

Observatoire de Paris

Diplôme d'Université
« Structuration de l'Univers »
Années 2023 – 2025

présenté par
Olivier Bouillanne

Planétologie
De la lumière aux exoplanètes :
voyage dans la science et la fiction

sous la direction de
Johan Mazoyer

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier grandement M. MAZOYER pour avoir accepté d'encadrer ce mémoire et avoir su me diriger dans la bonne direction, tout en me donnant les bonnes clés de compréhension de la planétologie.

Un très grand merci également à M. CRISTOFARI, responsable du DU SU, pour avoir cru en mon projet de mémoire, avoir trouvé un encadrant et m'avoir accompagné au cours de longs échanges très enrichissants.

Merci également aux autres étudiants présents aux réunions d'avancement du mardi soir, sur des sujets tous aussi variés et passionnants.

Enfin, je tiens à remercier celle qui m'a soutenu et encouragé pour la rédaction de ce mémoire, même lorsque le temps venait à manquer.



	Page
Introduction	9
I De la lumière à la détection d'exoplanètes	11
1 Prérequis	11
1.1 La lumière	11
1.1.1 Fiat lux!	11
1.1.2 Spectre de la lumière	13
1.1.3 Effet Doppler-Fizeau	14
1.1.4 Corps noir	15
1.2 Caractérisation des étoiles	16
1.2.1 Mesure des distances : la parallaxe	16
1.2.2 Mesure de la magnitude	17
1.3 Lois de Kepler	19
2 Détection d'exoplanètes	20
2.1 Historique	20
2.2 Conventions de nomenclature	22
2.3 Méthodes de détection	23
2.3.1 Méthodes dynamiques	23
2.3.1.1 Vitesses radiales	23
2.3.1.2 Astrométrie	26
2.3.2 Méthodes photométriques	28
2.3.2.1 Transits	28
2.3.2.2 Microlentilles gravitationnelles	30
2.3.2.3 Imagerie directe	32
2.3.3 Autres méthodes	34
2.3.3.1 Timing	34
2.3.3.2 Pulsars	35
2.3.3.3 Étoiles variables	35
2.4 Récapitulatif des exoplanètes découvertes à ce jour	35

II De la détection à la caractérisation	37
1 Caractérisation	37
1.1 Caractérisation de l'orbite	37
1.2 Taille et masse de l'exoplanète	37
1.3 Âge	38
1.4 Atmosphère	38
2 Exoplanètes et planètes de science-fiction	39
2.1 Science-fiction et planètes des imaginaires	39
2.2 Quelques archétypes d'exoplanètes	40
2.2.1 Les simili-Terres	42
2.2.2 Les planètes infernales	45
2.2.3 Les planètes de glaces	47
2.2.4 Les planètes en rotation synchrone	49
2.2.5 Les mondes océan	52
2.2.6 Les planètes dans des systèmes stellaires multiples	55
2.2.7 Les satellites naturels	57
2.3 Dessine-moi une planète!	59
2.4 Quand la réalité dépasse la fiction	61
Conclusion	63
A Liste d'œuvres où apparaissent des exoplanètes	65
B Plongée au cœur d'Aqua End	71
C Caractéristiques de l'astéroïde B612	73
Bibliographie	79
Liste des figures	82
Liste des crédits	84

Abréviations

ESO : *European Southern Observatory*

Diagramme HR : Diagramme de Hertzsprung-Russell

IR : Infrarouge

NASA : *National Aeronautics and Space Administration*

SF : Science-Fiction.

TDV : Transit-duration variation

TTV : Transit-timing variation

UAI : Union Astronomique Internationale

UV : Ultraviolet

VLT : *Very Large Telescope*

Définitions

Distances et longueurs :

al : Année-lumière, soit $9,461 \times 10^{12}$ km

R_{\oplus} : Rayon de la Terre, soit 6371 km

au : Unité Astronomique, soit $1,496 \times 10^8$ km

pc : Parsec, soit 3,262 al

Masses :

M_{\oplus} : Masse de la Terre, soit $5,972 \times 10^{24}$ kg

M_J : Masse de Jupiter, soit $1,899 \times 10^{27}$ kg

M_{\odot} : Masse du Soleil, soit $1,988 \times 10^{30}$ kg

Constantes :

c : Vitesse de la lumière, soit $3,00 \times 10^8$ m·s⁻¹.

h : Constante de Planck, soit $6,63 \times 10^{-34}$ J·s⁻¹

G : Constante gravitationnelle, soit $6,67 \times 10^{-11}$ N·m⁻²·kg⁻²

g : Accélération de pesanteur à la surface de la Terre, soit $9,81$ m·s⁻²

Les premières images qui nous viennent en tête lorsqu'on imagine une exoplanète sont souvent les planètes que l'on a pu voir dans les films de science-fiction. Mais est-ce que ces planètes pourraient exister dans la réalité ? Les exoplanètes découvertes à ce jour sont-elles d'une toutes identiques, ou alors trouve-t-on une grande diversité ?

Cette question nous guidera dans ce mémoire. Dans le premier chapitre, nous aborderons quelques connaissances de bases de l'astronomie et de la physique de la lumière. Puis, nous développerons les différentes méthodes de détection d'exoplanètes qui ont donné à ce jour des résultats probants.

Ensuite, dans un second chapitre, nous évoquerons tout d'abord la caractérisation des exoplanètes, puis sera abordée les différents types de planètes telluriques, par le prisme de la science-fiction.



Figure 1 – *Irregular Webcomic! n° 87*

1 Prérequis

1.1 La lumière

1.1.1 Fiat lux !

La lumière est pratiquement la seule source d'information que nous pouvons avoir de ce qu'il se passe hors de notre Système solaire (les autres moyens sont les détections de neutrinos, de rayons cosmiques, et depuis 2015, d'ondes gravitationnelles [Abbott et al., 2016]). C'est-à-dire que, jusqu'à très récemment, toutes les découvertes que nous avons pu faire en astrophysique — étoiles, galaxies, exoplanètes, matière noire, Big Bang... — n'ont pu l'être que par une analyse extrêmement poussée de la lumière que nous recevons. Un bref aperçu de quelques-unes de ses propriétés dans la suite de cette partie permettra d'introduire la détection des exoplanètes.

La lumière se propage dans le vide très rapidement ($\approx 300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), et sa vitesse, notée c , est une limite supérieure. Cela signifie qu'aucune information dans l'univers ne peut se déplacer plus vite que cette vitesse. La lumière, au sens large, est une onde électromagnétique. La principale caractéristique de cette onde est son énergie \mathcal{E} . De cette énergie dépendent sa fréquence ν , et sa longueur d'onde λ , selon la relation :

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

La lettre h désigne la constante de Planck, qui vaut approximativement $6,63 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$. Ainsi, h et c étant des constantes, parler de fréquence, de longueur d'onde ou d'énergie d'une onde électromagnétique est totalement équivalent. En fonction des domaines de l'astronomie, les scientifiques utilisent des unités d'énergie (eV, J...), de longueur (nm, μm ...) ou de fréquence (MHz, GHz...).

En fonction des évènements qui produisent ces ondes électromagnétiques, l'ordre de grandeur de l'énergie transportée peut être très différent. Historiquement, elles sont classées ainsi (voir aussi la figure I.1) :

Ondes radioélectriques et micro-ondes : Utilisés sur Terre pour les communications (radio, téléphonie...). Certains corps célestes émettent des ondes radio ou des micro-ondes. C'est aussi dans cette longueur d'onde que peut s'observer le *fond diffus cosmologique*.

Infrarouge (IR) : Ils sont émis par les corps à température ambiante, et peuvent être visualisés par les caméras thermiques. Dans l'univers, les planètes et les poussières émettent dans cette longueur d'onde.

Visible : La lumière telle qu'on la connaît, allant du rouge (faible énergie) au violet (énergie élevée), en passant par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

Ultraviolet (UV) : Émis entre autres par le Soleil, ils sont particulièrement nocifs pour la santé à haute dose. Dans l'univers, ils sont émis par les objets les plus chauds.

Rayons X et γ : Les rayonnements les plus énergétiques. Utilisés en médecine (radiographie), ils sont caractéristiques des évènements les plus violents de l'univers, comme les supernovæ et les quasars.

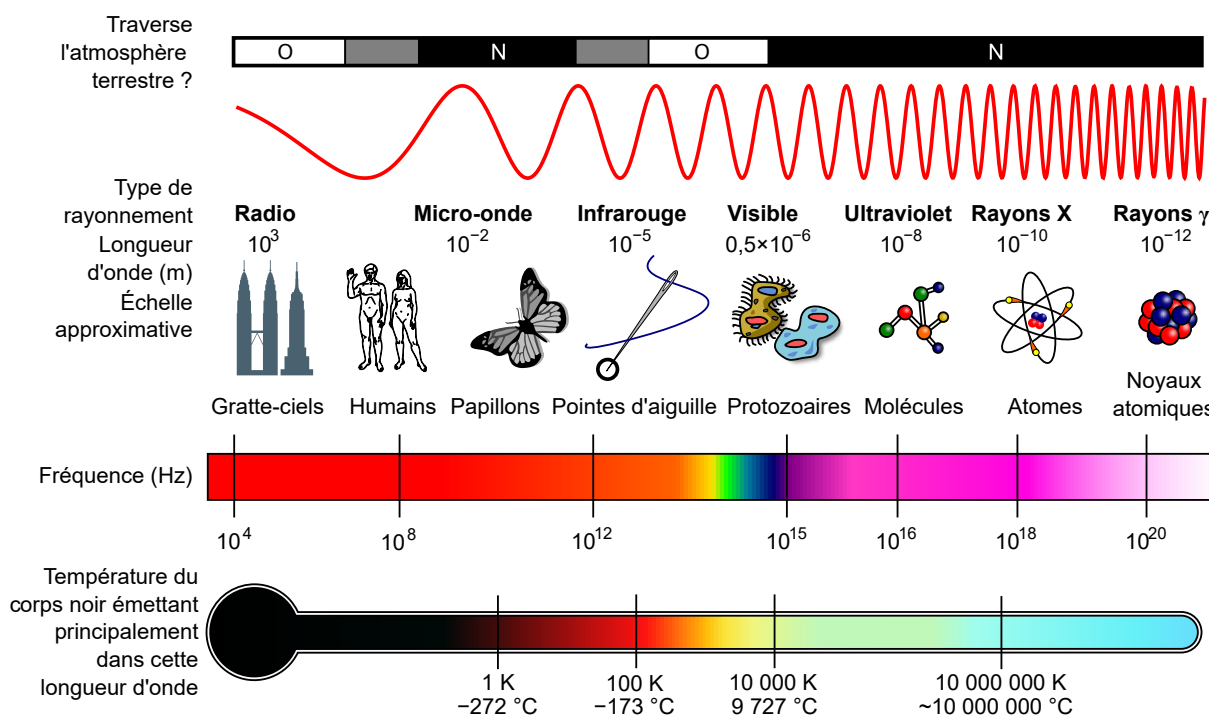


Figure I.1 – Diagramme des différents types de rayonnement électromagnétique en fonction de la longueur d'onde λ et de la fréquence ν . NASA, *Wikimedia Commons*.

Les ondes électromagnétiques interagissent différemment en fonction de leur longueur d'onde avec leur environnement. Par exemple, la lumière peut se réfléchir (réflexion d'un miroir), être réfractée (passage de l'air à l'eau) ou être diffusée (couleur des nuages et du ciel). Dans le cas d'interaction avec des objets particulièrement petits, la lumière peut également être diffractée et interférer.

1.1.2 Spectre de la lumière

En réalité, la lumière n'est que rarement monochromatique, c'est-à-dire qu'elle est généralement composée d'un ensemble d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde λ différentes. Par exemple, la lumière émise par le Soleil est composée de multiples ondes allant de l'ultraviolet à l'infrarouge. À nos yeux, cette lumière paraît blanche, mais en utilisant un dispositif permettant de séparer ces longueurs d'onde, comme un prisme, nous pouvons voir les différentes couleurs qui composent cette lumière. Cet ensemble de longueurs d'onde est appelé *spectre*.

L'étude du spectre de la lumière, la *spectroscopie*, permet d'obtenir de nombreuses informations sur l'objet qui a émis cette lumière, ainsi que le milieu dans lequel cette lumière a voyagé. Comme on peut le voir sur la figure I.2, une lumière « blanche » est constituée de l'ensemble des couleurs de l'arc-en-ciel, de telle sorte à former un spectre continu.

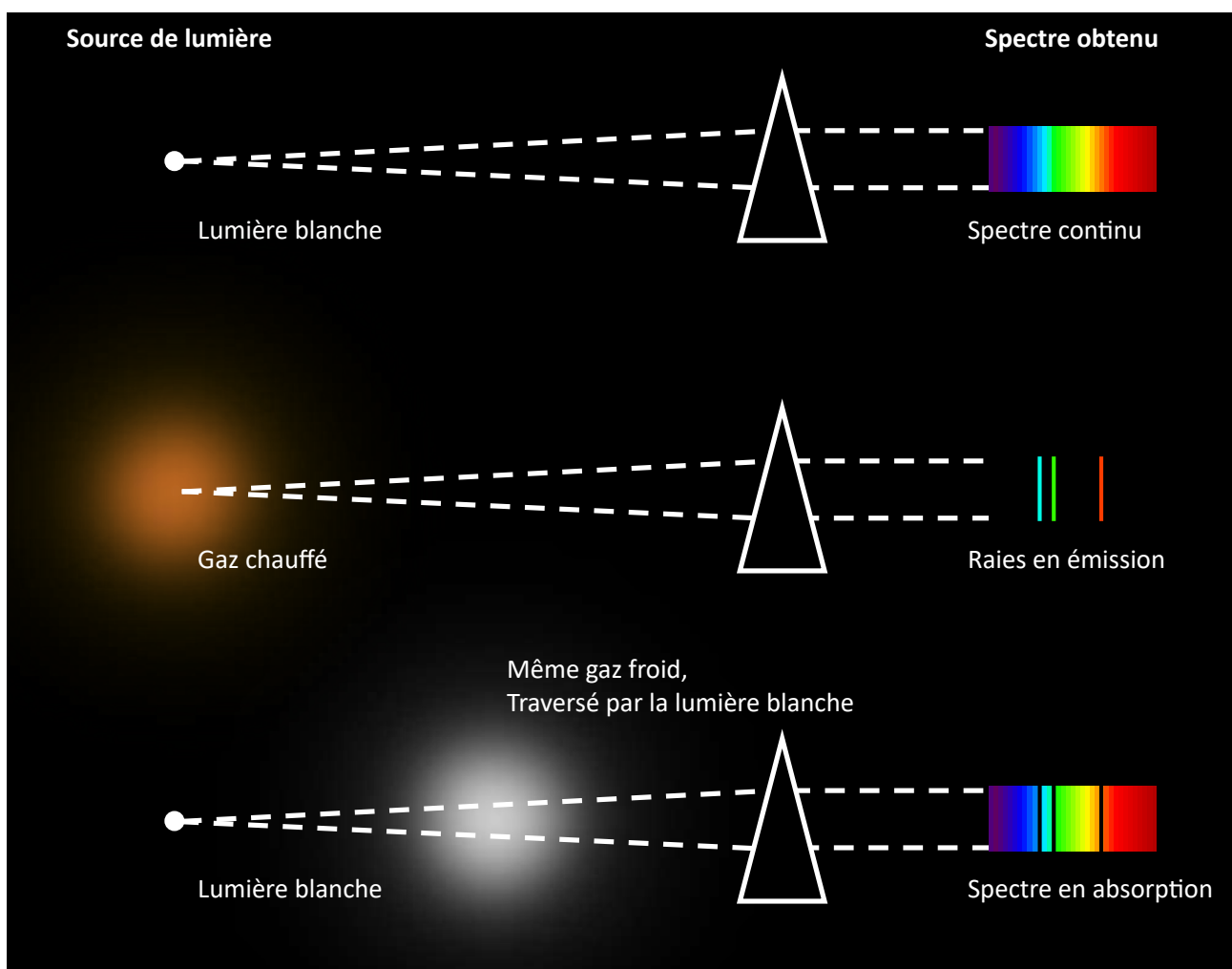


Figure I.2 – Diagramme des différents types de spectres en fonction de la source et du milieu traversé.

En revanche, lorsque c'est un gaz qui est chauffé – comme une lampe à vapeur de sodium –, seules certaines longueurs d'onde très spécifiques sont émises, ce sont les *raies d'émission*. Dans le cas des lampes sodium, cette longueur d'onde λ aux alentours de 600 nm donne une lumière jaune très caractéristique.

À l'inverse, lorsque la lumière traverse de la matière froide, cette matière absorbe une partie du rayonnement à des longueurs d'onde. Cela génère des *raies d'absorption*, dont la longueur d'onde dépend de cette matière.

Ainsi, grâce à l'étude de la spectroscopie, les astronomes peuvent déterminer la composition chimique des objets qu'ils observent ou que la lumière a traversé. La figure I.3 présente le spectre du Soleil tel que vu depuis la Terre. On peut noter un certain nombre de raies, certaines causées par l'interaction de la lumière avec l'atmosphère du Soleil (chromosphère et couronne), d'autres par l'interaction avec l'atmosphère de la Terre. Sur cet exemple, le doublet de raies D correspond à la raie d'absorption du sodium.

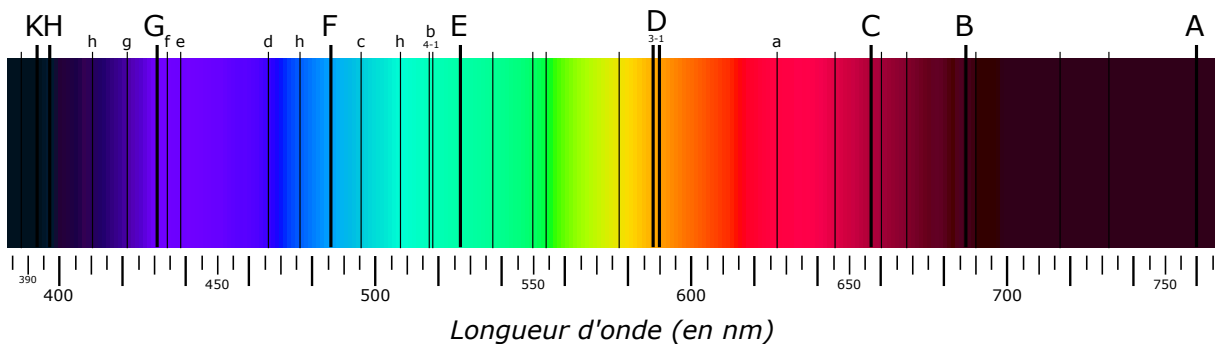


Figure I.3 – Spectre de la lumière du Soleil vu depuis la Terre. Adapté de *Wikimedia Commons*.

1.1.3 Effet Doppler-Fizeau

L'effet Doppler-Fizeau est bien connu sur Terre pour ses effets sur le son. La sirène d'une ambulance qui se rapproche est plus aiguë (la longueur d'onde du son est plus courte), puis, lorsqu'elle s'éloigne, est plus grave (la longueur d'onde est plus longue).

Il se produit le même phénomène pour la lumière. Une étoile qui se rapproche apparaîtra plus « bleue », tandis qu'une étoile qui s'éloigne apparaîtra plus « rouge », et ce, d'autant plus que la vitesse radiale est importante. La vitesse radiale V_r désigne la vitesse dans la ligne de visée de l'observateur, tandis que la vitesse tangentielle V_t désigne l'autre composante de la vitesse V d'un objet par rapport à l'observateur, comme cela est représenté sur la figure I.4.

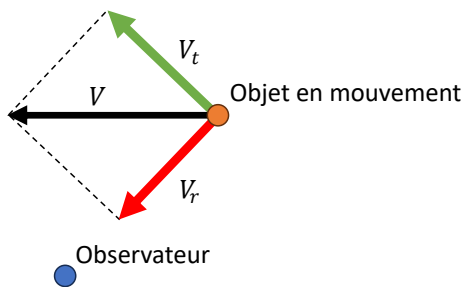


Figure I.4 – Diagramme de la décomposition de la vitesse.

Généralement, cette vitesse radiale V_r est déterminée grâce à la spectroscopie. Le déplacement de l'objet génère un décalage des raies d'absorption ou d'émission. Par exemple, une raie

initialement mesurée en laboratoire à $\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$ ¹ peut être mesurée à $\lambda_m = 650 \text{ nm}$ dans le cas où l'objet se rapproche de nous, ou alors à $\lambda_m = 670 \text{ nm}$ dans le cas où l'objet s'éloigne. La relation liant vitesse radiale V_r et longueur d'onde mesurée λ_m est :

$$V_r = c \cdot \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_0} - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

1.1.4 Corps noir

Les objets qualifiés de *corps noirs* sont des corps théoriques qui absorbent toutes les longueurs d'onde, et qui restituent cette énergie sous forme d'un rayonnement *thermique*. Ce rayonnement thermique est par exemple celui qu'émet l'acier en fusion.

À mesure que l'objet devient de plus en plus chaud, sa couleur varie, passant du rouge, puis au jaune, et enfin, au bleu. Contrairement à ce que son nom peut laisser entendre, le rayonnement émis par une étoile est très proche de celui d'un corps noir de même température. De manière contre-intuitive, les étoiles les plus chaudes sont bleues, et les plus froides, rouges. Il existe une relation entre la température T d'un corps noir et la longueur d'onde λ_{max} de la lumière qu'il renvoie (c'est-à-dire sa couleur), c'est la loi de Wien :

$$\lambda_{max} \approx \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \quad (\text{I.3})$$

Le spectre du rayonnement émis par un corps noir n'est pas monochromatique. La loi de Wien ne permet que d'obtenir le pic d'intensité maximale à une température donnée. La forme complète du spectre est décrite par la loi de Planck, présentée sur la figure I.5.

Sur cette figure, le spectre de la lumière visible de 380 nm à 750 nm est représenté. À gauche – en dessous de 380 nm – il s'agit d'ultraviolets, et à droite – au-dessus de 750 nm – il s'agit d'infrarouges. Le spectre de trois objets, à 3000 K, 4000 K et 5000 K est tracé, de même que la loi de Wien qui est représentée par les traits tiretés.

Un rayonnement électromagnétique peut donc être caractérisé par sa longueur d'onde λ ou sa fréquence ν , mais également par sa température de corps noir T , comme cela est présenté sur la figure I.1.

Le fond diffus cosmologique est la première lumière émise après le Big Bang. Ce rayonnement est très proche de celui d'un corps noir. Il a été émis à environ 3000 K, ce qui correspond à un maximum de luminosité dans l'infrarouge proche (cf. figure I.5). Cependant, du fait du redshift (cf. section 1.1.3), la température du corps noir est dorénavant de l'ordre de 3 K, ce qui correspond à un maximum de rayonnement dans les micro-ondes.

1. Il s'agit de la raie H α , caractéristique de l'hydrogène et très étudiée en astronomie.

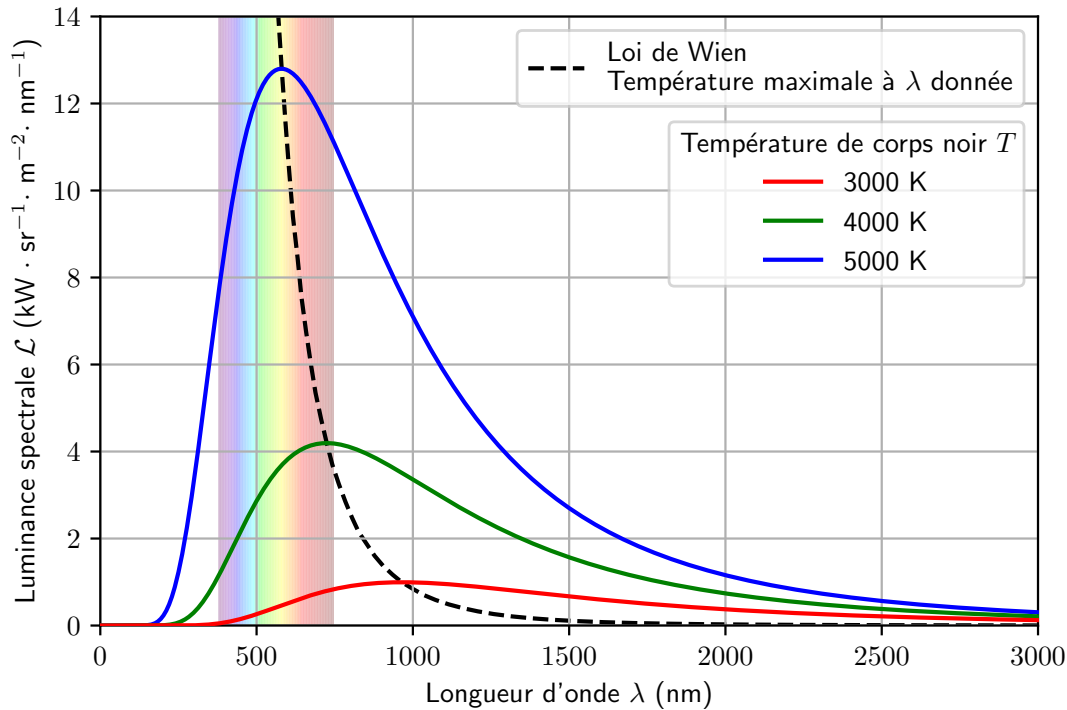


Figure I.5 – Spectre de corps noir en fonction de la longueur d'onde λ et de la température T .

1.2 Caractérisation des étoiles

1.2.1 Mesure des distances : la parallaxe

À quelle distance se trouvent les étoiles ? Pour répondre à cette question, les astronomes utilisent, entre autres, la technique de la parallaxe, dont la précision influe sur la caractérisation même des d'exoplanètes.

Le principe de la parallaxe repose sur le fait que lorsqu'on observe un même objet depuis deux points différents, cet objet semble se déplacer par rapport au fond. Ce principe géométrique est très utile en astronomie pour déterminer la distance avec les étoiles proches.

Le principe est présenté sur la figure I.6. À un instant donné, on observe une étoile. Puis, six mois plus tard, lorsque la Terre est de l'autre côté du Soleil, on observe de nouveau cette étoile. Par rapport à d'autres étoiles bien plus lointaines, cette étoile semble avoir bougé : c'est sa parallaxe, dont on mesure l'angle 2α . En connaissant la distance entre la Terre et le Soleil (1 unité astronomique (au), soit environ 150 000 000 km), la distance D (en parsecs) à laquelle se trouve l'étoile est alors, avec α en secondes d'arc :

$$D \approx \frac{1}{\alpha} \quad (\text{I.4})$$

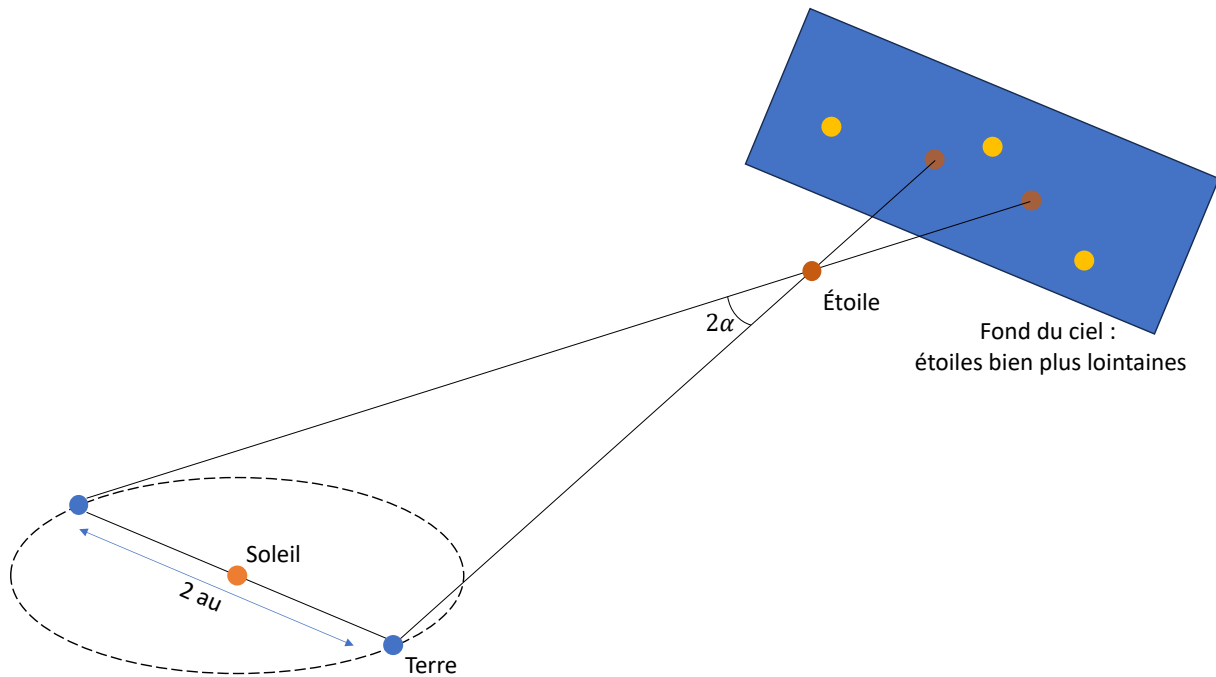


Figure I.6 – Schéma de principe de la parallaxe annuelle.

La mesure de la parallaxe, d'abord diurne, puis annuelle, des étoiles a longtemps occupé les astronomes, auparavant par des relevés à la main pendant des siècles, puis, à partir des années 1980, grâce à des satellites, dont Hipparcos [Turon & Arenou, 2007] puis Gaia [Gaia Collaboration et al., 2016]. Ce dernier satellite, dont l'activité vient de cesser, a permis de cartographier très précisément notre voisinage proche, et par la même occasion, de détecter et de caractériser des exoplanètes.

1.2.2 Mesure de la magnitude

Les étoiles n'apparaissent dans le ciel nocturne que comme de simples points, parfois légèrement rougeâtres ou bleutés. Mais derrière cette apparente uniformité se cache une très grande diversité : naines blanches, rouges, jaunes (notre Soleil), géantes, supergéantes, hypergéantes...

Les principales caractéristiques qui permettent de classer les étoiles sont :

- leur masse m (souvent exprimée en masse solaire M_{\odot} , soit environ 2×10^{30} kg) ;
- leur distance D par rapport au Soleil (en parsecs pc) ;
- leur température de surface T , ce qui correspond à leur couleur (voir la partie 1.1.4) ;
- leur magnitude absolue M .

La magnitude absolue M mesure la luminosité d'un objet, de manière indépendante de la distance à laquelle on se trouve. Sur Terre, deux étoiles peuvent nous apparaître aussi brillantes alors que l'une d'elle est très proche, et l'autre est bien plus lointaine. On dit alors qu'elles ont la même magnitude *apparente* m . Par exemple, les étoiles Rigel et Véga ont sensiblement la même magnitude apparente m (+0,12 contre +0,03 respectivement). Cependant, Rigel se trouve 25 fois plus loin de la Terre que Véga. Pour avoir la même luminosité vue depuis la Terre, elle est donc $25^2 = 625$ fois plus brillante. Rigel a donc une magnitude absolue plus élevée.

La magnitude apparente m se détermine en comparant les objets lumineux entre eux. L'étoile Véga a été définie comme étoile de référence, avec une magnitude apparente m de 0. Ironie du sort, il s'avère en réalité que cette étoile a une luminosité qui varie avec le temps [Gatewood, 2008], ce qui explique que sa magnitude apparente m soit désormais fixée à +0,03 en moyenne.

Par rapport à cette étoile de référence, augmenter ou diminuer de 1 sur l'échelle des magnitudes signifie que la luminosité est 2,5 fois plus faible ou plus forte, respectivement, en échelle logarithmique. Les étoiles les plus brillantes ont une magnitude apparente m faible, voire négative, tandis que les moins lumineuses ont une magnitude apparente m élevée.

La magnitude absolue M correspond à la luminosité qu'aurait l'étoile observée à une distance de 10 pc. On peut la relier à la distance D et à la magnitude apparente m par la relation :

$$m - M = 5 \cdot \log_{10}(D) - 5 \quad (\text{I.5})$$

Le diagramme de Hertzsprung-Russell (couramment abrégé diagramme HR), présenté sur la figure I.7 permet de classer ces étoiles en fonction de leur couleur (c'est-à-dire leur température de surface, divisée en différentes *classes spectrales*) et leur luminosité (en magnitude absolue).

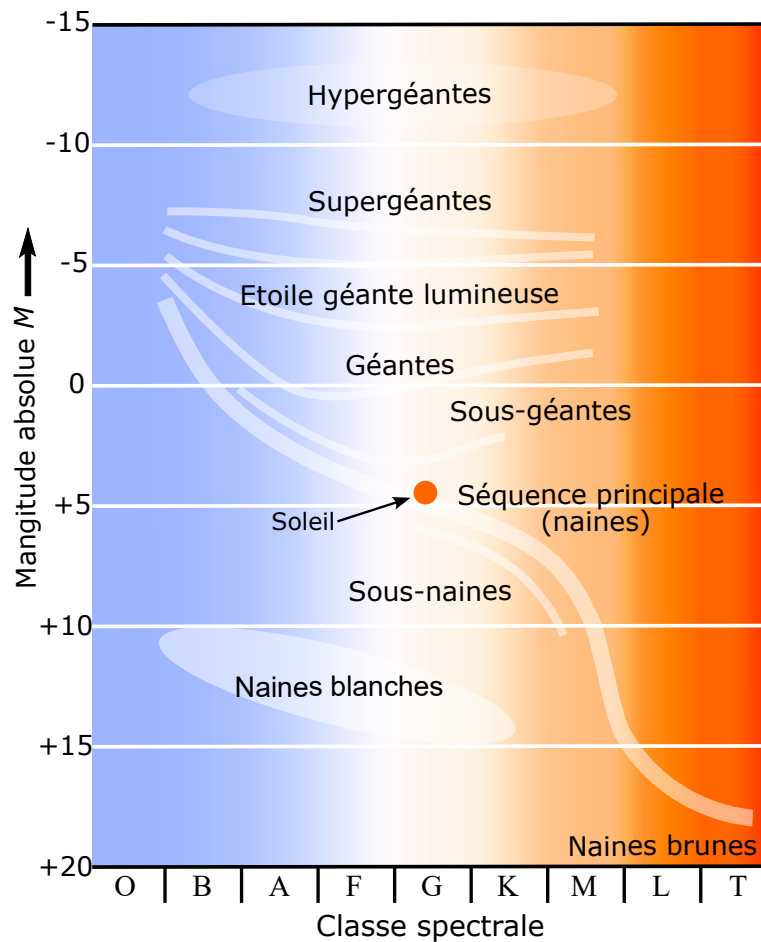


Figure I.7 – Diagramme de Hertzsprung-Russell. *Wikimedia Commons*.

Grâce à ce diagramme, les scientifiques peuvent estimer les propriétés des étoiles et connaître leur passé et leur futur. Puisque la seule lumière nous parvenant des systèmes planétaires est

celle de l'étoile autour de laquelle gravitent tous les autres corps, il est primordial de parfaitement comprendre le fonctionnement des étoiles pour détecter des exoplanètes.

1.3 Lois de Kepler

Les lois proposées par l'astronome Kepler permettent de décrire aisément le mouvement d'un système de deux corps célestes en interaction gravitationnelle, typiquement une planète et une étoile. Ces lois sont au nombre de trois :

Loi des ellipses : La trajectoire de la planète est une ellipse, dont l'un des deux foyers est occupé par l'étoile (cf. figure I.8).

Loi des aires : La planète balaie une surface égale en un temps égal, quelle que soit sa position sur la trajectoire. En clair, cela signifie que la planète se déplace plus rapidement au périapse de sa trajectoire (au plus proche de l'étoile), qu'à son apoapse (au plus loin de l'étoile).

Loi des périodes : Il existe une relation entre la période sidérale (la durée d'une « année ») P et le demi-grand axe a de l'ellipse :

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M+m)}{4\pi^2} = k \quad (\text{I.6})$$

Dans le cas où la masse de l'étoile M est très supérieure à la masse m de la planète, avec G qui vaut approximativement $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$:

$$k = \frac{GM}{4\pi^2} \quad (\text{I.7})$$

Cela signifie que plus la planète est proche de son étoile, plus la durée d'une année sur cette planète est courte.

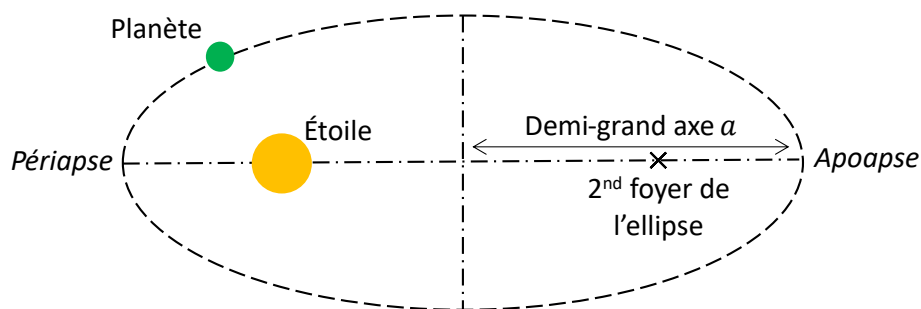


Figure I.8 – Trajectoire d'une planète autour de son étoile selon la première loi de Kepler.

Ces trois lois fonctionnent dans les cas simples, notamment lorsqu'il n'y a que deux corps en interaction. Grâce à leur simplicité, ces lois permettent, en connaissant simplement la masse M de l'étoile et la période sidérale P de la planète, de calculer le demi-grand axe a de l'orbite de la planète autour de l'étoile (ce qui revient à sa distance avec l'étoile dans le cas d'une orbite circulaire).

Dans des cas plus complexes, par exemple lorsqu'il y a plusieurs étoiles en interaction avec une planète ou si plusieurs planètes ont des orbites très proches, ces lois ne s'appliquent pas,

et il faut résoudre les équations de Newton à l'aide de simulations numériques. Dans certains cas, il est même nécessaire d'employer les lois d'Einstein, comme dans le cas de la précession résiduelle du périhélie de Mercure.

En réalité, lorsque qu'une planète orbite une étoile, cette dernière se déplace elle aussi, en formant également une orbite elliptique. La planète et l'étoile se déplacent autour de leur barycentre, c'est-à-dire leur centre de gravité. Le demi-grand axe a_* de l'orbite de l'étoile est alors :

$$a_* = a \cdot \frac{m}{M} \quad (\text{I.8})$$

Ce qui est très proche de 0 dès lors que $M \gg m$.

2 Détection d'exoplanètes

2.1 Historique

Depuis la Renaissance, la question de la possibilité de l'existence de planètes tournant autour des étoiles a interrogé les savants, tels que Giordano Bruno (1548 – 1600), Christiaan Huygens (1629 – 1695) ou Isaac Newton (1643 – 1727).

Bernard de Fontenelle (1657 – 1757) est un excellent exemple de ces penseurs qui commencent à conceptualiser la possibilité d'autres mondes. Il écrit, dans son traité de vulgarisation *Entretiens sur la pluralité des mondes* [de Fontenelle, 1686] :

Les Étoiles fixes sont autant de Soleils, notre Soleil est le centre d'un tourbillon qui tourne autour de lui, pourquoi chaque étoile fixe ne sera-t-elle pas aussi le centre d'un tourbillon qui aura un mouvement autour d'elle ? Notre Soleil a des planètes qu'il éclaire, pourquoi chaque Étoile fixe n'en aura-t-elle pas aussi qui éclairera ?

Dans ce texte l'auteur postule clairement l'existence d'exoplanètes, plus de 300 ans avant leur découverte effective ! L'illustration présentée sur la figure I.9 représente le Soleil au centre, les six planètes alors connues du Système solaire (Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne) accompagnées de leurs satellites majeurs. Sur la bordure se trouvent d'autres étoiles, autour de certaines desquelles des astres « tourbillonnent ».

Par la suite, de nombreux scientifiques ont cru détecter des exoplanètes. Par exemple, William S. Jacob en 1855 et Thomas J. J. See en 1890 pensent avoir mis en évidence une exoplanète autour de l'étoile 70 Ophiuchi. Cette découverte fut très contestée à l'époque et est toujours non confirmée aujourd'hui.

C'est en 1992 qu'est détectée la première exoplanète, par Aleksander Wolszczan et Dale Frail, autour du pulsar au nom poétique de PSR B1257+12 [Wolszczan & Frail, 1992]. Cependant, les pulsars sont des étoiles très particulières, dont le cas est évoqué dans la section 2.3.3.2. Au voisinage d'un tel objet, cette exoplanète est certainement très différente des planètes que nous pouvons imaginer.

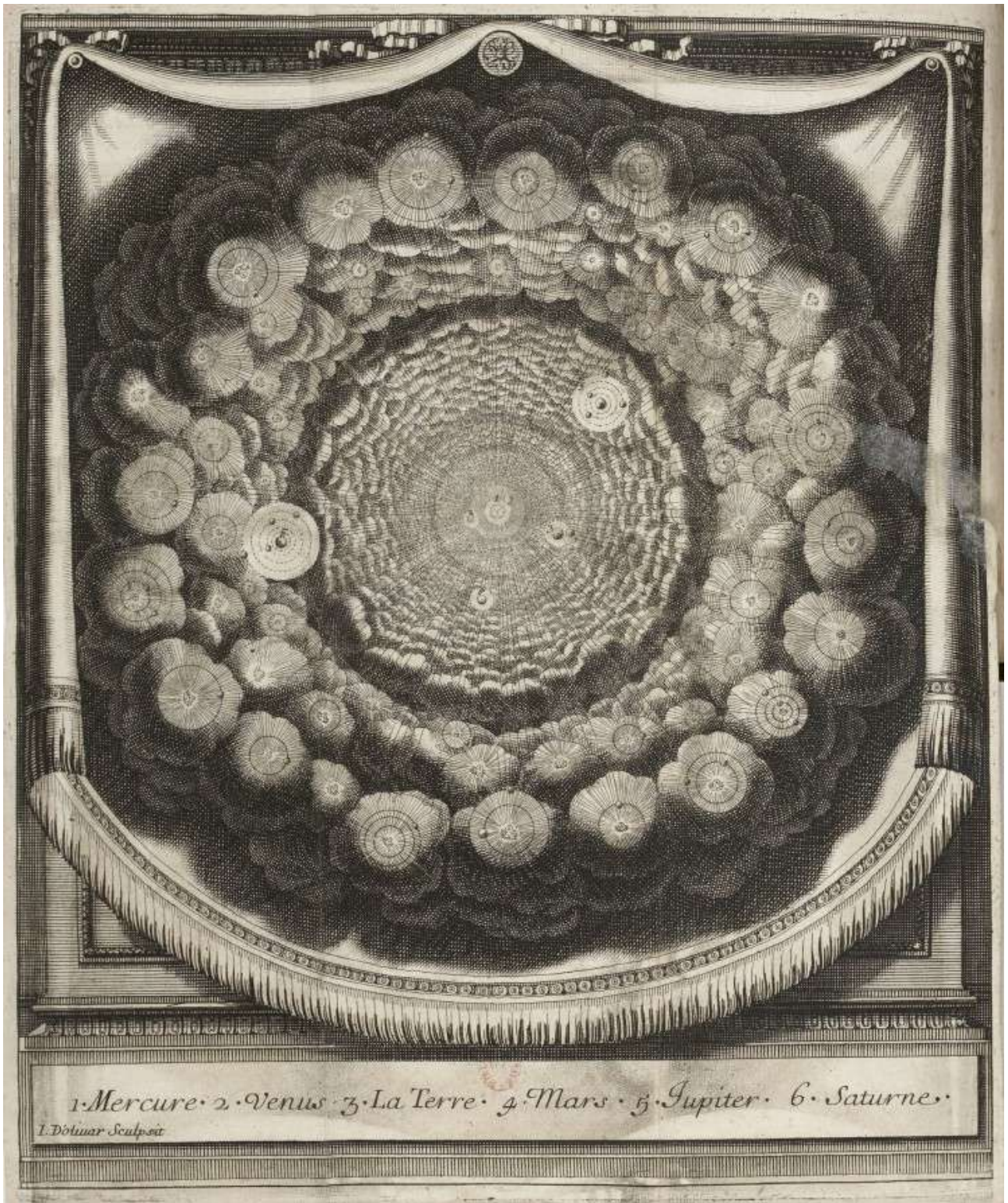


Figure I.9 – Carte du ciel. Issue de [de Fontenelle, 1686].

La première découverte d'une exoplanète autour d'une étoile de type solaire revient à Michel Mayor et Didier Queloz [Mayor & Queloz, 1995] par la méthode des vitesses radiales (voir section 2.3.1.1), ce qui leur vaut le prix Nobel de physique en 2019.

Aujourd'hui, plusieurs méthodes de détection existent, et seront présentées dans la suite. Ces méthodes de détection se divisent entre :

- les méthodes dynamiques, qui visent à mesurer le mouvement propre des étoiles ;
- les méthodes photométriques et d'observation directe, qui visent à mesurer la quantité de lumière émise par l'étoile ou à observer directement les exoplanètes ;
- les autres méthodes, souvent exotiques, qui s'appuient sur des phénomènes très particuliers.

De nombreux détails sur les différentes méthodes de détection peuvent être trouvés dans [Perryman, 2018], et, de manière beaucoup plus accessible, dans [Abraham & Mauguin, 2024].

Le nombre d'exoplanètes découvertes croît sans cesse, comme en atteste la figure I.10. Deux pics notables, en 2014 et 2016, correspondent en majorité à la publication des catalogues du satellite Kepler, qui a permis de nombreuses détections.

2.2 Conventions de nomenclature

Historiquement, les étoiles étaient nommées en fonction de leur rang de luminosité dans la constellation dans laquelle elles sont. Ainsi, l'étoile Véga est l'étoile la plus brillante de la constellation de la Lyre, est aussi appelée Alpha Lyræ, abrégé en α Lyr. Les étoiles moins brillantes suivent dans l'ordre de l'alphabet grec, puis latin, puis des chiffres. En réalité, il apparaît souvent que l'ordre n'est plus correct, suite à des mesures fausses.

Les étoiles ont ainsi plusieurs noms qui se superposent, d'abord leur nom historique, puis leur nom dans différents catalogues (HR², HD³, HIP⁴, 2MASS⁵...). Antares s'appelle par exemple également α Scorpii, HR 6134, HD 148478/9, HIP 80763...

Dans le cas où il s'agit d'un système multiple d'étoiles, chaque étoile est notée A , B , etc. en suivant leur luminosité. Ainsi, Rigel, dans la constellation d'Orion, est en réalité composée de trois étoiles, dont la principale est nommée β Ori A, la deuxième β Ori B et la troisième β Ori C.

Afin de nommer de manière systématique les exoplanètes découvertes, l'UAI (Union Astronomique Internationale) a adopté une norme. Les planètes sont nommées avec une lettre latine minuscule, en commençant par la lettre b , par ordre de découverte. Par exemple, la première planète découverte autour de l'étoile 51 Peg est nommée 51 Peg b.

On ajoute parfois à la liste des noms de la planète le nom de l'observatoire qui a permis sa découverte si son étoile n'a pas déjà de nom dans les principaux catalogues. Citons par exemple CoRoT-7 b, qui est la première planète découverte dans le système CoRoT-7, qui est le 7^e système planétaire découvert par le télescope CoRoT.

2. *Harvard Observatory, revised photometry*, publié en 1908.

3. Catalogue Henry Draper, publié entre 1918 et 1924.

4. Catalogue du satellite Hipparcos, publié en 1993.

5. *Two Micron All-Sky Survey*, relevé de tout le ciel terminé en 2001.

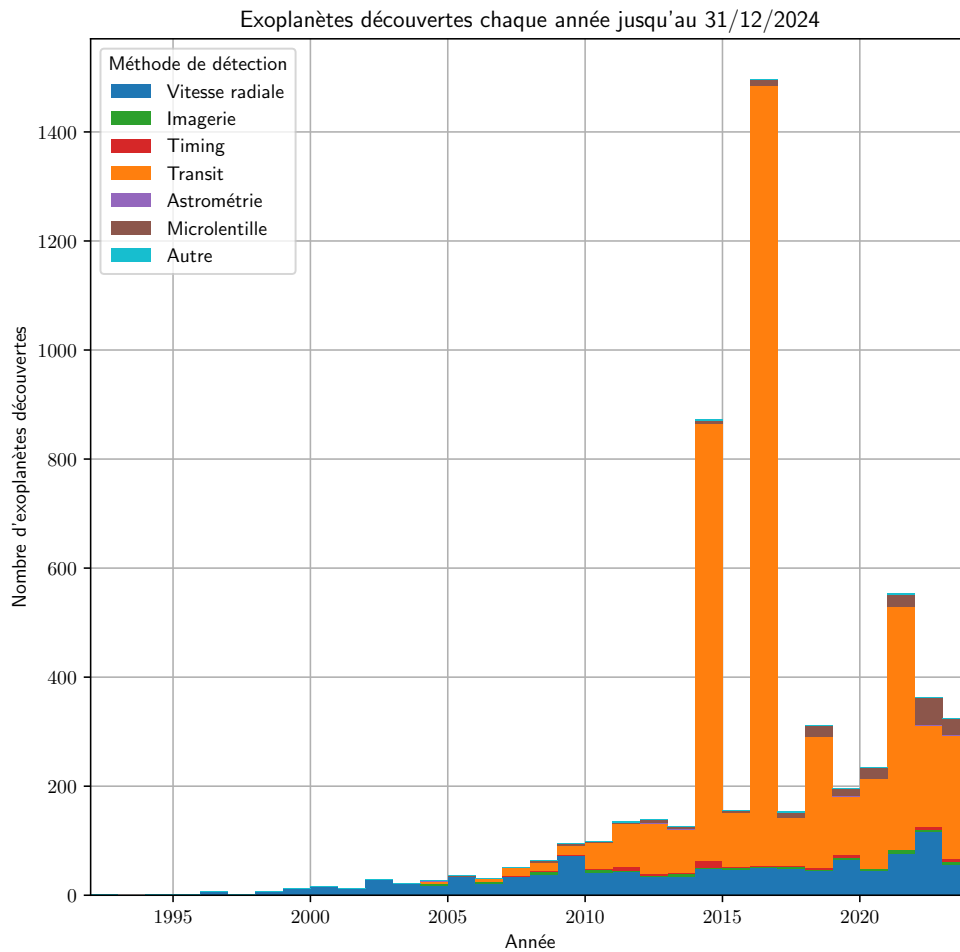


Figure I.10 – Histogramme des découvertes d'exoplanètes découvertes au 31 décembre 2024, catégorisées en fonction de leur méthode de découverte. Les données sont extraites de la [NASA Exoplanet Archive](#).

2.3 Méthodes de détection

L'observation des exoplanètes ne peut se faire que difficilement de manière directe. D'une part, elles sont très éloignées et très petites, et d'autre part, elles sont à proximité immédiate d'étoiles beaucoup plus lumineuses, qui éblouissent les télescopes. Cette difficulté à observer directement les exoplanètes nécessite de développer diverses techniques pour les détecter.

2.3.1 Méthodes dynamiques

2.3.1.1 Vitesses radiales

La méthode de détection des exoplanètes par mesure de la vitesse radiale a permis la découverte de 51 Peg b en 1995 par Michel Mayor et Didier Queloz [[Mayor & Queloz, 1995](#)]. Cette méthode spectrométrique s'appuie sur l'effet Doppler-Fizeau (voir section [1.1.3](#)).

Comme cela est évoqué dans la section 1.3, lorsqu'une planète tourne autour d'une étoile, celle-ci se déplace également légèrement. Ce faisant, par rapport à la Terre, le mouvement de l'étoile se modifie. Ce mouvement est périodique, c'est-à-dire que l'étoile se rapproche et s'éloigne successivement de nous, à mesure que la planète achève sa révolution. Ce mouvement génère un décalage du spectre de l'étoile, vers le bleu lorsqu'elle se rapproche et vers le rouge lorsqu'elle s'éloigne. Cela est représenté sur la figure I.11.

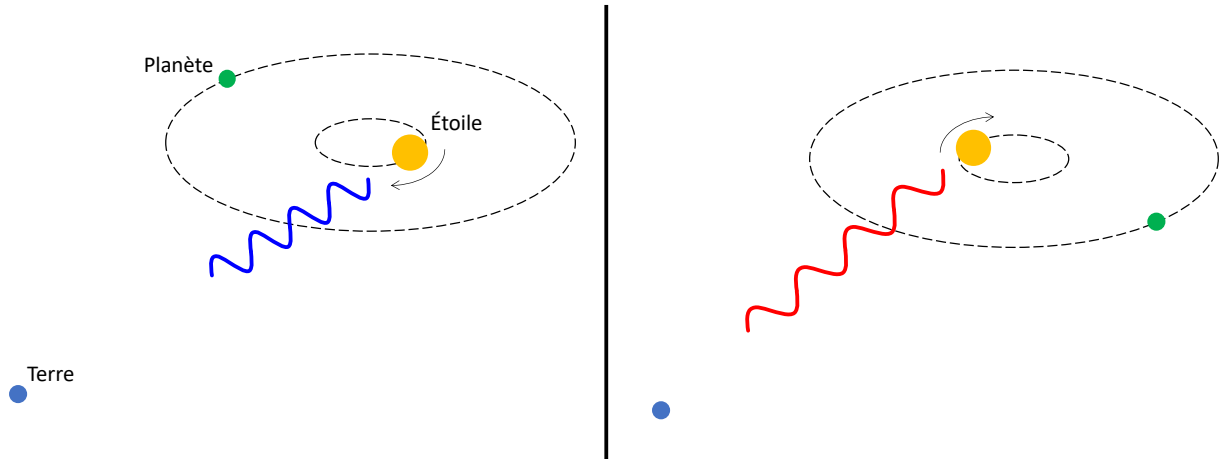


Figure I.11 – Diagramme de la méthode de la vitesse radiale. À gauche, l'étoile se rapproche et « bleuit ». À droite, l'étoile s'éloigne et « rougit ».

Dans le cas de la découverte de 51 Peg b, première exoplanète découverte par cette méthode, la figure I.12 présente la variation de la vitesse radiale V_r de l'étoile 51 Peg au cours du temps. Cette courbe est obtenue en superposant un grand nombre d'observations sur plusieurs mois. La période de révolution P de la planète – l'année – dure un peu plus de quatre jours. Le spectrographe utilisé, appelé ÉLODIE, permet de mesurer avec une précision de $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ la vitesse radiale V_r de l'étoile. Aujourd'hui, les spectrographes les plus perfectionnés (ESPRESSO au VLT de l'ESO) peuvent mesurer une vitesse radiale V_r allant jusqu'à $0,10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. À titre de comparaison, la Terre génère sur le Soleil une variation de la vitesse radiale V_r du Soleil de $0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Grâce à des courbes similaires à celle visible sur la figure I.12, il est possible de remonter à certaines caractéristiques de l'étoile. La période de révolution P est très aisée à déterminer, puisqu'elle correspond à une période du signal. Plus l'exoplanète est massive, et plus l'amplitude de la vitesse radiale mesurée V_r sera marquée.

Néanmoins, cette méthode ne permet que d'obtenir une valeur minimale de la masse m de la planète. En effet, la vitesse radiale V_r dépend de l'axe de visée. Comme cela est représenté sur la figure I.13, le système planétaire peut être plus ou moins incliné. Cette inclinaison, notée i , influe sur la mesure de la vitesse V_r . Le cas où $i = 90^\circ$ représente la configuration idéale, dans laquelle la vitesse mesurée correspond réellement à la vitesse radiale de l'étoile. Sinon, seule une partie de la vitesse radiale est mesurée. Dans le cas où $i = 0^\circ$, la mesure par vitesse radiale est impossible, car l'étoile ne bouge pas selon l'axe de visée.

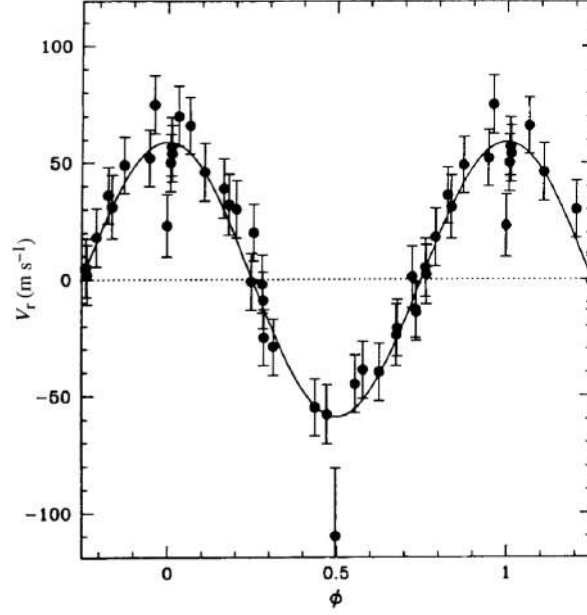


Figure I.12 – Mouvement de l'étoile 51 Peg. En abscisse, la phase ϕ , ce qui correspond à la révolution de l'exoplanète autour de l'étoile, soit environ 4 jours. En ordonnée, la vitesse radiale V_r de l'étoile. *Extrait de [Mayor & Queloz, 1995].*

La vitesse réelle de l'étoile V , par rapport à la vitesse mesurée V_r , est donc égale à :

$$V = \frac{V_r}{\sin i} \quad (\text{I.9})$$

Par application de la 3^e loi de Kepler (cf. équation I.6), on peut calculer le demi-grand axe a de l'ellipse décrite par la planète en connaissant la masse M de l'étoile et la période P :

$$a^3 = P \cdot \frac{GM}{4\pi^2} \quad (\text{I.10})$$

Si l'on considère que l'orbite est circulaire, on peut alors appliquer les lois de Newton pour calculer la vitesse de la planète v sur son orbite :

$$v = \sqrt{\frac{GM}{a}} \quad (\text{I.11})$$

La masse de la planète m est donc :

$$m = M \cdot \frac{V}{v} = M \cdot \frac{V_r}{v \cdot \sin i} \quad (\text{I.12})$$

Pour les exoplanètes découvertes par cette méthode seulement et dont l'inclinaison orbitale i est inconnue, la masse minimale de l'exoplanète est alors $m \sin i$. Il faut une mesure par une autre méthode pour pouvoir déterminer cet inclinaison i . La masse de 51 Peg b est ainsi estimée à la moitié de celle de Jupiter.

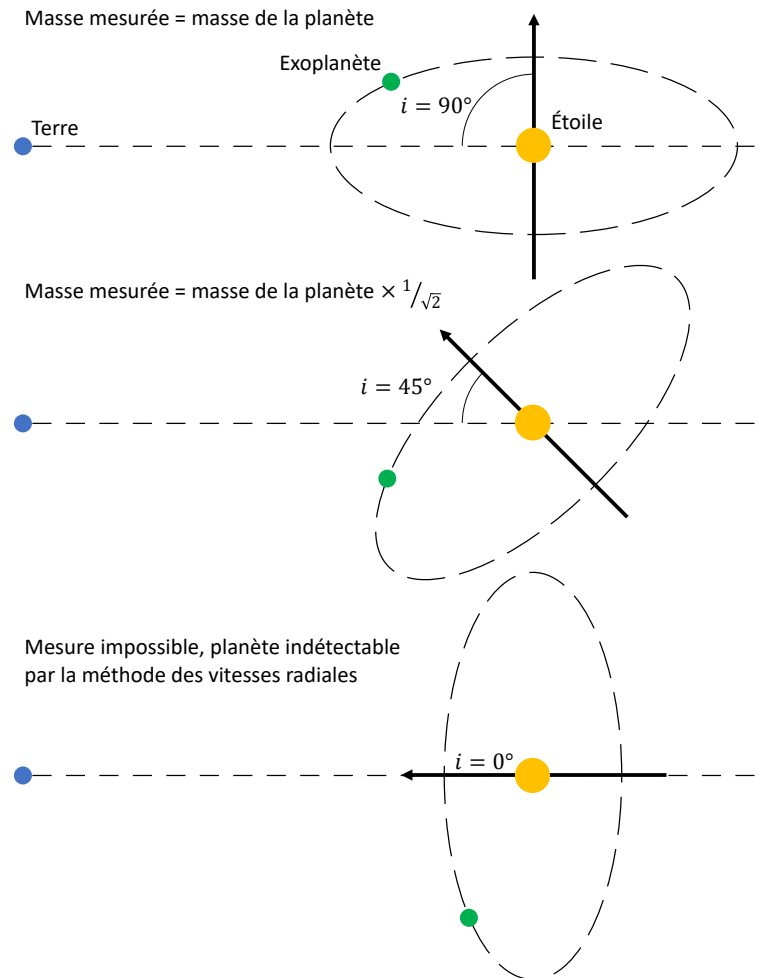


Figure I.13 – Diagramme représentant des configurations en fonction de l’inclinaison orbitale i par rapport à l’axe de visée, et masse mesurée par la méthode des vitesses radiales. En haut, $i = 90^\circ$ (configuration « *edge-on* »), au milieu, $i = 45^\circ$, en bas, $i = 0^\circ$ (configuration « *pole-on* »).

Mesurer l’inclinaison i est primordial pour faire la distinction entre étoiles et planètes. Par exemple, en 1989, autour de l’étoile HD 114762 est découvert un objet d’une masse minimale de $10 M_J$ (masse de Jupiter). [Latham, Mazeh, Stefanik, Mayor, & Burki, 1989]. Cette valeur minimale aurait pu faire entrer l’objet dans la catégorie des exoplanètes. Néanmoins, la masse fut réévaluée plus tard (par astrométrie) comme faisant environ $110 M_J$, ce qui signifie qu’il s’agit en réalité d’une étoile de faible masse [Kiefer, 2019].

Dans le cas où plusieurs exoplanètes orbitent la même étoile, cette méthode est toujours réalisable. Le mouvement de l’étoile peut alors être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux, chaque sinusoïde étant la marque d’une exoplanète.

2.3.1.2 Astrométrie

La détection par astrométrie repose sur le même principe que la détection par vitesse radiale. La potentielle exoplanète provoque un déplacement de l’étoile, qui peut être observé directement : celle-ci semble se déplacer sur le fond du ciel.

À l'inverse de la détection par vitesse radiale, la configuration optimale pour utiliser l'astrométrie est la configuration où l'inclinaison orbitale i est proche de 0° . De même, cette méthode fonctionne davantage pour détecter de grosses exoplanètes gravitant autour d'étoiles peu massives : le mouvement propre de l'étoile sera d'autant plus important. Cette méthode nécessite également que le système planétaire soit relativement proche, afin que le mouvement soit perceptible.

À l'aide d'outils d'astrométrie, tels que le satellite Gaia, il est possible de mesurer ce déplacement au fil du temps. Un exemple (fictif) peut être vu sur la figure I.14. L'étoile visée suit une trajectoire formant une boucle (traits pointillés) pour chaque année terrestre : c'est l'effet de la parallaxe (c'est-à-dire le fait que la Terre tourne autour du Soleil, cf. figure I.6). Cependant, ces boucles sont perturbées (traits pleins). Cette perturbation peut s'expliquer par la présence d'une exoplanète suffisamment massive.

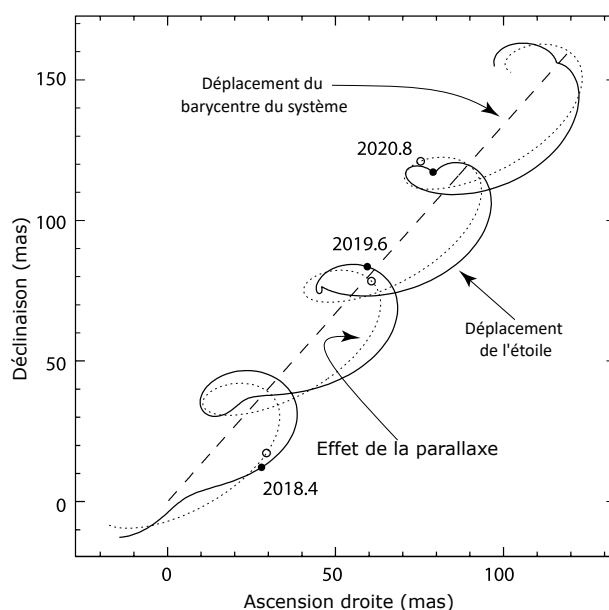


Figure I.14 – Déplacement d'un système planétaire sur le fond du ciel. Les axes sont en milliseconde d'arc (mas). *Adapté de [Perryman, 2018].*

La figure I.15 présente le déplacement du barycentre du Système solaire au cours des années. C'est le mouvement que verrait un observateur situé hors du Système solaire et qui nous regarderait. Comme on peut voir, le mouvement est particulièrement complexe, et dépend de l'ensemble des corps du Système solaire – du moins, les plus massifs. Deviner à partir de ces données les caractéristiques (période P et masse m) des différentes planètes qui composent le système solaire est une gageüre. En effet, il n'existe pas de solution mathématique pour les systèmes de N corps s'attirant entre eux, dès lors que $N \geq 3$. Les scientifiques en sont réduits à tâtonner grâce à des simulations numériques.

Comme cela est visible sur la figure I.14, le mouvement de l'étoile est très faible, de l'ordre de la milliseconde d'arc. Ceci explique qu'à ce jour, très peu d'exoplanètes ont été découvertes grâce à cette méthode. L'exoplanète GJ 896 A b a été la première à avoir été identifiée, en 2022 [Curiel, Ortiz-León, Mioduszewski, & Sanchez-Bermudez, 2022]. Une précédente découverte, nommée DENIS-P J082303.1-491201 b [Sahlmann et al., 2013] a été finalement rétractée, car

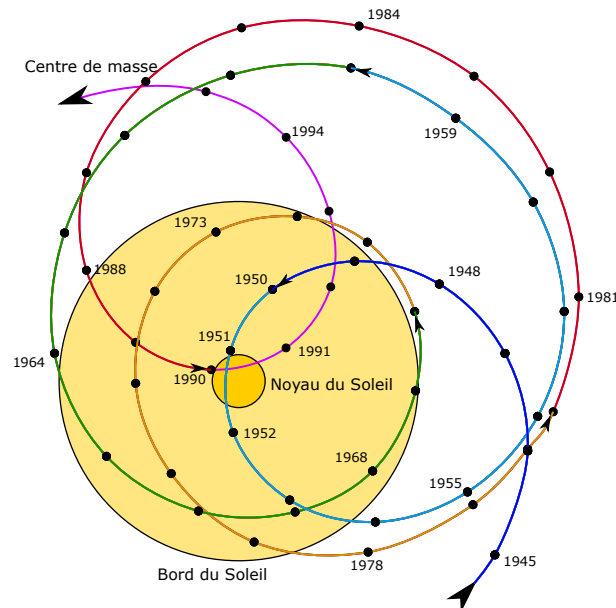


Figure I.15 – Déplacement du barycentre du Système solaire, par rapport au Soleil, principalement dû à l'influence de Jupiter. *Wikimedia Commons*.

la masse de l'exoplanète la classe dans la catégorie des naines brunes, une classe intermédiaire entre les planètes et les étoiles [Sahlmann et al., 2015].

Le satellite Gaia, successeur du satellite Hipparcos, a pour mission de mesurer très précisément la position plus d'un milliard d'étoiles, et leur évolution au cours du temps. Lancée en 2013, cette sonde est encore en train de transmettre des données. Il est nécessaire de relever pendant une durée très longue la position des étoiles pour pouvoir déceler un mouvement propre significatif. Régulièrement, les scientifiques en charge du programme publient des catalogues (DR3 actuellement, DR4 prévu pour 2026) sur lesquels les astronomes du monde entier travaillent. Bien que ce ne soit pas le but premier de la mission Gaia, il ne fait nul doute que de nouvelles exoplanètes seront découvertes grâce à elle.

2.3.2 Méthodes photométriques

2.3.2.1 Transits

La méthode des transits est certainement la méthode qui est la plus à la portée du grand public. Un télescope amateur sur lequel est montée une petite caméra permet à ainsi à des passionnés de contribuer à la confirmation ou la détection d'exoplanètes, grâce à des missions de science participative comme [ExoClock](#).

Cette méthode repose sur la détection des transits, c'est-à-dire le moment où une exoplanète passe devant une étoile. Ceci requiert que l'inclinaison du système planétaire i soit très proche de 0° (cf. figure I.13). Lorsque l'exoplanète se trouve devant l'étoile, la luminosité de cette dernière décroît, à la manière d'une éclipse de Soleil vue de la Terre lorsque la Lune transite entre ces deux astres.

Un exemple caractéristique de détection par méthode des transits est visible sur la figure I.16, issu des travaux de [Charbonneau, Brown, Latham, & Mayor, 2000]. Cette figure présente

l'évolution du flux lumineux au cours du temps de l'étoile HD 209458, durant le passage d'une exoplanète.

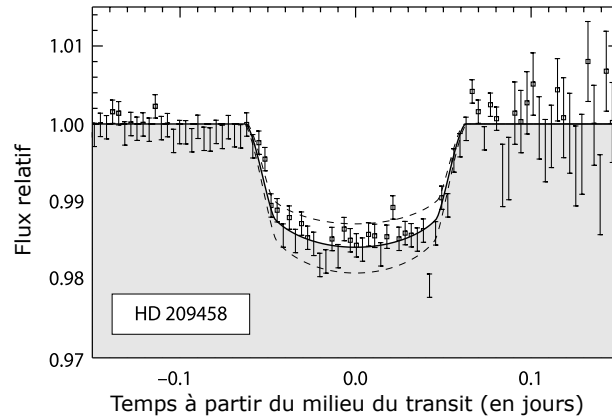


Figure I.16 – Courbe du flux lumineux de l'étoile HD 209458 au cours du temps. *Extrait de [Perryman, 2018], adapté de [Charbonneau et al., 2000].*

De nombreuses données peuvent être extraites de ce type de courbe. Tout d'abord, la fréquence à laquelle ces transits apparaissent renseigne sur la période de révolution P de l'exoplanète. Par application de la loi de Kepler I.6, il est possible de remonter au demi-grand axe a . Combinée à la méthode des vitesses radiales, la masse volumique ρ de la planète peut être calculée, ce qui donne de précieux renseignements sur le type d'exoplanète dont il s'agit (tellurique ou gazeuse). Il s'agit également de la meilleure méthode connue à ce jour pour caractériser les atmosphères (cf. section II.1.4).

C'est aujourd'hui (début 2024), et de loin, la méthode la plus fructueuse pour la découverte d'exoplanètes, avec plus de $4/5^e$ des détections. Les missions terrestres OGLE (1992 - ...), KELT (2005 - ...) ou WASP (2006 - ...) ont permis de découvrir des dizaines d'exoplanètes. Les télescopes spatiaux permettent de s'affranchir de la scintillation des étoiles due à l'atmosphère terrestre et d'obtenir des résultats plus précis. La mission CoRoT (2007 - 2012) a identifié un certain nombre de planètes telluriques. Par la suite, le satellite Kepler (2009 - 2018) a suivi en continu les étoiles en direction de la constellation du Cygne, et a permis une moisson de découverte d'exoplanètes, qui expliquent les pics sur la figure I.10. Les satellites TESS et CHEOPS ont aujourd'hui pris la relève.

Dans le futur, les nouveaux télescopes géants (Extremely Large Telescope, Giant Magellan Telescope, Thirty Meter Telescope) devraient permettre d'observer de nouvelles exoplanètes, tout comme les missions spatiales ARIEL ou PLATO.

Grâce à ces nouveaux outils, il pourrait être ainsi possible d'observer des anneaux ou des exolunes. Certains astronomes imaginent même qu'avec des télescopes suffisamment grands, il devrait être possible d'observer la topographie des exoplanètes, c'est-à-dire « voir » les montagnes et les vallées à la surface des planètes [McTier & Kipping, 2018]!

Cependant, cette méthode souffre de quelques inconvénients. D'une part, elle nécessite un alignement parfait entre l'observateur, l'exoplanète et son étoile. La probabilité que cela arrive est de moins de 0,5 % avec une étoile semblable au Soleil et une exoplanète à une distance

d'une unité astronomique. On peut calculer cette probabilité p par la formule suivante, avec R le rayon de l'étoile et r celui de la planète :

$$p = \frac{R}{a} \approx 0,005 \cdot \left(\frac{R}{r}\right) \cdot \left(\frac{a}{1 \text{ au}}\right)^{-1} \quad (\text{I.13})$$

Cette méthode produit également un taux de faux positifs assez élevé ($\approx 40\%$ pour Kepler). Cela s'explique par le fait que d'autres phénomènes peuvent produire une variation du flux d'une étoile : étoiles binaires, étoiles variables... Enfin, cette méthode nécessite une période de révolution P relativement courte, car pour valider la détection, plusieurs passages doivent avoir été observés.

2.3.2.2 Microlentilles gravitationnelles

La détection d'exoplanètes par la méthode des lentilles gravitationnelles est certainement l'une des méthodes les moins intuitives. Celle-ci repose sur le principe des lentilles gravitationnelles, phénomène permis par la théorie de la relativité générale d'Einstein.

Einstein avait prédit que, dans le cadre de la théorie de la relativité générale, la lumière peut être déviée par un corps massif, tel qu'une étoile, une galaxie ou un amas de galaxies. Lorsqu'une étoile plus proche (« la lentille ») passe devant une étoile plus lointaine, la lumière de cette dernière est déviée. Cela est représenté sur la figure I.17. Des images de l'étoile en arrière-plan apparaissent alors, et provoquent un pic de luminosité : la lumière de l'étoile « source » est amplifiée par l'action gravitationnelle de l'étoile « lentille ».

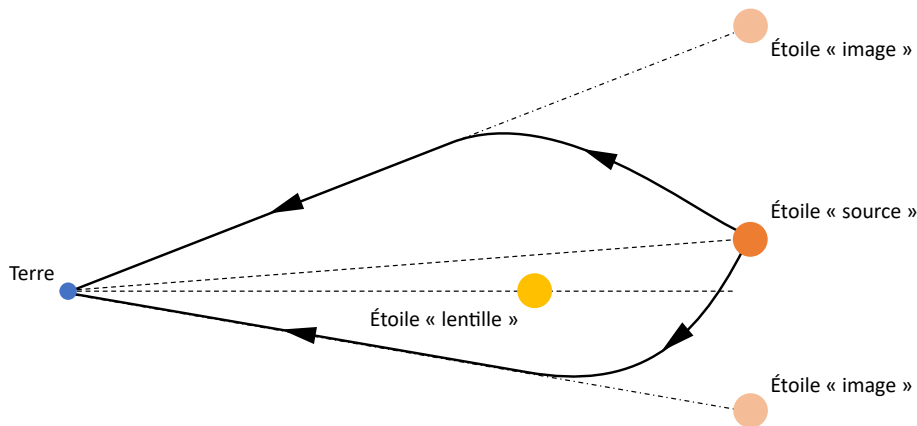


Figure I.17 – Principe de la lentille gravitationnelle. Une étoile « source » passe derrière une étoile « lentille ». La masse de celle-ci dévie la lumière, et provoque l'apparition d'étoiles « images » pour l'observateur sur Terre.

Dans le cas d'un système planétaire, l'évolution de ce pic de lumière détecté ne forme pas une simple cloche : la courbe est perturbée. Des exemples d'évolution de la luminosité au cours du temps peuvent être vus sur la figure I.18. L'exoplanète génère un second pic, dont les caractéristiques dépendent notamment de la masse de cette exoplanète, de sa distance à l'étoile et du passage ou non de cette planète dans la microlentille.

En juin 2003, un premier évènement de ce type a été détecté par deux observatoires indépendants, et a permis d'identifier l'exoplanète OGLE-2003-BLG-235L b [Bond et al., 2004]. Cette

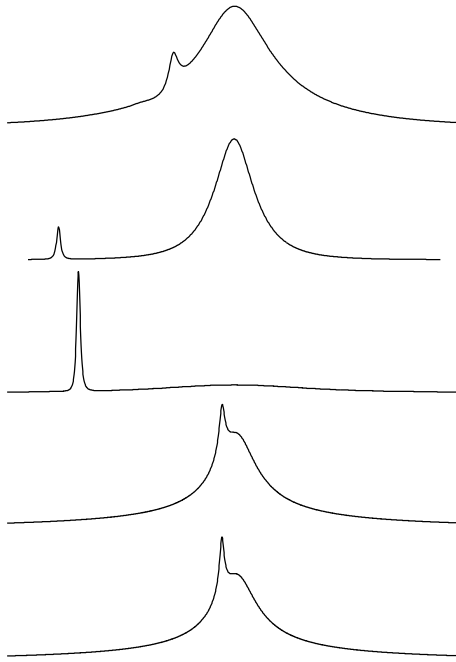


Figure I.18 – Exemples caractéristiques de courbes de lumière possibles obtenues par détection par microlentille gravitationnelle d'un système planétaire. *Adapté de [Perryman, 2018].*

exoplanète a une masse d'environ trois fois celle de Jupiter. La courbe de lumière mesurée est visible sur la figure I.19.

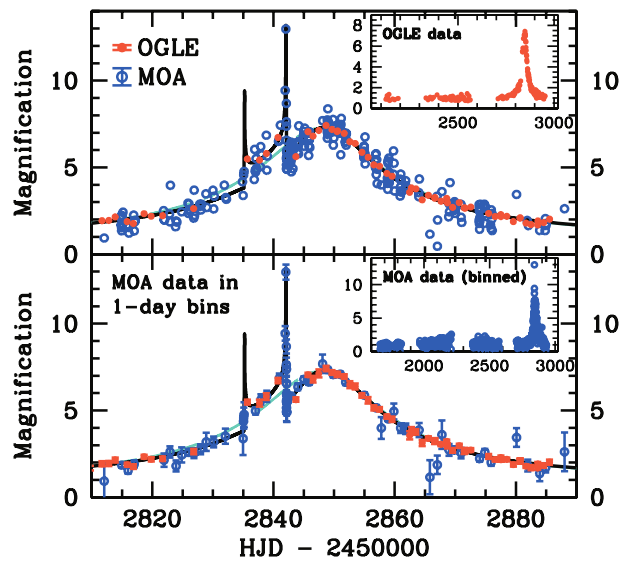


Figure I.19 – Détection de OGLE-2003-BLG-235L b. La courbe noire représente la courbe de lumière calculée à l'aide des observations des collaborations OGLE (en orange) et MOA (en bleu). L'abscisse représente le temps (en jours), et l'ordonnée, l'amplification. *Extrait de [Bond et al., 2004].*

Cette méthode est plus sensible que les autres à aux planètes petites ou éloignées de leur étoile. Elle est donc moins soumise au biais observationnel classique des autres méthodes qui tendent à observer principalement des planètes proches de leur étoile (à l'exception de l'imagerie

directe). L'utilisation de microlentilles gravitationnelles permet donc d'avoir un échantillon plus représentatif des exoplanètes existantes.

L'observation de ce type de phénomène repose principalement sur la chance, l'étoile en arrière-plan étant souvent peu visible avant son passage derrière l'étoile « lentille ». De plus, il s'agit d'une détection unique, qui ne permet pas de suivre l'évolution du système planétaire dans le temps.

Malgré ces défauts, c'est au 31 décembre 2024 la troisième méthode la plus efficace pour détecter des exoplanètes, avec 210 découvertes confirmées. Ce type de détection va augmenter avec l'arrivée de nouveaux télescopes de relevés astronomiques, qui photographient la totalité du ciel très régulièrement afin de détecter les légères variations de luminosité de chaque étoile. C'est le cas par exemple du télescope Vera-C.-Rubin, dont la mise en fonctionnement est prévue pour l'été 2025.

Cette méthode a permis la découverte, encore non confirmée à ce jour, de potentielles exoplanètes extragalactiques, c'est-à-dire présentes dans d'autres galaxies, comme PA-99-N2 b dans la galaxie d'Andromède [Ingrasso et al., 2009]. Au vu des distances colossales considérées, il sera très difficile d'en savoir plus sur ces exoplanètes.

2.3.2.3 Imagerie directe

L'imagerie directe est la première méthode à laquelle l'on pourrait penser pour détecter une exoplanète. Il s'agit d'observer directement une planète à l'aide d'un télescope ou d'une lunette. Cependant, cette méthode est difficile à mettre en œuvre dans le cas de la détection des exoplanètes, car :

- La distance angulaire entre l'étoile et la planète est très faible, il est donc très difficile de séparer la lumière de ces deux astres.
- La lumière de l'étoile est plusieurs ordres de grandeurs supérieure à la lumière réfléchi par les planètes qui l'orbitent. L'étoile nous « éblouit ».

Ce deuxième point est illustré dans la figure I.20. Par rapport au Soleil, le flux émis et réfléchi par les planètes du Système solaire est plusieurs ordres de grandeurs en deçà ($\approx 10^{-8}$). Alors que le Soleil ne fait qu'émettre un rayonnement semblable à celui d'un corps noir (cf. section 1.1.4), celui des planètes est la somme de deux rayonnements :

- un rayonnement *réfléchi*, dont le maximum est situé à la même longueur d'onde que le maximum du flux solaire. Ce rayonnement est, en première approximation, directement lié à la distance entre l'étoile et la planète d , ainsi qu'au rayon r et à l'albédo A ⁶ de cette planète. Il s'agit d'un rayonnement principalement présent dans le domaine visible.
- un rayonnement *émis*, qui est issu de la température même de la planète en question, selon la loi du corps noir (cf. section 1.1.4). Il s'agit d'une lumière émise dans l'infrarouge, dont le maximum correspond à la température d'équilibre de la planète. Au fur et à mesure que la planète refroidit, l'intensité de ce flux décroît, tandis que le maximum se décale vers des longueurs d'onde plus grandes. Cela explique la différence entre Jupiter jeune (juste après sa formation) et Jupiter actuellement.

6. L'albédo A désigne la fraction de la lumière reçue qui est réfléchi. À 0, il s'agirait d'un corps parfaitement noir, à 1, d'un miroir parfait.

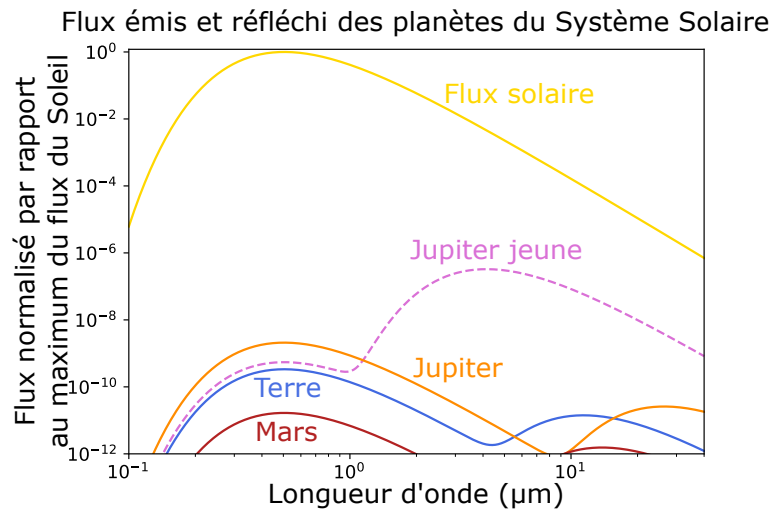


Figure I.20 – Flux émis et réfléchi des planètes du système solaire normalisé par rapport au flux émis par le Soleil. *Adapté de [Galicher & Mazoyer, 2023].*

Ces deux limites – faible distance angulaire et rapport de luminosité entre l'étoile et l'exoplanète – expliquent que les planètes les plus aisées à détecter sont les planètes situées loin de leur étoile, jeunes (plus brillantes, car encore chaudes) et autour d'étoiles peu brillantes (ce qui permet de diminuer le contraste entre l'étoile et la planète). Malheureusement, plus la planète est loin de son étoile, et plus elle est froide. Il y a donc une distance optimale pour laquelle il est plus aisé de détecter des exoplanètes. L'imagerie directe est particulièrement adaptée pour l'observation de systèmes jeunes, avec des exoplanètes ou des champs de débris.

L'imagerie directe nécessite l'utilisation d'un coronographe. Cet outil permet de créer des éclipses artificielles, et ainsi de cacher la lumière de l'étoile et donc de ne pas éblouir les capteurs. Il est également possible d'utiliser un interféromètre pour « éteindre » l'étoile et n'observer que les exoplanètes.

Jusqu'à fin 2024, environ 80 exoplanètes ont pu être découvertes par cette méthode. La première fut 2M1207 b, une planète de 5 à 6 fois la masse de Jupiter, orbitant à une distance de 50 au une naine brune [Chauvin et al., 2004]. Une autre découverte spectaculaire concerne l'étoile HR 8799, une étoile un peu plus massive que le Soleil, autour de laquelle quatre exoplanètes ont été imagées directement [Marois et al., 2008]. La figure I.21 montre trois de ces exoplanètes, un coronographe masquant l'étoile.

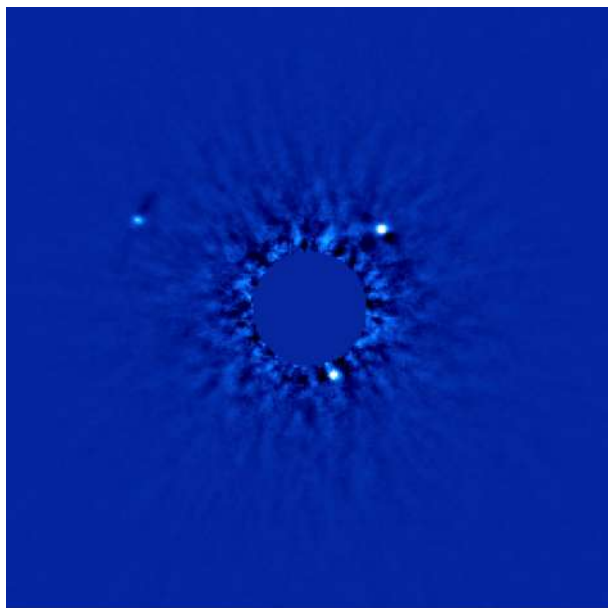


Figure I.21 – Détection par imagerie directe d'exoplanètes orbitant HR 8799, à l'aide d'un coronographe. *Extrait de [Marois et al., 2008].*

2.3.3 Autres méthodes

Les méthodes présentées dans cette section sont des méthodes très particulières qui n'ont conduit qu'à une poignée de détection.

2.3.3.1 Timing

La mesure de la variation de la durée du transit, plus régulièrement appelée *transit-timing variation* (TTV), consiste à observer l'évolution du transit d'une exoplanète déjà découverte par la méthode des transits (cf. section 2.3.2.1). Dans certains cas, la trajectoire de l'exoplanète connue est perturbée et ne suit pas une périodicité stricte. Cela signifie qu'un autre corps perturbe son déplacement. Par application des lois de la mécanique céleste, il est possible d'en déduire l'existence d'une nouvelle exoplanète qui, celle-ci, ne transite pas devant l'étoile pour l'observateur situé sur Terre. De la même manière, la durée du transit peut également être utilisée pour détecter de nouvelles exoplanètes : c'est la méthode *transit-duration variation* (TDV) [Agol & Fabrycky, 2017].

Plusieurs exoplanètes ont été découvertes par cette méthode, par exemple Kepler-19 c [Batalard et al., 2011]. Cette méthode nécessite une très grande précision dans les mesures, ainsi que l'observation de nombreux transits de l'exoplanète déjà connue.

Mais Kepler-19 c n'est pas la première planète découverte par ses perturbations générées sur l'orbite d'autres planètes ! En effet, dans les années 1840, des perturbations dans l'orbite d'Uranus sont observées. Le mathématicien Urbain Le Verrier [Le Verrier, 1847], de l'Observatoire de Paris, parvient en 1846 à déterminer la position de la planète inconnue, qui sera confirmée par l'observation et finalement nommée Neptune. Il s'agit de la première découverte d'une planète par le calcul et non par l'observation directe.

2.3.3.2 Pulsars

Les pulsars, comme cela est décrit dans la section 2.1, sont des étoiles très massives (des étoiles à neutrons), qui tournent sur elles-mêmes plusieurs fois par secondes, tout en émettant un rayonnement électromagnétique très intense. Les pulsars ont la particularité d'être particulièrement réguliers, jouant le rôle de métronomes célestes.

De la même manière que pour la méthode du timing, la présence d'exoplanètes peut perturber de manière infime cette régularité. C'est ainsi qu'en 1992 la première exoplanète de pulsar a été découverte [Wolszczan & Frail, 1992].

Aujourd'hui, moins de dix exoplanètes ont été découvertes par cette méthode, dont trois autour du pulsar PSR B1257+12. Ces exoplanètes subissent de plein fouet l'intense rayonnement électromagnétique de leur étoile. Elles sont donc certainement très différentes des exoplanètes traditionnelles.

2.3.3.3 Étoiles variables

Certaines étoiles sont connues pour avoir une luminosité qui varie rapidement avec le temps et de manière relativement rapide (quelques jours ou semaines). L'exemple le plus connu est l'étoile Bételgeuse.

De la même manière que pour les deux méthodes précédemment décrites, la présence d'exoplanètes peut perturber ce cycle de variation. C'est ainsi que V391 Pegasi b fut découverte [Silvotti et al., 2007]. À ce jour, seules deux exoplanètes ont été découvertes par cette méthode, l'autre étant KIC 7917485 b.

2.4 Récapitulatif des exoplanètes découvertes à ce jour

Au 31 décembre 2024, environ 5800 planètes ont été découvertes et confirmées. La majeure partie de ces exoplanètes l'ont été par la méthode des transits, comme cela peut être vu sur la figure I.10. La figure I.22 présente l'ensemble de ces exoplanètes découvertes, en fonction de leur demi-grand axe a par rapport à l'étoile (en unités astronomiques au), et leur masse m (en masse de Jupiter M_J). En fonction des méthodes employées, une incertitude demeure. Notamment, la masse n'est que la masse minimale dans le cas d'une détection par méthode des vitesses radiales uniquement.

L'ensemble des planètes du Système solaire est également indiqué, ainsi que les planètes naines (Cérès, Pluton, Hauméa, Makémaké, Éris), et Sedna. Cela permet de se rendre compte que la majeure partie des exoplanètes détectées à ce jour gravitent très près de leur étoile (plus proche que Mercure), et sont particulièrement massives. La méthode de détection par transits détecte principalement des planètes dont la révolution est très rapide. La détection par méthode des vitesses radiales permet principalement de détecter des planètes massives, tandis que la méthode de l'imagerie directe permet d'observer des astres situés loin de leur étoile, parfois plus loin que les objets de la ceinture de Kuiper de notre système solaire.

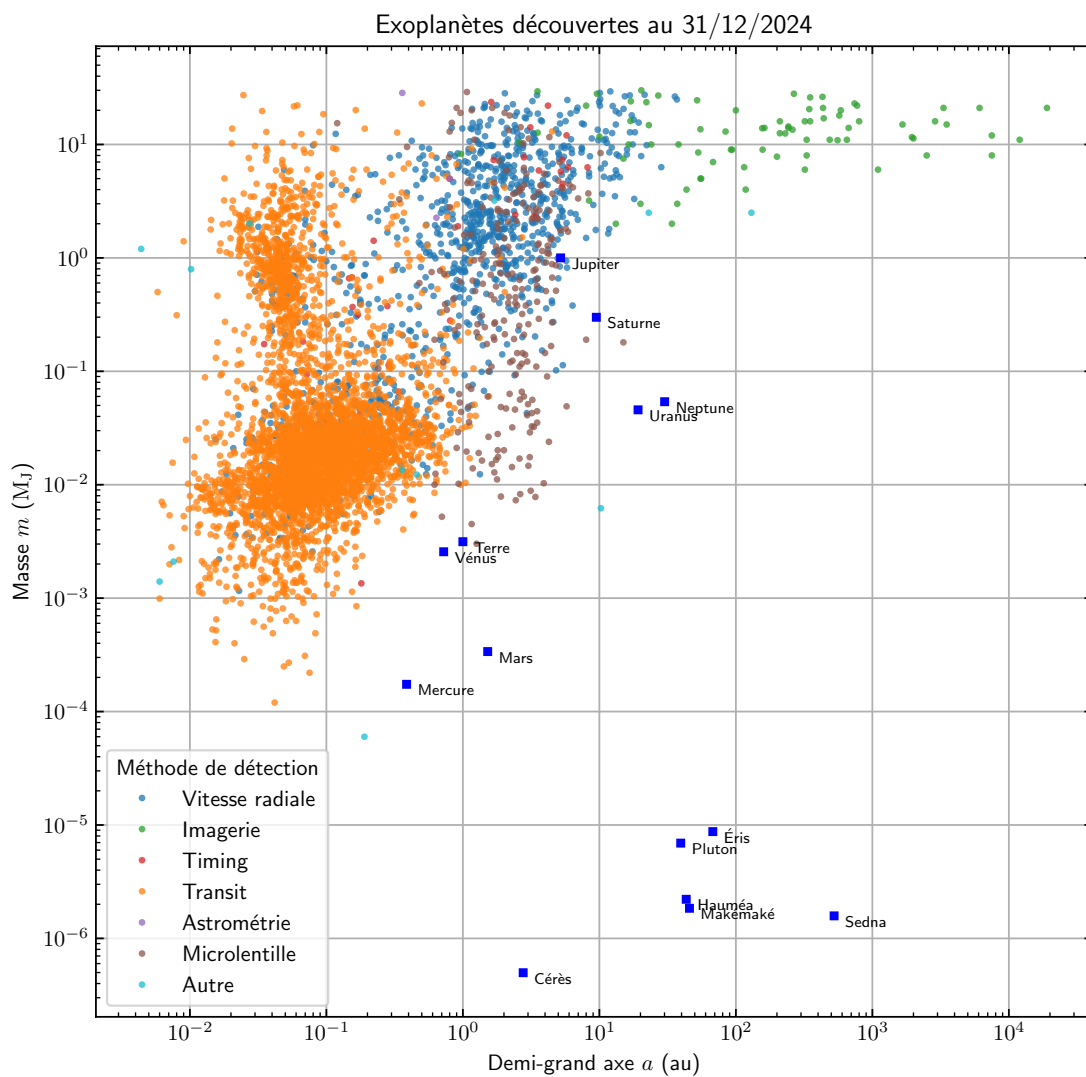


Figure I.22 – Exoplanètes découvertes au 31 décembre 2024, catégorisées en fonction de la méthode de découverte. Les planètes et planètes naines du Système solaire sont représentées pour comparaison. Les données sont extraites de la [NASA Exoplanet Archive](#).

1 Caractérisation

Selon la méthode de détection utilisée pour observer une exoplanète, différentes caractéristiques peuvent-être mesurées.

1.1 Caractérisation de l'orbite

La période orbitale P – c'est-à-dire l'équivalent de l'année sur l'exoplanète en question – est peut-être la caractéristique la plus facilement accessible, car il s'agit généralement d'observer la variation dans le temps de l'intensité lumineuse. Seule la méthode de la lentille gravitationnelle ne permet pas de mesurer facilement cette donnée.

La mesure de la période permet, en connaissant la masse M de l'étoile, d'en déduire la distance d à laquelle l'exoplanète gravite autour de l'étoile, par la troisième loi de Kepler (cf. équation I.6). La masse M de l'étoile peut être déterminée à l'aide du diagramme H-R (cf. section I.1.2.2), qui lie la luminosité de l'étoile L avec sa masse M . La luminosité – ou magnitude absolue – de l'étoile, étant elle-même définie grâce à la distance D à laquelle se trouve l'étoile de nous, grâce à la mesure des distances (cf. section I.1.2.1).

On comprend bien alors l'intérêt crucial des satellites d'astrométrie tels que Gaia, car de la précision de leurs mesures découlent l'ensemble des découvertes liées aux exoplanètes !

1.2 Taille et masse de l'exoplanète

La mesure de la masse m peut être plus difficile à estimer pour les exoplanètes. Les méthodes dynamiques (vitesse radiale et astrométrie) s'y prêtent bien, car l'intensité du mouvement mesuré de l'étoile dépend directement de la masse de l'exoplanète. Dans le cas de la détection par vitesses radiales, on ne mesure que la masse minimale de l'exoplanète.

Dans le cas de la méthode des transits, la *profondeur du transit*, c'est-à-dire la variation relative de la luminosité lors d'un transit, renseigne sur la taille relative de l'exoplanète par rapport à son étoile (cf. figure I.16). Plus l'exoplanète est grosse, et plus l'étoile est petite, et plus la profondeur du transit est marquée. Partant de cette information, il est possible d'en déduire le rayon r de la planète.

Lorsque le rayon r et sa masse m sont connus, il est possible d'en déduire la masse volumique ρ , et donc de savoir s'il s'agit d'une planète gazeuse ou rocheuse. Sinon, dans le cas de très grosses planètes telluriques ou de petites planètes gazeuses, il peut être difficile de caractériser la planète.

1.3 Âge

Connaître l'âge d'un système planétaire permet de calibrer des modèles d'exoplanétologie, et d'imaginer à quoi elle ressemble. Cela permet également d'étudier les migrations des planètes (voir par exemple le modèle de Nice [Tsiganis, Gomes, Morbidelli, & Levison, 2005]) au sein d'un système, qui permettent d'expliquer certains types d'exoplanètes découvertes à ce jour.

Pour connaître cet âge, il est possible de s'appuyer sur l'âge de l'étoile. En effet, il apparaît que les planètes se forment très rapidement au sein des disques protoplanétaires, en une dizaine de millions d'années tout au plus [Haisch, Lada, & Lada, 2001]. Dater l'âge de l'étoile revient donc à dater l'âge des planètes qui l'entourent, avec une précision suffisante, eu égard aux échelles de temps géologiques.

La première méthode repose sur l'évaluation de la luminosité et de la couleur de l'étoile, ce qui permet de la placer dans la séquence principale du diagramme H-R (cf. section I.1.2.2), et par conséquent d'estimer son âge.

Cette méthode est cependant moins précise que l'observation d'*associations stellaires*. Ce terme désigne un ensemble d'étoiles dont le mouvement trahit une genèse commune. En connaissant la vitesse des étoiles et la position actuelle, il est possible de remonter à un point d'origine duquel toutes ces étoiles proviennent. L'âge des étoiles est alors facilement calculable. Ces *young moving groups* sont particulièrement utilisés lors de la méthode de détection directe pour la datation.

1.4 Atmosphère

Connaître la période orbitale P , la masse volumique ρ et l'âge d'une planète ne sont pas suffisants pour connaître complètement une planète. Dans certains cas, d'autres caractéristiques peuvent être obtenues.

Dans le cas de la méthode des transits, il est possible d'observer le transit secondaire. Un transit secondaire a lieu lorsque l'exoplanète observée passe *derrière* son étoile (voir figure II.1). À cet instant, il n'y a pas une baisse de luminosité marquée comme lors d'un transit primaire. En revanche, quelques instants avant et après le transit secondaire, l'exoplanète renvoie une grande partie des rayons de l'étoile vers l'observateur, à la manière d'une pleine Lune sur Terre.

Cette lumière, qui provient de l'étoile, franchit une première fois l'atmosphère de l'exoplanète, est réfléchi par le sol, puis traverse une seconde fois l'atmosphère avant de nous parvenir.

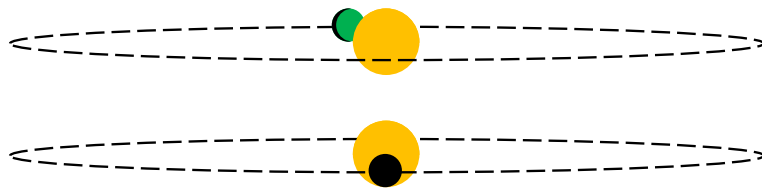


Figure II.1 – Diagramme représentant un début (ou une fin) de transit secondaire (en haut) et un transit primaire (en bas).

Par une analyse spectrométrique de cette lumière et en la comparant avec la lumière de l'étoile seule, il est possible de remonter aux caractéristiques de l'atmosphère. En fonction de sa composition (présence de diazote N_2 , dioxygène O_2 , eau H_2O , méthane CH_4 , etc.), l'atmosphère n'absorbe pas de la même manière dans toutes les longueurs d'onde (voir section I.1.1.2 et figure I.2). En construisant des modèles, les astrophysiciens peuvent ainsi remonter à cette composition chimique de l'atmosphère, mais aussi à l'albédo A de la planète (c'est-à-dire à quel point la planète réfléchit de la lumière : à 1 c'est un miroir, à 0 c'est un corps noir).

La détection de l'atmosphère d'une planète peut également se faire par imagerie directe [Galicher & Mazoyer, 2023]. S'agissant d'objets généralement jeunes, ils émettent naturellement plus de lumière (cf. figure I.20), et peuvent ainsi être observés directement par des spectromètres, qui permettent, tout comme la méthode des transits, de caractériser l'atmosphère.

2 Exoplanètes et planètes de science-fiction

2.1 Science-fiction et planètes des imaginaires

La science-fiction est un genre de l'imaginaire, présent sur de nombreux supports (livres, bandes dessinées, films, jeux vidéo...). Son origine n'est pas évidente à définir, d'une part car la définition même de la science-fiction est floue, d'autre part, car peu d'études historiques et littéraires ont été menées sur ce sujet. Par la suite, nous nous limiterons aux œuvres qui abordent l'exploration spatiale dans un sens large.

On peut citer parmi les précurseurs les *Histoires vraies* (II^e siècle après J.-C.) du romain Lucien de Samosate, qui conte un voyage en bateau vers la Lune ; mais aussi l'*Histoire comique des États et Empires de la Lune* (1657) de Cyrano de Bergerac ou encore *Le Songe ou l'Astronomie lunaire* (1608) de Johannes Kepler. Ces trois auteurs ont en commun de proposer une exploration de la Lune. Mentionnons également *The Blazing World* (1666) de Margaret Cavendish, dans lequel l'autrice décrit un royaume utopique sur une autre planète, et *Micromégas* (1752) de Voltaire, qui conte la visite d'un géant venu d'une planète orbitant Sirius sur Terre.

Au XIX^e siècle, des auteurs tels que Jules Verne (*De la Terre à la Lune*, 1865) ou Charlemagne Ischir Defontenay (*Star ou Ψ de Cassiopée*, 1854) se prêtent à l'exercice. Ce dernier auteur, très en avance sur son temps, décrit une planète dans la constellation de Cassiopée. En orbite autour

de quatre soleils et possédant cinq satellites, cette planète abrite de multiples civilisations qui finissent par partir à la conquête de l'espace pour fonder une fédération interplanétaire.

Le XX^e donna à ce genre ses lettres de noblesse, avec des auteurs tels qu'Edgar Rice Burroughs (*Cycle de Mars*, 1912), Isaac Asimov (*Cycle de Fondation*, 1942), Philip K. Dick (*Un vaisseau fabuleux*, 1954) ou Arthur C. Clarke (*2001 : l'Odyssée de l'espace*, 1968).

La science-fiction est un genre très vaste, dont les problématiques traitées peuvent aller de l'étude de la psychologie humaine à une critique de l'évolution des technologies. Plusieurs sous-genres de la science-fiction emploient couramment des planètes fictives. On peut citer en premier lieu le *space opera*, genre extrêmement populaire, principalement grâce à des œuvres cinématographiques telles que *Star Trek* (1966) ou *Star Wars* (1977)¹. Il s'agit là d'une occupation de l'espace à grande échelle, où chaque planète est généralement prétexte à de nouveaux décors, menaces et enjeux.

Un autre sous-genre est le *planet opera*. Ce genre s'attache à décrire une planète seule, souvent mystérieuse et recelant de secrets. Parmi les œuvres littéraires les plus connues : *Dune* (1965) de Frank Herbert, *La Ballade de Pern* (1971) d'Anne McCaffrey, *Helliconia* (1982) de Brian Aldiss, *Hypérion* (1989) de Dan Simmons, et au cinéma, *Solaris* (1972) et *Avatar* (2009). Le *planet opera* permet souvent d'offrir une planète aux propriétés complexes et riches, généralement plus détaillées que dans le *space opera*.

La science-fiction s'est déployée sur tous les médias. Outre les romans déjà cités précédemment, un ensemble d'œuvres de science-fiction situant leur action sur des exoplanètes fictives est disponible dans l'annexe A.

2.2 Quelques archétypes d'exoplanètes

La classification des planètes dans le Système solaire peut être faite entre les planètes *telluriques*, principalement constituées de roches (Mercure, Vénus, la Terre et Mars), et les planètes *géantes*, constituées en majeure partie de gaz. Dans cette dernière catégorie sont distinguées les géantes *gazeuses* (Jupiter et Saturne), composées d'hydrogène et d'hélium, et les géantes *de glaces* (Uranus et Neptune), composées de gaz plus lourds tels que l'eau H₂O, l'ammoniac NH₃ ou le méthane CH₄. À première vue, les quatre planètes telluriques, les deux géantes gazeuses et les deux géantes de glaces sont très différentes, comme cela peut être vu sur la figure II.2.

Pour les exoplanètes, la classification est encore un sujet ouvert. Les planètes géantes, par leur absence de surface, sont peu présentes dans les œuvres de science-fiction, et ne seront par conséquent pas étudiées par la suite. La distinction n'est pas si évidente entre les petites géantes de glaces (appelées « mini-Neptunes », $r \approx 2 R_{\oplus}$), et les planètes telluriques très massives (« super-Terres », $m \approx 10 M_{\oplus}$). Seule la mesure de la masse volumique ρ permet de distinguer ces deux catégories, ce qui nécessite généralement l'emploi de plusieurs méthodes de détection combinées (cf. section I.1.2). Ces deux bornes, $r \leq 2 R_{\oplus}$ et $m \leq 10 M_{\oplus}$ forment les limites maximales actuellement admises pour la formation de planètes telluriques [Perryman, 2018].

1. Que certains auteurs classent plutôt dans le genre de la *space fantasy*.

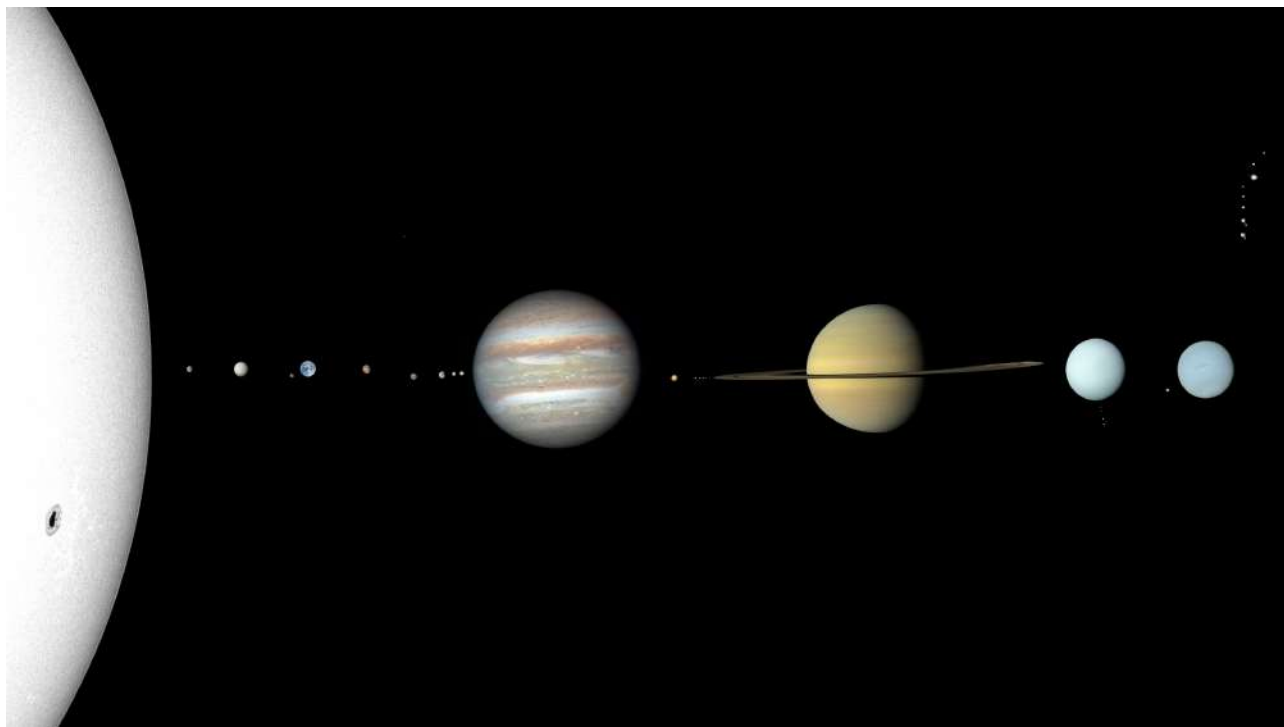


Figure II.2 – Principaux astres du Système solaire, avec couleurs naturelles et taille relative respectée. La distance n’est pas respectée. De gauche à droite, pour les astres principaux : Soleil, Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Les plus gros satellites sont représentés, ainsi que les planètes naines et certains objets transneptuniens. *Wikimedia Commons*.

On peut néanmoins citer comme œuvre de science-fiction se passant sur des planètes gazeuses *L’Algébriste* (2004) de Iain M. Banks. Dans cet univers, les humains découvrent une vie intelligente se développant dans l’atmosphère de ces planètes géantes.

Les planètes telluriques, à l’inverse, sont omniprésentes dans la science-fiction, et quelques archétypes se dégagent. La section suivante s’attachera à détailler la possibilité de l’existence des planètes de fiction, et de la manière dont on pourrait les détecter. Ces archétypes forment des tropes², c’est-à-dire des motifs récurrents. Plusieurs auteurs proposent leur propre catégorisation, l’une d’elle peut être trouvée dans l’ouvrage grand public de [Jesionek \[2024\]](#).

Dans sa thèse, [Puranen \[2024\]](#), l’auteur a recensé 212 planètes de science-fiction, issues de nombreuses œuvres diffusées entre 1666 et 2023. Elle dénombre ainsi que près de 80 % de ces planètes sont situées dans la zone habitable de leur étoile, et, dans 65 % des cas, les humains peuvent respirer à la surface. Seules 11 % des planètes sont des géantes gazeuses, et sans vie.

2. Dont la base de données la plus complète peut être trouvée sur ce site internet : <https://tvtropes.org/>.

2.2.1 Les simili-Terres

La recherche des planètes semblable à la Terre est, depuis le début de la détection d'exoplanète, le Graal des astronomes. Cette recherche de planètes semblables à la Terre croise inévitablement la recherche d'astres habitables, sans que ces deux notions ne soient nécessairement confondues. Le terme d'« habitabilité » se heurte fatalement à notre conception de la vie. La définition de cette dernière étant un pan entier de la science, nous considérerons dans la suite que par « habitable », nous parlons d'astres suffisamment similaires à la Terre pour pouvoir accueillir des formes de vie proches de celles que l'on peut voir sur Terre.

Dire d'une planète qu'elle ressemble à la Terre nécessite certaines caractéristiques nécessaires, mais non suffisantes :

- Pour être capable d'abriter une forme de vie complexe, il semble préférable qu'une planète dispose d'une surface, donc soit tellurique. Ces planètes ne forment qu'une minorité des exoplanètes actuellement détectées, à cause du biais observationnel qu'ont les méthodes actuelles.
- Ensuite, leur masse doit être suffisamment élevée. Les planètes ayant une faible masse tendent à avoir une atmosphère plus fine. Celle-ci peut s'échapper plus rapidement dans l'espace, sous l'effet des vents de particules stellaires. La masse joue également un rôle important pour que la planète conserve suffisamment longtemps de l'énergie en son cœur. Plus l'astre est gros, et plus, suite à sa formation, il met du temps à se refroidir. Un astre froid est géologiquement mort, ce qui n'est pas compatible avec la vie, car cela entraîne notamment la fin du cycle du carbone, nécessaire pour la biosphère terrestre.
- L'étoile autour de laquelle orbite la planète doit être suffisamment calme pour permettre d'avoir un climat stable sur plusieurs millions d'années sur la planète. Les grosses étoiles tendent ainsi à être trop turbulentes. De plus, la vie mettant – *a priori* – des centaines de millions d'années à apparaître et à se développer, les étoiles plus petites qui ont une longévité bien supérieure sont de bonnes candidates pour accueillir la vie au sein de leur système. Cette étoile doit également ne pas être trop active, afin d'éviter des éruptions stellaires trop violentes qui pourraient stériliser les planètes alentour. Par exemple, les naines rouges de type M émettent de fortes éruptions dans l'UV et les rayons X, ce qui pourrait dénuder les atmosphères ou endommager la vie [Parke Loyd et al., 2018].
- Enfin, la planète doit se trouver à « la bonne distance » de son étoile. En effet, trop proche de son étoile, la planète est brûlante, tandis que trop éloignée, elle est gelée. Les planètes situées dans la *zone habitable* permettent ainsi à l'eau d'exister sous forme liquide. Cette zone habitable est représentée sur la figure II.3. À cette définition basée uniquement sur le type stellaire et la distance peuvent s'ajouter des considérations comme la présence d'une atmosphère ou non, qui permettraient de garder de l'eau liquide à la surface même légèrement en dehors de cette définition stricte. On parle de zone habitable optimiste ou conservatrice. L'eau liquide est un terrain de jeu idéal pour que des réactions chimiques aient lieu en son sein et pour permettre l'émergence de la vie. Ses caractéristiques uniques (moment dipolaire, excellent solvant...) ont grandement joué dans l'apparition de la vie sur Terre, et les scientifiques ont du mal à imaginer la vie sans elle.

Dans la science-fiction, les planètes très semblables à la Terre sont très présentes (59 % des planètes recensées par Puranen [2024]). À l'inverse, certains jeux vidéo dans lesquels de

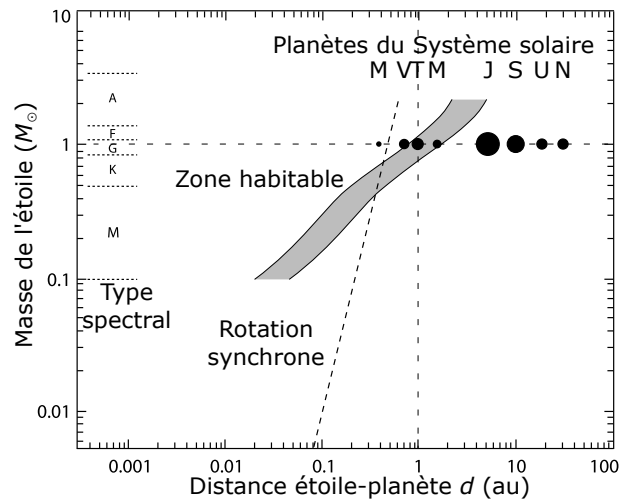


Figure II.3 – Diagramme représentant la zone habitable en fonction de la distance étoile-planète d (en au) et de la masse de l'étoile (en masse solaire M_{\odot}). Adapté de de [Perryman, 2018].

nombreuses planètes sont décrites (*Mass Effect* (2007) ou *No Man's Sky* (2016) par exemple), beaucoup de planètes sont inhospitalières, afin de représenter la rareté des planètes habitables. On peut également citer les planètes du film *Interstellar* (2014). Dans cette œuvre, une douzaine de capsules sont envoyées pour découvrir un nouveau monde habitable pour les hommes. Parmi ces douze capsules, seules trois renvoient un signal. Finalement, les astronautes envoyés sur place se rendent compte que seule une de ces planètes est habitable, la planète Edmunds.



Figure II.4 – Une planète dans le jeu vidéo sur PC *No Man's Sky* (2016).



Figure II.5 – Une planète dans le jeu vidéo sur PC *Mass Effect* (2007).

Dans la catégorie des planètes habitables se trouvent trois grands tropes qui reviennent régulièrement. Ils ne seront pas abordés par la suite car directement associés à la question des planètes habitables, et donc difficiles à analyser par le prisme de l’astronomie scientifique actuelle.

Le premier est la planète luxuriante, couverte de végétation. On peut citer Pandora dans *Avatar* (2009), Endor dans *Star Wars, épisode VI : Le Retour du Jedi* (1983) ou encore Worlorn dans *L’Agonie de la lumière* (1977) de G. R. R. Martin. Dans cette œuvre, Worlorn est une planète errante qui passe très près d’une étoile, permettant son habitabilité, et une explosion de vie. L’histoire prend place alors que la planète va bientôt quitter la zone d’habitabilité.

Le second trope est l’œcuménopole, littéralement le « monde-ville ». Il s’agit de planètes où l’urbanisme atteint son paroxysme et couvre l’intégralité de l’espace disponible, souvent sur plusieurs étages. On peut citer ainsi Coruscant dans *Star Wars, épisode I : La Menace fantôme* (1999), Trantor dans le *Cycle de Fondation* (1942) d’Isaac Asimov ou encore les Mondes Ruches de l’univers du jeu de figurines *Warhammer 40,000* (1987).

Alors que les œcuménopoles sont souvent des planètes où seul l’humain règne, les mondes luxuriants représentent quant à eux plutôt des mondes où la nature s’épanouit, parfois accueillante, parfois hostile pour les humains. Il s’agit, pour ces deux tropes, de caricatures de la Terre, chacun à l’un des extrêmes : soit une nature omniprésente, soit totalement absente.

Le dernier trope est la planète-désert, qui pourrait être résumée par une planète sèche dans laquelle la vie subsiste, mais est en lutte perpétuelle avec l’environnement. On peut citer Tatooine dans *Star Wars, épisode IV : Un nouvel espoir* (1977), Arrakis dans *Dune* (1965) de F. Herbert ou encore Abydos dans *Stargate, la porte des étoiles* (1994).

2.2.2 Les planètes infernales

La science-fiction regorge de planètes couvertes de lave. On peut citer par exemple la planète Mustafar dans le film *Star Wars, épisode III : La Revanche des Sith* (2005), mais aussi Netu dans les séries *Stargate SG-1* (épisode 12-3, 1999) et Excalbia dans *Star Trek* (épisode 3-22, 1969).



Figure II.6 – Surface de Mustafar dans le film *Star Wars, épisode III : La Revanche des Sith* (2005).



Figure II.7 – Surface de Netu dans la série *Stargate SG-1*, épisode 12-3 (1999).

Dans la réalité, il n'est pas nécessaire de chercher bien loin pour trouver une telle planète. La Terre lors de sa formation, il y a 4,6 milliards d'années, devait certainement ressembler à ces planètes.

Une planète tellurique pourrait être recouverte de lave pour deux raisons principales [Perryman, 2018] :

- Une planète venant de subir l'impact d'une très grosse météorite [Brian Tonks & Jay Melosh, 1992], à l'image de l'hypothèse standard de la formation de la Lune. Celle-ci implique un astéroïde de la taille de Mars – nommé Théia – qui aurait heurté la Terre il y a 4,5 milliards d'années. Aujourd'hui, un tel impact changerait la Terre en un immense champ de lave. Si suffisamment d'eau se trouve sur la planète à cet instant, il est alors possible qu'une atmosphère très riche en vapeur d'eau se forme, formant ainsi une véritable planète-sauna.
- Une planète tellurique orbitant très près de son étoile, avec une période $P \leq 1$ jour et une distance à l'étoile $d \leq 0,02$ au [Léger et al., 2009 ; Rouan et al., 2011]. Le flux de chaleur reçu de l'étoile est ainsi extrêmement intense, et fait fondre la croûte de l'exoplanète.

Aujourd'hui, quelques exoplanètes découvertes pourraient correspondre à la seconde raison d'être une planète de lave. CoRoT-7 b, découverte en 2009 [Léger et al., 2009 ; Queloz et al., 2009] par la méthode des vitesses radiales tourne très vite autour de son étoile : l'année dure 20 h ! Grâce à la mesure par méthode des transits, la taille de la planète a pu être déterminée, et la masse volumique a pu être estimée à $\rho = 5600 \text{ kg/m}^3$, ce qui la classe bien dans la catégorie des planètes telluriques. La température sur la face exposée à son étoile pourrait ainsi avoisiner les $2500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Autre découverte notable, Kepler-10 b [Rouan et al., 2011] orbite son étoile en un temps similaire à CoRoT-7 b. Grâce à l'étude de son transit secondaire (cf. figure II.1), les scientifiques ont pu montrer l'absence d'une atmosphère et confirmer qu'il s'agit très certainement d'une planète de lave. Son albédo particulièrement élevé (≈ 0.5) conduit à l'hypothèse que cette lave pourrait être blanche, comme celle de certains rares volcans (Ol Doinyo Lengai en Tanzanie). La présence d'oxydes de thorium ThO_2 et d'aluminium Al_2O_3 pourrait être à l'origine de cette couleur.

Une planète recouverte de lave n'est pas nécessairement une planète volcanique et vis-versa, contrairement à l'image que nous pouvons en avoir par la culture populaire. Le volcanisme est très bien documenté et étudié dans le Système solaire (Terre, Io, Encelade...), et l'on soupçonne certaines planètes de subir un réchauffement interne lié aux forces de marées, comme LP 791-18 d [Peterson et al., 2023]. Cet échauffement interne est l'une des deux causes possibles de volcanisme, l'autre étant une planète n'ayant pas eu le temps de se refroidir depuis sa formation (comme la Terre). Les astronomes cherchent à obtenir des preuves directes de volcanisme, comme par détection de dioxyde de soufre SO_2 – caractéristique des éruptions volcaniques – par spectroscopie lors des transits primaires et secondaires [Kaltenegger, Henning, & Sasselov, 2010], sans succès avéré pour l'instant.

2.2.3 Les planètes de glaces

Hoth, la planète sur laquelle se déroule le début de *Star Wars, épisode V : L'Empire contre-attaque* (1980), porte bien mal son nom. Complètement glacée, elle fait partie de la famille des planètes de glaces (à ne pas confondre avec les *géantes* de glaces, qui sont gazeuses). D'autres œuvres présentent de telles planètes, comme Zéro dans *Battlestar Galactica* (épisode 1-6, 1978), ou la planète Mann dans *Interstellar* (2014).



Figure II.8 – Hoth vue de l'espace dans le film *Star Wars, épisode V : L'Empire contre-attaque* (1980).



Figure II.9 – Surface de la planète Mann dans le film *Interstellar* (2014).

En planétologie, lorsqu'on parle de *glaces*, il peut s'agir de glace d'eau H_2O , mais également d'autres composés, comme le méthane CH_4 , l'ammoniac NH_3 ou encore le dioxyde de carbone CO_2 . Une fois encore, il n'est pas nécessaire de chercher loin pour trouver de bons exemples de planètes qui pourraient correspondre. Europe et Encelade, respectivement lunes de Jupiter et de Saturne, sont des satellites entièrement recouverts de glaces sur plusieurs dizaines de kilomètres d'épaisseur, selon les modèles actuels. De telles planètes pourraient donc bien exister hors du Système solaire.

La Terre aurait elle-même connu jusqu'à trois périodes où elle était entièrement recouverte de glace à plusieurs reprises dans son passé (hypothèse de la « Terre boule de neige ») [Hoffman et al., 2017]. Cependant, l'épaisseur de la glace n'est pas suffisante pour la classer à cette époque comme une planète de glaces. On considère en effet qu'une telle planète doit avoir au moins 10 % de sa masse constituée d'eau, sinon il s'agit d'une planète silicatée ou métallique [Perryman, 2018] (voir la section 2.4), or l'eau sur Terre ne représente que 0,1 % de sa masse. Cette hypothèse de la « Terre boule de neige » ne fait pas l'unanimité dans la communauté scientifique.

De telles planètes de glaces ont déjà été détectées, toutes par la méthode des lentilles gravitationnelles. En effet, ces planètes gravitent nécessairement loin de leur étoile, ce qui rend la méthode des transits peu efficace ; le fait qu'elles soient peu massives (car telluriques) et froides rend leur détection par la méthode des vitesses radiales et par observation directe difficile.

On peut ainsi citer la planète OGLE-2005-BLG-390L b [Beaulieu et al., 2006], découverte en 2005. Surnommée « Hoth » dans un communiqué de la NASA, la température à sa surface avoisine les $-200^\circ C$. Cependant, la méthode des lentilles gravitationnelles ne permet qu'une seule mesure, et d'autres méthodes n'ont pas pu être utilisées pour caractériser davantage cette exoplanète. Il pourrait finalement s'agir d'une planète géante de glaces, comme une petite Uranus. L'utilisation d'autres méthodes pourrait entre autres de mesurer plus précisément sa masse volumique ρ – pour valider qu'elle est bien tellurique –, mais aussi son albédo voire son spectre, ce qui permettrait de confirmer son statut de planète de glaces.

À noter que la planète Mann d'*Interstellar* est un astre particulier, car il est en orbite autour d'un trou noir et non d'une étoile. L'existence de telles *planètes* – mot-valise pour *black hole* (trou noir) et *planet* – n'est pas inimaginable, mais aucune n'a encore été détectée.

2.2.4 Les planètes en rotation synchrone

Dire d'une planète qu'elle est en rotation synchrone signifie qu'elle présente toujours la même face à son astre parent. C'est le cas de la Lune, qui présente, grâce au verrouillage gravitationnel, perpétuellement sa *face visible* à la Terre. Cette configuration finit par arriver à tout corps orbitant un autre corps et ne subissant pas d'autres interactions gravitationnelles, par effets dynamiques.

La science-fiction montre quelques exemples de planètes en rotation synchrone. On peut citer la planète Remus dans *Star Trek Nemesis* (2002), Radole dans le *Cycle de Fondation* (1966) d'Isaac Asimov, ou encore la planète Vinéa dans la bande dessinée *Yoko Tsuno : Le Trio de l'étrange* (1971) de Roger Leloup. Un exemple intéressant d'exploitation de ce phénomène peut se trouver dans *La Marche du Levant* de Leafar Izen (2020). Dans ce roman, la Terre est pratiquement en rotation synchrone, forçant les peuples à migrer sans cesse pour rester au niveau du terminateur, la zone située entre la face dans le jour et celle dans la nuit. C'est également le cas dans l'œuvre de Dave Duncan, *West of January* (1989).

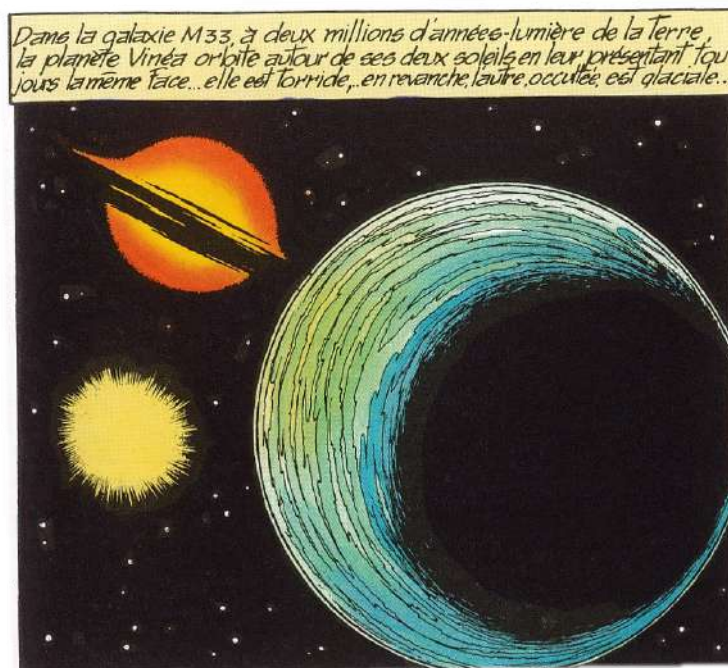


Figure II.10 – Planète Vinéa dans la bande dessinée *Yoko Tsuno : Les Archanges de Vinéa* (1982).

La rotation synchrone est un résultat des forces de marée. Les planètes orbitant très près de leur étoile subissant de telles forces de manière très importante, les scientifiques estiment ainsi qu'une bonne part des exoplanètes découvertes à ce jour sont en rotation synchrone autour de leur étoile.

Un très bon exemple de planètes en rotation synchrone est le système TRAPPIST-1 [Gillon et al., 2017 ; Lienhard et al., 2020 ; Turbet et al., 2020]. Les scientifiques ont observé sept exoplanètes telluriques en orbite autour de l'étoile, notamment à l'aide du télescope spatial Spitzer. Comme cela est représenté sur la figure II.11, le système est extrêmement compact par

rapport au Système solaire. L'étoile de ce système est une naine rouge ultra-froide, qui est à peine plus grande que Jupiter, tout en étant bien plus massive [Lefour & Dobrijevic, 2022]. La zone habitable de ce système est beaucoup plus resserrée, bien qu'au moins trois exoplanètes seraient dans cette zone, avec potentiellement de l'eau liquide à leur surface.

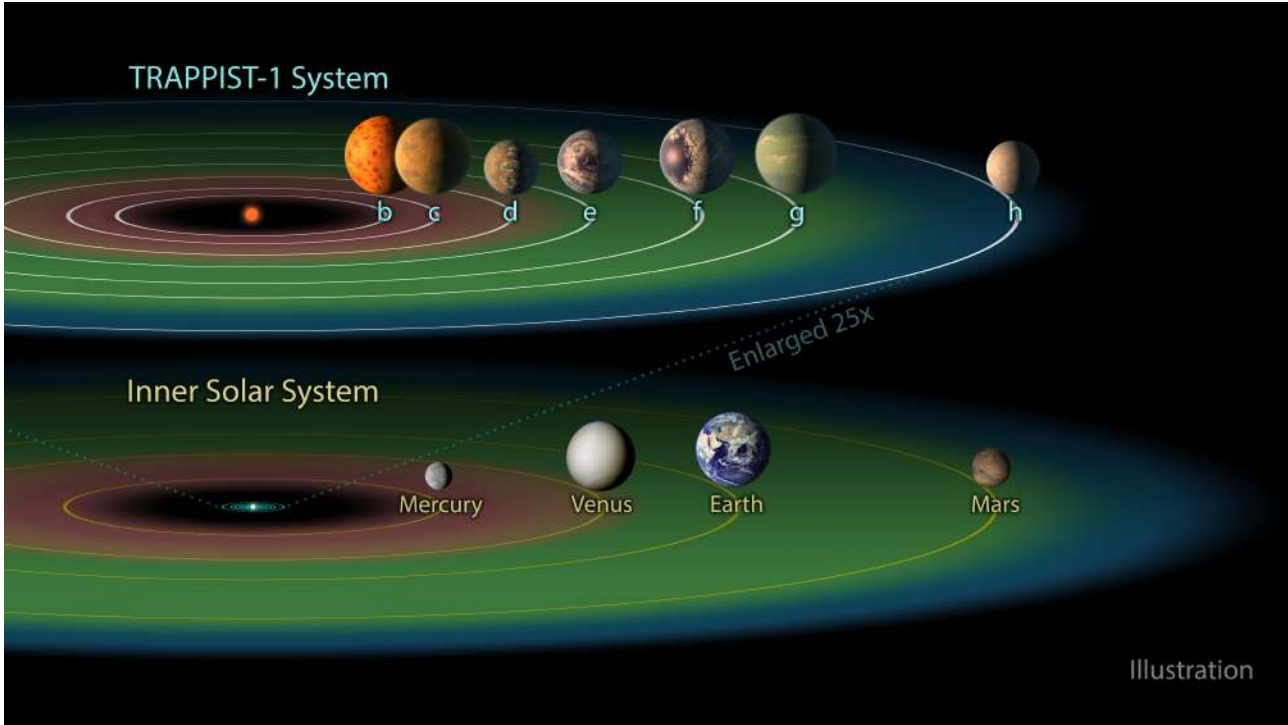


Figure II.11 – Système TRAPPIST-1 comparé au Système solaire. En vert est représentée la zone habitable. NASA, JPL-Caltech.

Le système TRAPPIST-1 comporte sept planètes dont la taille et la masse est particulièrement homogène entre elles, toutes proches de celle de la Terre. Puisqu'elles orbitent très près de leur étoile, elles sont toutes en rotation synchrone avec leur étoile.

Comme cela est représenté sur la figure II.11 pour les planètes d et f (sans que cela ne soit prouvé), certaines planètes du système TRAPPIST-1 pourrait être des « eyeball planets ». Ces planètes « globes oculaires » se divisent en deux catégories :

- Les eyeball planets « chaudes », dont la face exposée à l'étoile est constituée de roches, tandis que l'autre face est constituée d'un océan d'eau liquide.
- Les eyeball planets « froides », dont le côté jour est un océan d'eau liquide, et le côté nuit, recouvert de glace.

La seule occurrence trouvée d'une telle planète dans une œuvre de science-fiction est à trouver dans l'univers étendu *Legend* (c'est-à-dire considéré comme non-officiel) de *Star Wars*, sur la planète Ryloth.

La rotation synchrone rend l'habitabilité compliquée car les conditions sur chaque face sont particulièrement extrêmes. Il s'agit d'un frein à l'existence de la vie pour les planètes orbitant des naines rouges, ces planètes étant très souvent en rotation synchrone. Cependant, des études suggèrent que la vie pourrait se développer au niveau du terminateur [Lobo, Shields, Palubski, & Wolf, 2023]. Il se pourrait ainsi qu'entre la face éclairée brûlante et la face dans l'obscurité



Figure II.12 – Planète Ryloth dans l’univers *Legend* de *Star Wars*. Tiré du jeu de rôle *Star Wars : Edge of the Empire Core Rulebook* (2013).

glaciale, se trouve une zone tempérée. Selon ces chercheurs, l’eau devrait alors être – ce qui peut paraître contre-intuitif – peu abondante. En effet, une eau abondante pourrait atténuer la différence de température entre le jour et la nuit, et transformer alors la planète en « planète sauna » très chaude et très humide.

À l’aide de nos instruments actuels, il n’est pas aisé de repérer ces eyeball planets. Leurs deux faces très différentes devraient cependant pouvoir être caractérisées par une mesure de l’albédo A , ou par spectroscopie. On peut par exemple imaginer détecter de l’eau sur une seule des faces de la planète, signe d’un océan ou d’une couche de glace.

2.2.5 Les mondes océan

On retrouve l'idée d'un monde entièrement recouvert d'un océan dans de nombreuses œuvres de science-fiction, parmi lesquelles les planètes Kamino dans *Star Wars, épisode II : L'Attaque des clones* (2002), Aqua End dans la bande dessinée *L'Incal : Ce qui est en haut* (1985) de Jodorowsky et Moëbius, 4546B dans le jeu vidéo *Subnautica* (2018) ou encore Lantia dans la série *Stargate SG-1* (épisode 10-3, 2006), bien que, dans ce dernier cas, un petit continent existe. Le film *Waterworld* (1995) décrit une Terre sur laquelle le niveau des eaux est monté de 7600 m, et s'apparente alors à une planète-océan.



Figure II.13 – Surface de Lantia dans la série *Stargate SG-1*, épisode 10-3 (2006).

La découverte dans les années 1990 de géantes gazeuses orbitant très près de leur étoile a remis en question le modèle standard d'évolution d'un système planétaire. Jusqu'à présent, l'opinion majoritaire était que les petites planètes telluriques se formaient près de leur étoile, là où seules les roches sont solides, et que plus loin, se formaient les planètes géantes à partir de roches et de glaces. Le concept de migration orbitale a été mis en avant pour expliquer l'existence de Jupiter chaudes : cela signifie qu'au cours de leur existence, les planètes peuvent se rapprocher ou s'éloigner de leur étoile [Alibert, Mordasini, Benz, & Winisdoerffer, 2005].

Ce phénomène de migration planétaire est invoqué pour proposer l'existence de planètes-océan. Situées loin de leur étoile, ces planètes se forment tout d'abord couvertes de glaces (formant ainsi des planètes de glaces, cf. section 2.2.3). Il peut s'agir de glace d'eau, mais également d'autres molécules (méthane CH_4 ou ammoniac NH_3 par exemple). Ensuite, au gré d'une migration planétaire, l'astre se réchauffe et un océan qui le recouvre totalement se forme.

Les planètes-océan peuvent avoir des océans de plusieurs dizaines de kilomètres de profondeur, ou alors être couvertes de petites îles, formant des « planètes pélagiques », à la manière de



Figure II.14 – Surface de Solaris dans le film *Solaris* (1972).

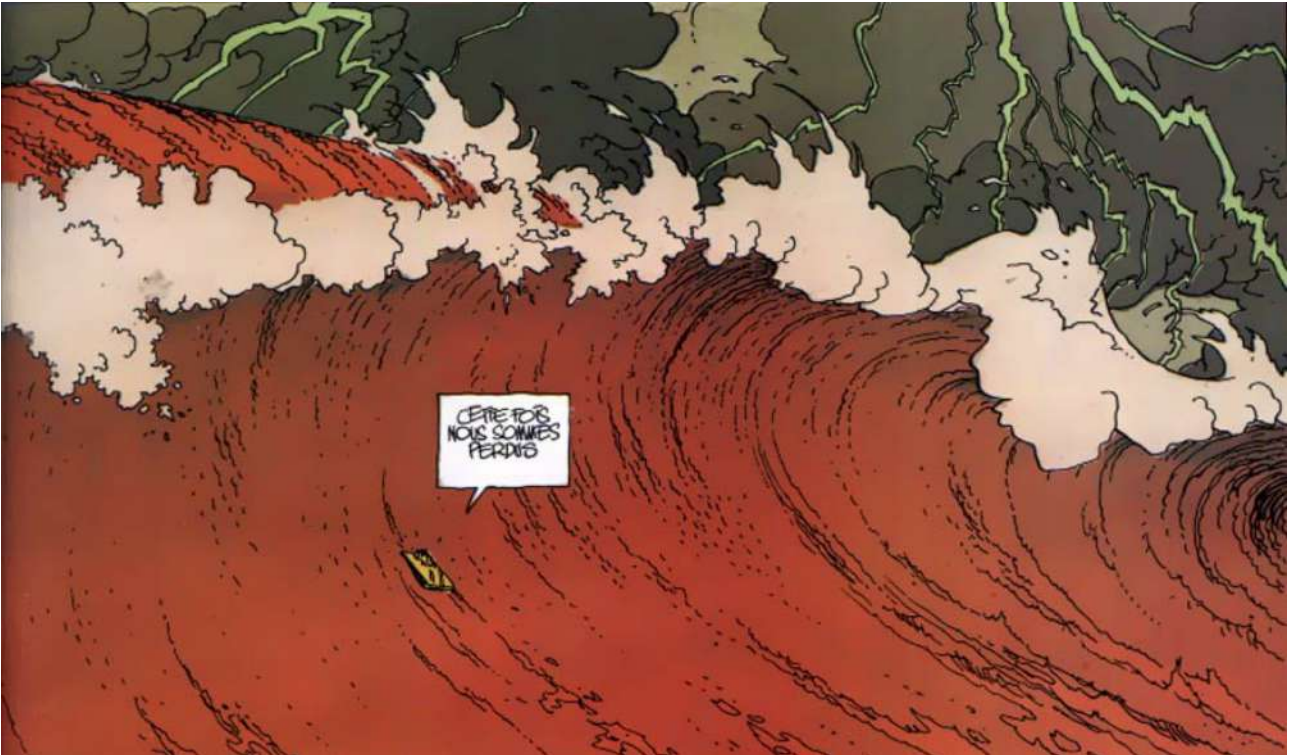


Figure II.15 – Surface d’Aqua End dans la bande dessinée *L’Incal – Tome 4 – Ce qui est en haut* (1985).

Scarif dans *Rogue One : A Star Wars Story* (2016). Les planètes pélagiques sont d’excellentes candidates pour la vie, pour plusieurs raisons [Glaser et al., 2020] :

- Une faible profondeur d’eau signifie que la lumière de l’étoile peut atteindre le fond de l’océan, et donc permettre d’une part, de maintenir une température suffisamment élevée, et d’autre part, d’initier certaines réactions chimiques.

- La présence d'îles permet aux pluies d'éroder la roche, et ainsi contribuer à libérer de nombreux minéraux dans l'eau, tels que le phosphore ou le sodium.
- La présence de nombreuses îles augmente les surfaces d'interaction entre l'océan et la terre ferme, et permet d'augmenter les chances qu'une hypothétique vie marine finisse par se développer sur terre.

Les chercheurs font ainsi la distinction entre les planètes pélagiques, dont l'eau représente entre 0,2 % et 1 % de la masse de la planète, et les planètes-océan, dont la masse d'eau dépasse 1 %. Pour comparaison, l'eau constitue 0,025 % de la masse de la Terre, tandis qu'elle représente 10 % de la masse d'Europe.

Une sérieuse candidate était la planète Gliese 1214 b [[Charbonneau et al., 2009](#)]. Cette planète a un rayon presque trois fois plus grand que celui de la Terre (déterminé par la méthode des transits) et une masse d'à peine huit fois celle de la Terre (mesurée par la méthode des vitesses radiales). Cela suggère une densité très faible ($\approx 2200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) en comparaison avec les planètes telluriques du Système solaire ($\approx 5000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Certains modèles proposés suggèrent ainsi l'existence d'un océan de 13 000 km de profondeur, composant 75 % de la masse de la planète. Cette hypothèse a été rejetée par les dernières observations du James Webb Space Telescope [[Nixon et al., 2024](#)], classant finalement cette planète dans les mini-Neptune.

Dans le cas de la planète Aqua End de la bande dessinée *L'Incal*, la planète est entièrement constituée d'eau, y compris en son cœur. Bien qu'une telle planète ne serait théoriquement pas impossible selon les lois de la physique (bien qu'improbable), l'eau située au niveau du noyau serait certainement solide (quelle que soit la température de l'eau). Plus de détails sont disponibles dans l'annexe [B](#).

2.2.6 Les planètes dans des systèmes stellaires multiples

Le double coucher de soleil sur Tatooine dans *Star Wars, épisode IV : Un nouvel espoir* (1977) a certainement marqué de nombreux fans de la saga et demeure le meilleur exemple d'un motif récurrent dans la science-fiction. Citons entre autres la planète Namek (où il fait jour en permanence) dans *Dragon Ball* (Chapitre 135, 1987), Helliconia (où les deux étoiles provoquent des saisons très longues) dans la série de livres éponyme de Brian Aldiss (1982), Solaris dans le livre du même nom de Stanisław Lem (1961), la lune M6-117 dans *Les Chroniques de Riddick : Pitch Black* (2000) ou encore Trisolaris dans *Le Problème à trois corps* de Liu Cixin (2008).



Figure II.16 – Double coucher d'étoiles sur Tatooine dans le film *Star Wars, épisode IV : Un nouvel espoir* (1977).



Figure II.17 – Lune M6-117, sa planète et deux des trois étoiles du système, dans le film *Les Chroniques de Riddick : Pitch Black* (2000).

Comme l'énonce le titre du roman *Le Problème à trois corps*, les orbites autour de systèmes multiples d'étoiles sont peu stables et compliquées à calculer. L'existence d'exoplanètes dans ces systèmes semblait à première vue improbable. Pourtant, plusieurs exoplanètes y ont été découvertes. On en distingue trois types principaux, représentés sur la figure II.18 :

Type S : Planète, qualifiée de *circumprimaire*, en orbite autour d'une seule des deux étoiles.

Type P : Planète, qualifiée de *circumbinaire*, en orbite autour des deux étoiles en même temps.

Type T : Planète située aux points de Lagrange L_4 ou L_5 du système formé par les deux étoiles. Elle est une « troyenne » de l'étoile secondaire. Aucune exoplanète n'a été découverte dans une telle configuration à ce jour.

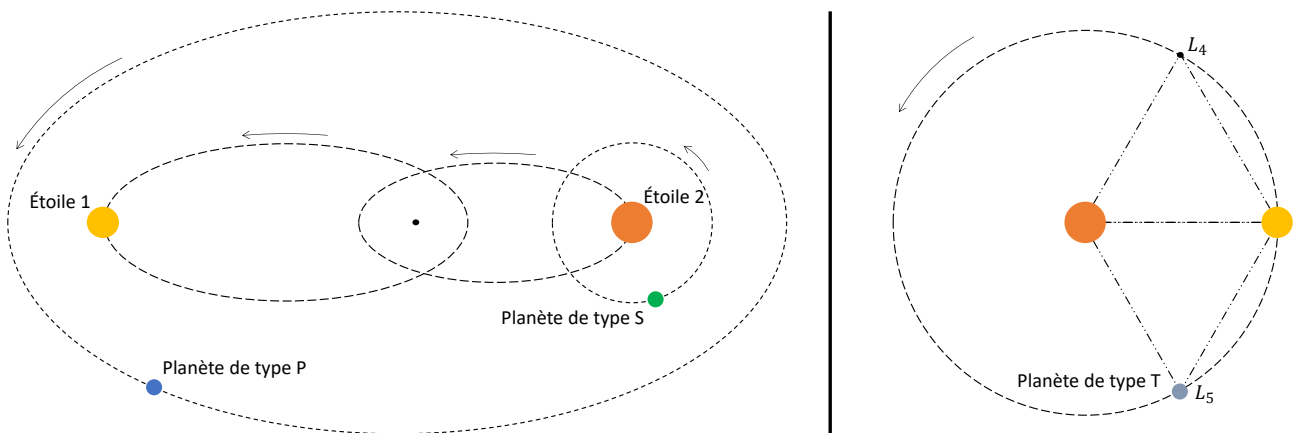


Figure II.18 – Types d'orbites d'une exoplanète dans un système binaire.

L'étoile la plus proche de nous après le Soleil, Proxima du Centaure, fait partie d'un système stellaire avec les étoiles Alpha du Centaure A et B. Autour de Proxima a été découverte, par la méthode des vitesses radiales, une exoplanète certainement tellurique faisant au moins 1,3 fois la masse de la Terre [Anglada-Escudé et al., 2016]. Il s'agit donc d'une planète de type S. Comme planète purement circumprimaire, on peut par exemple citer Kepler-16 b, surnommée « Tatooine », une planète géante de la taille de Saturne [Doyle et al., 2011].

La question de l'habitabilité de telles planètes se pose nécessairement. Cela est a priori possible pour les planètes de type P, car il serait possible d'avoir un flux stellaire à peu près constant [Haghighipour & Kaltenegger, 2013], à condition que les deux étoiles orbitent proches l'une de l'autre, et que la planète se trouve suffisamment loin. Cependant, la présence de plusieurs étoiles rend l'apparition de la vie plus difficile, car toutes les étoiles doivent être suffisamment calmes pour ne pas plonger leurs planètes dans de violentes tempêtes stellaires. On peut donc supposer que Tatooine est de type P.

2.2.7 Les satellites naturels

C'est sur une lune de Polyphème, Pandora, que se déroule le film *Avatar* (2009). Polyphème orbiterait autour de l'étoile Alpha du Centaure A, autour de laquelle aucune exoplanète n'a été découverte à ce jour. Dans la science-fiction, d'autres exolunes ont été imaginées, comme Endor dans *Star Wars, épisode VI : Le Retour du Jedi* (1983), Selûne dans l'univers des *Royaumes oubliés* de *Donjons & Dragons* (1975) ou encore Ixo dans la bande dessinée *Yoko Tsuno : La Lumière d'Ixo* (1980).



Figure II.19 – Polyphème et sa lune Pandora, tels que représentés dans le film *Avatar : La Voie de l'eau* (2022).

La question de l'existence possible d'exolunes ne se pose pas, mais la première preuve de leur existence tarde encore. La méthode des vitesses radiales ne permettrait pas de dissocier une exolune de son exoplanète, à moins d'avoir accès à l'exoplanète par imagerie directe. La méthode des transits et les microlentilles gravitationnelles semblent être les meilleures pistes pour la détection d'exolunes.

Une exolune candidate autour de l'exoplanète Kepler-1625 b est évoquée [Teachey & Kipping, 2018]. Il pourrait s'agir d'une lune de la taille de Neptune en orbite autour d'une planète dix fois plus massive que Jupiter. Nous sommes encore loin des satellites naturels de notre Système solaire !

La question de l'habitabilité des exolunes est un sujet encore ouvert parmi les chercheurs. On suppose que la vie pourrait se développer sur une exolune orbitant une exoplanète située dans la zone habitable, mais pourrait également se développer hors de cette zone, grâce à d'autres phénomènes pouvant provoquer un réchauffement de l'exolune [Heller et al., 2014]. Par exemple, dans notre Système solaire, Io est suffisamment proche de Jupiter pour subir d'intense forces

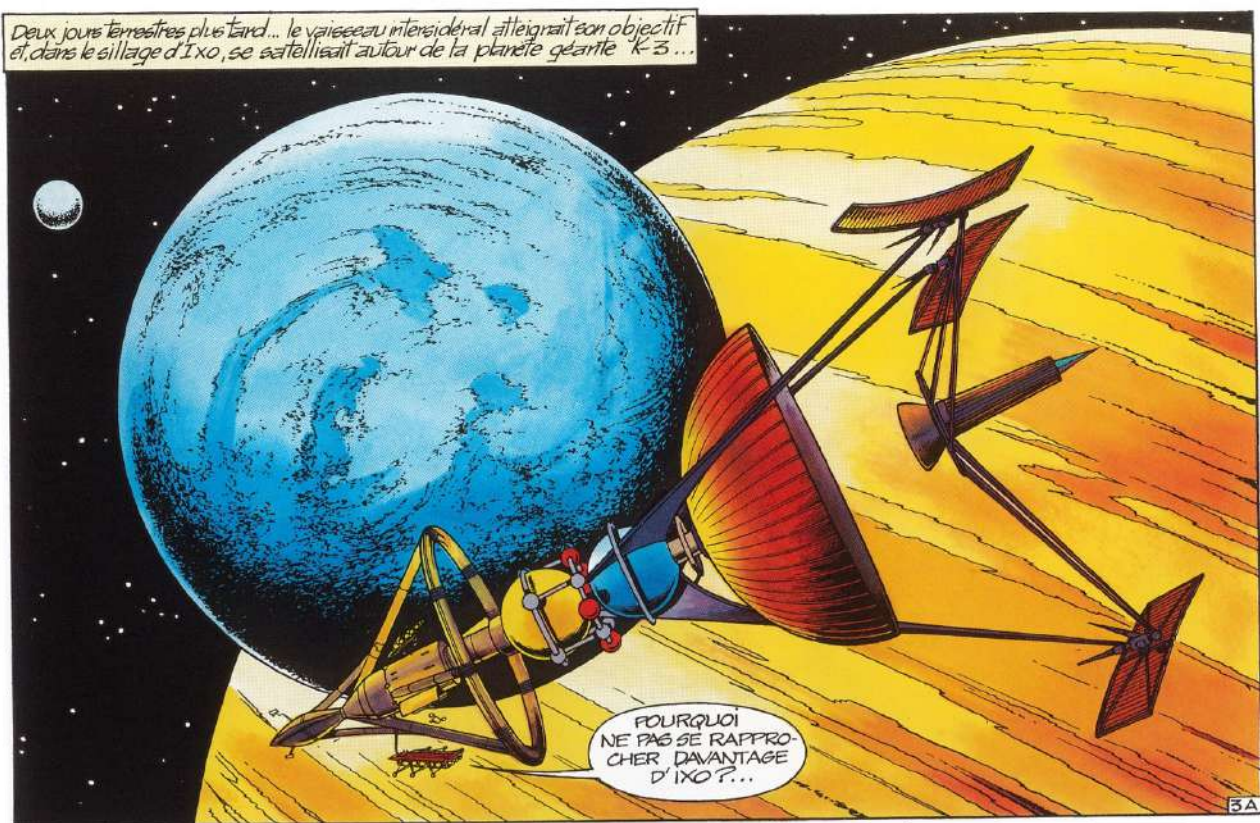


Figure II.20 – Ixo en orbite autour de K-2, dans la bande dessinée *Yoko Tsuno : La Lumière d'Ixo* (1980).

de marée générant de la friction – et donc de la chaleur – au cœur de cette lune, permettant même du volcanisme. La vie pourrait alors se développer à proximité des sources de chaleur.

2.3 Dessine-moi une planète !

Le Petit Prince d'Antoine de Saint-Exupéry (1943) est l'ouvrage le plus traduit après la Bible. Dans cet ouvrage, le poète décrit un ensemble de petites planètes, comme la planète de l'allumeur de réverbère ou la planète du roi. De telles petites planètes sont souvent représentées dans la science-fiction, comme dans le jeu vidéo *Super Mario Galaxy* (2007) ou la planète de Maître Kaïô dans la série d'animation *Dragon Ball Z* (1989). Citons également les planètes du jeu vidéo *Outer Wilds* (2019). La petite taille des planètes dans ce jeu permet d'offrir de l'exploration avec beaucoup de variabilité entre planètes, tout en limitant la surface à parcourir.



Figure II.21 – Astéroïde B612 dans le livre *Le Petit Prince* (1943).

De si petites planètes ne pourraient pas exister selon les lois de la physique que nous connaissons. Trop petites pour atteindre un équilibre hydrostatique, elles auraient des formes biscornues comme les astéroïdes. Comme l'écrivent [Sullivan, Sallabank, Higgins, et Foden \[2014\]](#), une telle exoplanète se désintégrerait en une fraction de secondes, en « détruisant tous les petits plombiers qui se promènent à la surface ».

Si de telles planètes existaient, pour avoir une gravité semblable à celle sur la Terre, elles devraient avoir une masse volumique ρ très élevée, de l'ordre de celle d'une étoile à neutrons. De plus, cela créerait un gradient de gravité très élevé, de telle sorte que les pieds seraient deux fois plus attirés que la tête par la planète, pour une planète d'environ 3 m de rayon. Une telle planète aurait aussi une vitesse de libération de l'ordre de $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, c'est-à-dire qu'il serait possible à un athlète olympique de se mettre en orbite en courant ! L'ensemble des calculs sont disponibles dans l'annexe C.



Figure II.22 – Une des planètes du jeu vidéo sur Wii *Super Mario Galaxy* (2007) .



Figure II.23 – Planète du Maître Kaiô dans l'anime *Dragon Ball Z* (1991).

2.4 Quand la réalité dépasse la fiction

Les découvertes faites par les astronomes n'ont parfois rien à envier avec les auteurs de science-fiction. Si jusqu'à présent, les planètes découvertes correspondent parfois à des motifs récurrents des imaginaires (planètes de lave, glacées ou océans...), d'autres types de planètes telluriques ont été découvertes par les astronomes.

Comme cela est représentés sur la figure II.24, la composition des planètes tellurique n'est pas identique. Certaines sont constituées de davantage de roche (par exemple de la silice SiO_2), d'autres d'eau (H_2O), d'autres encore de fer (Fe) ou d'autres métaux. Ce diagramme montre que, pour une masse volumique donnée, plusieurs compositions sont possibles, selon la proportion d'eau, de roches et de métaux.

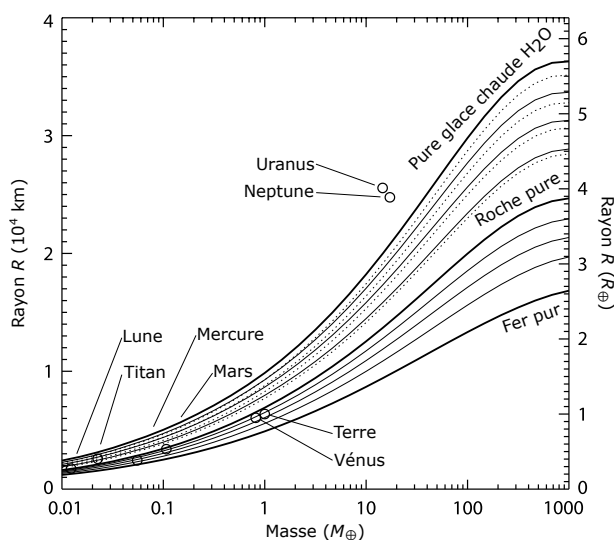


Figure II.24 – Diagramme représentant les différents types de planètes telluriques en fonction de leur masse et de leur rayon. Trois principaux types de planètes purement théoriques sont représentés. *Adapté de [Perryman, 2018].*

Les scientifiques ont ainsi proposé l'existence de planètes métalliques, très riches en fer. Les métaux tels que le fer et le nickel forment le noyau de la plupart des planètes telluriques. Divers mécanismes pourraient ainsi permettre la formation de planètes dont le noyau composerait la majeure partie de leur masse. La planète K2-229 b aurait par exemple un noyau faisant 70 % de sa masse, contre 45 % pour la Terre [Santerne et al., 2018], ce qui amène à une densité très importante de $8900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, contre $5510 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour la Terre.

Un autre type de planète tellurique hypothétiquement possible serait les planètes très riches en carbone, parfois appelés de manière aguicheuses « planètes de diamant ». La Terre et les planètes du Système solaire sont des planètes composées de roches silicatées. Or, le carbone et le silicium sont chimiquement très semblables, et la – relative – abondance du carbone dans l'univers laisse à penser qu'il pourrait exister des planètes où les roches sont des roches carbonées plutôt que silicatées. L'exoplanète 55 Cancri e pourrait être de ce type [Madhusudhan, Lee, & Mousis, 2012], sans que cela ne soit confirmé à ce jour.

Il n'existe pas, à notre connaissance, d'exemple connu de telles planètes de métal ou de carbone dans la science-fiction.

Les artistes et penseurs n'ont pas attendu la découverte des premières exoplanètes à l'aube du XXI^e siècle pour imaginer d'autres mondes. Étonnamment, certains de ces mondes fantasmés pourraient bien exister.

Au fur et à mesure que nous faisons de nouvelles découvertes, la zoologie des exoplanètes ne cesse de s'enrichir, repoussant les limites de l'imagination. Mondes de glaces ou de lave, océans infinis ou mouvements orbitaux complexes, les scientifiques retrouvent ces astres dans leurs télescopes, et découvrent parfois des exoplanètes improbables.

La science-fiction s'empare à présent du réel, en plaçant certaines de ses histoires sur des exoplanètes bien réelles, comme la série *Raised by Wolves* (2020) sur Kepler-22 b ou la bande-dessinée *Noir Horizon* (2023) sur Kepler-452 b.

Grâce à une analyse toujours plus poussée des infimes indices présents dans la lumière, les scientifiques parviennent à caractériser toujours mieux ces systèmes planétaires. La recherche d'exoplanètes ne fait que commencer, l'arrivée de nouveaux instruments scientifiques d'exception (télescopes terrestres Vera-C.-Rubin et Extremely Large Telescope, mais aussi des satellites comme PLATO, Nancy-Grace-Roman, ARIEL, Habitable Worlds Observatory...) promet un futur riche en surprises !

ANNEXE A

LISTE D'ŒUVRES OÙ APPARAISSENT DES EXOPLANÈTES

Cette liste n'a pas pour vocation à être exhaustive, mais reflète les œuvres consultées par l'auteur pour ce présent mémoire. Lorsqu'il s'agit d'œuvres collectives (saga cinématographique...), seuls les principaux auteurs sont indiqués. Certaines œuvres s'enrichissant au cours du temps avec de nouveaux contenus, seule la date de la première sortie est indiquée. Nombreuses étant les œuvres transmédias, seuls les supports prépondérants sont indiqués. Quelques planètes et leurs archétypes rattachés sont cités.

- Agonie de la lumière (I')** de G. R. R. Martin (1977) Roman
Sur une planète vouée à l'obscurité éternelle, un homme venu retrouver un amour perdu se retrouve piégé dans un conflit de cultures et de violences qu'il ne peut maîtriser.
Exoplanètes : Worlorn (planète luxuriante).
- Algébriste (I')** de I. M. Banks (2004) Roman
Un mathématicien vivant sous une dictature galactique part en quête d'un secret légendaire caché par une ancienne race extraterrestre, qui pourrait bouleverser l'équilibre des pouvoirs dans l'univers.
Exoplanètes : Nasqueron (géante gazeuse)...
- Alien** de R. Scott et H. R. Giger (1979) Films, jeux vidéo...
Après avoir intercepté un signal de détresse, l'équipage d'un vaisseau spatial se retrouve confronté à une créature extraterrestre mortelle qui les traque un à un, mettant leur survie en péril.
Exoplanètes : Acheron (exolune), Fiorina-16 (système stellaire multiple)...
- Aquablue** de T. Cailleateau et O. Vatine (1988) BD
Un orphelin humain élevé par un peuple pacifique sur une planète océanique doit lutter contre les envahisseurs industriels de la Terre qui menacent son monde.
Exoplanètes : Aquablue (planète pélagique).
- Avatar** de J. Cameron (2009) Films, jeux vidéo, romans...
Sur la luxuriante lune de Pandora, un ancien marine humain, Jake Sully, intègre un corps d'Avatar et se retrouve partagé entre sa mission pour exploiter les ressources locales et

son attachement grandissant au peuple autochtone Na'vi.

Exoplanètes : Pandora (exolune ; planète luxuriante)...

Voir aussi [Wilhelm & Mathison, 2009].

- Ballade de Pern (la)** de A. McCaffrey (1967) Romans, jeux vidéo
Tous les 250 ans, la planète Pern s'approche de l'« Étoile rouge », mettant en grand danger les habitants. Chevaliers et dragons s'associent alors pour lutter contre l'ennemi.
 Exoplanètes : Pern (simili-Terre)...
- Battlestar Galactica** de G. A. Larson (1978) Séries télévisées, romans...
Après l'anéantissement de l'humanité par les Cylons, les derniers survivants, menés par le vaisseau de guerre Battlestar Galactica, errent dans l'espace en quête d'une planète mythique : la Terre.
 Exoplanètes : Kobol (simili-Terre), Caprica (simili-Terre)...
- Cantos d'Hypérion (les)** de D. Simmons (1989) Romans
Sept pèlerins voyagent vers la planète Hypérion, chacun partageant son récit personnel et mystérieux, tout en étant liés par le destin et par la menace d'une entité mystérieuse appelée le Gritch.
 Exoplanètes : Hypérion (simili-Terre)...
- Chroniques de Riddick (les)** de D. Twohy, J. et K. Wheat (2000) Films, romans...
Traqué à travers la galaxie, le redoutable et solitaire Riddick, dernier de sa race, doit affronter des mercenaires, des créatures redoutables et un empire fanatique tout en cherchant sa propre survie et son destin.
 Exoplanètes : Dark Planet (exolune ; système stellaire multiple ; planète désert), Crématoria (planète de lave)...
- DC (univers)** de J. Siegel et J. Shuster (1933) Comics, films...
Dans un monde où dieux, héros et criminels coexistent, des êtres extraordinaires comme Superman, Batman et Wonder Woman protègent l'humanité contre des menaces cosmiques, surnaturelles et criminelles, tout en luttant avec leurs propres dilemmes moraux.
 Exoplanètes : Krypton...
- Dr Who** de S. Newman et D. Wilson (1963) Séries télévisées
Un extraterrestre immortel appelé "Le Docteur", accompagné de compagnons humains, lutte contre des ennemis variés et sauve des civilisations tout en explorant les mystères de l'univers.
 Exoplanètes : Gallifrey, Raxacoricofallapatorius...
- Dragon Ball** de A. Toriyama (1984) Mangas, animes...
Son Goku, un jeune guerrier doté d'une force exceptionnelle, part à la recherche des Dragon Balls, tout en affrontant des ennemis puissants et en protégeant la Terre contre des menaces de plus en plus redoutables.
 Exoplanètes : Namek (système stellaire multiple), Vegeta (système stellaire multiple)...
- Dune (cycle de)** de F. Herbert (1965) Romans, films, séries télévisées, jeux de société...
Dans un univers dominé par de Grandes Maisons, ces dernières se battent pour le contrôle de l'Épice sur la planète Arrakis, aussi appelée Dune.
 Exoplanètes : Arrakis (planète désert), Caladan (simili-Terre)...
 Voir aussi [McNelly, 1984].

-
- Ékumen (cycle de l')** de U. K. Le Guin (1966) Romans
Dans une galaxie où des civilisations humaines isolées évoluent sur des mondes aux cultures et biologies uniques, l'Ékumen, une confédération interstellaire, tente de les unir par le dialogue et l'échange, explorant ainsi les défis de la communication, de l'altérité et du pouvoir.
Exoplanètes : Hain, Anarres et Urras (planètes jumelles), Gethen (planète gelée)...
- Ender (cycle d')** de O. S. Card (1977) Romans, film...
Dans un futur où l'humanité est menacée par une race extraterrestre, le jeune prodige Ender Wiggin est entraîné pour devenir le stratège ultime, confronté aux dilemmes moraux et psychologiques de la guerre.
Exoplanètes : Sorelldolce (planète luxuriante), Path, Lusitania...
- Firefly** de J. Whedon (2002) Série télévisée
Dans un futur où l'humanité a colonisé un nouveau système stellaire, l'équipage hétéroclite du vaisseau Serenity tente de survivre en enchaînant petits boulots et missions illégales, tout en échappant à un gouvernement oppressif et à des ennemis dangereux.
Exoplanètes : Londinium, Sihnon, Osiris (simili-Terres)...
- Fondation (cycle de)** de I. Asimov (1942) Romans, série télévisée
Hari Seldon, un mathématicien et sa Fondation tentent de préserver le savoir et de réduire l'effondrement de la civilisation galactique grâce à la psychohistoire.
Exoplanètes : Trantor (œcuménopole), Solaria (simili-Terre), Aurora (simili-Terre), Kalgan (planète luxuriante), Gaïa (planète archipel)...
- Guide du voyageur galactique (le)** de D. Adams (1978) Feuilleton radio, romans...
Lorsqu'une nouvelle autoroute intergalactique est construite et nécessite de détruire la Terre, Arthur Dent s'embarque dans une aventure pour découvrir les confins de la galaxie.
Exoplanètes : Magrathéa (système stellaire multiple)...
- Halo** de J. Jones et J. Staten (2001) Jeux vidéo, romans...
Dans un futur où l'humanité est en guerre contre une alliance extraterrestre fanatique appelée le Covenant, le super-soldat Spartan John-117, alias le Master Chief, devient le dernier espoir de survie en découvrant les secrets d'anciens artefacts : les Halo.
Exoplanètes : Reach (simili-Terre)...
- Kerbal Space Program** de F. Falanghe (2011) Jeu vidéo
Un jeu de simulation spatiale où les joueurs dirigent le programme spatial des Kerbals, une espèce extraterrestre maladroite, en concevant des fusées, en explorant l'espace et en défiant les lois de la physique avec des résultats souvent explosifs.
Exoplanètes : Kerbin (simili-Terre), Mun (exolune), Eve, Duna...
- Incal (l')** de A. Jodorowsky et Mœbius (1981) BD
Dans un univers dystopique et métaphysique, le détective minable John Diffool se retrouve malgré lui porteur de l'Incal, un artefact aux pouvoirs cosmiques convoité par de puissantes forces, l'entraînant dans une quête initiatique à travers l'espace et la conscience.
Exoplanètes : Aqua End (planète-océan)...
- Interstellar** de C. Nolan (2014) Film
Dans un futur où la Terre est en train de mourir, un ancien pilote d'astronaute mène

une mission à travers un trou de ver pour trouver un nouveau foyer pour l'humanité.

Exoplanètes : Miller (planète océan), Edmunds (planète désert), Mann (planète gelée)...

Marvel (univers) de S. Lee et J. Kirby (1939) Comics, films, séries télévisées...

Dans un univers où des héros, des mutants et des extraterrestres coexistent, des personnages emblématiques comme Spider-Man, les Avengers et les X-Men luttent contre des menaces cosmiques, technologiques et surnaturelles pour protéger l'humanité.

Exoplanètes : Ego (planète vivante), Xandar (simili-Terre)...

Mass Effect de D. Karpynchyn (2007) Jeux vidéo, romans, comics...

Suite à la découverte d'une technologie extraterrestre permettant le voyage supraluminique, l'Alliance, qui regroupe toutes les nations de la Terre, prend contact avec les autres civilisations extraterrestres. Le commandant Shepard découvre une race de machines exterminant toute forme de vie : les Moissonneurs.

Exoplanètes : Eden Prime (planète luxuriante), Novéria (planète gelée), Rannoch (planète désert)...

Metroid de S. Okada et Y. Sakamoto (1986) Jeux vidéo

Samus Aran, une chasseuse de primes intergalactique, lutte contre des pirates de l'espace et des créatures extraterrestres, notamment les redoutables Metroids, afin de protéger l'univers.

Exoplanètes : Zebes, K-2L (simili-Terre)...

Mondes d'Aldébaran (les) de Leo (1994) BD

Dans un futur où l'humanité colonise des planètes lointaines, une jeune femme nommée Kim Keller découvre les mystères, les dangers et les merveilles des mondes d'Aldébaran, où la nature extraterrestre est aussi fascinante que redoutable.

Exoplanètes : Aldébaran-4 (planète-océan), Bételgeuse-6, Antarès-5 (simili-Terre)...

Némésis de A. Asimov (1989) Roman

Autour de l'étoile Némésis se constitue une colonie humaine. Les scientifiques découvrent alors que cette étoile se dirige droit vers la Terre.

Exoplanète : Erythro (simili-Terre).

No Man's Sky de S. Murray (2016) Jeu vidéo

Jeu d'exploration spatiale où le joueur parcourt un univers généré de manière procédurale, explorant des planètes infinies, rencontrant des formes de vie extraterrestres et cherchant à percer les mystères du cosmos.

Exoplanètes : Planètes générées aléatoirement.

Noir Horizon de P. Pelaez et B. Blasco-Martinez (2023) BD

un vaisseau militaire en mission sur Kepler-452 b tente de percer les mystères d'un gigantesque mur de matière sombre, mais lorsque les soldats envoyés pour l'explorer sont violemment happés de l'autre côté, l'équipage bascule dans l'inconnu et l'horreur.

Exoplanètes : Kepler-452 b (exoplanète réelle).

Outer Wild de A. Beachum et L. Verneau (2019) Jeu vidéo

Jeu d'exploration spatiale où le joueur incarne un astronaute chargé de percer les mystères d'une ancienne civilisation disparue et la cause imminente de la fin de l'univers.

Exoplanètes : Âtrebois (simili-Terre), Leviathe (planète-océan)...

-
- Petit Prince (le)** de A. de Saint-Exupéry (1943) Roman
Un jeune prince voyage de planète en planète, découvrant à travers des rencontres poétiques et philosophiques les absurdités du monde des adultes et la valeur de l'amitié, de l'amour et de l'imaginaire.
 Exoplanètes : Astéroïde B-612, planète du Roi (mini-planètes)...
- Petits Hommes (les)** de P. Seron (1967) BD
Lorsque tous les habitants d'un village se retrouve réduit à la taille d'un dixième, ils n'ont d'autre choix que de fonder une nouvelle ville, Eslapion, et se cacher des « grands ».
 Exoplanètes : Ranxérox (simili-Terre)...
- Problème à trois corps (le)** de L. Cixin (2008) Romans, série télévisée
La découverte d'un message extraterrestre révèle une civilisation luttant pour survivre dans un système stellaire chaotique à trois corps, menaçant ainsi de bouleverser le destin de l'humanité.
 Exoplanètes : Trisolaris.
- Raised by Wolves** de A. Guzikowski (2020) Série télévisée
Dans un futur lointain, deux androïdes, ayant fui une Terre ravagée par la guerre des croyances, élèvent les derniers enfants humains sur une planète mystérieuse et hostile.
 Exoplanètes : Kepler-22 b (exoplanète réelle).
- Scrameustache (le)** de Gos (1972). BD
Khéna, jeune terrien, se découvre un jour des origines extraterrestres. Il rencontre le Scrameustache, une créature extraterrestre doté de pouvoirs télépathiques.
 Exoplanètes : Aktarka...
- Solaris** de S. Lem (1961) Roman, films
Une station orbitale découvre une planète aux propriétés étranges. Sa surface semble formée de matière organique, et pourrait être une forme de vie unique.
 Exoplanète : Solaris (système stellaire multiple, planète-océan).
- Stargate** de R. Emmerich et D. Devlin (1994) Films, séries télévisées
Un groupe de militaires et de scientifiques utilise la Stargate, un ancien portail interstellaire, pour explorer de nouveaux mondes, forger des alliances et défendre la Terre contre des menaces extraterrestres.
 Exoplanètes : Abydos (planète désert)...
- Star Trek** de G. Roddenberry (1966) Séries télévisées, films, jeux vidéo...
Star Trek dépeint les nombreuses aventures d'humains et d'extraterrestres de la Starfleet. Dans un monde où la paix règne, les personnages explorent de nouveaux mondes.
 Exoplanètes : Vulcain (simili-Terre), Remus (rotation synchrone)..
 Voir aussi [[Mandel & Drexler, 2002](#)].
- Star Wars** de G. Lucas (1977) Films, séries télévisées, romans, BD, jeux vidéo...
Dans une galaxie lointaine, très lointaine, un groupe de rebelles tentent de lutter contre l'Empire Galactique. Certaines personnes sont sensibles à la Force, qui leur permet d'utiliser des pouvoirs psychiques et ainsi que des sabre-lasers.
 Exoplanètes : Tatooine (planète désert, système stellaire multiple), Hoth (planète gelée), Endor (exolune, planète luxuriante), Coruscant (œcuménopole), Naboo (simili-Terre),

Kamino (planète océan), Mustafar (planète de lave), Scarif (planète pélagique)...
 Voir aussi [Wallace & Fry, 2009].

- Starship Troopers** de P. Verhoeven et E. Neumeier (1997) Films
Dans un futur militarisé, de jeunes soldats s'engagent dans une guerre brutale contre une race d'araignées extraterrestres menaçant l'humanité.
 Exoplanètes : Klendathu (système stellaire multiple), Tango Urilla...
- Subnautica** de C. Cleveland (2018) Jeu vidéo
Jeu de survie sous-marine où le joueur, après un crash spatial, explore un vaste océan extraterrestre et cherche à percer les secrets d'un monde mystérieux.
 Exoplanètes : Planète 4546B (planète océan).
- Super Mario Galaxy** de Y. Koizumi (2007) Jeux vidéo
Mario traverse des planètes et des galaxies aux lois gravitationnelles uniques pour sauver la princesse Peach des griffes de Bowser.
 Exoplanètes : Planète œuf, Forteresse rocheuse (mini-planètes)...
- Transformers** de S. Kawamori et K. Miyatake (1984) Jouets, films...
Deux factions de robots extraterrestres capables de se transformer, les Autobots et les Decepticons, s'affrontent sur Terre pour le contrôle d'une source d'énergie aux pouvoirs immenses, impliquant malgré eux l'humanité dans leur guerre millénaire.
 Exoplanètes : Cybertron (planète métallique, œcuménopole)...
- Valérian et Laureline** de P. Christin et J.-C. Mézières (1967) BD, film...
Valérian et Laureline sont des agents du Service spatio-temporel (SST). Leur mission, défendre les intérêts de Galaxy, la mégapole terrienne, les mène à travers l'espace et le temps.
 Exoplanètes : Syrte-la-Magnifique (œcuménopole), Rubanis, Hysis...
- Vorkosigan (saga)** de L. McMaster Bujold (1986) Romans
Dans un univers marqué par l'intrigue politique et la guerre, Miles Vorkosigan, un aristocrate brillant mais physiquement fragile, use de son intelligence et de son audace pour surmonter les préjugés et se tailler une place dans l'empire de Barrayar.
 Exoplanètes : Barrayar (simili-Terre), Komarr, Sergyar...
- Warhammer 40,000** de R. Priestley (1984) Jeu de figurines, romans...
Dans un futur lointain et brutal, l'Imperium de l'Homme, un empire galactique autoritaire, lutte pour sa survie contre des hordes d'extraterrestres, de démons et de trahisons internes, tandis que des guerres sans fin ravagent la galaxie.
 Exoplanètes : Cadia (simili-Terre), Prospero, Armageddon...
- West of January** de D. Duncan (1989) Roman
Sur la planète Vernier, où un simple jour dure une éternité, un jeune homme commence un long périple vers l'ouest.
 Exoplanètes : Vernier (planète synchrone).
- Yoko Tsuno** de R. Leloup (1970) BD
Yoko Tsuno, jeune ingénieure en électronique, découvre, accompagnée par ses amis Vic Vidéo et Pol Pitron, une civilisation extraterrestre qui vit cachée dans les entrailles de la Terre.
 Exoplanètes : Vinéa (orbite synchrone), Ixo (exolune)...

ANNEXE B

PLONGÉE AU CŒUR D'AQUA END

La planète Aqua End apparaît dans la bande dessinée *L'Incal : Ce qui est en haut* (1985) de Jodorowsky et Moëbius. Cette planète est entièrement constituée d'eau, et n'a donc pas de noyau rocheux. N'ayant aucune indication sur la taille de ladite planète, considérons qu'elle fasse la taille de la Terre (les personnages ne semblent pas être en gravité réduite ou augmentée), et qu'elle a également une pression atmosphérique semblable à celle de la Terre, soit $p_{atm} = 101\,325\text{ Pa}$ (les personnages ne semblent pas éprouver de difficulté à respirer).

La pression à une profondeur z vaut alors :

$$p_z = p_{atm} + 10000 \cdot z \quad (\text{B.1})$$

Au niveau du noyau de la Terre, soit à $R_{\oplus} = 6371\text{ km}$, la pression serait alors de 63,7 GPa.

Sur Terre, à mesure que l'on s'enfonce dans le sol, la température augmente, de 3°C tous les 100 m dans les premiers kilomètres de la croûte terrestre, puis plus rapidement ensuite, jusqu'à atteindre 3800°C à 5000°C dans le noyau interne. L'origine de la géothermie provient, d'une part, de l'énergie résiduelle liée à la formation de la Terre, et d'autre part, de la radioactivité du noyau terrestre. La part de chacun de ces deux flux de chaleur est estimée à 50 % [[The KamLAND Collaboration, 2011](#)].

Sur Aqua End, les personnages peuvent y nager, ce qui indique une température d'eau de l'ordre de 20°C . L'eau n'étant pas un matériau radioactif, la chaleur provient donc de l'énergie résiduelle liée à sa formation ainsi qu'au flux de lumière émis par son étoile.

Grâce à l'importante pression au centre de la planète, et à une température de 20°C , on peut utiliser le diagramme de phase de l'eau (cf. figure B.1) pour en déduire que l'eau se trouve certainement sous forme de glace de type VII en son cœur.

Pour que le noyau demeure liquide, la pression devrait être inférieure à 1 GPa environ, le rayon maximal de la planète devrait être de :

$$R = \frac{10^9\text{ Pa} - p_{atm}}{10000} = 10^5\text{ m} \quad (\text{B.2})$$

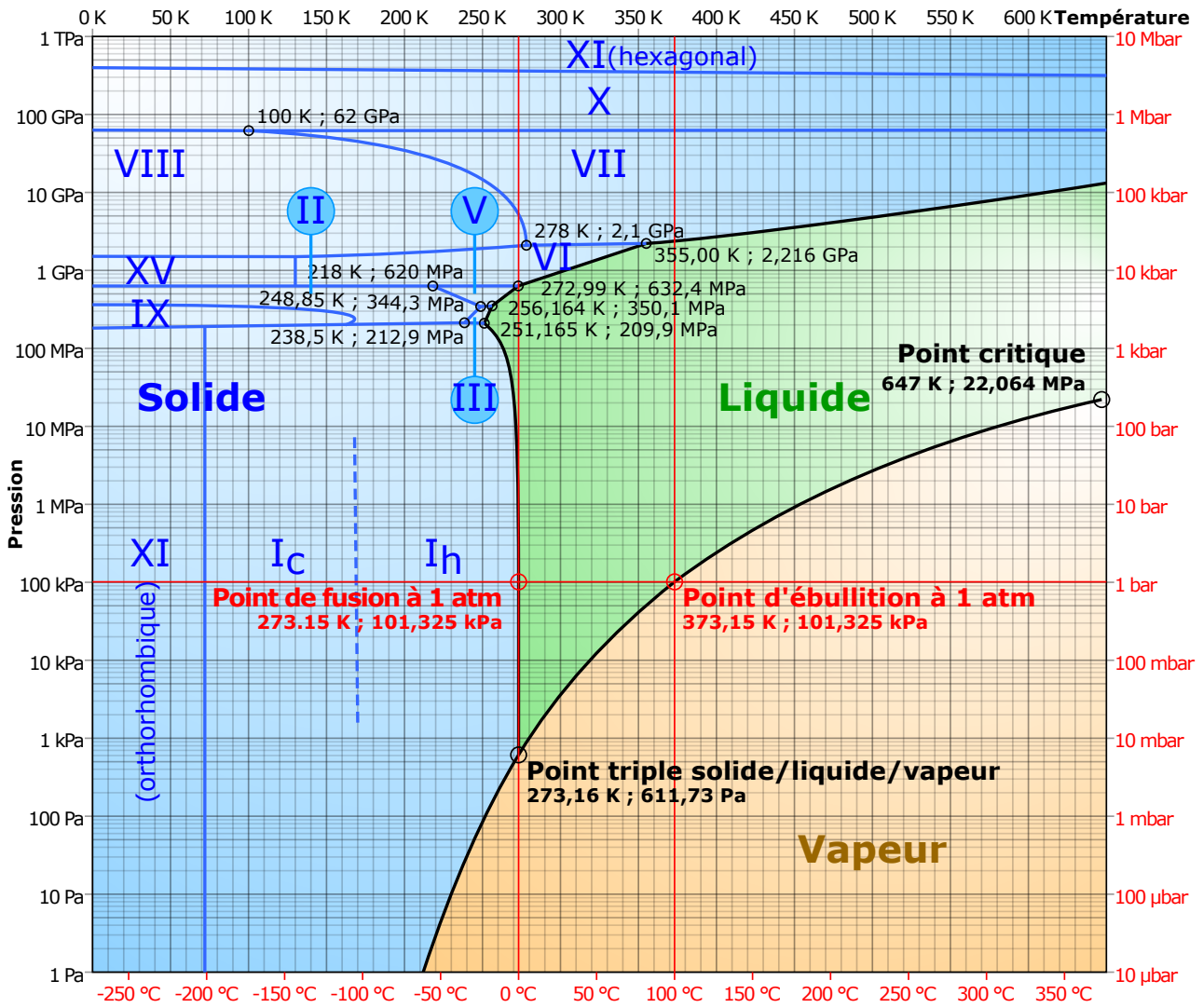


Figure B.1 – Diagramme de phase de l'eau, issu de *Wikimedia Commons*.

Cela signifie que l'astre devrait faire moins de 100 km de rayon, soit la taille d'une petite lune de Saturne, comme Hypérion $R \approx 133$ km ou Phœbé $R \approx 106$ km.

ANNEXE C

CARACTÉRISTIQUES DE L'ASTÉROÏDE B612

Avec un petit prince mesurant $h = 1,40$ m et d'une masse de $m_{pp} = 50$ kg, habitant sur une planète sphérique d'un rayon $r = 3$ m, où la gravité au niveau du nombril (soit à $h/2$) est semblable à celle sur Terre ($g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), la masse m de la planète devrait être de :

$$m = \frac{g}{G} \cdot \left(r + \frac{h}{2}\right)^2 - m_{pp} = 2,01 \times 10^{12} \text{ kg} \quad (\text{C.1})$$

À comparer avec la masse de la Terre, $M_{\oplus} = 5,972 \times 10^{24}$ kg. La masse volumique ρ de la planète est donc :

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3} = 1,78 \times 10^{10} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad (\text{C.2})$$

À comparer avec la masse volumique typique d'une étoile à neutron, d'environ $10^{10} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Les accélérations subies au niveau des pieds a_{pieds} et de la tête a_{tete} seraient alors :

$$\begin{cases} a_{pieds} = \frac{m}{r^2} \cdot G = 14,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 1,5 \text{ g} \\ a_{tete} = \frac{m}{(r+h)^2} \cdot G = 6,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 0,70 \text{ g} \end{cases} \quad (\text{C.3})$$

La vitesse de libération v_l serait alors :

$$v_l = \sqrt{\frac{2Gm}{r}} = 9,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (\text{C.4})$$

À noter qu'on serait encore très loin de la densité nécessaire à la formation d'un trou noir, car le rayon de Schwarzschild r_S serait de :

$$r_S = \frac{2Gm}{c^2} = 3,0 \times 10^{-15} \text{ m} \quad (\text{C.5})$$

À l'inverse, si on considérait que la planète du petit prince avait la même masse volumique ρ que la Terre, soit $5,5 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, alors l'accélération de pesanteur a à sa surface serait de :

$$a = G \cdot \frac{m}{r^2} = G \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r \cdot \rho = 4,6 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 4,7 \times 10^{-7} \text{ g} \quad (\text{C.6})$$

Sur cette planète, le petit prince pèserait :

$$P = m_{pp} \cdot a = 2,3 \times 10^{-4} \text{ N} \quad (\text{C.7})$$

Par rapport à son poids sur la Terre ($\approx 490 \text{ N}$), le petit prince se sentirait alors plus de 2 millions de fois plus léger.

- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., ... LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration (2016, février). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116(6), 061102. doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102 [11]
- Abraham, P., & Mauguin, B. (2024). *Les exoplanètes*. Rennes : Éditions Apogée. [22]
- Agol, E., & Fabrycky, D. (2017). Transit Timing and Duration Variations for the Discovery and Characterization of Exoplanets. [34]
doi: 10.48550/ARXIV.1706.09849
- Alibert, Y., Mordasini, C., Benz, W., & Winisdoerffer, C. (2005, avril). Models of giant planet formation with migration and disc evolution. *Astronomy & Astrophysics*, 434(1), 343–353. doi: 10.1051/0004-6361:20042032 [52]
- Anglada-Escudé, G., Amado, P. J., Barnes, J., Berdiñas, Z. M., Butler, R. P., Coleman, G. A. L., ... Zechmeister, M. (2016, août). A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature*, 536(7617), 437–440. doi: 10.1038/nature19106 [56]
- Ballard, S., Fabrycky, D., Fressin, F., Charbonneau, D., Desert, J.-M., Torres, G., ... Borucki, W. J. (2011, décembre). The Kepler-19 system : A transiting 2.2 R_{\oplus} planet and a second planet detected via transit timing variations. *The Astrophysical Journal*, 743(2), 200. doi: 10.1088/0004-637X/743/2/200 [34]
- Beaulieu, J.-P., Bennett, D. P., Fouque, P., Williams, A., Dominik, M., Jorgensen, U. G., ... Collaboration, t. M. (2006, janvier). Discovery of a Cool Planet of 5.5 Earth Masses Through Gravitational Microlensing. *Nature*, 439(7075), 437–440. doi: 10.1038/nature04441 [48]
- Bond, I. A., Udalski, A., Jaroszyski, M., Rattenbury, N. J., Paczynski, B., Soszynski, I., ... The MOA and OGLE Collaborations (2004, mai). OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53 : A Planetary Microlensing Event. *The Astrophysical Journal*, 606(2), L155-L158. doi: 10.1086/420928 [30, 31, 83]
- Brian Tonks, W., & Jay Melosh, H. (1992, décembre). Core formation by giant impacts. *Icarus*, 100(2), 326–346. doi: 10.1016/0019-1035(92)90104-F [46]
- Charbonneau, D., Berta, Z. K., Irwin, J., Burke, C. J., Nutzman, P., Buchhave, L. A., ... Forveille, T. (2009, décembre). A super-Earth transiting a nearby low-mass star. *Nature*, 462(7275), 891–894. doi: 10.1038/nature08679 [54]

- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. (2000, janvier). Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star. *The Astrophysical Journal*, *529*(1), L45-L48. doi: 10.1086/312457 [28, 29]
- Chauvin, G., Lagrange, A.-M., Dumas, C., Zuckerman, B., Mouillet, D., Song, I., ... Lovrince, P. (2004, octobre). A giant planet candidate near a young brown dwarf : Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing. *Astronomy & Astrophysics*, *425*(2), L29-L32. doi: 10.1051/0004-6361:200400056 [33]
- Curiel, S., Ortiz-León, G. N., Mioduszewski, A. J., & Sanchez-Bermudez, J. (2022). 3D orbital architecture of a dwarf binary system and its planetary companion. [27]
doi: 10.48550/ARXIV.2208.14553
- de Fontenelle, B. (1686). *Entretiens sur la pluralité des mondes*. Paris : Vve C. Blageart. [20, 21, 83]
- Doyle, L. R., Carter, J. A., Fabrycky, D. C., Slawson, R. W., Howell, S. B., Winn, J. N., ... Fischer, D. (2011, septembre). Kepler-16 : A Transiting Circumbinary Planet. *Science*, *333*(6049), 1602–1606. doi: 10.1126/science.1210923 [56]
- Gaia Collaboration, Prusti, T., De Bruijne, J. H. J., Brown, A. G. A., Vallenari, A., Babusiaux, C., ... Zschocke, S. (2016, novembre). The *Gaia* mission. *Astronomy & Astrophysics*, *595*, A1. doi: 10.1051/0004-6361/201629272 [17]
- Galicher, R., & Mazoyer, J. (2023, mars). Imaging exoplanets with coronagraphic instruments. *Comptes Rendus. Physique*, *24*(S2), 1–45. doi: 10.5802/crphys.133 [33, 39, 83]
- Gatewood, G. (2008, juillet). Astrometric studies of Aldebaran, Arcturus, Vega, the Hyades, and other regions. *The Astronomical Journal*, *136*(1), 452–460. doi: 10.1088/0004-6256/136/1/452 [18]
- Gillon, M., Triaud, A. H. M. J., Demory, B.-O., Jehin, E., Agol, E., Deck, K. M., ... Queloz, D. (2017, février). Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, *542*(7642), 456–460. doi: 10.1038/nature21360 [49]
- Glaser, D. M., Hartnett, H. E., Desch, S. J., Unterborn, C. T., Anbar, A., Buessecker, S., ... Zolotov, M. (2020, avril). Detectability of Life Using Oxygen on Pelagic Planets and Water Worlds. *The Astrophysical Journal*, *893*(2), 163. doi: 10.3847/1538-4357/ab822d [53]
- Haghighipour, N., & Kaltenegger, L. (2013, octobre). Calculating the habitable zone of binary star systems. II. P-Type Binaries. *The Astrophysical Journal*, *777*(2), 166. doi: 10.1088/0004-637X/777/2/166 [56]
- Haisch, K. E., Jr., Lada, E. A., & Lada, C. J. (2001, juin). Disk Frequencies and Lifetimes in Young Clusters. *The Astrophysical Journal*, *553*(2), L153-L156. doi: 10.1086/320685 [38]
- Heller, R., Williams, D., Kipping, D., Limbach, M. A., Turner, E., Greenberg, R., ... Zuluaga, J. I. (2014, septembre). Formation, Habitability, and Detection of Extrasolar Moons. *Astrobiology*, *14*(9), 798–835. doi: 10.1089/ast.2014.1147 [57]
- Hoffman, P. F., Abbot, D. S., Ashkenazy, Y., Benn, D. I., Brocks, J. J., Cohen, P. A., ... Warren, S. G. (2017, novembre). Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. *Science Advances*, *3*(11), e1600983. doi: 10.1126/sciadv.1600983 [48]
- Ingrasso, G., Novati, S. C., De Paolis, F., Jetzer, Ph., Nucita, A. A., & Zakharov, A. F. (2009, octobre). Pixel lensing as a way to detect extrasolar planets in M31. *Monthly Notices of*

- the Royal Astronomical Society*, 399(1), 219–228. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15184.x [32]
- Jesionek, R. (2024). *Planètes : voyage dans les mondes de la science-fiction*. Paris : Hoëbeke. [41]
- Kaltenegger, L., Henning, W. G., & Sasselov, D. D. (2010). Detecting Volcanism on Extrasolar Planets. [46]
doi: 10.48550/ARXIV.1009.1355
- Kiefer, F. (2019, décembre). Determining the mass of the planetary candidate HD 114762 b using *Gaia*. *Astronomy & Astrophysics*, 632, L9. doi: 10.1051/0004-6361/201936942 [26]
- Latham, D. W., Mazeh, T., Stefanik, R. P., Mayor, M., & Burki, G. (1989, mai). The unseen companion of HD114762 : a probable brown dwarf. *Nature*, 339(6219), 38–40. doi: 10.1038/339038a0 [26]
- Lefour, C., & Dobrijevic, M. (2022). Introduction à l'étude du système planétaire TRAPPIST-1. [50]
doi: 10.13140/RG.2.2.17015.29605
- Léger, A., Rouan, D., Schneider, J., Barge, P., Fridlund, M., Samuel, B., ... Zanatta, P. (2009, octobre). Transiting exoplanets from the CoRoT space mission : VIII. CoRoT-7b : the first super-Earth with measured radius. *Astronomy & Astrophysics*, 506(1), 287–302. doi: 10.1051/0004-6361/200911933 [46]
- Le Verrier, U. J. (1847, janvier). Recherches sur les mouvements d'Uranus. *Astronomische Nachrichten*, 25(4-5), 53–80. doi: 10.1002/asna.18470250404 [34]
- Lienhard, F., Queloz, D., Gillon, M., Burdanov, A., Delrez, L., Ducrot, E., ... Rackham, B. V. (2020, septembre). Global analysis of the TRAPPIST Ultra-Cool Dwarf Transit Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497(3), 3790–3808. doi: 10.1093/mnras/staa2054 [49]
- Lobo, A. H., Shields, A. L., Palubski, I. Z., & Wolf, E. (2023, mars). Terminator Habitability : The Case for Limited Water Availability on M-dwarf Planets. *The Astrophysical Journal*, 945(2), 161. doi: 10.3847/1538-4357/aca970 [50]
- Madhusudhan, N., Lee, K. K. M., & Mousis, O. (2012, novembre). A possible carbon-rich interior in super-Earth 55 Cancri e. *The Astrophysical Journal*, 759(2), L40. doi: 10.1088/2041-8205/759/2/L40 [61]
- Mandel, G. T., & Drexler, D. (2002). *Star Trek star charts*. New York : Pocket Books. [69]
- Marois, C., Macintosh, B., Barman, T., Zuckerman, B., Song, I., Patience, J., ... Doyon, R. (2008, novembre). Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799. *Science*, 322(5906), 1348–1352. doi: 10.1126/science.1166585 [33, 34]
- Mayor, M., & Queloz, D. (1995, novembre). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555), 355–359. doi: 10.1038/378355a0 [22, 23, 25, 83]
- McNelly, W. E. (1984). *The Dune encyclopedia*. New York : Berkley Books. [66]
- McTier, M. A. S., & Kipping, D. M. (2018). Finding Mountains with Molehills : The Detectability of Exotopography. [29]
doi: 10.48550/ARXIV.1801.05814
- Nixon, M. C., Piette, A. A. A., Kempton, E. M.-R., Gao, P., Bean, J. L., Steinrueck, M. E., ... Rogers, L. A. (2024, août). New Insights into the Internal Structure of GJ 1214 b Informed by JWST. *The Astrophysical Journal Letters*, 970(2), L28. doi: 10.3847/

- 2041-8213/ad615b [54]
- Parke Loyd, R. O., Shkolnik, E. L., Schneider, A. C., Barman, T. S., Meadows, V. S., Pagano, I., & Peacock, S. (2018, novembre). HAZMAT. IV. Flares and Superflares on Young M Stars in the Far Ultraviolet*. *The Astrophysical Journal*, 867(1), 70. doi: 10.3847/1538-4357/aae2ae [42]
- Perryman, M. (2018). *The exoplanet handbook*. Cambridge University Press. [22, 27, 29, 31, 40, 43, 46, 48, 61, 83, 84]
- Peterson, M. S., Benneke, B., Collins, K., Piaulet, C., Crossfield, I. J. M., Ali-Dib, M., ... Barclay, T. (2023, mai). A temperate Earth-sized planet with tidal heating transiting an M6 star. *Nature*, 617(7962), 701–705. doi: 10.1038/s41586-023-05934-8 [46]
- Puranen, E. (2024, décembre). Exoplanets in science fiction. [41, 42]
doi: 10.17630/STA/1055
- Queloz, D., Bouchy, F., Moutou, C., Hatzes, A., Hébrard, G., Alonso, R., ... Wuchterl, G. (2009, octobre). The CoRoT-7 planetary system : two orbiting super-Earths. *Astronomy & Astrophysics*, 506(1), 303–319. doi: 10.1051/0004-6361/200913096 [46]
- Rouan, D., Deeg, H. J., Demangeon, O., Samuel, B., Cavarroc, C., Fegley, B., & Léger, A. (2011, novembre). The orbital phases and secondary transit of Kepler-10b - A physical interpretation based on the Lava-ocean planet model -. *The Astrophysical Journal*, 741(2), L30. doi: 10.1088/2041-8205/741/2/L30 [46]
- Sahlmann, J., Burgasser, A. J., Martín, E. L., Lazorenko, P. F., Bardalez Gagliuffi, D. C., Mayor, M., ... Udry, S. (2015, juillet). DE0823-49 is a juvenile binary brown dwarf at 20.7 pc. *Astronomy & Astrophysics*, 579, A61. doi: 10.1051/0004-6361/201425536 [28]
- Sahlmann, J., Lazorenko, P. F., Segransan, D., Martin, E. L., Queloz, D., Mayor, M., & Udry, S. (2013). Astrometric orbit of a low-mass companion to an ultracool dwarf. [27]
doi: 10.48550/ARXIV.1306.3225
- Santerne, A., Brugger, B., Armstrong, D. J., Adibekyan, V., Lillo-Box, J., Gosselin, H., ... Vigan, A. (2018, mars). An Earth-sized exoplanet with a Mercury-like composition. *Nature Astronomy*, 2(5), 393–400. doi: 10.1038/s41550-018-0420-5 [61]
- Silvotti, R., Schuh, S., Janulis, R., Solheim, J.-E., Bernabei, S., Østensen, R., ... Zola, S. (2007, septembre). A giant planet orbiting the ‘extreme horizontal branch’ star V 391 Pegasi. *Nature*, 449(7159), 189–191. doi: 10.1038/nature06143 [35]
- Sullivan, C., Sallabank, J., Higgins, A., & Foden, A. (2014, novembre). It’s a-me density! *Physics Special Topics*, 13(1). [59]
- Teachey, A., & Kipping, D. M. (2018, octobre). Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b. *Science Advances*, 4(10), eaav1784. doi: 10.1126/sciadv.aav1784 [57]
- The KamLAND Collaboration. (2011, septembre). Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. *Nature Geoscience*, 4(9), 647–651. doi: 10.1038/ngeo1205 [71]
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., & Levison, H. F. (2005, mai). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, 435(7041), 459–461. doi: 10.1038/nature03539 [38]
- Turbet, M., Bolmont, E., Bourrier, V., Demory, B.-O., Leconte, J., Owen, J., & Wolf, E. T. (2020, août). A Review of Possible Planetary Atmospheres in the TRAPPIST-1 System. *Space Science Reviews*, 216(5), 100. doi: 10.1007/s11214-020-00719-1 [49]

- Turon, C., & Arenou, F. (2007, octobre). The Hipparcos Catalogue : 10th anniversary and its legacy. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 3(S248), 1–7. doi: 10.1017/S1743921308018516 [17]
- Wallace, D., & Fry, J. (2009). *Star Wars The essentiel atlas*. Ballantine Books. [70]
- Wilhelm, M., & Mathison, D. (2009). *Avatar - A Confidential Report On The Biological and Social History Of Pandora - An Activist Survival Guide*. Harper Collins Publishers. [66]
- Wolszczan, A., & Frail, D. A. (1992, janvier). A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, 355(6356), 145–147. doi: 10.1038/355145a0 [20, 35]

LISTE DES FIGURES

I.1	Diagramme des différents types de rayonnements électromagnétiques	12
I.2	Diagramme des différents types de spectres	13
I.3	Spectre de la lumière du Soleil	14
I.4	Diagramme de la vitesse radiale	14
I.5	Loi de Planck	16
I.6	Parallaxe annuelle	17
I.7	Diagramme de Hertzsprung-Russell	18
I.8	Trajectoire d'une planète autour de son étoile	19
I.9	Extrait de Fontenelle	21
I.10	Histogramme de découvertes d'exoplanètes	23
I.11	Diagramme de la méthode de la vitesse radiale	24
I.12	Mouvement orbital de 51 Peg	25
I.13	Inclinaison orbitale	26
I.14	Déplacement d'une étoile sur le fond du ciel	27
I.15	Déplacement du barycentre du Système solaire	28
I.16	Courbe du flux lumineux de l'étoile HD 209458	29
I.17	Principe de la lentille gravitationnelle	30
I.18	Courbe de lumière d'une détection par microlentille	31
I.19	Détection de OGLE-2003-BLG-235L b	31
I.20	Flux des planètes du système solaire	33
I.21	Observation d'exoplanètes autour de HR 8799	34
I.22	Exoplanètes découvertes au 31 décembre 2024	36
II.1	Transit primaire et secondaire	39
II.2	Montage du Système solaire	41
II.3	Schéma de la zone habitable	43
II.4	Planète de No Man's Sky	43
II.5	Planète de Mass Effect	44
II.6	Planète Mustafar	45
II.7	Planète Netu	45

II.8	Planète Hoth	47
II.9	Planète Mann	47
II.10	Planète Vinéa	49
II.11	Système TRAPPIST-1	50
II.12	Planète Ryloth	51
II.13	Planète Lantia	52
II.14	Planète Solaris	53
II.15	Planète Aqua End	53
II.16	Planète Tatooine	55
II.17	Lune M6-117	55
II.18	Types d'orbites d'exoplanètes	56
II.19	Lune Pandora	57
II.20	Lune Ixo	58
II.21	Astéroïde B612	59
II.22	Super Mario Galaxy	60
II.23	Dragon Ball Z	60
II.24	Diagramme des différents types de planètes telluriques	61
B.1	Diagramme de phase de l'eau	72

LISTE DES CRÉDITS

I.1	Adapté d'un diagramme de la NASA, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 . . .	12
I.3	Adapté de Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0	14
I.7	Adapté de Rursus, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0	18
I.9	[de Fontenelle, 1686], Gallica	21
I.12	[Mayor & Queloz, 1995]	25
I.14	Adapté de [Perryman, 2018]	27
I.15	Adapté de Rubik-wuerfel, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0	28
I.16	Adapté de [Perryman, 2018]	29
I.18	Adapté de [Perryman, 2018]	31
I.19	[Bond et al., 2004]	31
I.20	Adapté de [Galicher & Mazoyer, 2023]	33
I.21	International Gemini Observatory, NSF's NOIRLab, Peter Michaud	34
II.2	Adapté de CactiStaccingCrane, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0	41
II.3	Adapté de [Perryman, 2018]	43
II.4	Tiré du jeu vidéo sur PC <i>No Man's Sky</i> (2016)	43
II.5	Tiré du jeu vidéo sur PC <i>Mass Effect</i> (2007)	44
II.6	Tiré du film <i>Star Wars, épisode III : La Revanche des Sith</i> (2005)	45
II.7	Tiré de la série <i>Stargate SG-1, épisode 12-3</i> (1999)	45
II.8	Tiré du film <i>Star Wars, épisode V : L'Empire contre-attaque</i> (1980)	47
II.9	Tiré du film <i>Interstellar</i> (2014)	47
II.10	Tiré de la bande dessinée <i>Yoko Tsuno : Les Archanges de Vinéa</i> (1982)	49
II.11	NASA, JPL-Caltech	50
II.12	Tiré du jeu de rôle <i>Star Wars : Edge of the Empire Core Rulebook</i> (2013)	51
II.13	Tiré de la série <i>Stargate SG-1, épisode 10-3</i> (2006)	52
II.14	Tiré du film <i>Solaris</i> (1972)	53
II.15	Tiré de la BD <i>L'Incal T4</i> (1985)	53
II.16	Tiré du film <i>Star Wars, épisode IV : Un nouvel espoir</i> (1977)	55
II.17	Tiré du film <i>Les Chroniques de Riddick : Pitch Black</i> (2000)	55
II.19	Tiré du film <i>Avatar : La Voie de l'eau</i> (2022)	57
II.20	Tiré de la bande dessinée <i>Yoko Tsuno : La Lumière d'Ixo</i> (1980)	58

II.21	Tiré du roman <i>Le Petit Prince</i> (1943)	59
II.22	Tiré du jeu vidéo <i>Super Mario Galaxy</i> (2007).	60
II.23	Tiré de l'anime <i>Dragon Ball Z</i> (1991)	60
II.24	Adapté de [Perryman, 2018]	61
B.1	Diagramme d'Olivier Descout, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0	72

Les figures, images et photographies non créditées sont l'œuvre de l'auteur et sont partageables sous la licence CC-BY-NC-SA (attribution de l'œuvre à l'auteur, utilisation non commerciale et partage dans les mêmes conditions).