

> captivantes est celle de « systèmes solaires miniatures ». Ceux-ci hébergent jusqu'à six planètes entassées sur des orbites plus proches de leur étoile que celle de Mercure autour du Soleil. Et cette configuration est loin d'être rare. Si vous prenez au hasard dans le ciel une étoile du même type que le Soleil, vous avez 50% de chances qu'elle héberge une planète plus grande que la Terre sur une orbite plus rapprochée que Mercure. Personne n'avait anticipé que de telles planètes pouvaient être monnaie courante. En réalité, certaines des théories de formation des planètes les plus abouties suggéraient même que ces configurations étaient rares.

La mission *Kepler* a aussi découvert des planètes rares, mais si extrêmes qu'elles n'avaient été imaginées que par les auteurs de science-fiction. L'une de mes préférées est KOI 1843.03, une planète de la taille de la Terre si proche de son étoile que la température de la face éclairée y atteint plusieurs milliers de degrés. Sa surface est probablement couverte d'un océan de magma, qui ne serait pas sans rappeler la planète imaginaire Mustafar de la saga *Star Wars*. KOI 1843.03 suit une orbite si rapprochée de l'étoile qu'elle accomplit un tour en 4,25 heures.

Autre exemple : avec ses deux étoiles, l'exoplanète Kepler-16b ressemble à Tatooine, un autre monde de l'univers de *Star Wars*. La planète évolue autour des deux étoiles qui tournent l'une autour de l'autre. Citons aussi le système de l'étoile Kepler-36, où deux planètes évoluent quasiment sur la même orbite, ce qui les amène à interagir l'une avec l'autre de façon chaotique. Ainsi, même si nous connaissions la position au mètre près de ces planètes à un instant donné, nous serions incapables de calculer la position qu'elles occuperont dans une vingtaine d'années. C'est un exemple astrophysique de chaos déterministe, ou « effet papillon » : même en partant de conditions initiales très proches, l'évolution du système conduit à des configurations très différentes. Sur Terre, la révolution scientifique a débuté en comprenant le mouvement des planètes. Imaginez à quel point cela serait compliqué pour les éventuels savants qui vivent dans le système Kepler-36 !

L'une des questions qui motive les astrophysiciens est de savoir si les planètes comparables à la Terre en taille et en masse sont rares dans l'Univers. Les scientifiques cherchent surtout des mondes qui, potentiellement, renferment des océans d'eau liquide. Pour satisfaire ce dernier point, les planètes doivent se trouver à une certaine distance de l'étoile qui leur fournit de la chaleur : trop éloignées, l'eau y serait gelée, trop proches, l'eau n'y existerait que sous forme de vapeur. L'intervalle des distances acceptables est dénommé « zone habitable » par les astrophysiciens, qui supposent que l'eau est un élément essentiel à l'émergence de la vie, comme cela a été le cas sur Terre. Mais cela ne signifie

pas qu'une planète située dans la zone habitable de son étoile contienne de l'eau liquide, que les conditions y soient réellement propices à la vie et que la vie s'y soit développée. Malgré la dizaine de candidates découvertes dans la zone habitable de leur étoile par *Kepler*, il est trop tôt pour dire si la Terre est une planète banale ou rare. Des analyses plus précises des données recueillies sont nécessaires.

ÉLARGIR L'HORIZON

La mission *Kepler* a été un succès malgré certaines limitations : le télescope ne pointait que dans une seule direction et n'observait qu'une petite fraction de la voûte céleste (1/400° pour être précis). Pour compenser la faible taille angulaire de la zone inspectée, *Kepler* devait examiner les étoiles proches dans cette région mais aussi celles plus lointaines afin d'obtenir un échantillon assez fourni, qui se prête à des analyses statistiques. Ainsi, une étoile typique du catalogue de *Kepler* se situe à 1 000 années-lumière.

Certes, il est spectaculaire de pouvoir détecter une exoplanète aussi lointaine. Mais la distance nuit à la qualité des observations. Plus une étoile est lointaine, moins elle est lumineuse, ce qui limite la précision des données recueillies, voire rend impossible certaines mesures. Par exemple, nous sommes incapables d'estimer la masse de la plupart des planètes du catalogue *Kepler*. Le signal du transit permet de

La planète KOI 1843.03 est si proche de son étoile qu'elle est couverte d'un océan de magma

calculer le diamètre de la planète, mais pas sa masse. Cela laisse une grande inconnue sur le type de planète auquel on a affaire. S'agit-il d'une planète dense et rocheuse comme la Terre ? Ou d'une planète diffuse et gazeuse comme Jupiter et Saturne ? Ou de quelque chose d'intermédiaire ? Seule la combinaison des informations de masse et de diamètre nous permettrait de répondre avec certitude.

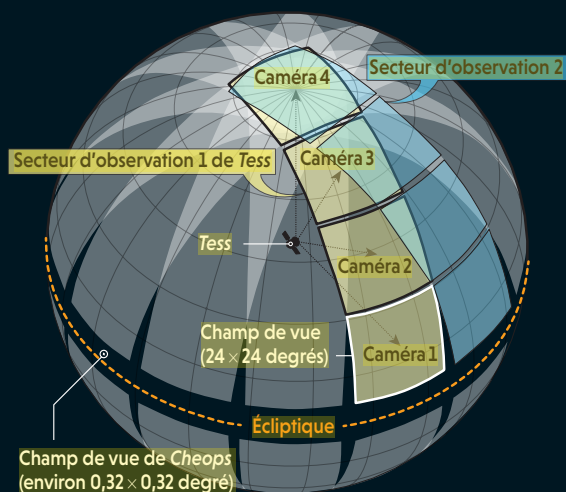
Pour déterminer la masse d'une planète, le moyen habituel est de mesurer les infimes mouvements de l'étoile en réaction à la petite attraction gravitationnelle de la planète. En effet, le

COMMENT TRAQUER UNE EXOPLANÈTE ?

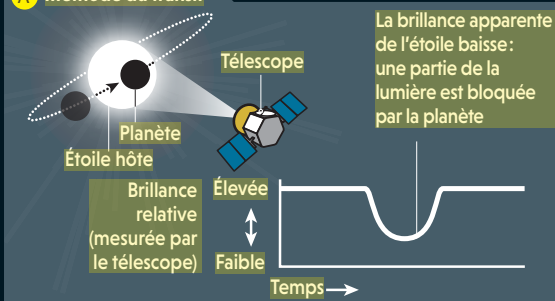
Il existe plusieurs méthodes pour détecter des exoplanètes. Les deux plus efficaces sont la méthode du transit et celle faisant appel à l'effet Doppler. Les informations qu'elles livrent sont cependant complémentaires. Les futurs télescopes spatiaux *Tess* et *Cheops* utiliseront la méthode du transit.

Stratégie d'observation

Tess observera 90 % de la voûte céleste grâce à quatre caméras qui couvriront à tout instant un secteur de 24 degrés par 96. Le ciel sera divisé en 26 secteurs qui se recouvrent, et *Tess* consacrera un mois d'observation par secteur. *Cheops* se focalisera sur des étoiles individuelles pour lesquelles on suspecte la présence d'exoplanètes.



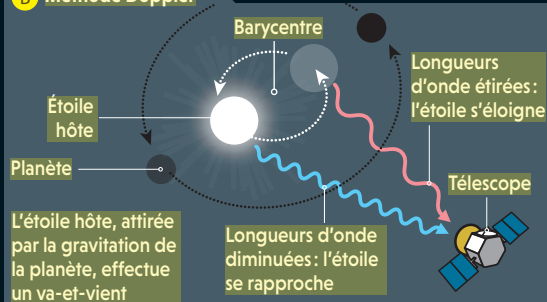
A Méthode du transit



Comment trouver une exoplanète

Les télescopes *Kepler*, *Tess* et *Cheops* utilisent la méthode du transit **A**. Quand une planète passe devant l'étoile dans la ligne de visée du satellite, elle bloque une partie de la lumière stellaire. L'étoile paraît donc moins brillante. L'effet est périodique et se reproduit à chaque passage de la planète en orbite. Une seconde méthode s'appuie sur l'effet Doppler **B**. Si l'on détecte un décalage Doppler périodique dans les longueurs d'onde de la lumière reçue de l'étoile, c'est que celle-ci bouge d'avant en arrière de façon régulière. L'influence gravitationnelle d'une planète en orbite autour de l'étoile en est la cause : les deux corps tournent autour de leur barycentre.

B Méthode Doppler



système étoile-planète évolue autour de son barycentre, qui ne coïncide pas avec le centre de l'étoile. L'étoile a ainsi un petit mouvement de rotation autour de ce barycentre. Il est possible de déceler ce petit mouvement, qui est d'autant plus marqué que la planète est massive, à l'aide de l'effet Doppler : la longueur d'onde du rayonnement reçu de l'étoile diminue ou augmente légèrement selon que l'astre se rapproche de la Terre ou s'en éloigne (voir l'encadré ci-dessus).

Cette technique exige cependant des mesures spectroscopiques de précision, portant sur un minimum d'environ 50 000 longueurs d'onde différentes. Pour des étoiles de faible luminosité, le rayonnement capté est insuffisant pour réaliser ces mesures.

Une future mission de la Nasa, *Tess* (*Transiting exoplanet survey satellite*), pour laquelle je suis coresponsable, a pour objectif de dépasser les limitations de *Kepler*. *Tess* embarquera quatre télescopes, chacun de 10 centimètres de diamètre, soit un dixième du télescope de *Kepler*. Ce choix peut sembler étrange (en général, le progrès s'accompagne plutôt de télescopes de plus en plus grands). Mais les

télescopes plus petits ont l'avantage d'avoir un champ de vision plus large. Cette relation entre taille et champ de vision est dictée par les lois de l'optique. Chaque caméra de *Tess* voit ainsi une portion 6 fois plus grande du ciel que *Kepler*, et *Tess* pourra pivoter de façon à pointer dans différentes directions. Finalement, *Tess* devrait observer beaucoup plus d'étoiles que *Kepler*.

La mission *Tess* décollera entre mars et juin de cette année. Et durant les deux prochaines années, elle passera en revue environ 90 % du ciel qui sera divisé en 26 secteurs se recouvrant. Chaque secteur sera exploré pendant un mois. Comme pour *Kepler*, nous espérons découvrir des milliers d'exoplanètes avec *Tess*, mais celles-ci seront situées autour d'étoiles typiquement 30 fois plus brillantes. Cela permettra notamment aux observatoires au sol de prendre le relais de *Tess*, ce qui était plus difficile avec les étoiles peu lumineuses sondées par *Kepler*.

Peu après *Tess*, c'est la mission européenne *Cheops* (*Characterising exoplanet satellite*) qui prendra son envol à la fin de 2018. *Cheops* est équipé d'un unique télescope de 32 centimètres de diamètre. Son rôle, bien que différent, sera ➤