

L'EXPLORATION DES EXOPLANÈTES

UNE RÉVOLUTION EN ASTRONOMIE

Thérèse Encrenaz, LIRA, Observatoire de Paris-PSL

Il y a tout juste trente ans, le 6 octobre 1995, Michel Mayor et Didier Queloz, astronomes à l'Observatoire de Genève, annonçaient la découverte d'une planète géante à proximité immédiate d'une étoile de type solaire, 51 Pégase. La nouvelle fit l'effet d'une bombe. Ce n'était pourtant pas la première planète extrasolaire (aussi appelée "exoplanète") découverte : quelques années plus tôt, le radioastronome Aleksander Wolszczan avait découvert une petite planète autour d'un pulsar, une petite étoile en fin de vie. Dans le cas de l'exoplanète 51 Peg b, au-delà de la découverte de la première exoplanète en orbite autour d'une étoile de type solaire, c'est la nature de ce nouveau système stellaire qui a provoqué la surprise. En effet, nul ne s'attendait à découvrir une exoplanète géante tournant autour de son étoile en seulement quatre jours – un scénario complètement différent de celui du Système solaire (figure 1) : Mercure, la planète la plus proche, tourne autour du Soleil en 88 jours, tandis que Jupiter, la planète géante la plus proche, boucle sa révolution en une douzaine d'années.

Avec la découverte de 51 Peg b, on avait donc la confirmation du fait que le Système solaire n'est pas unique dans le cosmos – ce dont on se doutait – mais on découvrait surtout qu'il n'était en rien représentatif des systèmes stellaires qui nous entourent. Aujourd'hui, nous connaissons plus de 7900 exoplanètes. Celles-ci présentent une extrême diversité, du point de vue de leurs propriétés physiques comme de leurs caractéristiques orbitales.

Depuis son origine, l'humanité s'interroge sur l'existence possible

d'autres mondes en dehors du Système solaire, et la question de la pluralité des mondes, habités ou non, a été au cœur des débats entre philosophes et scientifiques. Avec le développement des instruments d'optique, les astronomes entreprennent, dès le XIX^e siècle et tout au long du XX^e siècle, d'identifier la présence de ces fameuses exoplanètes. Ils savent que ce n'est pas une tâche facile : en lumière visible, le rayonnement d'une exoplanète près de son étoile ne représente qu'un dix-millionième (10^{-7}) de celui de l'étoile. Il faut donc faire appel à des méthodes indirectes pour la mettre en évidence. La plus simple consiste à mesurer le petit mouvement de l'étoile qui tourne autour du centre de gravité du système étoile-planète. Les astronomes essaient de repérer le petit mouvement de l'étoile par comparaison avec les autres étoiles du champ, mais la précision astrométrique des mesures est insuffisante pour permettre la détection d'une exoplanète par cette méthode. Il faudra attendre, au début du

XXI^e siècle, les mesures du satellite spatial Gaia. Nous présentons ci-dessous les trois principales méthodes ayant permis la détection des exoplanètes, celle des vitesses radiales, celle des transits, et celle, plus récente, de l'imagerie directe.

La méthode des vitesses radiales

Vers la fin du XX^e siècle, les astronomes se tournent vers une méthode plus précise que l'astrométrie : au lieu de mesurer le mouvement de l'étoile dans le plan du ciel, ils déterminent sa vitesse par rapport à l'observateur en mesurant le décalage spectral associé à l'effet Doppler-Fizeau (figure 2). Dans le cas du Système solaire, la présence de Jupiter induit, pour le Soleil, une variation de vitesse qui peut être détectée depuis un point éloigné, avec une période proche de 12 ans. Il s'agit donc, a priori, d'un programme de longue haleine. C'est là que la chance vient servir les astronomes ! Dans la foulée de 51 Peg b,

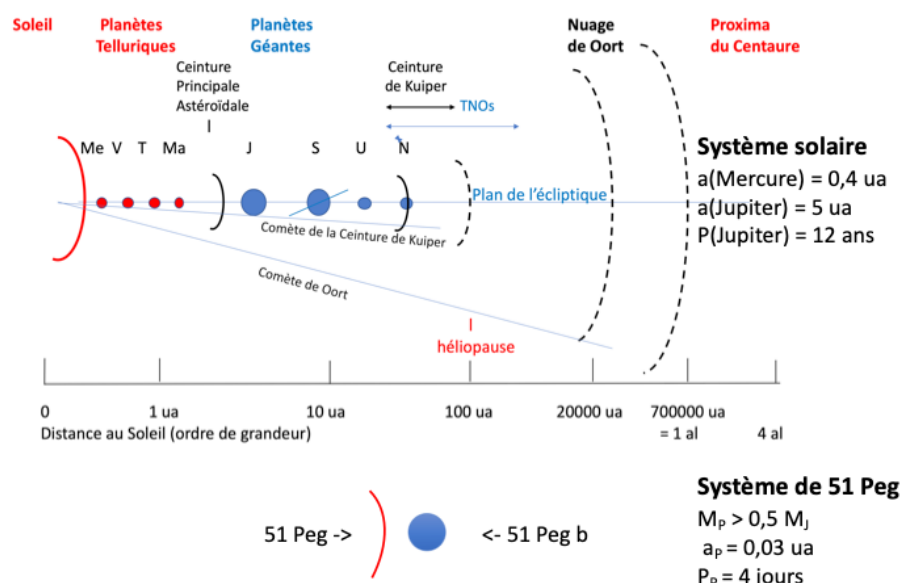


Fig.1. Schéma comparatif du Système solaire (en haut) et du système de 51 Peg (en bas). Les échelles ne sont pas respectées.

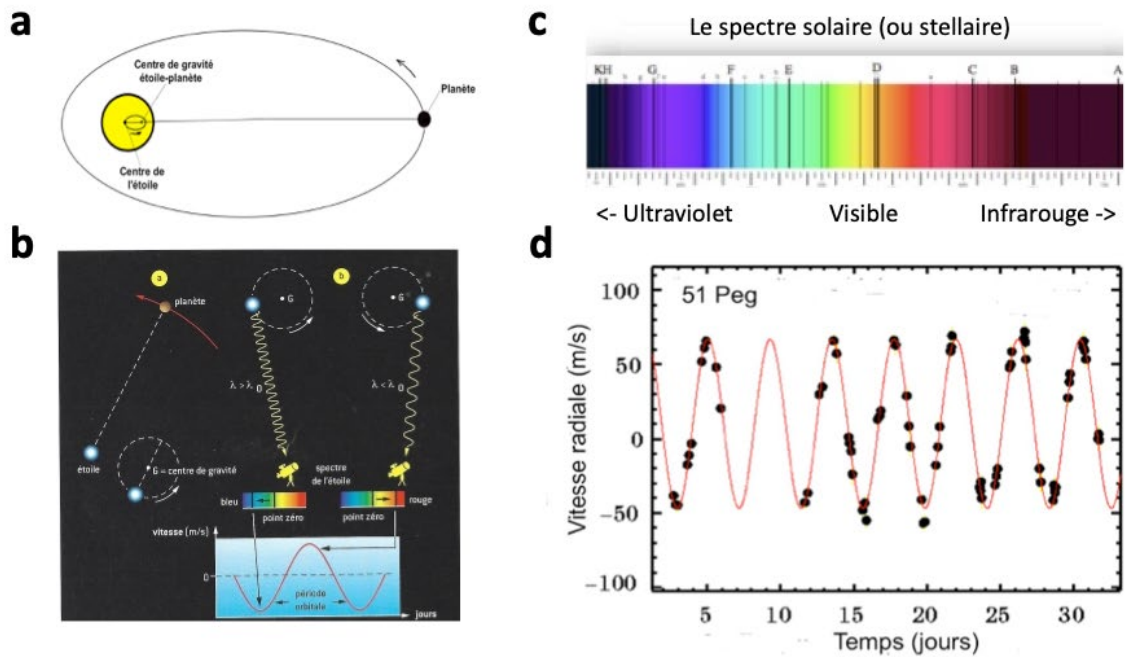


Fig.2. Illustration de la méthode des vitesses radiales. (a) : mouvement de l'étoile par rapport au centre de gravité du système étoile-planète. (b) : modification de la fréquence du signal émis par l'étoile suite à ce mouvement (effet Doppler-Fizeau). (c) le spectre du Soleil (ou d'une étoile de type solaire) dans le domaine visible. (d) : courbe montrant la modulation de la vitesse de l'étoile 51 Peg due à la présence de la planète. La période des oscillations correspond à la période de révolution de la planète autour de l'étoile (4 jours). Crédits : (b) d'après F. Casoli et T. Encrenaz, « Planètes extrasolaires », Belin, 2005. (d) d'après M. Mayor et D. Queloz, Nature 378, 335).

les premières exoplanètes géantes détectées par cette méthode sont toutes très proches de leur étoile, ce qui rend leur détection possible en quelques mois.

La méthode des vitesses radiales sera la source principale de détection des exoplanètes jusqu'à la fin du xx^e siècle. La plupart des exoplanètes découvertes sont massives et proches de leur étoile, car ce sont les deux facteurs qui rendent leur détection plus facile.

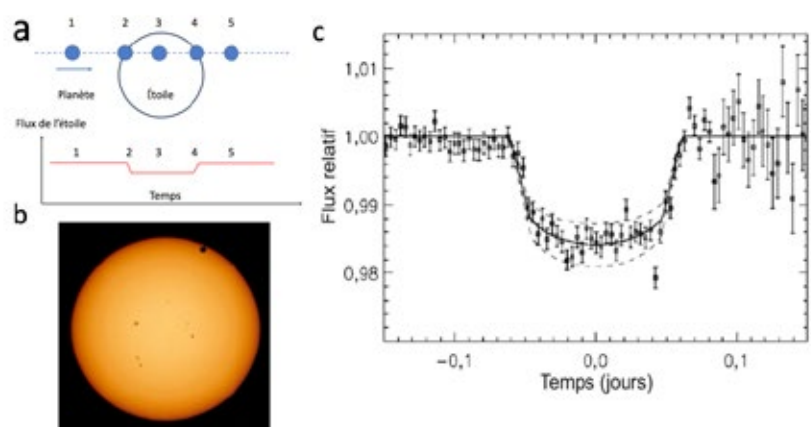
La méthode des transits

Avec le tournant du siècle est apparue une deuxième méthode, indirecte elle aussi : c'est la méthode des transits, qui consiste à mesurer en permanence le flux d'une étoile en fonction du temps avec la plus grande précision possible. Si une planète est présente et si l'observateur est placé dans le plan de son orbite, la lumière de l'étoile est légèrement occultée lors du passage de la planète devant l'étoile (figure 3), c'est ce que l'on appelle un transit. La courbe de lu-

mière de l'étoile présente alors une série de chutes de signal à intervalles réguliers, ce qui traduit la présence de la planète. Il faut toutefois se méfier des sursauts stellaires périodiques qui peuvent conduire à des courbes de lumière similaires ; c'est pourquoi, lorsqu'une exoplanète candidate est annoncée par la mesure de transits, on tente de la confirmer au moyen de la méthode des vitesses radiales. Dans le cas du Système solaire, le transit de Jupiter devant le Soleil se traduit par une baisse de

signal de 1% de la lumière solaire. Cette mesure peut être réalisée depuis la Terre car la précision photométrique des caméras numériques permet d'atteindre le pourcent. La détection des exoplanètes géantes depuis la Terre est donc possible depuis les télescopes terrestres et de vastes programmes systématiques se sont mis en place avec cet objectif. En revanche, la détection des exoplanètes de la taille de la Terre (appelées exo-Terres) demande une précision de 0,01%, qui ne peut être obtenue

Fig.3. Illustration de la méthode des transits. (a) : schéma de principe ; (b) transit de Vénus observé le 6 juin 2012 ; (c) Première courbe de transit observée depuis la Terre. Crédits : (b) Wikipédia Creative Commons ; (c) d'après D. Charbonneau et al. Astrophys. J. 529, L45, 2000.



depuis le sol terrestre ; il faut donc aller dans l'espace.

La première mission dédiée à la recherche d'exoplanètes par transit a été lancée par la France en 2006 : c'est la mission *CoRoT*, aussi consacrée à l'étude de la structure interne des étoiles par sismologie. En opération jusqu'en 2013, elle a détecté plusieurs dizaines d'exoplanètes et a pu déjà mettre en évidence leur extrême diversité. Une mission américaine à l'instrumentation plus performante, *Kepler*, a pris le relais en 2009 avec un extraordinaire succès. Au terme de son opération, en 2018, elle a détecté plus de 2 600 exoplanètes confirmées. Elle a permis de montrer que les étoiles étaient, en moyenne, dotées d'au moins une planète et elle a mis en évidence de nombreux systèmes multiples. Elle a aussi découvert l'existence de nombreuses exoplanètes de masse comprise entre celle de la Terre et celle de Neptune. Après *Kepler*, une autre mission américaine a pris le relais : c'est la mission *TESS*, lancée en 2018 et toujours en opération, qui a déjà détecté plus de 1 000 exoplanètes.

L'imagerie des exoplanètes : une méthode de détection directe

On l'a vu, la détection directe d'une exoplanète est extrêmement difficile, car sa lumière est noyée dans celle de son étoile-hôte. Des recherches ont été menées pour diminuer au maximum le contraste entre la lumière de la planète et celle de son étoile. Ceci peut se faire à partir de télescopes terrestres, en jouant sur plusieurs facteurs qui peuvent s'additionner : (1) choisir une étoile peu brillante (naine rouge) ; (2) occulter au maximum la lumière de l'étoile au moyen d'un coronographe (comme on le fait dans le cas du Soleil pour observer la couronne solaire) ; (3) utiliser un dispositif dit « d'optique adaptative » pour corriger en temps réel les effets de la

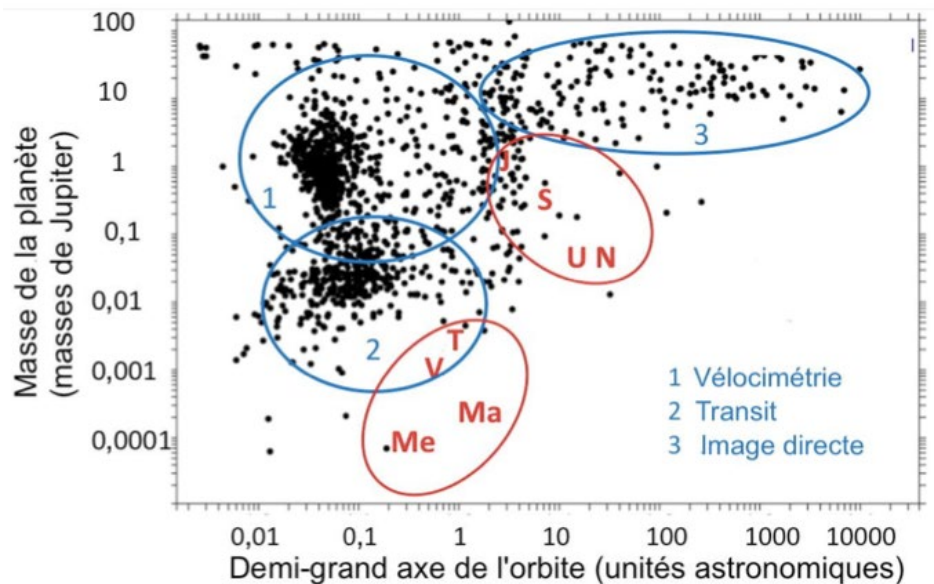


Fig.4. Diagramme représentant les exoplanètes en fonction de la distance à leur étoile (en abscisse) et de leur masse (en ordonnée). Les planètes du Système solaire sont représentées en rouge. On voit apparaître 3 catégories : (1) les « Jupiters chauds » détectés par la méthode des vitesses radiales, (2), les « super-Terres » et les « Neptunes » principalement détectés par transit, et (3) les exoplanètes géantes éloignées de leur étoile, détectées par imagerie directe. Crédit : exoplanet.eu.

turbulence atmosphérique ; (4) observer dans l'infrarouge proche pour augmenter le contraste de flux entre la planète et l'étoile ; (5) rechercher des planètes éloignées de leur étoile et jeunes, capables d'émettre un rayonnement infrarouge propre.

Plusieurs instruments, conçus dans l'objectif de détecter ce type d'exoplanètes par imagerie directe, équipent aujourd'hui les grands télescopes de la classe de 10 mètres. Une cinquantaine d'exoplanètes ont été détectées à ce jour par imagerie directe, et leur nombre est appelé à croître rapidement dans les années à venir.

Comment étudier l'atmosphère d'une exoplanète ?

Depuis plus d'un siècle, les astronomes utilisent la spectroscopie pour étudier à distance la nature des astres (planètes, étoiles, galaxies) qu'ils observent. Cette méthode consiste à analyser la lumière de l'astre en fonction de sa longueur d'onde. Dans le domaine visible, la lumière solaire se décompose en un spectre selon les

couleurs de l'arc-en-ciel. À l'intérieur du spectre, des raies sombres, très fines, apparaissant à des longueurs d'onde bien précises, sont caractéristiques d'éléments chimiques, d'atomes ou de radicaux présents dans le Soleil (H, Na, Fe, O₂, ...). Mais le rayonnement des astres s'étend bien au-delà du domaine visible, d'un côté vers l'ultra-violet et de l'autre vers l'infrarouge et le domaine radio, et son analyse nous permet de détecter la présence d'atomes ou de molécules à partir de leurs raies spectrales.

Le plus difficile reste à faire : comment obtenir le spectre d'une exoplanète ? Une méthode a été développée dans le cas des exoplanètes observées par transit. Lorsqu'une exoplanète passe devant son étoile-hôte, son atmosphère forme un halo autour du globe central, vu en transparence devant l'étoile. En mesurant la lumière de l'étoile pendant le transit, et en retranchant la moyenne des valeurs mesurées avant et après le transit, on arrive à séparer la contribution due à l'atmosphère planétaire et on peut alors en analyser le spectre. La mesure est très délicate, mais a été réalisée avec succès avec

les mesures réalisées avec le Télescope spatial Hubble (HST) dans le visible et l'infrarouge proche, puis dans l'infrarouge avec le télescope spatial Spitzer et, plus récemment le télescope spatial James Webb (JWST). On a ainsi détecté en particulier les atomes H, C, O, K, Ca et Na, puis, entre autres, les molécules H_2O , CH_4 , CO et NH_3 .

Le zoo des exoplanètes

Les quelque 7 900 exoplanètes que nous connaissons présentent des propriétés infiniment variées, qu'il s'agisse de leur étoile-hôte (massive ou naine, simple ou binaire), des systèmes planétaires auxquels elles appartiennent (parfois multiples), de leur orbite (circulaire ou elliptique), de leur nature (taille et masse) et de leur distance à leur étoile-hôte (extrêmement proche ou très éloignée). Ce dernier paramètre entraîne des variations extrêmes de leur température qui peut dépasser 2 000 °C. Les systèmes multiples sont très nombreux (plus de 1 000), le record étant tenu par la petite étoile naine TRAPPIST-1, entourée de 7 petites planètes.

La figure 4 montre les différentes catégories d'exoplanètes en fonction de leur masse et de la distance à leur étoile-hôte. On distingue trois grandes familles qui correspondent approximativement aux trois principales méthodes de détection. Les « Jupiters chauds » sont les exoplanètes les plus massives, des géantes gazeuses très proches de leur étoile ; elles ont été détectées les premières, par la méthode des vitesses radiales, car elles étaient les cibles les plus facilement détectables. Également proches de leur étoile, les exoplanètes détectées par transit ont des masses variables allant d'une masse terrestre à quelques dizaines de masses terrestres. Elles peuvent être rocheuses (on les appelle des « super-Terres ») ou dotées d'une atmosphère d'hydrogène et d'hélium (les

« Neptunes »). Enfin les exoplanètes détectées par imagerie directe sont à la fois massives et éloignées de leur étoile ; ce sont les plus faciles à identifier. Elles appartiennent en général à des systèmes stellaires jeunes et sont en phase de contraction, ce qui leur confère une température élevée et un rayonnement propre qui les rend détectables.

Formation et évolution des systèmes planétaires

Dès le XVIII^e siècle, l'observation des orbites planétaires, approximativement coplanaires et concentriques autour du Soleil, avait amené Emmanuel Kant et Pierre-Simon de Laplace à proposer un scénario dans lequel, à l'origine, une nébuleuse en rotation s'effondre en un disque sous l'effet de sa propre gravité ; le Soleil se forme au centre et les planètes naissent au sein du disque à partir d'inhomogénéités, par l'accumulation progressive de particules solides. Ce scénario s'est trouvé conforté, à la fin du XX^e siècle, par les observations réalisées dans le domaine infrarouge et millimétrique qui ont mis en évidence l'existence de nombreux disques protoplanétaires autour d'étoiles en formation. Le matériau originel, la matière interstellaire, a été lui aussi étudié en détail grâce aux observations radio à partir des années 1970. La matière interstellaire est composée à 90 % en masse d'hydrogène, atomique ou moléculaire (H_2). Viennent ensuite l'hélium puis les éléments plus lourds, synthétisés dans les étoiles par réactions nucléaires puis réinjectés dans le milieu interstellaire par les étoiles en fin de vie. Plus les atomes sont lourds, moins ils sont abondants.

Au sein du disque protosolaire, la température décroît à mesure que la distance au Soleil augmente. En-deçà de 2 unités astronomiques (ua), soit 2 fois la distance Soleil-Terre, les matériaux solides sont les roches

réfractaires et les métaux, formés à partir d'atomes relativement lourds. Les planètes qui en résultent sont, en conséquence, relativement petites et denses : ce sont les planètes terrestres, dites aussi telluriques ou rocheuses. En revanche, à plus grande distance du Soleil, au-delà de 3 ua, la température est suffisamment basse pour que les petites molécules (H_2O , CH_4 , NH_3 ...) qui sont les plus abondantes, soient sous forme de glace ; elles peuvent alors être incorporées dans de gros noyaux dont la masse peut atteindre une dizaine de masses terrestres. Leur champ de gravité est alors suffisant pour capturer le gaz environnant, composé principalement d'hydrogène et d'hélium : les planètes géantes sont nées, peu denses et très volumineuses.

Ce scénario a l'avantage de bien rendre compte de la séparation des planètes en deux catégories, les rocheuses près du Soleil, et les géantes, plus éloignées. Avec la découverte des disques protoplanétaires qui semblait indiquer que le scénario de formation stellaire était général, on pouvait s'attendre à retrouver cette séparation entre planètes rocheuses et géantes dans les systèmes planétaires qui restaient à découvrir. C'est la raison pour laquelle, en 1995, la découverte d'une exoplanète géante, à proximité immédiate de son étoile-hôte, a créé une immense surprise.

Comment expliquer ce paradoxe ? La solution, proposée dès l'annonce de la découverte de 51 Peg b par leurs auteurs, est donnée par un autre mécanisme, la migration des planètes qui a pour effet de faire varier la distance de celles-ci à leur étoile. Selon ce scénario, largement accepté aujourd'hui, les exoplanètes massives se forment loin de leur étoile puis migrent vers l'intérieur suite à leur interaction gravitationnelle avec le disque protoplanétaire ; celui-ci est éjecté ensuite par la jeune étoile lorsque celle-ci entre dans une phase d'activité intense, quelques millions

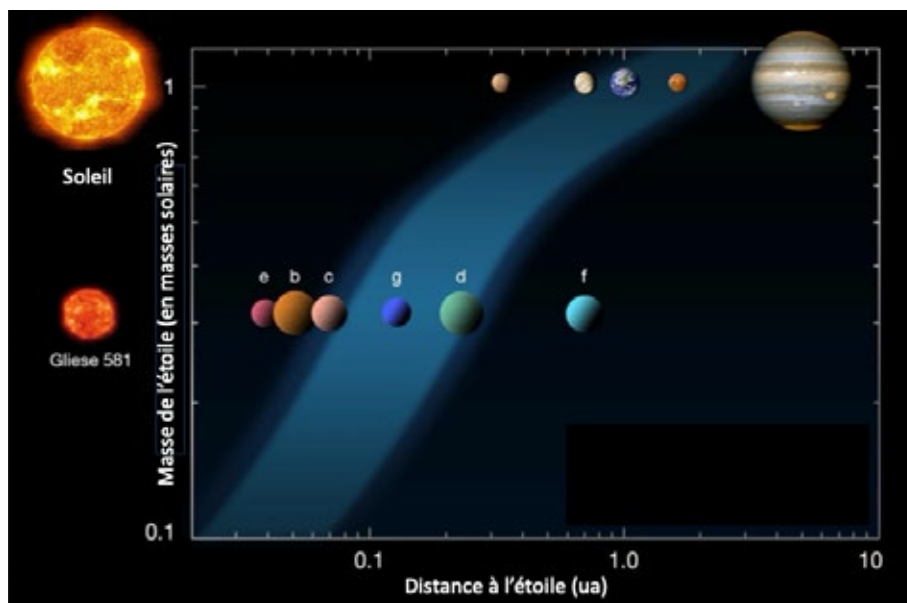


Fig.5. La zone d'habitabilité, représentée en fonction de la distance à l'étoile (en abscisse) et la masse de l'étoile (en ordonnée). La zone bleue est la région où la température est compatible avec la présence d'eau liquide. Elle s'éloigne de l'étoile si celle-ci est plus massive (et donc plus brillante), et s'en rapproche si celle-ci est petite. Deux systèmes planétaires sont représentés, le Système solaire (en haut) et le système Gliese 581 qui présente deux exoplanètes dans la zone habitable. Crédit : d'après Wikipédia Creative Commons.

d'années après sa formation. Il est intéressant de noter que, selon le « modèle de Nice » généralement accepté aujourd'hui, dans le Système solaire lui-même, les planètes géantes ont aussi connu une migration modérée mais significative : formées initialement plus près du Soleil, Jupiter et Saturne se seraient rapprochés vers l'intérieur pour repartir ensuite vers l'extérieur, entraînant vers l'extérieur Uranus et Neptune qui, au passage, inversent leurs positions respectives (Neptune, la plus proche au départ étant la plus éloignée aujourd'hui). Les simulations numériques ne fournissent pas une solution unique et ont surtout valeur d'exemple, mais les scénarios retenus permettent de rendre compte de la configuration actuelle des différentes familles d'astéroïdes.

Comment rechercher la vie sur les exoplanètes ?

La vie pourrait-elle être apparue sur une exoplanète lointaine ? Si la question remonte à l'Antiquité, nous pouvons aujourd'hui l'aborder avec les outils de la physique, de la biologie et de l'observation astronomique. Sur la base de la vie telle que nous la connaissons, les chercheurs privilégient les environnements où l'eau liquide peut être présente. Pour rechercher des cibles potentiellement intéressantes, les astronomes considèrent, pour chaque système planétaire, la « zone d'habitabilité » de son étoile (figure 5), c'est-à-dire la distance à laquelle l'eau peut être sous forme liquide ; c'est celle pour laquelle la température est comprise entre 0 °C et (environ) 100 °C, la limite supérieure dépendant de la pression du milieu.

On connaît plusieurs dizaines d'exoplanètes rocheuses répondant à ce critère. Mais comment rechercher des signes de vie ? Dans le cas des exoplanètes en orbite autour d'une étoile de type solaire, une première piste consiste à rechercher la présence d'oxygène : en effet, dans le cas de la Terre, sa présence en quantité significative est due à l'apparition de la vie. L'oxygène moléculaire O_2 et plus encore son produit de dissociation l'ozone O_3 , présentent des signatures spectrales bien visibles dans leur spectre infrarouge (figure 6).

Le télescope spatial James Webb (JWST) est très bien placé pour rechercher de telles signatures autour des cibles les plus favorables. Ce sera tout l'enjeu des recherches à venir dans les années qui viennent. ■

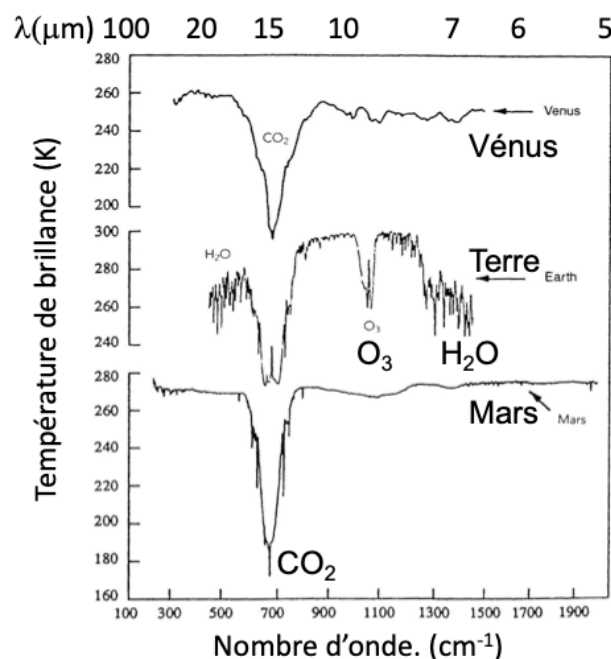


Fig.6. Le spectre infrarouge des trois planètes terrestres dotées d'une atmosphère (Vénus, la Terre et Mars). L'échelle des abscisses représente la longueur d'onde (en haut) et le nombre d'onde, unité de fréquence inverse de la longueur d'onde (en bas). L'échelle des ordonnées, en degrés kelvin, indique la température mesurée (c'est celle de la surface de la planète entre les raies spectrales). La raie due à CO_2 , à 15 mm, est visible sur les trois planètes. Dans le cas de la Terre, on voit aussi les raies de l'eau (vers 6 mm) et la forte bande de l'ozone (O_3) à 9,5 mm. C'est cette signature qui est recherchée en particulier dans les exoplanètes. Crédit, d'après R. Hanel, et al., « Exploration of the Solar system by infrared remote sensing », Cambridge, 2003.