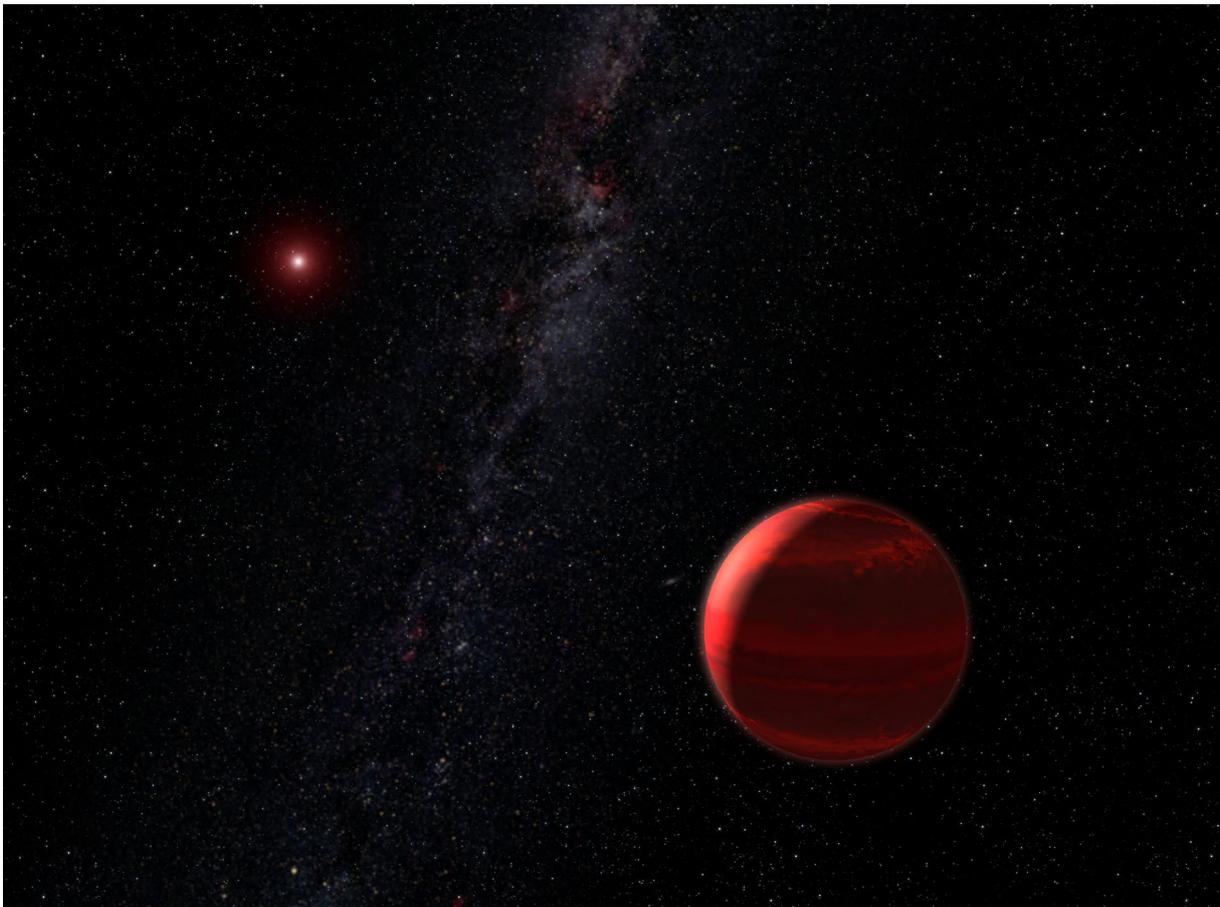
→ On trouve $P \approx 0,47$ %, $D \approx 8,4 \cdot 10^{-5}$, $f \approx 1$ an⁻¹ (bien évidemment) et $\Delta t \approx 13$ h.

Évaluons à présent ces quatre paramètres pour un système dont le centre serait occupé par une étoile naine rouge typique ($R_S = 140\,000$ km, $M_S = 3 \cdot 10^{29}$ kg) – dans la Galaxie, les naines rouges représentent 76 % des étoiles adultes alors que les étoiles de type solaire sont dix fois moins nombreuses – dans la zone habitable de laquelle graviterait une exo-Terre ($R_P = 6\,378$ km, $a \approx 0,1$ unité astronomique $\approx 15 \cdot 10^6$ km).

→ Avec les nouvelles données, on obtient $P \approx 1$ %, $D \approx 0,0021$, $f \approx 12,3$ an⁻¹ et $\Delta t \approx 2$ h 10 min.

Ces résultats nous apprennent que si la probabilité de transit d'une exo-Terre située dans la zone habitable d'une naine rouge n'est qu'un peu plus élevée que celle que présenterait notre planète (deux fois ici), les transits seraient plus facilement perceptibles car beaucoup plus fréquents (douze fois dans notre exemple) et dotés d'une profondeur nettement plus forte (vingt-cinq fois dans notre cas particulier).

Il semble donc logique que les programmes de recherche se concentrent sur les systèmes stellaires de faible masse... d'autant plus que des simulations numériques récentes ont montré qu'ils pourraient constituer un environnement particulièrement favorable à la formation de planètes rocheuses situés dans la zone habitable.



Vue d'artiste de la naine rouge CHR 73 (en haut à gauche) et de son compagnon CHR 73 B (au premier plan, en bas à droite). Ce dernier gravite à environ 200 unités astronomiques de son étoile et posséderait une masse une douzaine de fois supérieure à celle de Jupiter. Le système, d'à peine 2 millions d'années, se situe dans la constellation australe du Caméléon à 500 années-lumière de nous. Crédit : NASA, ESA et G. Bacon (STScI).

La zone habitable d'une étoile

La zone habitable est un concept qui porte mal son nom et peut prêter à confusion. Elle désigne la région circumstellaire dans laquelle doit être située une planète pour pouvoir héberger, de manière pérenne, de l'eau liquide en surface... pourvu qu'elle dispose de l'eau nécessaire, d'une surface, des conditions atmosphériques indispensables à sa stabilité, etc. Une planète peut se trouver dans la zone habitable de son étoile sans héberger la moindre trace de vie. La bordure intérieure de la zone habitable correspond à la distance en-deçà de laquelle un emballement de l'effet de serre vaporise l'intégralité du réservoir d'eau de surface de la planète puis induit sa photodissociation avec échappement d'hydrogène vers l'espace. Sa bordure extérieure est définie comme la distance à partir de laquelle l'ajout de dioxyde de carbone dans l'atmosphère de la planète ne permet pas de maintenir la température de surface au-dessus du point de congélation. Dans le système solaire, certains auteurs placent la bordure intérieure à 0,99 unité astronomique et la bordure extérieure à 1,02 unité astronomique. D'autres sont plus « tolérants » et l'on trouve dans la littérature des valeurs allant de 0,38 unité astronomique pour la bordure intérieure à 10 unités astronomiques pour la bordure extérieure ! L'annonce de la découverte d'une nouvelle exoplanète « habitable » fait régulièrement la une de la presse, qu'elle soit spécialisée ou pas dans la diffusion de l'information scientifique. Par « habitable », comprenez seulement par-là « située dans la zone habitable » de son étoile, et en aucun cas « habitée » ou « susceptible d'être habitée par des êtres nous ressemblant ». La nuance est de taille !

En tout cas, si une étoile exhibe des transits, c'est que le plan orbital de son exoplanète est vu quasiment par la tranche. Aussi, l'angle i entre le fond du ciel et le plan orbital de la planète est-il proche de 90° . Appliquée à une étoile dont on sait qu'elle présente des transits, la méthode des vitesses radiales donne ainsi la véritable masse de l'objet perturbateur, l'incertitude sur la valeur du terme $\sin(i)$ disparaissant. Connaissant :

1. la masse de l'exoplanète par la méthode des vitesses radiales,
2. le rayon de l'exoplanète par la profondeur du transit, une fois estimé le rayon de l'étoile via des modèles d'évolution stellaire,

on peut alors calculer sa densité et déterminer s'il s'agit plutôt d'une géante gazeuse ou d'une planète tellurique.

Examinons donc le système planétaire gravitant autour d'une naine rouge joliment nommée 2MASS J23062928-0502285. Découverte en 1999, elle arbore une température de surface d'à peine 2500 K et une masse équivalant à 8 % de celle du Soleil. Située à une quarantaine d'années-lumière de nous dans la constellation du Verseau, elle est 80 000 fois moins lumineuse que l'objet le plus faible visible à l'œil nu sous un ciel bien sombre.

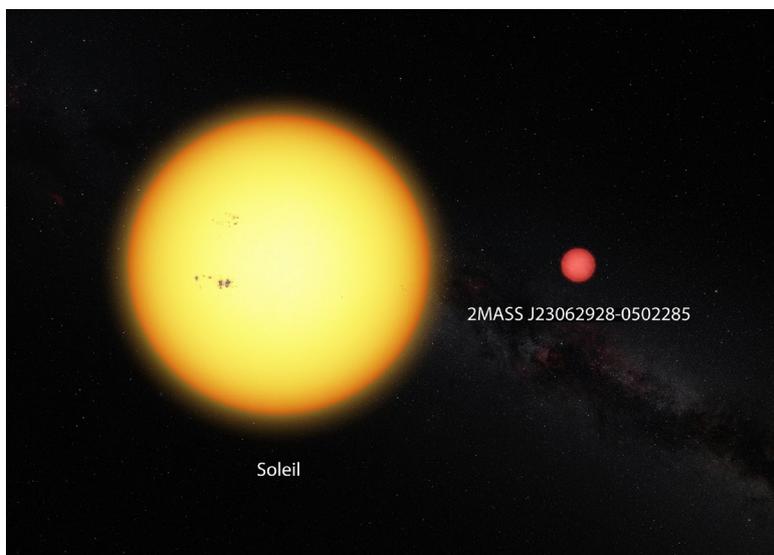
2MASS J23062928-0502285 a acquis une renommée mondiale sous le nom de TRAPPIST-1 lorsqu'une équipe d'astronomes lui a découvert trois compagnons planétaires de masse sensiblement terrestre en 2016 puis a annoncé la détection de quatre autres planètes de masses comparables en 2017. Au total, sept planètes ressemblant à la Terre dont trois ou quatre dans la zone habitable, un record !

Le système planétaire de TRAPPIST-1 présente une véritable chaîne de résonances orbitales. Les périodes de révolution de toutes les planètes sont liées entre elles, tout comme leur position sur leur orbite respective.

L'architecture remarquable du système TRAPPIST-1 est prédite par les modèles de formation des planètes dans lesquels celles-ci migrent vers leur étoile au sein du disque de gaz et de poussière leur ayant donné naissance. Les résonances mises en évidence ici, conséquences des interactions gravitationnelles entre planètes, font que les transits observés ne se succèdent pas de manière parfaitement périodique. **Les astronomes ont tiré profit des retards et des avances mesurés pour quantifier les masses des planètes.** Et ceci bien que la luminosité de la naine rouge soit trop faible pour que son spectre soit vraiment exploitable par la méthode des vitesses radiales !

La connaissance de la densité d'une planète, de sa distance à son étoile-hôte et donc de l'énergie qu'elle en reçoit permet de se faire une idée réaliste de sa composition et de son évolution. En comparant les courbes théoriques reliant masse et taille pour différentes compositions possibles, on en a déduit que la composition de ces sept planètes semble similaire à celle de la Terre. Une limite supérieure peut être mise sur leur teneur en eau : les quatre planètes les plus externes ne peuvent être constituées de plus de 5-10 % d'eau en masse. Mais les trois planètes internes sont plus « sèches » que la Terre, pour laquelle l'eau représente moins de 0,1 % de sa masse. Des informations complémentaires sont disponibles sur le site de l'Institut national des sciences de l'Univers ici :

<https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/les-planetes-de-trappist-1-pesees-et-caracterisees-avec-une-precision-inedite>



Vue d'artiste du Soleil et de 2MASS J23062928-0502285 représentés à la même échelle. Un bien grand nom pour une si petite étoile !
Crédit : ESO.

L'observation d'un transit est susceptible d'apporter des informations sur l'atmosphère d'une exoplanète. En effet, lors du transit primaire, la lumière de l'étoile traverse l'atmosphère de l'exoplanète et subit alors, à certaines longueurs d'onde, une absorption caractéristique de la part de ses composants atomiques et/ou moléculaires. On a ainsi pu détecter du sodium (Na), du potassium (K), du méthane (CH₄), de la vapeur d'eau (H₂O), du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère de certaines exoplanètes passant devant leur étoile.

On a également exploité le transit secondaire de quelques exoplanètes, c'est-à-dire la période durant laquelle elles passent derrière leur étoile. On mesure alors également une baisse de luminosité, puisqu'occultée, la planète ne contribue plus à l'éclat total du système étoile – planète. Ce transit secondaire est toutefois moins profond que le transit primaire.

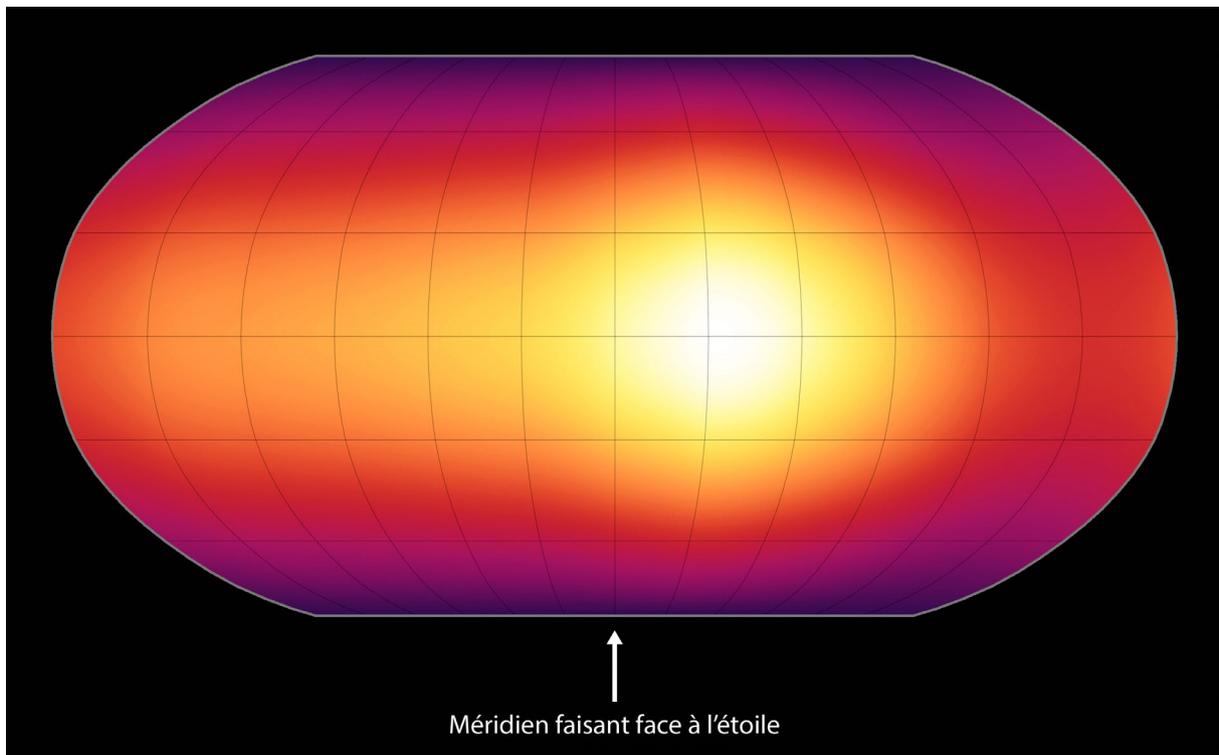
De la différence entre le flux de lumière infrarouge mesuré juste avant le transit secondaire (système « étoile + planète ») et le flux reçu pendant le transit secondaire (étoile seule), les astronomes déduisent l'énergie émise par l'hémisphère de la planète tournée vers l'étoile. Ils peuvent alors calculer sa température moyenne. Grâce à cette technique, des équipes d'astronomes ont été en mesure d'évaluer les températures des hémisphères éclairés de quelques *Jupiter chauds*. Les valeurs dépassent 1 000 K.

Du fait de sa proximité à son étoile, un *Jupiter chaud* est très certainement bloqué en rotation : il doit effectuer une révolution dans le même temps qu'il fait un tour sur lui-même. C'est un phénomène que l'on rencontre dans notre système solaire, à une autre échelle : la Terre, par un puissant effet de marée, a ralenti la Lune peu après sa formation et l'a forcée à lui présenter depuis la même face. Il en va de même pour les satellites galiléens autour de Jupiter ou encore de Titan autour de Saturne. Les astronomes s'accordent donc à penser qu'un *Jupiter chaud* doit toujours présenter la même face à son étoile et que seule cette face est chauffée directement. Ils s'attendent également à ce que le signal infrarouge détecté varie périodiquement en fonction de la contribution des côtés jour et nuit à la luminosité totale du système étoile – planète sur une révolution de la planète.

L'apport d'un télescope spatial infrarouge comme *Spitzer* (2003-2020) est justement d'avoir mesuré précisément la luminosité infrarouge du système étoile-planète pendant une révolution presque complète. Ainsi, sur la figure de la page 17, qui représente un transit dans le domaine visible mais qui peut tout à fait le représenter en infrarouge, on note une très légère augmentation de l'éclat du système étoile-planète entre (a) et (b). L'explication de ce phénomène réside dans le fait qu'en tournant autour de son étoile, la planète exhibe un cycle de phases. Entre (a) et (b), elle nous présente donc progressivement son hémisphère éclairé et chaud. Prenons le cas de l'exoplanète HD 189 733 b, dont la température est proche de 1 200 K. Des astronomes ont estimé la température moyenne de l'hémisphère le moins chaud – qui ne coïncide pas exactement avec le côté nuit comme nous le verrons – à 970 K (soit 700 °C). Cette mesure fournit une indication fondamentale sur l'efficacité du transport de chaleur depuis les zones chaudes vers les zones plus froides, par l'intermédiaire de vents puissants. En effet, avec un hémisphère toujours éclairé et l'autre plongé dans une perpétuelle obscurité, on peut s'attendre à l'existence d'un très fort contraste de température. Or, on a montré que ce contraste est relativement faible.

Seulement 350 K séparent la zone la plus chaude de la zone la moins chaude. Il semble nécessaire d'invoquer ici des vents très puissants (10 km.s^{-1} !) seuls susceptibles de redistribuer aussi efficacement la chaleur accumulée côté jour sur l'ensemble de la planète.

Enfin, les astronomes ont dressé une carte des températures de l'exoplanète HD 189 733 b. Ils l'ont découpée en bandes de longitude de 30° à qui ils ont assigné des températures pouvant varier afin de reproduire au mieux le flux infrarouge mesuré. Le résultat est, en un sens, une image de l'exoplanète dans l'infrarouge. Surprise : le point situé en permanence sous l'étoile – le point subsolaire – n'est pas le point le plus chaud ! Celui-ci se trouve à 30° à l'est du point subsolaire. De même, le point le plus froid n'est pas dans la direction opposée à l'étoile : il se trouve décalé de 30° vers l'ouest. Ainsi, les points le plus chaud et le plus froid semblent curieusement situés dans le même hémisphère ! L'existence d'un flux minimal et maximal sur un seul et même hémisphère suggère une circulation atmosphérique complexe et non encore comprise. Les théoriciens ont encore du pain sur la planche pour les années à venir...



Carte thermique globale de l'exoplanète HD 189733 b, telle qu'elle a pu être reconstituée d'après les mesures effectuées par le télescope *Spitzer*. La flèche désigne le méridien faisant toujours face à l'étoile. On remarque que le point le plus chaud de l'hémisphère éclairé ne se trouve pas sur ce méridien.

Crédit : NASA / JPL-Caltech / H. Knutson (Harvard-Smithsonian CfA).

2.4 Les microlentilles gravitationnelles

Un phénomène de lentille gravitationnelle peut se manifester lorsqu'un corps massif comme une galaxie ou un amas de galaxie s'interpose entre l'observateur et une source lumineuse lointaine. En effet, la relativité générale d'Einstein (1879-1955) nous enseigne que toute masse courbe l'espace-temps et dévie la lumière passant à proximité.

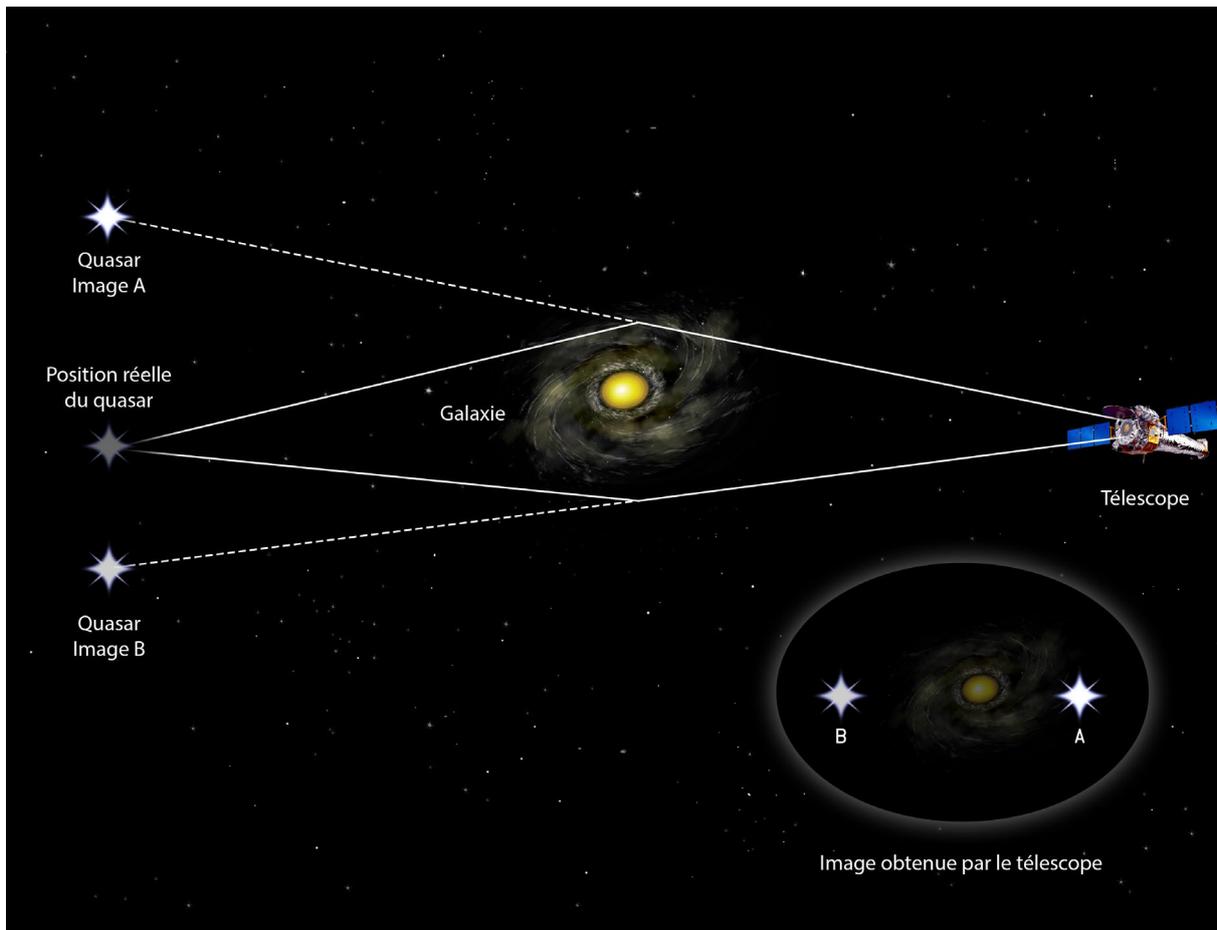
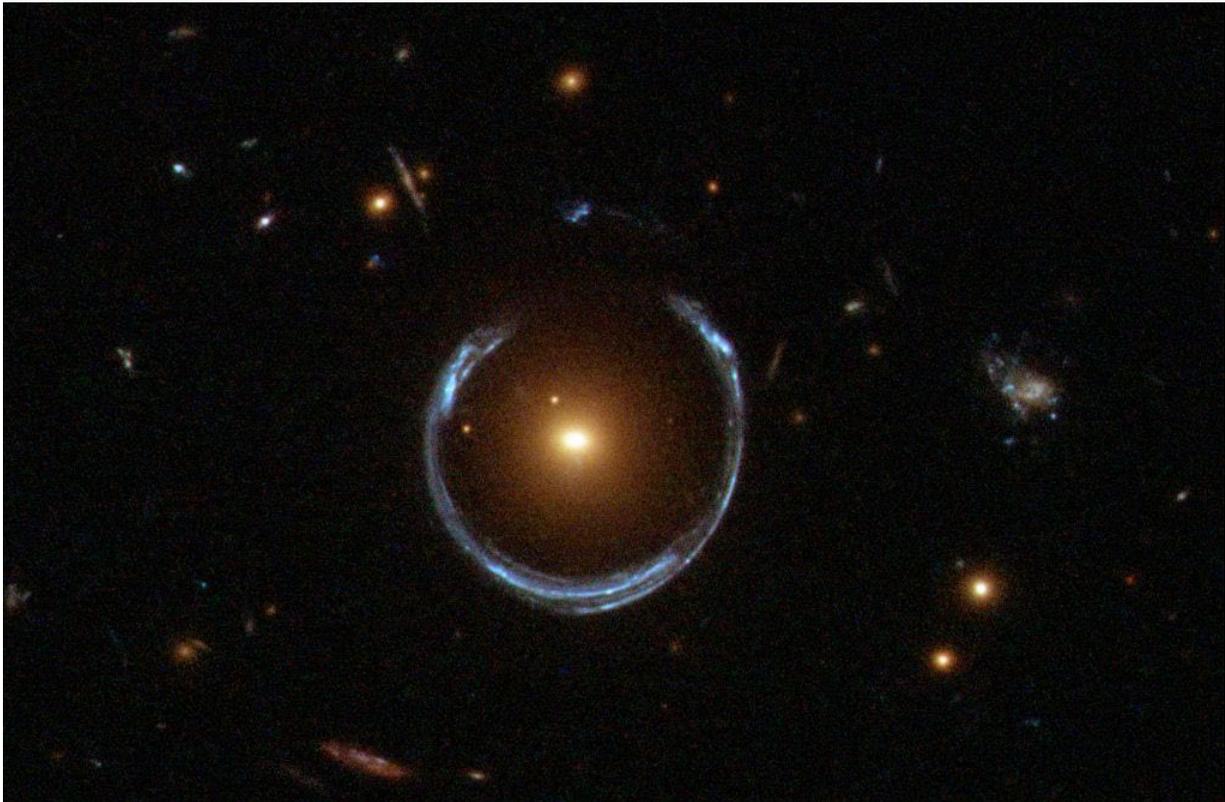


Image d'un quasar (noyau de galaxie extrêmement lumineux) très lointain dédoublée par la présence d'une galaxie plus proche. Crédit : NASA / CXC / M. Weiss.

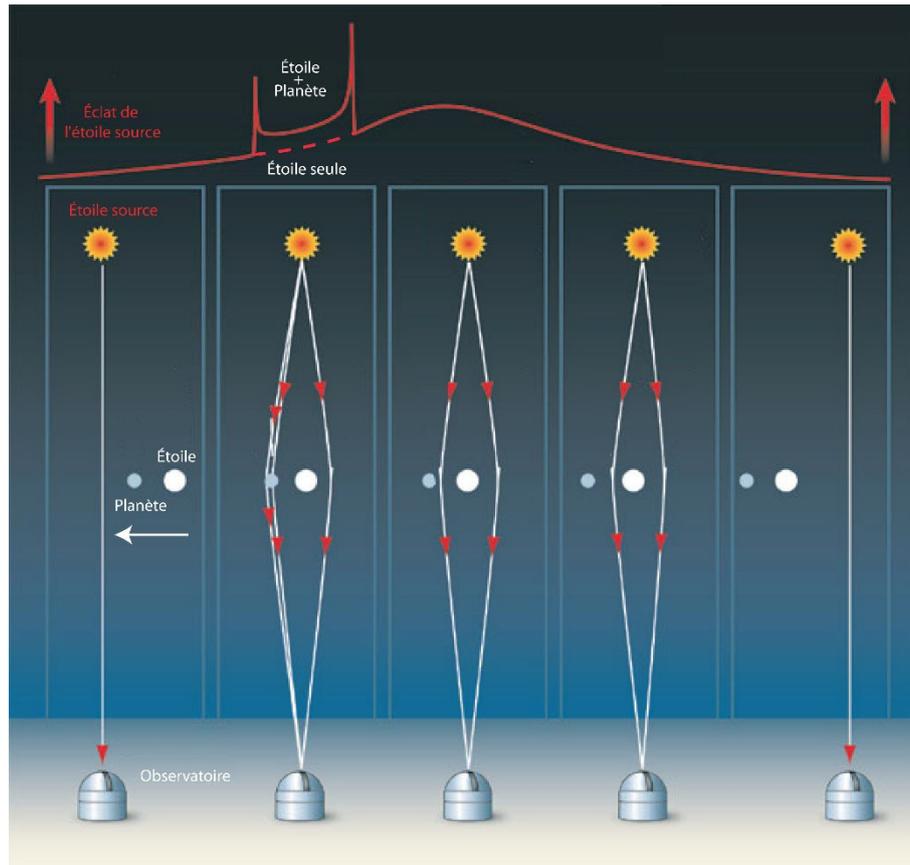
Si la source et l'observateur sont suffisamment éloignés de l'objet gravitant central, la déviation des rayons lumineux par le champ de l'objet peut former deux images de la source, l'une étant due aux rayons passant au-dessus et l'autre à ceux passant en dessous du corps gravitant. Si, par hasard, la source se trouve juste derrière un corps sphérique, l'observateur voit la source comme un anneau entourant le corps.



Un anneau d'Einstein en forme de fer à cheval capturé par le télescope spatial *Hubble*. La gravité d'une galaxie rougeâtre a déformé l'image d'une galaxie bleue située bien plus loin derrière elle. La plupart du temps, une telle déviation de la lumière se traduit par deux images distinctes de la galaxie d'arrière-plan. Toutefois, l'alignement est ici si parfait que l'image de la galaxie d'arrière-plan ébauche la forme d'un cercle parfait.
Crédit : ESA / Hubble et NASA.

La distorsion imposée par une lentille gravitationnelle affecte aussi la luminosité des images en l'augmentant. Les astronomes ont mis à profit ce coup de pouce de la nature pour détecter des objets trop peu lumineux pour être observés autrement.

À une plus petite échelle, une étoile proche et sa planète peuvent aussi agir comme des lentilles lorsqu'elles s'alignent avec une étoile distante : elles focalisent sa lumière. Depuis la Terre, on mesure une augmentation de la luminosité de l'étoile distante, due au passage de l'étoile au premier plan, suivie ou précédée par des pics de luminosité dus à la planète. Ce phénomène de *microlentille gravitationnelle* a permis la découverte de quelques dizaines d'exoplanètes et la détermination de leur masse.



Principe de la détection d'exoplanètes par la technique des microlentilles gravitationnelle. Lorsqu'une étoile lointaine s'aligne successivement avec une étoile et une planète, sa courbe de lumière montrera une large augmentation due à l'étoile sur laquelle se superposera un pic dû à la planète.

3 Récapitulatif des avantages et défauts des différentes méthodes de détection

✚ L'imagerie

Cette méthode directe, pour le moment relativement marginale, ne permet encore que de détecter des planètes assez éloignées de leur étoile pour ne pas être noyées dans leur tache de diffraction et suffisamment jeunes pour être fortement lumineuses dans l'infrarouge... si on les cherche dans ce domaine de longueur d'onde. Si la planète est détectée, l'étude de son spectre peut être envisagée avec, à la clé, des informations sur sa composition chimique et sa température. Toutefois, ni la masse ni le rayon de la planète ne sont directement accessibles.

✚ L'astrométrie

Un avantage indéniable de la méthode astrométrique est qu'elle est sensible aux planètes massives orbitant loin de leur étoile. Cela le rend complémentaire à d'autres méthodes qui sont plus sensibles aux planètes tournant près de leur étoile. Cependant, des temps

d'observation très longs sont nécessaires (des années voire des décennies), car les planètes suffisamment éloignées de leur étoile pour permettre la détection par astrométrie... mettent également beaucoup de temps à effectuer une orbite.

La méthode des vitesses radiales

Il s'agit d'une méthode nécessitant des spectres à haute résolution et donc des étoiles brillantes pour être efficace. Elle présente l'avantage de pouvoir contraindre les masses des exoplanètes... au facteur $\sin(i)$ près. Elle est toutefois affectée d'un biais puisque, par nature, elle est sensible aux planètes massives tournant près de leur étoile. Il n'est donc pas étonnant que les « Jupiter chauds » se soient taillé la part du lion parmi les premières découvertes. Encore fallait-il que ce type d'objet existât ! Les techniques s'affinant, il est désormais possible d'accéder à des planètes telluriques, beaucoup moins massives, mais à condition qu'elles soient suffisamment proches de leur étoile pour lui imprimer un mouvement réflexe non négligeable. De manière générale, les planètes très éloignées de leur étoile sont difficilement détectables, car la mise en évidence de leur signal impliquerait des décennies d'observation.

Les transits planétaires

Par définition, un transit permet de déterminer l'inclinaison de l'orbite de la planète par rapport au fond du ciel. Il donne accès à la taille de la planète, moyennant une hypothèse sur celle de l'étoile. Comme pour la méthode des vitesses radiales, la méthode des transits est affectée d'un biais : plus une planète est proche de son étoile, plus elle a de chance d'être à l'origine de transits. Si la probabilité de remarquer un transit pour une étoile en particulier est faible, elle est largement contrebalancée par la capacité des détecteurs photométriques à observer de très nombreuses étoiles simultanément. Enfin, les transits permettent de faire la spectroscopie en transmission de l'atmosphère des exoplanètes et ainsi d'en déterminer, entre autres, la composition. Du côté des inconvénients, on note la présence gênante de nombreux « faux positifs » dans les campagnes d'observation, qui sont fort heureusement souvent débusqués par la méthode des vitesses radiales... souvent, mais pas toujours. En effet, faire le spectre à haute résolution d'une étoile prend beaucoup de temps et nécessite de multiples nuits d'observation, puisqu'il faut l'enregistrer sur plusieurs périodes de révolution pour valider l'existence de la planète et la caractériser. De plus, un nombre non négligeable d'étoiles sont trop peu lumineuses pour faire l'objet d'un spectre exploitable. Ainsi, plus de la moitié des transits mesurés par le télescope spatial *Kepler* demeurent à ce jour de simples « objects of interest » selon l'expression officielle adoptée par les astronomes. De simples candidats au titre d'exoplanète...

Les lentilles gravitationnelles

Comme dans le cas des transits planétaires, il est possible d'observer un grand nombre d'étoiles simultanément, ce qui multiplie les chances de détection. Malheureusement, la détection est un événement unique et la planète détectée, dont on peut avoir une estimation de la masse et de la distance à son étoile, ne peut être réobservée.

4 La grande diversité des exoplanètes

Depuis 1995 et l'obtention de la première preuve observationnelle de l'existence des exoplanètes, près de 3700 systèmes ont été découverts. Aucune planète semblable à la Terre n'a encore été observée mais la quête ne fait que commencer...

On a trouvé des planètes :

- autour de naines rouges de faible masse et autour d'étoiles massives ;
- autour d'étoiles plus jeunes que le Soleil et autour d'étoiles plus âgées ;
- dans des systèmes d'étoiles doubles et même triples ;
- autour d'étoiles enrichies en éléments lourds (c'est-à-dire plus complexes que l'hydrogène et l'hélium) comme autour d'étoiles en étant presque dépourvues.

Toutefois, les étoiles riches en éléments lourds semblent mieux dotées en planètes. Cela est relié au scénario de formation des planètes, favorisée en présence de carbone, d'oxygène, etc.

Découvertes remarquables

1995 : découverte de la première exoplanète tournant autour d'une étoile semblable à notre Soleil, 51 Peg b.

1999 : HD 209458 b, découverte par la méthode des vitesses radiales, est également détectée par ses transits. On en déduit sa masse (0,69 fois la masse de Jupiter) et sa densité (0,37). Sa nature planétaire est définitivement prouvée. De plus, c'est une planète géante et gazeuse.

1999 : découverte du premier système planétaire. Au moins trois planètes gravitent autour de l'étoile *Upsilon Andromedae*.

2003 : première détection d'une atmosphère autour de HD 209458 b.

2004 : découverte de plusieurs planètes dont la masse est comprise entre cinq et quinze fois celle de la Terre. Ces planètes pourraient être des « super-Terre », des planètes géantes dépouillées de leur atmosphère et laissant à nu un noyau solide ou encore des planètes-océan, similaires à Neptune mais dont l'atmosphère aurait été soufflée et le manteau de glace liquéfié par l'étoile centrale.

2007 : découverte de Gliese 581c, première planète du type terrestre (sa masse vaut quand même au moins 5,5 fois celle de la Terre) située dans la zone habitable de son étoile, là où l'eau pourrait demeurer à l'état liquide de manière pérenne.

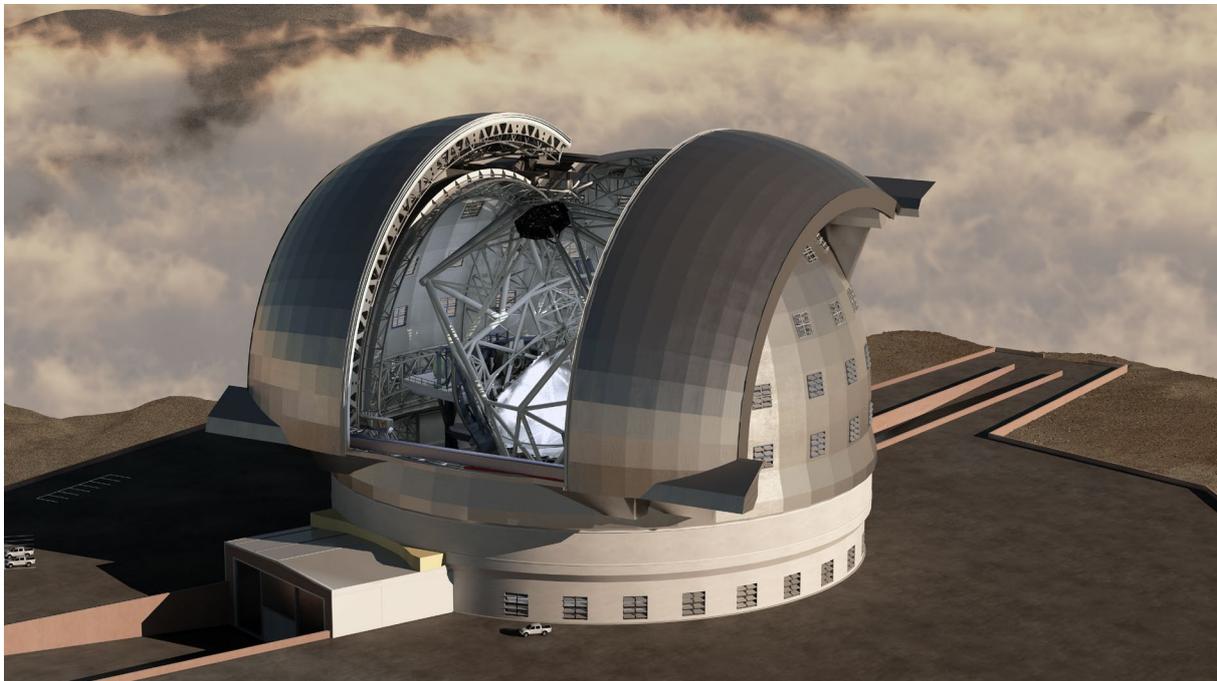
2016 : découverte d'une planète probablement tellurique et située dans la zone habitable de son étoile, en orbite autour de Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil.

2017 : l'équipe du télescope belge TRAPPIST (the TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope) annonce que le système planétaire autour de l'étoile TRAPPIST-1 comporte 7 planètes telluriques, dont 3 en zone habitable.

Les découvertes d'exoplanètes vont continuer à pleuvoir dans les années à venir. Beaucoup de données envoyées par le télescope *Kepler*, aujourd'hui inactif, restent à dépouiller. Le télescope astrométrique *Gaia* est en plein travail. Les missions *TESS* (Transiting Exoplanet Survey Satellite) et *CHEOPS* (CHAracterising ExOPlanets Satellite) débutent à peine leur quête. Les futures missions spatiales dédiées – au moins partiellement – aux exoplanètes *PLATO* (PLANetary Transits and Oscillations of stars), *Nancy-Grace-Roman* et *ARIEL* (Atmospheric Remote-Sensing Infrared Exoplanet Large-survey) ne prendront pas leur envol respectif avant 2026, 2027 et 2029. Le *James-Webb Space Telescope* (lancé en décembre 2021) contribuera à leur étude... ainsi que de nombreux instruments au sol dont l'*Extremely Large Telescope* et le *Thirty Meter Telescope* (2027 ?).

Terre à l'horizon

La recherche des exoplanètes de type terrestre constitue une des étapes dans la quête d'une vie extraterrestre. Une éventuelle activité biologique pourrait avoir un impact sur leur composition atmosphérique. Des molécules comme le méthane, le chlorométhane CH_3Cl ou le sulfure de diméthyle $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ pourraient être des traceurs (des *biomarqueurs*) intéressants, peut être encore meilleurs et moins ambigus que le dioxygène (O_2).



Vue d'artiste du futur *Extremely Large Telescope* européen et de son gigantesque miroir primaire de 39,3 m. Il est actuellement en construction sur le Cerro Armazones, un sommet des Andes situé au nord du Chili.

Crédit : Swinburne Astronomy Productions / ESO.

5 Bibliographie et sitographie

5.1 Bibliographie

Ouvrages en langue française

Michel Dobrijevic, **Découverte de l'astronomie par l'exemple. La planète extrasolaire Proxima b**, éd. Ellipses, 2021.

Présentation de l'éditeur : « L'objectif de ce cours d'astronomie et des nombreux exercices corrigés qui sont proposés est de faire découvrir les notions de base de l'astronomie. Ces notions font appel aux différents cours de physique de licence universitaire comme la mécanique du point, l'optique géométrique, l'optique ondulatoire, la physique des particules, la mécanique des fluides, etc.

La principale originalité de cet ouvrage est d'appliquer toutes les notions théoriques présentées à un seul objet astrophysique : le système stellaire α Centauri et l'exoplanète en orbite autour de Proxima.

Ce livre s'adresse aussi à tous les passionnés d'astronomie qui trouveront dans les différents chapitres de ce cours et dans les exercices toutes les explications qui leur permettront de comprendre le contenu des pages Wikipédia des trois étoiles de α Centauri et de l'exoplanète récemment découverte. »

Stéphane Mazevet, **Les exoplanètes et la vie dans l'Univers. À la recherche de nos origines**, éd. Odile Jacob, 2021.

Présentation de l'éditeur : « Sommes-nous seuls ? Y a-t-il dans l'Univers d'autres vies que la nôtre ? La Terre est-elle une arche unique ? Pour faire le point sur ces questions, Stéphane Mazevet nous entraîne aux confins du temps, de l'espace et de notre savoir. Il y a quatre cents ans, l'humanité comprend que la Terre n'est pas au centre de l'Univers. Il y a cent ans, elle admet l'existence d'autres galaxies. Il y a cinquante ans, elle met le pied sur la Lune. Depuis, des robots se sont posés sur Mars... Et nous voyons au-delà du système solaire : les premières exoplanètes ont été détectées dans les années 1990. On en dénombre aujourd'hui plus de 4 000. Au cœur de cette incroyable épopée scientifique et technique, le désir de connaître notre Univers, mais aussi, brûlante, la question de la vie – ailleurs. Stéphane Mazevet raconte ces progrès de l'astrophysique, qui ont bouleversé ce que nous savions du système solaire et du cosmos. De surprise en surprise, notre représentation de l'Univers évolue à mesure que nous embrassons un horizon de plus en plus vaste. La quête de planètes peut-être habitables devient aujourd'hui un champ de recherche actif.

Ce livre est un « guide du voyageur galactique » plus fascinant que la fiction, pour visiter le Very Large Telescope du désert d'Atacama et tout savoir sur les Jupiters chauds, les Super-Terres et les planètes océans... »

David Fossé, peintures de Manchu, **Exoplanètes**, éd. Belin, 2018.

Présentation de l'éditeur : « En 1995, la découverte de la première planète autour d'une autre étoile est un choc : 51 Pegasi b est deux fois plus grosse que Jupiter et l'année y dure... 4 heures ! Les astronomes se retrouvent confrontés à un monde qui ne peut pas exister... 20 ans plus tard, nous avons découvert environ 4 000 planètes extrasolaires et nous pensons qu'il en existe plusieurs centaines de milliards dans la Galaxie. La diversité de ces mondes lointains est immense : planètes-océans, géantes gazeuses qui s'évaporent, planètes à trois soleils, planètes métalliques ou de diamant... Non seulement la pluralité des mondes est une réalité, mais elle est en plus absolument extravagante ! Nous en savons aujourd'hui assez pour comprendre à quel point les exoplanètes sont différentes de ce que l'on connaît, mais nous n'avons pas encore les moyens, jusqu'à présent, de les voir vraiment. Mais grâce aux talents conjoints de Manchu et de David Fossé, il vous est désormais possible d'explorer le zoo des planètes extrasolaires - géantes gazeuses, « super-Terre » et « mini-Neptune », et exo-Terre - et de voyager dans ces mondes étranges... Un formidable cocktail de rigueur scientifique et d'imagination qui fascinera tous ceux qui ont un jour rêvé d'ailleurs en levant la tête pour regarder les étoiles. »

Flavien Kiefer, **Les exoplanètes. À la recherche des nouveaux mondes**, éd. De Boeck Supérieur, 2019.

Présentation de l'éditeur : « Aujourd'hui, grâce aux yeux des plus puissants télescopes, nous savons que les 200 milliards d'étoiles qui constituent notre galaxie sont presque autant de soleils entourés de planètes. Les mondes extra-terrestres ne sont donc plus une science-fiction.

Pour autant, comment ces exoplanètes se sont-elles formées ? Comment peut-on se les représenter ? Pourront-elles un jour nous révéler une forme de vie à leur surface ? Star Wars, Dr. Who, Moebius, Azimov... autant d'inspiration artistiques et scientifiques. Mais sont-elles bien à l'image de ce que sont réellement les exoplanètes ? »



James Lequeux, Thérèse Encrenaz, Fabienne Casoli, **La révolution des exoplanètes**, éd. EDP Sciences, 2017.

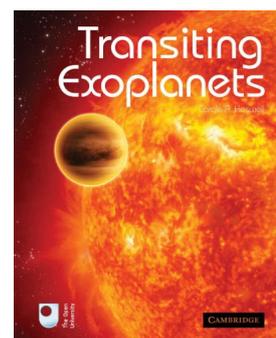
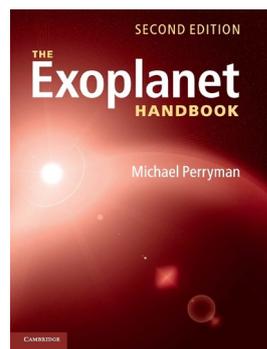
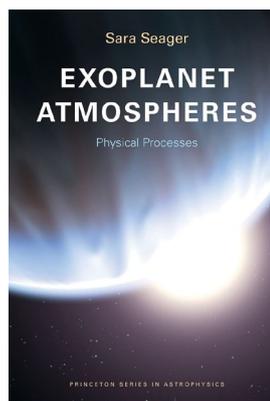
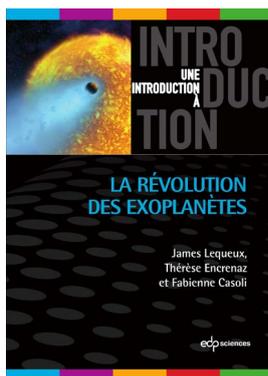
Présentation de l'éditeur : « Plus de 3600 planètes autour d'étoiles proches ! Qui aurait pu imaginer cette extraordinaire moisson il y a seulement vingt ans ? La grande majorité des étoiles est entourée de planètes, dont il doit y avoir plus de cent milliards dans notre Galaxie. Le Système solaire n'est donc plus un cas isolé, bien qu'il soit différent de la plupart des systèmes extérieurs que nous connaissons aujourd'hui. Comprendre la nature des exoplanètes et de leur atmosphère et savoir comment se sont formés et ont évolué des systèmes planétaires aussi divers sont autant de challenges auxquels travaillent des centaines de chercheurs dans le monde. Et puis, certaines de ces planètes abritent peut-être la vie. Nous n'avons pas encore de réponse à cette question, mais les nouveaux moyens d'observation dont disposent et disposeront bientôt les astronomes sont si puissants qu'ils devraient permettre d'en obtenir des éléments dans quelques décennies, et peut-être même dans quelques années si nous avons de la chance. Faire le point sur un sujet aussi mouvant et aussi complexe est un défi que nous avons tenté de relever. Il nous a en effet paru utile de donner dans ce livre les bases nécessaires pour comprendre des travaux actuels sur les exoplanètes, qui sont si nombreux et si divers qu'il est facile de s'y perdre. »

Ouvrages en langue anglaise, de niveau universitaire

Michael Perryman, **The Exoplanet Handbook**, éd. Cambridge University Press, 2018 pour la seconde édition.

Carole Haswell, **Transiting Exoplanets**, éd. Cambridge University Press, 2010.

Sara Seager, **Exoplanet Atmospheres. Physical Processes**, éd. Princeton University Press, 2010.



Et les magazines de diffusion de l'actualité astronomique *Ciel & Espace*, *L'Astronomie*, *Sky & Telescope*, *Astronomy*, *BBC Sky at Night*...

5.2 Sitographie

L'encyclopédie des planètes extrasolaires.

<http://exoplanet.eu/>

Sciences pour les Exoplanètes et les Systèmes Planétaires, cours en ligne de l'[Observatoire de Paris](#) et du [LabEx ESEP](#).

<http://sesp.esep.pro/fr/>

Exoplanètes, site de l'[Observatoire de Paris](#), catalogue des exoplanètes connues et de leurs caractéristiques, outils de visualisation et de traitement statistique, cartes du ciel, TP guidés.

<http://exoplanetes.esep.pro/>

Une sélection d'articles récents parus dans la revue *Pour la Science* sur le thème des exoplanètes.

<https://www.pourlascience.fr/theme/exoplanetes/>

Une simulation en ligne vous permettant d'explorer la méthode des vitesses radiales et celle des transits.

<http://akabazo.fr/aLAM/exoP2019/index.html>

Universcience, l'établissement public qui réunit la Cité des sciences et de l'industrie et le Palais de la découverte, a lancé en mars 2019 [le blob, l'extra-média](#). Gratuit, sans abonnement et sans publicité, le blob est un média de service public. Il propose une nouvelle vidéo à la une chaque jour, avec un fil d'actualité scientifique quotidien et des enquêtes mensuelles sur les grands enjeux contemporains, mêlant donc sujets de fond et actualité « chaude ».

Une recherche avec les mots-clés « exoplanète » ou « extrasolaire » vous mènera à de nombreux articles et des vidéos en lien avec notre sujet.

Open Exoplanet Catalogue, catalogue des exoplanètes connues et de leurs caractéristiques. En langue anglaise.

<http://www.openexoplanetcatalogue.com/>



Un dossier en ligne proposé par l'Université Paris Saclay, le CEA et Exoplanets A, un projet de recherche européen H2020, avec des vidéos explicatives.

<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=352>

1. Les définitions d'une planète et d'une exoplanète
<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=353>
2. Distances astronomiques
<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=354>
3. Limites d'un télescope
<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=355>
4. Diversité des étoiles
<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=356>
5. Techniques de détection des exoplanètes
<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=357>
6. Système exoplanétaire Trappist-1
<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=358>
7. Observation des atmosphères exoplanétaires
<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=359>
8. Concept de l'habitabilité des exoplanètes
<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=360>
9. Futures missions spatiales
<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=361>

Imagerie des exoplanètes dans les zones habitables des étoiles proches

<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=444>

Portrait de Jérôme, chercheur en traitement du signal et analyse de données

<http://irfu.cea.fr/Phoce/Video/index.php?id=416>

Et tous les sites académiques des missions citées...

Annexe *Quelques calculs d'angles*

Quel angle sous-tendent 100 000 km observés depuis une distance de 50 années-lumière ?

Une année-lumière est la distance parcourue par la lumière, dans le vide, en une année julienne de 365,25 jours. Sachant que la vitesse de la lumière dans le vide est une constante fixée à 299 792,458 km.s⁻¹, 50 années-lumière représentent la bagatelle de :

$$50 \times 299\,792,458 \times 3600 \times 24 \times 365,25 \approx 4,73 \cdot 10^{14} \text{ km}$$

Exprimée en radian, la taille apparente θ d'un corps de taille R situé à une distance très grande d devant sa taille s'écrit :

$$\theta = \frac{R}{d}$$

Avec $R = 100\,000$ km et $d \approx 4,73 \cdot 10^{14}$ km, il vient $\theta \approx 2,11 \cdot 10^{-10}$ rad.

Le passage des radians aux degrés nécessite une multiplication par le facteur $180/\pi$, ce qui donne $\theta \approx 1,21 \cdot 10^{-8}$ °. Enfin, la conversion en seconde d'arc impose une dernière multiplication par 3600 : $\theta \approx 4,36 \cdot 10^{-5}$ " soit 43,6 μ as.

Une ligne longue de 100 000 km, observée à une distance de 50 années-lumière de telle sorte qu'elle soit perpendiculaire à la ligne de visée, sous-tend un angle de 43,6 μ as.

Pour connaître la distance à laquelle il faudrait placer un cheveu pour que son épaisseur soit vue sous un angle équivalent, il suffit de faire le chemin inverse et d'utiliser l'équation :

$$d = \frac{R}{\theta}$$

Avec $R = 70$ μ m et $\theta \approx 2,11 \cdot 10^{-10}$ rad, il vient $d \approx 33,2 \cdot 10^{10}$ μ m ≈ 332 km.