



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de liaison enseignants et astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (écoles d'été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Le **CLEA** a reçu l'agrément national des associations éducatives complémentaires de l'enseignement public.

Présidents d'honneur

Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel
Cécile Ferrari

Bureau du CLEA pour 2025

Président : Frédéric Pitout
Vice-présidente : Léa Griton
Secrétaire : Grégory Silva
Secrétaire adjointe : Alina Cristian
Trésorier : Jean-Louis Coustillet
Trésorière adjointe : Sylvie Thiault

Responsables des groupes

Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions pédagogiques : Pierre Causeret
École d'été d'astronomie : Frédéric Pitout
Site web : Jean-Michel Vienney
Réseau de correspondants : Sébastien Dhérissard
et Floriane Michel



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

David Alberto, Pierre Causeret, Pascal Descamps
Daniel Descout Michel Dumont, Thérèse Encrenaz,
Olivier Espagnet, Lucienne Gouguenheim,
Véronique Hauguel, François Hurter, , Christian
Larcher, Pierre Le Fur, Frédéric Pitout, Jean Ripert,
Sylvain Rondi, Lionel Ruiz, Béatrice Sandré, Sylvie
Thiault.

Image de couverture

Éclipse annulaire et lever de Soleil à Kourou le 22 septembre 2006. Ce jour-là, la Lune était au plus loin de la Terre à l'apogée, distante de plus de 405 000 km. Son diamètre apparent était de 29' 27'', bien inférieur à celui du Soleil (31' 52''). Au moment de l'alignement observateur Lune Soleil, il restait un anneau de lumière autour de la Lune.

Pour cette photo, une image a été réalisée toutes les 10 minutes sur la même pellicule et l'exposition a été modifiée au fur et à mesure que le Soleil se levait.

Crédit image : Fabrizio Melandri/IAU OAE. L'OAE (Office of Astronomy for Education) dépend de l'IAU (ou UAI en français, Union astronomique internationale) et propose des ressources sur son site <https://astro4edu.org/>

Les Cahiers Clairaut

Mars 2026

Éditorial

À fin de préparer l'observation de l'éclipse totale de Soleil du 12 août 2026 nous vous proposons un dossier sur les éclipses de Soleil. Depuis des temps très anciens le spectacle d'une éclipse totale de Soleil provoque habituellement peur ou appréhension. En effet, les éclipses rompent brusquement avec l'évolution harmonieuse des phénomènes célestes. Elles semblent annoncer un mauvais présage, comme la mort d'un haut personnage ou l'issue fatale d'une bataille.

Les anciens astronomes du huitième siècle avant notre ère étaient déjà capables de prévoir scientifiquement une éclipse. Leurs connaissances reposaient sur l'observation de la récurrence d'une suite d'événements, conduisant à la reproduction des positions relatives du Soleil, de la Terre et de la Lune. C'est le cas par exemple du Saros, une période d'environ 18 ans. (Cf. article p. 29).

Parfois une éclipse totale de Soleil sert à vérifier une théorie physique. Ce fut le cas pour la relativité générale lors de l'éclipse du 29 mai 1919. Il s'agissait de mettre en évidence la déflexion subie par les rayons lumineux issus d'étoiles lointaines frôlant le Soleil éclipsé.

Elles ont aussi permis de percevoir la diminution de la vitesse de rotation de la Terre. En recalculant les paramètres des éclipses antiques avec les méthodes modernes on observe un décalage régulier entre les instants calculés et ceux qui sont observés. On a pensé qu'il résultait d'une accélération de la Lune jusqu'à ce que l'on découvre que c'est la Terre qui ralentissait de façon constante. Actuellement on évalue ce ralentissement à environ 1,6 ms par siècle. Dans le célèbre livre de Camille Flammarion l'Astronomie populaire, publié en 1881, l'auteur annonce p. 262 que la prochaine éclipse totale de Soleil aurait lieu à Paris en... 2026. Il ne tenait pas compte du ralentissement de la rotation de la Terre.

Nous vous souhaitons le 12 août prochain de pouvoir profiter d'un magnifique spectacle naturel.

Christian Larcher pour l'équipe

Sommaire

ACTUALITÉS

Actualités

Brèves d'observatoires et autres nouvelles

Frédéric Pitout 2

Observation

Vagabondage extragalactique

Pierre Le Fur 6

ACTUALITÉS

Dossier : éclipses de Soleil

11

Observation

L'éclipse du 12 août 2026

Pierre Causeret 12

Observation

Nos conseils pour observer l'éclipse

Olivier Espagnet, Sylvain Rondi 14

Mots croisés

Pierre Causeret 15

Article de fond

L'ombre de la Lune

Béatrice Sandré 16

Article de fond

Simulation de l'éclipse du 12 août avec Stellarium

Daniel Descout 23

Article de fond

Les récurrences dans les éclipses

Pascal Descamps 29

Histoire

Une maquette du XVIII^e siècle

David Alberto 35

ACTUALITÉS

Observation

Le ciel de printemps 2026

Pierre Causeret 39

Article de fond

Exploration des exoplanètes

Thérèse Encrenaz 40

Lecture pour la marquise

L'énigme de la vie dans le cosmos

Christian Larcher 45

Vie associative

Georges Patrel, Claude Piguet 46

Solutions mots croisés

Bonnet d'âne

« Et si ? » 48



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

L'ÉCLIPSE DE SOLEIL DU 12 AOÛT 2026

Pierre Causeret

Le phénomène

Le 12 août 2026, l'ombre de la Lune va balayer la Terre de 16 h 58 à 18 h 34 (TU), du Nord de la Russie jusqu'en Méditerranée, en passant par le Groenland, l'Islande et l'Espagne (figure 1). L'éclipse sera partielle en France métropolitaine.

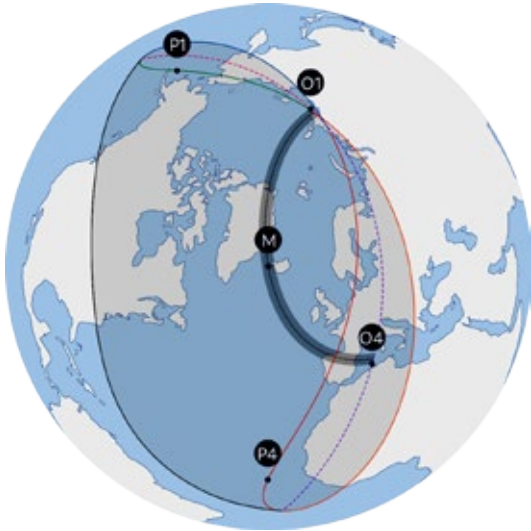


Fig.1. Trace de l'ombre sur la Terre, de O1 à O4. La partie en gris foncé indique la bande de totalité, la partie en gris clair, la zone où l'éclipse est partielle (extrait du site du LTE ssp.imcce.fr).

Les conditions locales d'observation

Vous cherchez les conditions d'observation depuis chez vous ? Vous trouverez tout sur le site du LTE (Laboratoire temps espace de l'Observatoire de Paris, ex IMCCE).

Mode d'emploi :

- aller sur le site ssp.imcce.fr ;
- cliquer sur Éclipses de Soleil, on arrive sur l'année 2026 ;
- choisir 12 août 2026 et cliquer sur circonstances locales ;
- se déplacer et zoomer sur la carte jusqu'au site d'observation choisi, puis cliquer sur le lieu.

La figure 2 montre tous les renseignements obtenus, ici pour l'Observatoire de Paris, hors de la bande de totalité :

- la durée de l'éclipse du 1^{er} au 4^e contact ;
- sa grandeur (définie figure 3) ;
- le degré d'obscurité qui est le pourcentage du disque solaire occulté ;
- l'heure du début de l'éclipse (P1) avec la hauteur du Soleil sans réfraction (H_{\odot}) à ce moment. On trouve

aussi les angles P (angle entre la direction centre du Soleil - pôle Nord céleste et la direction centre du Soleil - centre de la Lune) et Z (angle entre la verticale du centre du Soleil et la direction centre du Soleil - centre de la Lune), les deux comptés positivement vers l'est ;

- les mêmes renseignements donnés pour le milieu et la fin de l'éclipse ;
- un schéma montrant la position de la Lune par rapport au Soleil aux instants P1, M et P4, soit dans un repère céleste (nord céleste en haut), soit dans un repère local (zénith en haut).

Éclipse partielle

📍 48°50'06.6"N 2°20'03.8"E

Durée de l'éclipse = 01:47:11.3

Grandeur = 0.93149

Obscurité = 92.2 %

Circonstances locales

Phase	Date (UTC)	P	Z	H \odot
P1	2026-08-12T17:22:18	293.21°	250.22°	16.54°
M	2026-08-12T18:17:24	207.09°	165.52°	7.59°
P4	2026-08-12T19:09:30	121.07°	82.26°	-0.54°

Déplacement de la Lune

Repère céleste Repère local



Fig.2. Circonstances locales pour l'Observatoire de Paris.

Le disque solaire sera occulté à plus de 92 % au moment du maximum. On remarque que le Soleil sera couché à la fin de l'éclipse (hauteur H_{\odot} négative pour P4). Source ssp.imcce.fr.

Pour un lieu situé dans la bande de totalité, vous trouverez en plus les précisions (heure, angles P et Z, hauteur du Soleil) sur le 2^e contact noté O1 et le 3^e noté O2 (voir la figure 1 page 23 pour les 4 contacts).

Attention, on n'observe JAMAIS le Soleil sans protection, voir page 14

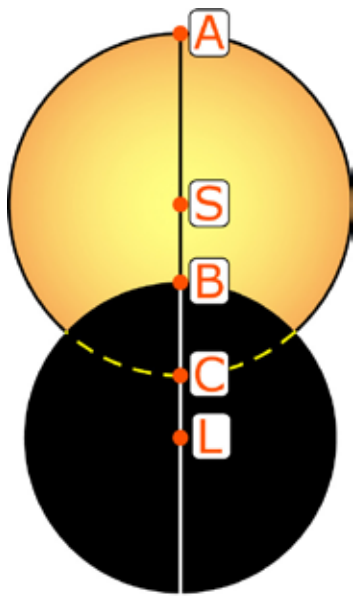


Fig.3. Grandeur d'une éclipse.
 On appelle L le centre de la Lune et S celui du Soleil. Sur la droite (LS), on définit 3 points :
 - A et C sont sur les bords du Soleil, C étant le plus proche de L.
 - B est sur le bord de la Lune le plus proche de S.
 La grandeur g d'une éclipse est égale à BC/AC . Elle est inférieure à 1 quand l'éclipse est partielle, supérieure à 1 quand l'éclipse est totale. Le 12 août 2026, elle vaut 0,93 à Paris et 1,03 à León en Espagne. On peut aussi écrire : $g = (rL + rS - d) / 2rS$ où rL et rS sont les rayons de la Lune et du Soleil et où d est la distance LS entre les deux centres (dans ces calculs, les distances sont en réalité des distances angulaires mesurées en degrés ou en minutes d'angle).

Une autre solution pour obtenir les circonstances locales de l'éclipse est d'utiliser un logiciel comme Stellarium sur lequel vous pouvez simuler l'éclipse depuis n'importe quel lieu.

Pourquoi une éclipse totale de Soleil le 12 août ?

La ligne des nœuds

Quelques rappels : une éclipse de Soleil a lieu lorsque Soleil, Lune et Terre sont alignés (fig. 1).



Fig.4. Éclipse totale de Soleil.

Pour qu'un tel alignement puisse avoir lieu, il faut :

- que ce soit une nouvelle Lune ;
- que la ligne des nœuds passe par le Soleil (fig. 5).

Plus précisément, il faut qu'à la nouvelle Lune, la ligne des nœuds passe à proximité du Soleil (et donc de la Lune), à moins de $17,5^\circ$. Si cet angle est inférieur à $11,5^\circ$, l'éclipse sera centrale quelque part sur Terre (totale ou annulaire), sinon elle sera partielle (valeurs approximatives dépendant en particulier de la distance de la Lune et du Soleil).

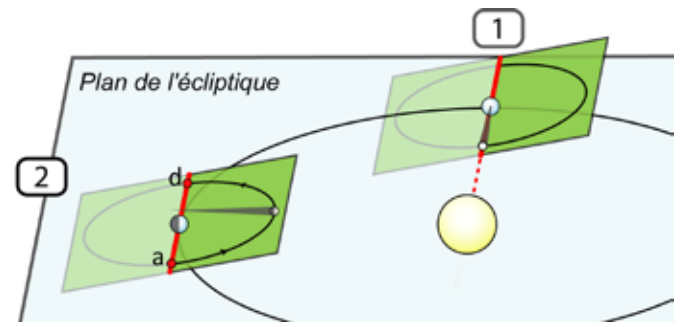


Fig.5. En bleu, le plan de l'orbite de la Terre (plan de l'écliptique) et en vert le plan de l'orbite de la Lune, incliné de 5° par rapport au précédent. Ces deux plans se coupent suivant « la ligne des nœuds », en rouge (a est le nœud ascendant, d le nœud descendant). En 1, la ligne des nœuds passe par le Soleil, l'ombre de la Lune atteint la Terre. En 2, l'ombre de la Lune passe « au-dessus » de la Terre, il n'y a pas d'éclipse.

Le 12 août 2026, au moment de la nouvelle Lune, le Soleil sera à environ 10° du nœud descendant, ce qui suffit à ce qu'il y ait une éclipse centrale de Soleil vue de quelque part sur Terre. La figure 6 montre la position de la Lune, du Soleil et du nœud descendant vus depuis le centre de la Terre. Depuis ce point, on s'aperçoit que la Lune ne cacherait pas le Soleil. Pour avoir une éclipse, il faut monter en latitude sur Terre.

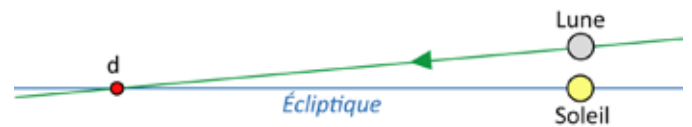


Fig.6. une, Soleil et nœud descendant (d) au moment de l'éclipse du 12 août 2026, vus du centre de la Terre.

La figure 7, à l'échelle, montre que le cône d'ombre arrive à proximité du pôle Nord, comme on peut le vérifier sur la figure 1.

La distance Terre Lune

C'est un facteur important pour comprendre une éclipse. Comme cette distance varie beaucoup, de + ou - 7 %, le cône d'ombre de la Lune n'atteint pas toujours la Terre. Le 12 août, la Lune sera à 367 000 km de la Terre, plus proche donc que la moyenne, et le cône d'ombre de 378 000 km de longueur atteindra la Terre comme on le voit également sur la figure 7. L'éclipse sera bien totale. Lorsque la Lune est trop éloignée, elle apparaît trop petite pour occulter entièrement le Soleil, l'éclipse est alors annulaire.



Fig.7. Dessin à l'échelle de la Terre et la Lune avec son cône d'ombre le 12 août 2026. Le Soleil est situé sur la gauche, à près de 72 m à cette même échelle et avec un diamètre de 66 cm.



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

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 Alexander 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,

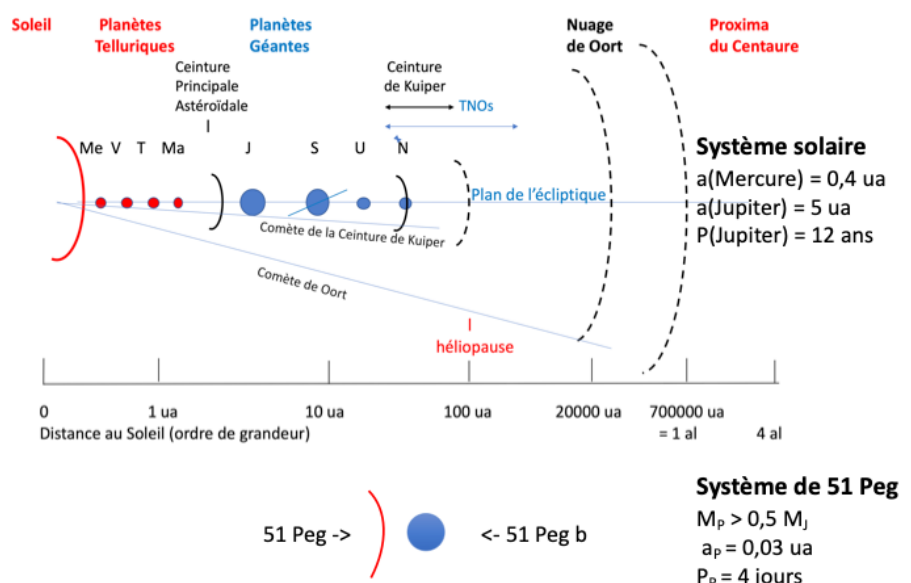


Fig.1. Schéma comparatif du Système solaire (en haut) et du système de 51 Peg (en bas). Les échelles ne sont pas respectées.

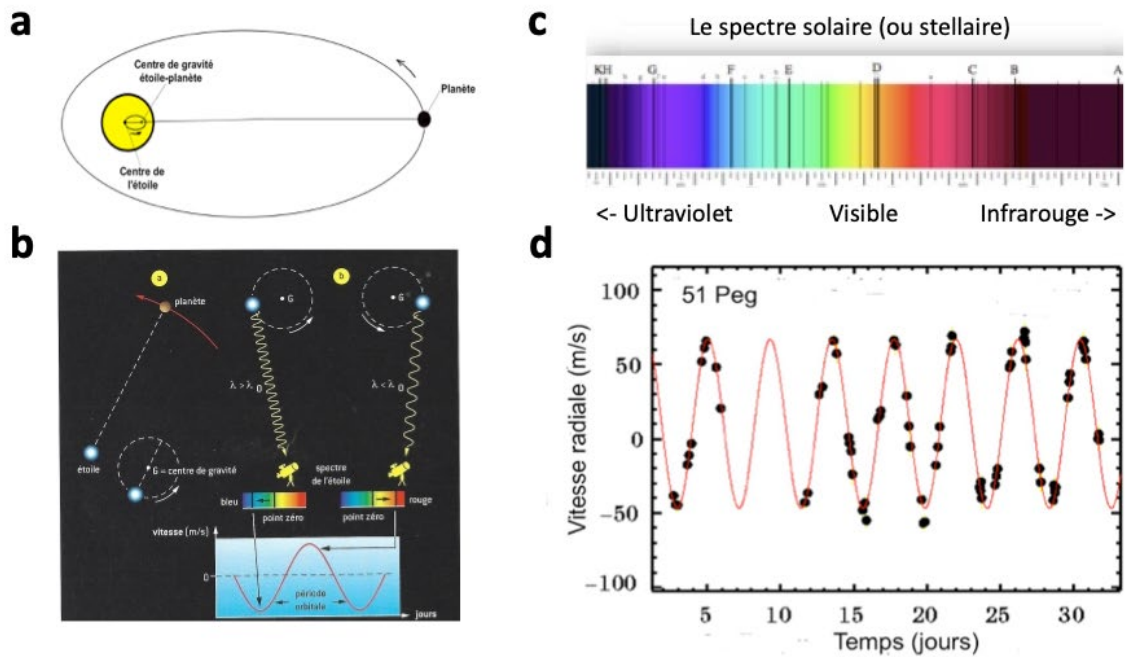


Fig.2. Illustration de la méthode des vitesses radiales. (a) : mouvement de l'étoile par rapport au centre de gravité du système étoile-planète. (b) : modification de la fréquence du signal émis par l'étoile suite à ce mouvement (effet Doppler-Fizeau). (c) le spectre du Soleil (ou d'une étoile de type 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.

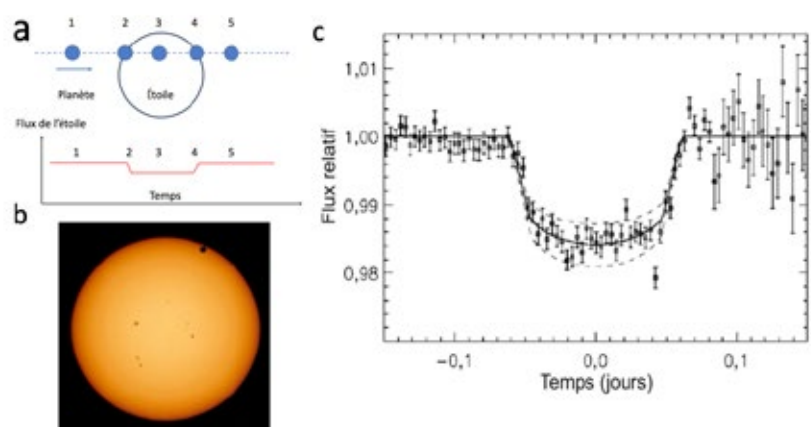
La méthode des transits

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

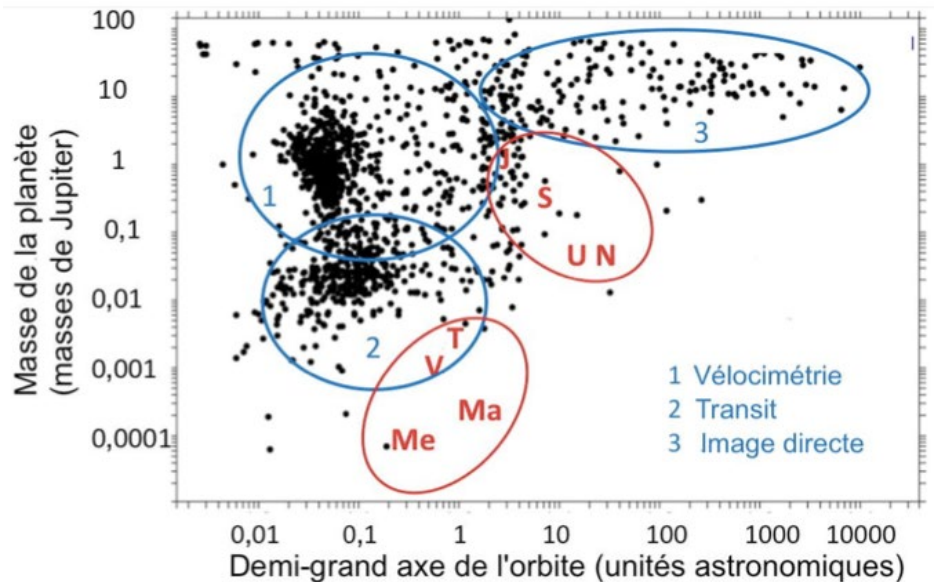


Fig.4. Diagramme représentant les exoplanètes en fonction de la distance à leur étoile (en abscisse) et de leur masse (en ordonnée). Les planètes du Système solaire sont représentées en rouge. On voit apparaître 3 catégories : (1) les « Jupiters chauds » détectés par la méthode des vitesses radiales, (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 H₂O, CH₄, CO et NH₃.

Le zoo des exoplanètes

Les quelque 7900 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 2000 °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 (H₂). 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 (H₂O, CH₄, NH₃...) 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

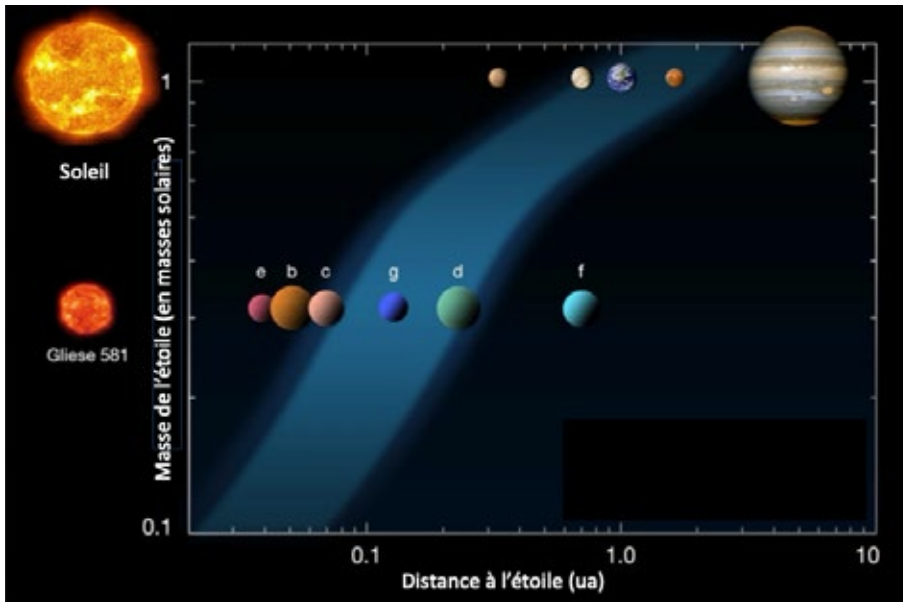


Fig.5. La zone d'habitabilité, représentée en fonction de la distance à l'étoile (en abscisse) et la masse de l'étoile (en ordonnée). La zone bleue est la région où la température est compatible avec la présence d'eau liquide. Elle s'éloigne de l'étoile si celle-ci est plus massive (et donc plus brillante), 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. ■

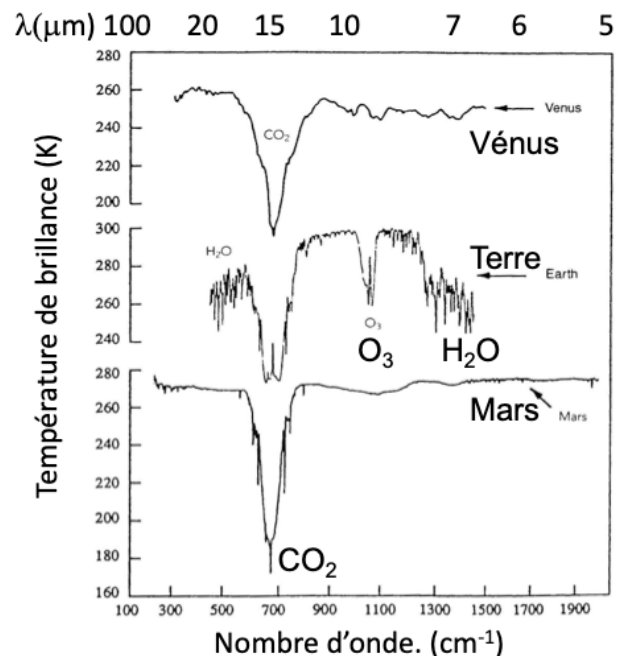


Fig.6. Le spectre infrarouge des trois planètes terrestres dotées d'une atmosphère (Vénus, la Terre et Mars). L'échelle des abscisses représente la longueur d'onde (en haut) et le nombre d'onde, unité de fréquence inverse de la longueur d'onde (en bas). L'échelle des ordonnées, en degrés kelvin, indique 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.



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>