

**VOYAGE  
DANS  
L'ESPACE**

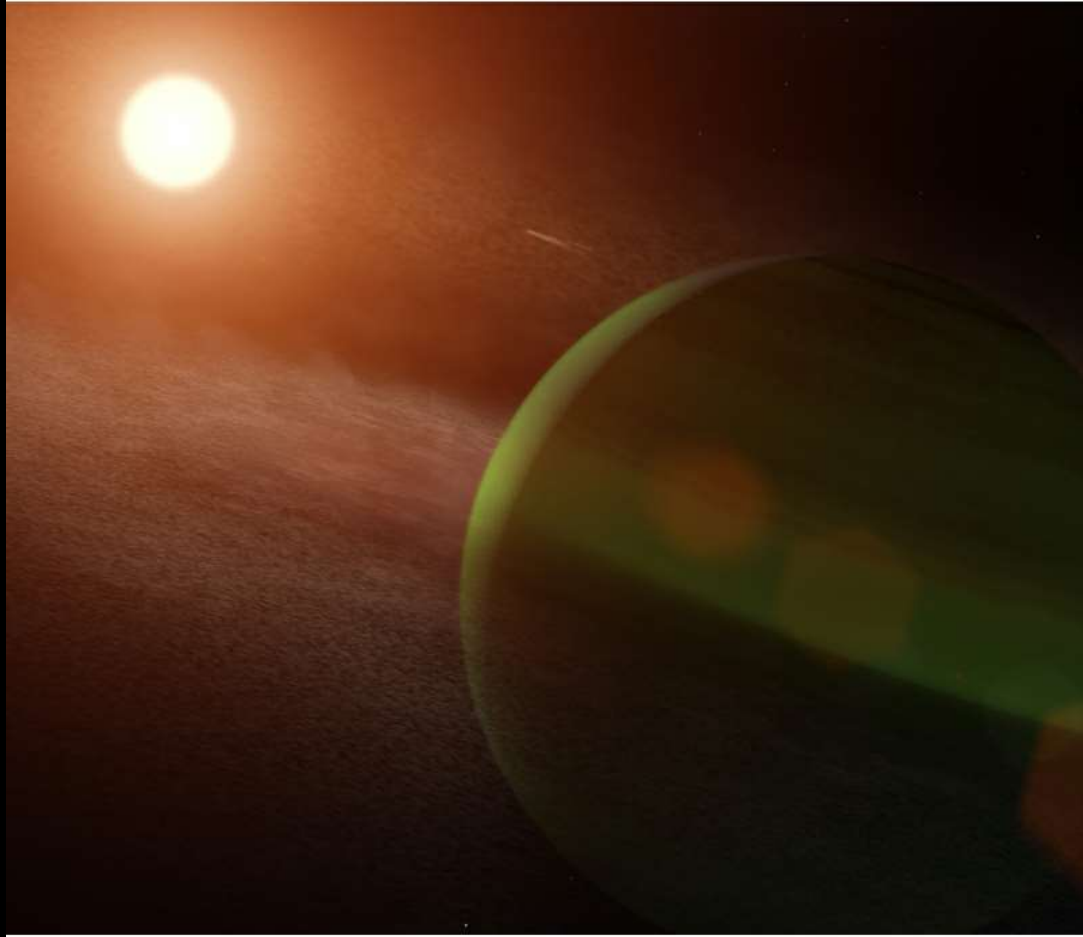
Épisode

48

---

DE NOUVELLES PLANÈTES INCROYABLES

---



---

Une diversité à n'en plus finir...

## Le balado et les fascicules

Depuis janvier 2018, Claude Lafleur et Mathieu Rancourt produisent un balado consacré à l'exploration de l'espace. Intitulé *Voyage dans l'espace*, il est diffusé sur la plate-forme soundcloud.com. Chaque épisode vous fait parcourir une dimension particulière, qu'il s'agisse de l'exploration d'une planète, de la recherche de vie dans l'Univers ou de l'aventure des astronautes et de ceux et celles qui rêvent d'espace.

Pour chaque balado, ils préparent un exposé détaillé, sous forme de questions/réponses. Ils publient ces exposés sous forme de fascicules pdf, comme celui-ci. Il s'agit donc d'une conversation entre l'animateur de *Voyage dans l'espace*, Mathieu, et le passionné d'espace, Claude.

Notez que le balado diffusé s'inspire librement des questions/réponses préparées à cet effet. Le texte qui suit n'est pas un verbatim de l'émission, mais plutôt une autre version; le balado et ce fascicule se complètent l'un et l'autre.

Tous les fascicules sont offerts aux abonnés du balado *Voyage dans l'espace*, abonnement au coût de 5\$/mois, via la plate-forme patreon.com.

**Mathieu Rancourt** est géographe et professionnel de recherche. **Claude Lafleur** est journaliste scientifique qui suit au quotidien depuis cinquante ans les péripéties de l'exploration spatiale.

L'équipe des fascicules:  
Rédaction:  
Claude Lafleur  
Couverture: Mathieu Rancourt  
Illustrations: NASA, ESO, ESA

Balado: <https://soundcloud.com/voyage-danslespace/>

Abonnement:  
<https://www.patreon.com/voyagedanslespace>

Facebook: <https://www.facebook.com/voyagedanslespace/>

Courriel: [claudio-lafleur1@videotron.ca](mailto:claudio-lafleur1@videotron.ca)

© Copyright, Claude Lafleur, 2020

ISBN 978-2-925106-04-3 (pdf)

ISBN 978-2-925106-05-0 (kindle)

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec, 2020

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Canada, 2020



Une idée des planètes de toutes tailles qu'on a repérées autour de diverses étoiles.

## De nouvelles planètes incroyables

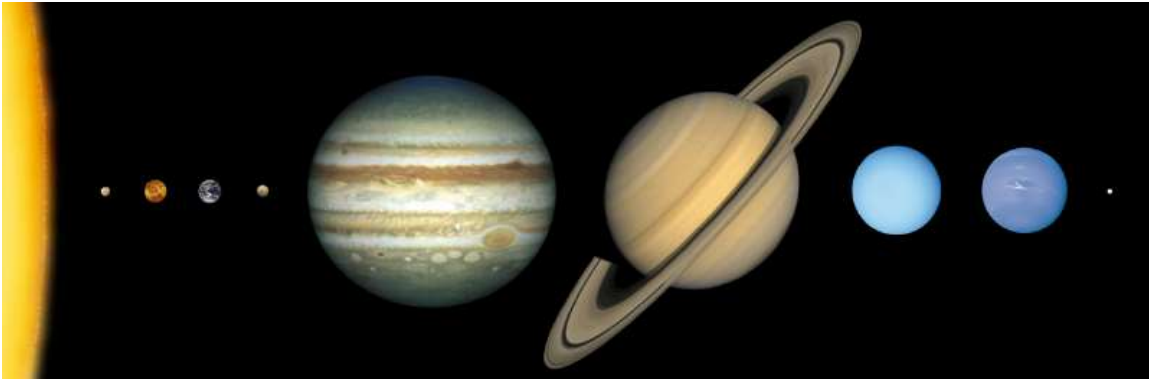
Écouter le balado *De nouvelles planètes incroyables* diffusé le 2 août 2020.

Le 5 octobre prochain marquera le 25<sup>e</sup> anniversaire de la découverte de la première exoplanète: une «Jupiter chaude» gravitant autour de l'étoile 51 Pegasi. C'est là un exploit remarquable accompli par Didier Queloz et Michel Mayor, qui ont par conséquent reçu le Nobel de physique en 2019.<sup>1</sup> Depuis ce jour, on a découvert des milliers de planètes hors de notre Système solaire, des exoplanètes de toutes sortes... sauf des planètes qui s'apparentent à la Terre.<sup>2</sup>

Or, justement, ce que nous cherchons en fin de compte, ce sont des planètes aussi hospitalières que la nôtre et sur lesquelles on espère trouver des êtres avec qui échanger. Car, pour la première fois de l'histoire de l'humanité, nous avons les moyens de répondre à la fabuleuse question qu'on se pose depuis si longtemps: sommes-nous seuls dans l'Univers?

Mais ce qu'on a plutôt trouvé – à notre grand étonnement – c'est une foule de planètes fort différentes de celles que nous connaissons, c'est-à-

dire des planètes qui ne ressemblent en rien à celles qu'on retrouve dans notre Système solaire. Nous, qui croyions qu'il n'existait que deux grandes familles de planètes – les planètes rocheuses et les géantes gazeuses – nous voici confrontés à une diversité de planètes à couper le souffle. C'est dire que la grande leçon que nous enseignent nos vingt-cinq années de découverte d'exoplanètes, c'est qu'il y a abondance de planètes autour des étoiles et que celles-ci sont étonnamment différentes de ce à



Notre Système solaire se compose de quatre petites planètes rocheuses (à gauche) et de quatre géantes gazeuses (du centre vers la droite). Remarquez la taille très différente entre les deux groupes de planètes. À noter aussi la taille «démessurée» du Soleil, à l'extrême-gauche.

quoi on s'attendait. Certaines dépassent même tout ce qu'on aurait pu oser imaginer tandis que d'autres nous font rêver.

Nous allons donc explorer le monde fascinant des exoplanètes. Mais alors qu'on s'intéresse habituellement aux planètes qui ressemblent à la Terre –

avec l'espoir d'y trouver des humanoïdes –, nous allons cette fois nous intéresser aux autres types de planètes, à celles qui sont très différentes de celles qui orbitent autour du Soleil. Et comme nous le verrons, ce sont des mondes fascinants, souvent même déroutants.

## I – Nos (fausses) hypothèses de départ

Durant des millénaires, nous nous sommes crus les seuls habitants de l'Univers... dont nous occupions par bonheur le centre. Ce n'est que récemment – moins de quatre siècles – qu'on a pris conscience que la Terre est une planète qui tourne autour du Soleil et qu'elle fait partie d'un ensemble comprenant Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. (Plus tard, on y ajoutera Uranus et Neptune.) On a aussi réalisé que le Soleil est une étoile parmi des milliers d'autres qui brillent au firmament.

Quatre questions se sont alors naturellement imposées. Puisque le Soleil est entouré de planètes, est-ce la même chose pour les autres étoiles? La présence de planètes est-elle quelque chose de fréquent ou de plutôt rare? Retrouvera-t-on couramment des planètes semblables à celles que nous connaissons? Et ces planètes sont-elles, pour la plupart, hospitalières comme la Terre?

Or, tenter de répondre à ces questions nous plonge dans un défi presque insurmontable: les étoiles se trouvent à des distances considérables – astronomiques! – de nous. Ainsi, alors que le Soleil se situe à 150 millions de kilomètres de la Terre, les autres étoiles sont à des *centaines de milliards* de kilomètres.<sup>3</sup>

De surcroît, les planètes sont d'infimes particules comparées aux étoiles

autour desquelles elles gravitent. Ainsi, le Soleil compte à lui seul pour 99,85% de toute la matière qui constitue le Système solaire et la Terre est 109 fois plus petite que lui.<sup>4</sup> De surcroît, notre étoile émet une quantité prodigieuse d'énergie, sous forme de lumière, de chaleur, etc., alors que les planètes ne font que refléter une parcelle de celle-ci.

Les astronomes résument la situation à laquelle ils sont confrontés de la façon suivante: imaginez que par une belle nuit, vous voyez venir au loin une voiture et que vous tentiez de voir si des moustiques passent devant les phares de celle-ci. Pour eux, tenter d'apercevoir une exoplanète revient à chercher une luciole passant devant les phares d'un véhicule se trouvant à des kilomètres. C'est ainsi que pour un extraterrestre qui observerait notre Soleil, Jupiter serait un milliard de fois plus ténue que celui-ci ... alors que la Terre est douze fois plus petite que Jupiter. Bonne chance!

Néanmoins, à partir des années 1850, des astronomes ont eu l'audace de tenter l'aventure.<sup>5</sup> Mais après de nombreuses fausses découvertes, ce n'est finalement que 150 ans plus tard qu'on a repéré une première planète

autour d'une étoile, 51 Pegasi, située à 51 années-lumière de nous (soit cinq cents mille milliards de kilomètres).<sup>6</sup>

Durant ce siècle et demi, les astronomes se sont beaucoup questionnés sur ce qu'ils devraient chercher au juste. Quelle sorte de planète peut-on raisonnablement espérer trouver? Doit-on chercher des systèmes planétaires semblables au nôtre ou, au contraire, s'attendre à trouver autre chose?

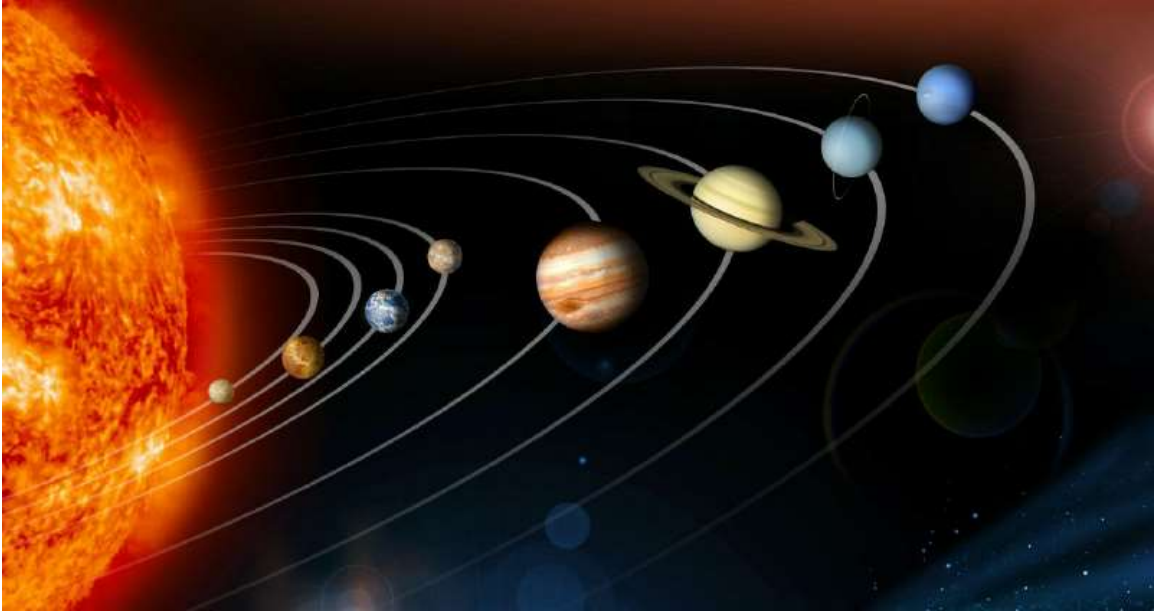
Or, si la Nature avait conscience de ce qu'elle fait, on pourrait presque l'accuser de nous avoir induit en erreur!

En effet, nous nous trouvons au cœur de ce qui paraît être un ensemble de planètes bien ordonné et gravitant autour d'une belle gros-

se étoile stable. On a ainsi conçu un modèle de système planétaire logique: près d'une étoile (mais pas trop) devraient se trouver de petites planètes rocheuses (comme Mercure, Vénus, la Terre et Mars) tandis qu'à bonne distance circuleraient de grosses planètes gazeuses, à la manière de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Il nous est dès lors apparu naturel d'imaginer que les autres systèmes planétaires devraient ressembler au nôtre. Bien sûr, on devait s'attendre à trouver un certain nombre de différences – ou plutôt



Le 9 mai 2016, Mercure passe devant le Soleil; pas facile de voir la petite planète alors qu'on ne se trouve qu'à une centaine de millions de kilomètres. Imaginez détecter une exoplanète circulant autour d'une étoile située à des centaines de milliards de kilomètres.



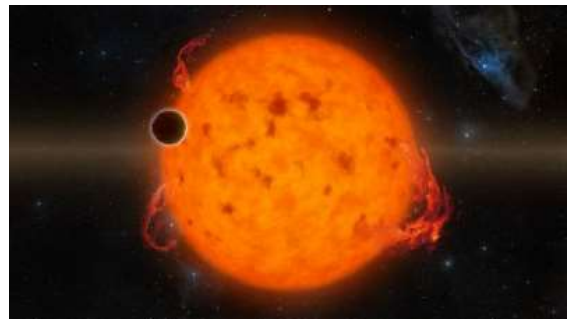
Voici l'image qu'on se fait du Système solaire: une belle grosse étoile entourée de planètes bien ordonnées. Or, on trouve de tout auprès des autres étoiles, sauf quelque chose de semblable.

des variations de notre modèle «parfait» – mais on imaginait rencontrer assez fréquemment des systèmes solaires. C'était logique.

C'est dans cet esprit que nous avons entrepris nos recherches de planètes extrasolaires. Dès le départ, les astronomes s'estimaient dans l'incapacité de parvenir à photographier des exoplanètes étant donné les distances et l'éclat absolument époustouflant que les étoiles projettent par rapport à leurs planètes. Ils ont toutefois imaginé deux méthodes astucieuses pour y parvenir.

### La méthode du transit

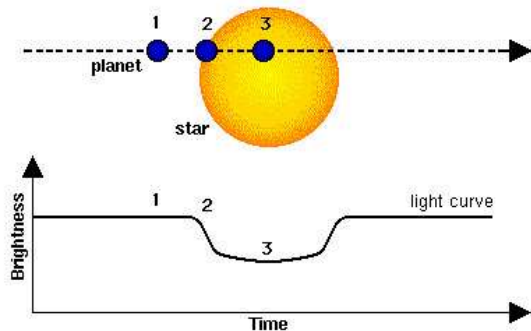
La première méthode consiste à mesurer l'ombre que fait une planète lorsqu'elle passe devant son étoile (par rapport à nous). C'est ainsi qu'elle cache alors une portion de l'étoile – à la manière d'un moustique passant devant une lampe – ce qui fait baisser très légèrement l'éclat lumineux de celle-ci.



En passant devant son étoile, une planète cache légèrement le disque de celle-ci.

Les astronomes cherchent donc à mesurer une infime baisse de luminosité de l'étoile. Il s'agit bien entendu d'une diminution impossible à percevoir à l'œil, mais à l'aide d'appareils extrêmement sensibles, ils espéraient parvenir à mesurer une baisse constante et régulière de l'éclat, pour ensuite en déduire que cette diminution est due au passage d'une planète. Supposons par exemple qu'on observe une baisse de luminosité de 0,001% de l'éclat d'une étoile à tous les x jours, on en déduira qu'un astre d'une certaine taille fait le tour de son étoile à

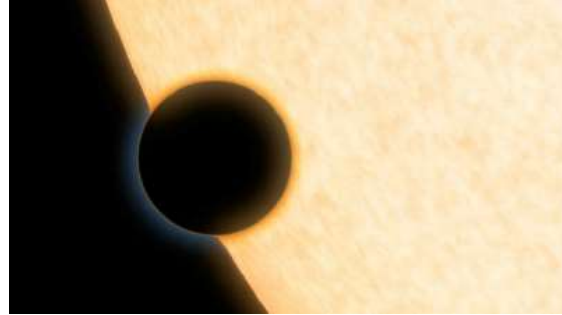
tous ces x jours. Plus la diminution est importante, plus la taille de la planète est grande – et vice versa.



En passant devant son étoile, une planète fait baisser la luminosité de celle-ci, baisse qu'on peut mesurer à l'aide d'appareils ultra-sensibles.

Ainsi, un extraterrestre qui observerait au loin le Soleil verrait son éclat diminuer très légèrement une fois par année à cause du passage de la Terre. Puis, en poursuivant ses observations, il constaterait une diminution onze fois plus importante à tous les douze ans, à cause du passage de Jupiter.<sup>7</sup> De même, il observerait une autre baisse d'intensité (du même ordre que celui de la Terre) à tous les 7½ mois, à cause de la présence de Vénus, et une autre à tous les trois mois pour Mercure... En étant donc très patient et attentif, cet extraterrestre finirait par déduire la présence de huit planètes autour du Soleil.

En astronomie, lorsqu'un astre passe devant un autre, on parle d'un transit. C'est le cas par exemple lorsque Mercure et Vénus transitent devant le Soleil (par rapport à nous). C'est pourquoi cette façon de débusquer des exoplanètes est dite la *méthode du transit*.<sup>8</sup>



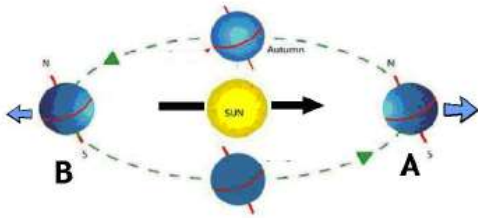
Transit de Vénus passant devant le Soleil.

## La méthode des vitesses radiales

Il existe une seconde méthode, qui consiste à mesurer l'effet gravitationnelle qu'exerce une planète sur son étoile. On sait par exemple que la Lune exerce un effet de marée sur la Terre. De même, notre planète exerce un effet sur le Soleil par sa seule présence. Cette fois, les astronomes cherchent à détecter l'effet qu'exerce une planète sur la *vitesse de déplacement* de l'étoile.

On sait en effet que les étoiles qu'on voit au firmament gravitent autour du centre de notre galaxie. Ainsi, le Soleil se déplace à la vitesse de 781 200 km/h. Toutefois, la présence des planètes perturbe très légèrement cette vitesse.

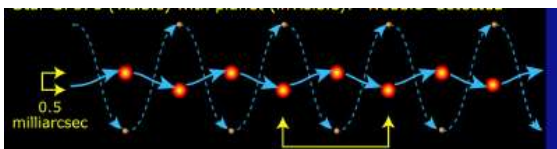
Ainsi, à un certain moment de l'année, la Terre se trouve placée au-devant du Soleil et sa force gravitationnelle attire très légèrement le Soleil vers l'avant, dans le sens de son déplacement. Disons que le Soleil se déplace alors à la vitesse de 781 205 km/h. Puis, six mois plus tard, la Terre se trouve à la traîne du Soleil et, par conséquent, elle ralentit la vitesse de déplacement à, disons, 781 195 km/h.



Tantôt, la force gravitationnelle d'une planète attire son étoile vers l'avant (A), et tantôt elle l'attire vers l'arrière (B), phénomène qu'on peut mesurer à l'aide d'appareils ultra-sensibles et qui permettent de détecter la présence d'une planète sans jamais la voir.

C'est dire qu'un extraterrestre qui observerait notre Système solaire ne verrait pas la Terre (éclaboussée par la luminosité du Soleil), mais il pourrait mesurer que la vitesse de déplacement de l'étoile varie de plus ou moins cinq kilomètres/heure au rythme d'une année. Il détecterait d'autres variations de vitesse: à tous les douze ans à cause de la présence de Jupiter, à tous les 7½ mois à cause de Vénus, à tous les trois mois à cause de Mercure, etc. Voilà qui lui imposerait de savants calculs pour parvenir à distinguer la présence des huit planètes.

Ce sont donc des perturbations de vitesse stable et régulière que cherchent à mesurer les astronomes auprès des autres étoiles, en utilisant ce qu'ils appellent la *méthode des vitesses radiales*.<sup>9</sup>



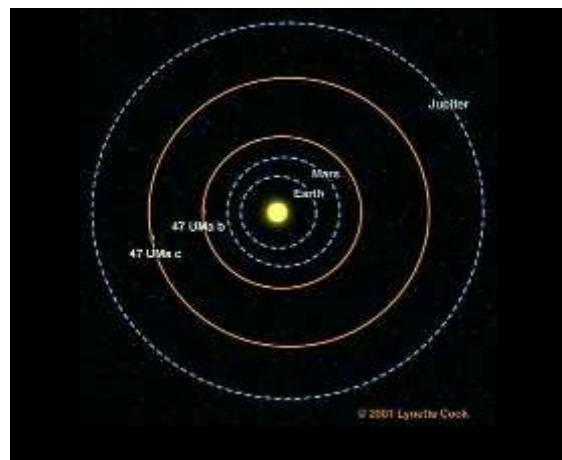
Exemple des variations du déplacement d'une étoile dues à la présence d'une planète.

Notons que la méthode du transit permet d'évaluer la taille de la planète qui fait ombrage à son étoile en passant devant: plus la planète est grosse,

plus elle fait de l'ombre. Quant à la méthode des vitesses radiales, elle permet de déterminer la masse de la planète: plus massive est-elle, plus elle exerce une force gravitationnelle sur son étoile. Lorsqu'on parvient à observer une même exoplanète à l'aide des deux méthodes, on obtient alors la densité de l'astre; cette exoplanète a-t-elle la densité de la Terre (planète rocheuse) ou celle de Jupiter (géante gazeuse)?

## Encore faut-il être bien placé

Cependant, ces deux méthodes de détection induisent d'énormes biais dans nos recherches. Ainsi, pour débusquer des planètes grâce à la méthode du transit, il faut que celles-ci passent devant l'étoile *par rapport à nous*. Il faut donc se trouver dans le bon angle. Ainsi, un extraterrestre qui observerait notre Système solaire en étant situé «au-dessus» de lui (par le pôle nord) ou «en-dessous» (par le pôle sud) ne verrait jamais passer de planètes devant son télescope. Pour les repérer, il doit observer notre système «de côté» (par l'équateur). C'est dire



Si on observe un système planétaire par «le dessus», jamais on ne verra les planètes passer devant l'étoile.

qu'on rate probablement quantité de planètes simplement parce qu'elles ne passent jamais devant leur étoile... par rapport à nous.

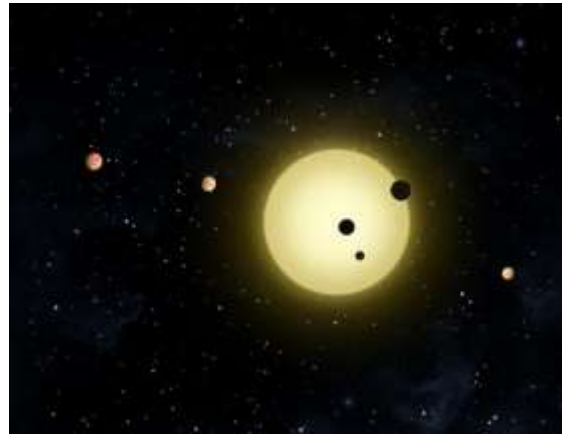
Quant à la méthode des vitesses radiales, non seulement pose-t-elle de sérieux problèmes de calcul lorsqu'il y a plusieurs planètes mais également si celles-ci gravitent sur des orbites elliptiques (en forme d'œuf). (Dans le cas du Système solaire, les huit planètes gravitent sur des orbites circulaires, ce qui faciliterait la tâche à l'extraterrestre... qui aurait néanmoins à distinguer un nombre inconnu (pour lui) de planètes.)

Mais surtout, dans les deux cas, il est plus facile de détecter de grosses planètes qui font rapidement le tour de leur étoile que de petites planètes ou celles qui prennent beaucoup de temps pour accomplir leur révolution autour de leur étoile.

Il faut en effet observer plusieurs passages d'une même planète devant son étoile pour s'assurer qu'il s'agit bien d'un phénomène récurrent. Il faut donc de la patience (des années)

pour débusquer une planète comme la Terre et douze fois plus de temps pour repérer une Jupiter.

C'est dire aussi qu'on ne peut jamais être assuré que, si on détecte peu ou pas de planètes autour d'une étoile, on a tout vu – loin de là! Et quand bien même en aurions-nous détecté plusieurs, il se peut qu'il y en ait d'autres. Ainsi donc, dans le cas du Système solaire, Saturne prend 30 ans pour faire le tour du Soleil, Neptune 84 ans et Uranus 165 ans. Patience!



Imaginez le défi de devoir détecter un nombre inconnu de planètes invisibles tournant autour d'une étoile.

## II – Les Jupiter chaudes

Étant donné que le seul exemple de système planétaire que nous connaissons est le nôtre, bien ordonné, on s'attendait à trouver de petites planètes prenant plusieurs mois, voire une année ou deux, pour faire le tour de leur étoile. On pourrait aussi repérer de grosses planètes, mais qui feraient le tour de leur étoile en une décennie ou plus.

Or, ce que Didier Queloz et Michel Mayor ont trouvé, c'est une planète qui fait le tour de l'étoile 51 Pegasi en quatre jours seulement, soit vingt fois plus rapidement que Mercure! Cette planète se trouve par conséquent à seulement 8 millions de kilomètres de

son étoile (tandis que Mercure se maintient à 58 millions de kilomètres).<sup>10</sup>

Voilà qui a fortement déconcerté nos deux astronomes. Comment une planète si proche de son étoile peut-elle résister à l'intense chaleur dégagée par celle-ci? On estime en effet qu'il doit faire 1300° à la surface de

cette planète (contre 170° sur Mercure).

Mais plus déconcertant encore: il s'agit d'une gigantesque planète, qui fait entre une fois et demie et deux fois la taille de Jupiter.

### «On a un sérieux problème...»

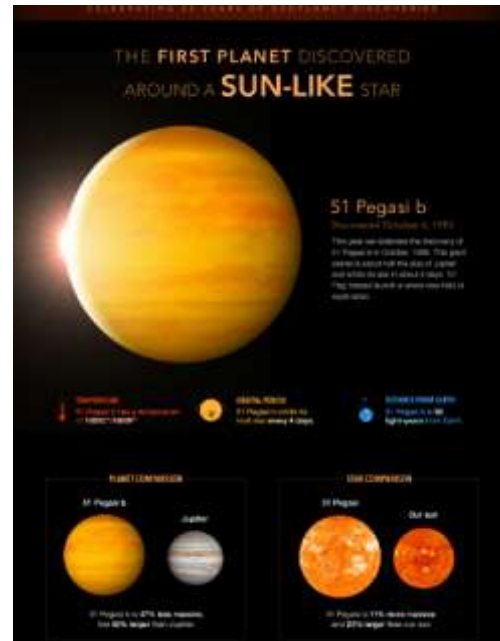
Comment une telle planète peut-elle exister si proche d'une étoile? C'est tout à fait invraisemblable! On pouvait en effet difficilement imaginer comment une planète de la taille de Jupiter étant aussi proche de son étoile ne s'évaporerait pas tout simplement.

«Lorsque pour la première fois j'ai vu le comportement bizarre de l'étoile, je me suis dit: "Y'a un problème avec l'instrument", se rappelle Didier Queloz. C'était en effet la façon la plus raisonnable de réagir parce qu'on ne pouvait imaginer qu'une planète puisse exister si près d'une étoile. Et plus je regardais, plus j'étais angoissé, car il me fallait trouver le problème!»<sup>11</sup>

Pourtant Didier Queloz avait bien vu, ou plutôt, son détecteur de planètes a pris les bonnes mesures. Dans les faits, le jeune astronome (il n'avait alors que 28 ans) venait de découvrir la première d'une longue série de planètes qu'on appelle désormais des *Jupiter chaudes*.<sup>12</sup>

Comme leur nom l'indique, il s'agit de planètes géantes – de la taille de Jupiter ou plus – qui gravitent collées sur leur étoile. On en a repéré des centaines à ce jour, ce qui a confirmé que l'exoplanète découverte par Queloz n'est pas une exception, bien au contraire.

Notons, ô bel hasard, qu'on n'aurait pas pu espérer trouver planète plus fa-

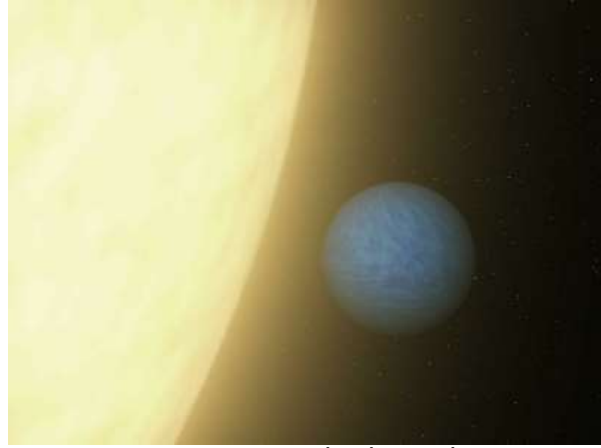
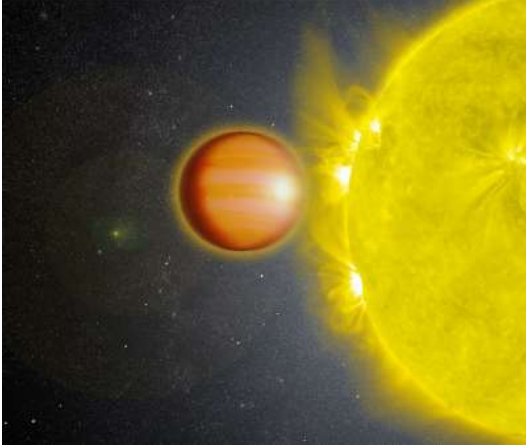


Affiche de la NASA illustrant les principales caractéristiques de la planète 51 Pegasi b. En haut, une idée de ce à quoi elle pourrait ressembler. En bas, comparaison de la taille de la planète avec Jupiter, et de l'étoile 51 Pegasi par rapport à notre Soleil.

cile à repérer à l'aide de nos méthodes. En effet, une grosse planète qui fait rapidement le tour de son étoile est infiniment plus facile à débusquer qu'une petite Terre qui passerait une fois par année devant son étoile ou qu'une belle grosse Jupiter faisant le tour de son étoile en une décennie.

Par conséquent, on a rapidement découvert une foule de Jupiter chaudes, ce qui nous a permis de confirmer la justesse de nos méthodes de repérage.

Cependant, en même temps, des planètes aussi invraisemblables nous ont plongés dans un abîme: comment *expliquer* l'existence de gigantesques planètes à proximité immédiate de leur étoile? Comment expliquer qu'elles ne s'évaporent pas tout bonnement?! Et d'où proviennent-elles? Se forment-elles à proximité de leur



Deux exemples de Jupiter chaudes telles qu'on les imagine, collées à leur étoile.

étoile ou un peu plus loin, ou encore à bonne distance pour ensuite migrer vers elle?<sup>13</sup>

### Les «Jupiter»... chaudes?

Ce qui caractérise ces planètes, c'est le fait qu'il s'agit d'astres dont la masse est comprise entre un tiers et douze fois celle de Jupiter et qui font le tour de leur étoile en moins de dix jours. (Par-delà une masse de 13,6 Jupiter, on a plutôt affaire à des quasi-étoiles.)

Pour le moment, on ne connaît pas grand-chose (avec certitude) à leur sujet, mais on a de bonnes raisons d'estimer qu'il doit s'agir de mondes vraiment étranges, extraordinairement différents de la planète Jupiter qui nous est familière.

Ainsi, de par leur proximité d'avec leur étoile, il s'agit de planètes gazeuses extrêmement dilatées; dans certains cas, on pourrait même parler d'immenses bulles de gaz, plutôt que de planètes.

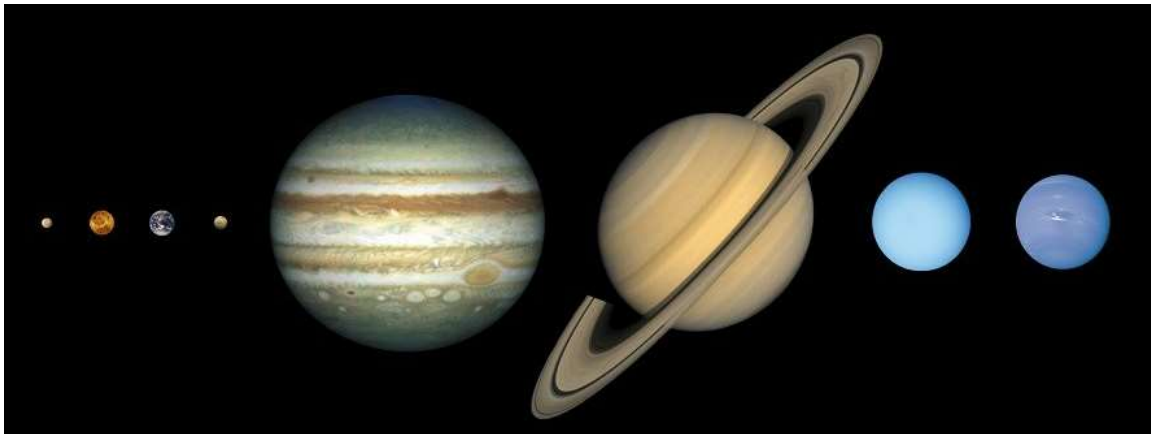
L'atmosphère de certaines pourrait se confondre avec celle de leur étoile.

Bon nombre de ces Jupiter présentent toujours le même hémisphère à leur étoile (comme la Lune nous présente toujours la même face). Il y a donc toujours un hémisphère exposé aux ardentes radiations de l'étoile tandis que l'autre se trouve éternellement plongé dans une obscurité glaciale. Cette différence doit générer d'énormes écarts de température et, par le fait même, de foudroyants courants de vent. Par conséquent, les conditions qui règnent à la surface des Jupiter chaudes doivent être atroces et sont difficilement imaginables.



Illustration d'une Jupiter chaude présentant toujours le même hémisphère à son étoile.

Des mondes étranges, certes, mais on n'en était pas au bout de nos surprises.



Petites planètes rocheuses et géantes gazeuses, tout est une question de taille.

### III – Les planètes océan

La découverte d'une première exoplanète en 1995 a ouvert les vannes du domaine, puisqu'au cours des années suivantes, c'est par douzaines, puis par centaines qu'on débute de nouvelles exoplanètes. Surtout, on a découvert toutes sortes de planètes et, ô surprise, plusieurs types qui n'existent pas dans notre Système solaire.



Ces découvertes ont même fait ressortir une notion qu'on connaissait depuis longtemps mais dont on sous-estimait l'importance: la taille des planètes. En effet, ce qui caractérise avant tout une planète, c'est sa taille. Tout est une question de taille... et de masse car, comme on le verra, les deux sont liées.

Bien sûr, nous l'avons déjà remarqué à travers le Système solaire. Ainsi, les quatre petites planètes qui gravitent près du Soleil sont des astres rocheux, tandis que les quatre autres

planètes sont des astres gazeux. Or, c'est essentiellement la taille et la masse de ces astres qui gouvernent leur état.

De surcroît, les planètes rocheuses doivent posséder une certaine taille pour être entourées d'une couche de gaz – d'une atmosphère. C'est le cas de la Terre et de Vénus, qui font une dizaine de milliers de kilomètres de diamètre. Par contre, Mercure (et la Lune) – dont la taille n'est que de quelques milliers de kilomètres seulement – sont trop petites pour posséder une atmosphère, tandis que Mars (avec ses 6500 km) est à la limite.

La raison qui explique la différence entre les géantes gazeuses et les planètes rocheuses (avec ou sans atmosphère), c'est que leur taille sous-entend une certaine force de gravité. Ainsi, la Terre et Vénus possèdent une

## Les différentes sortes d'astres du Système solaire

Planète	Diamètre	Gravité (Terre = 1)	Masse (Terre = 1)	Densité (Terre = 1)	Type d'astre
Soleil	1 382 684 km	28	333 000	0,26	Étoile
Jupiter	142 984 km	2,4	318	0,24	Géante gazeuse
Saturne	120 536 km	1,1	95	0,12	Géante gazeuse
Uranus	51 118 km	0,9	14,6	0,23	Géante gazeuse
Terre	12 756 km	1	1	1	Planète rocheuse
Mars	6 792 km	0,4	0,1	0,71	Planète rocheuse
Titan	5 150 km				
Mercurure	4 878 km	0,4	0,06	0,98	Planète rocheuse
Lune	3 475 km	0,2	0,01	0,61	Planète rocheuse
Europe	3 122 km				Astre de glace
Pluton	2 370 km	0,07	0,002	0,38	Planète naine
Cérès	952 km	0,03			Astéroïde
Encelade	504 km	0,00			Astre de glace
Halley	11 km	0,000			Comète
Tchouri	-6 x -2 km	0,000		0,96	Comète
Arrokoth (Ultima Thulé)	38 x 18 x 10 km	0,000			Planétésimal

force d'attraction suffisante pour retenir autour d'elles une bonne couche de gaz, tandis que Mercure et la Lune en sont incapables. De même, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune possèdent une force de gravité si puissante que celles-ci sont capables de maintenir une immense quantité de gaz pour en faire des géantes gazeuses.

Par ailleurs, on observe aussi au sein du Système solaire qu'il faut mesurer environ un millier de kilomètres pour être un astre de forme sphérique, tandis que plus on s'éloigne de cette taille, plus l'astre prendra la forme quelconque d'une roche, et même dans certains cas, très allongée ou aux formes bizarres.



Astéroïdes aux formes quelconques.

C'est ainsi que dans notre Système solaire, on observe trois grandes familles d'astres (en termes de taille): les astres de moins de 13 000 kilomètres (la Terre en descendant jusqu'aux astéroïdes); les astres mesurant quelques dizaines de milliers de kilomètres (d'Uranus à Jupiter), ainsi que le Soleil (plus d'un million de kilomètres de diamètre).

À remarquer cependant le grand écart qui existe entre la Terre et le duo Uranus et Neptune. Si on prend la taille de la Terre comme unité de mesure, on constate qu'Uranus et Neptune ont près de quatre fois cette taille. On n'a donc pas dans notre Système solaire des planètes qui font quelque chose comme deux à trois fois la taille de la Terre.



Entre la plus grosse planète rocheuse et les plus petites géantes gazeuses, il existe un grand écart de taille.

## Des planètes à faire rêver...

Or, parmi les milliers d'exoplanètes qu'on a repérées, on a découvert qu'il s'agit là de catégories fort intéressantes – ce à quoi on n'avait pas songé à l'époque où on estimait que nous étions le modèle bien ordonné à suivre. Or, a-t-on réalisé, il s'agit là d'astres dont la taille fait toute une différence.

C'est ainsi qu'il existe une catégorie captivante de planètes, qui font environ deux fois la taille de la Terre. Étant donné la force de gravité que génèrent ces planètes, elles sont entourées par une immense quantité d'eau... c'est-à-dire

par un extraordinaire océan.

On sait que la Terre est recouverte aux deux-tiers par des océans. Mais il s'agit d'océans qui n'ont que quelques kilomètres

d'épaisseur – tout au plus une dizaine. Imaginez maintenant des planètes entourées par un seul océan... qui fait plusieurs *centaines* de kilomètres d'épaisseur! Cet océan est si imposant qu'on imagine qu'aucun continent ni île ne peuvent exister à la surface de telles planètes. (Du moins, tel qu'on le conçoit à l'image de la Terre.) Ce sont ce qu'on appelle des *planètes-océan*.<sup>14</sup>

Or, ces planètes ont tout pour nous faire rêver. En nous basant sur l'exemple de la Terre, on sait que la vie est apparue assez rapidement dans nos océans et qu'elle y est demeurée

durant trois milliards d'années, avant de s'aventurer sur la terre ferme. Que peut-on imaginer qu'il pourrait se passer sur des planètes de l'âge de la Terre mais entourée de centaines de kilomètres d'eau? Ne peut-on pas envisager qu'une vie extraordinairement riche pourrait s'y être développée... jusqu'à atteindre un stade très avancée d'évolution? Peut-on même imaginer des planètes habitées par des êtres aussi intelligents que nous... sinon même par des civilisations évoluées? Il s'agirait bien sûr d'êtres aquatiques fondamentalement différents de nous.

Or, des planètes-océan, on en a repéré des centaines et il en existe sans

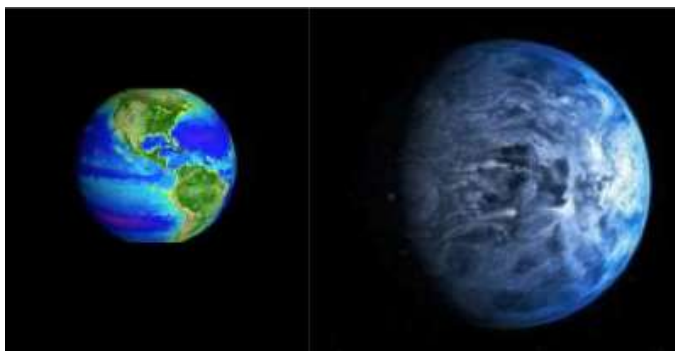
doute des milliards dans notre galaxie. Il doit s'agir de mondes fascinants à explorer, des planètes où on a toutes les raisons de penser que la vie y abonde. Mais de quelle

sorte de vie? Voilà qui laisse songeur...

Domage qu'il n'y ait pas eu une planète-océan à la place, disons, de Mars ou de Vénus, car cela aurait radicalement influencé notre façon de voir les choses.<sup>15</sup>

## Et encore plus bizarre...

Ajoutons qu'entre la Terre, qui possède de minces océans, et des planètes entourées par des centaines de kilomètres d'eau, il existe une foule de possibilités. Entre autres, des planètes pourraient posséder d'imposants océans, faisant quelques dizaines de

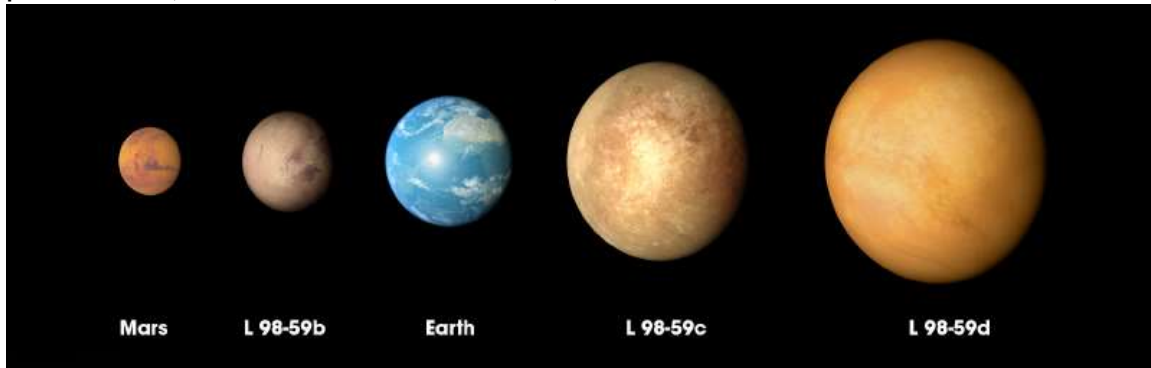


La Terre recouverte au deux-tiers d'eau et une planète océan, deux fois plus grosse, entièrement recouverte d'eau.

kilomètres d'épaisseur mais en étant également dotées d'îles et de continents. Quel genre de vie pourrait-on trouver sur de telles planètes?

D'autre part, il pourrait exister des planètes où, dans certaines conditions,

l'eau et l'atmosphère gazeuse se trouvent mélangées, pour former une sorte de soupe très favorable à la vie. On peut ainsi imaginer des mondes dotés d'une abondante vie... mais extraordinairement différente de la nôtre.



Quelques exemples d'exoplanètes, parmi des milliers, dont la taille se compare à la Terre.

## IV – Les superterres

Que se passe-t-il sur une planète légèrement plus grande ou plus massive que la Terre, sur une planète qui, disons, serait 5, 10 ou 20% plus grosse? Voilà qui ouvre la porte à de fascinantes perspectives.

Sur de telles planètes, la force de gravité serait légèrement plus élevée que celle que nous subissons ici sur Terre. (N'oublions pas que la force de gravité est fonction de la masse totale de la planète.) La question se pose donc: quel impact, sur le développement de la vie terrestre aurait eu une force de gravité de 10% plus intense que celle qu'on connaît? Cela aurait-il «tout changé» ou peu de choses? Si on a toutes les raisons d'estimer qu'une force de gravité légèrement plus intense n'aurait en rien entravé le développement de la vie, on est par contre incapable d'imaginer les conséquences qu'aurait eu cette différence sur les milliards d'années de l'évolution de la vie terrestre. (De même si la force de gravité avait été légèrement plus faible...)

### Des conséquences très favorables?

On sait par contre que plus une planète est grosse, plus l'eau s'y trouve en quantité. On peut donc imaginer qu'une planète 10% plus grosse que la Terre risque fort de contenir davantage d'eau - peut-être deux ou trois fois plus que ce qu'on retrouve sur Terre. Encore là, quelles conséquences cette abondance d'eau aurait-elle eu sur le développement de la vie? L'eau facilitant le développement de la vie, on peut anticiper des conséquences très favorables!

On qualifie parfois les planètes un peu plus grosses que la nôtre de superterres. Cependant, cette appellation prête souvent à confusion. Comme le

relate si justement Wikipédia: «Dans les médias, la présentation des super-terres est souvent erronée, les confondant avec des planètes qui pourraient abriter une forme de vie ou possédant à sa surface des conditions proches de celles de la Terre, ce qui n'est pas le cas pour la grande majorité d'entre elles.»<sup>16</sup> Super-terre ne signifie en effet pas quelque chose comme «des Terre encore plus fabuleuses que la nôtre» mais simplement une planète un peu plus grosse. Selon certaines définitions, la taille ou la masse des superterres serait comprise entre une et deux fois celle de notre planète - soit

des planètes légèrement différentes à la nôtre jusqu'aux planètes-océan.

### Des catégories bien futiles

Notons au passage que nous aimons bien créer des catégories, des boîtes dans lesquelles enfermer nos choses. On a ainsi jadis créé deux grandes catégories de planètes mais voilà que la Nature, elle, n'a que faire de nos boîtes, comme nous le montre la découverte de milliers d'exoplanètes.



On a découvert un très vaste éventail de planètes, des plus petites que la Terre jusqu'à des géantes nettement plus grosses que Jupiter et, entre les deux, toute la gamme des tailles.

En réalité, il existe toute la gamme des astres, des plus petits astéroïdes jusqu'aux étoiles mille fois plus grosses que le Soleil. Et à l'échelle de notre galaxie, on obtient un éventail continu d'astres, contrairement à ce qu'on retrouve dans le Système solaire. C'est dire que chercher à classer des planètes en les plaçant dans des boîtes,

c'est un exercice aussi périlleux que futile.

### Ni trop proches ni trop loin

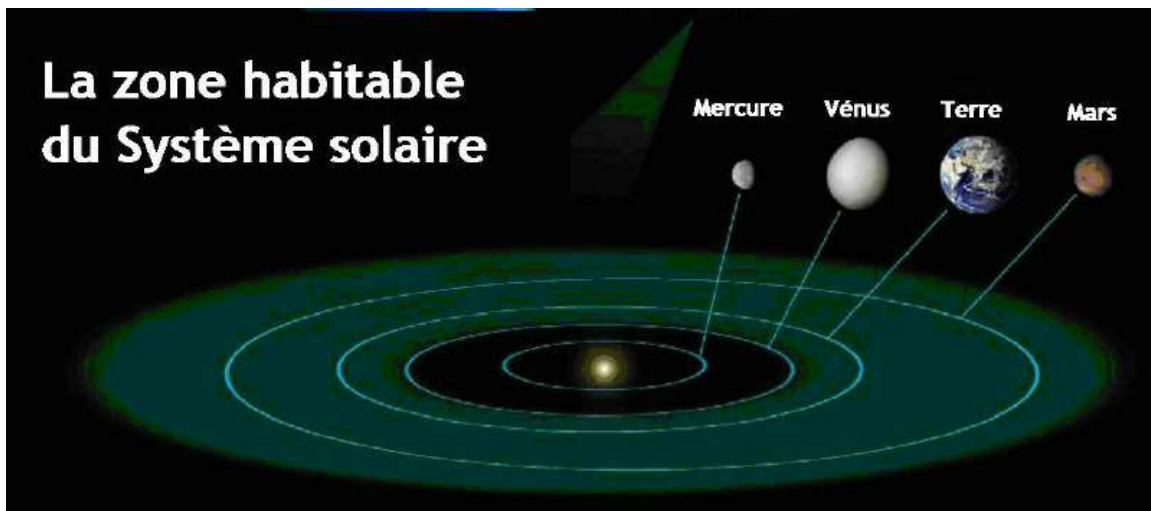
Par-delà la taille, on doit aussi prendre en compte d'autres facteurs importants, à commencer par la distance à laquelle gravitent les planètes autour

de leur étoile. En effet, des planètes de même taille seront très différentes selon qu'elles orbitent très proche de leur étoile ou très loin. Dans le premier cas, elles sont soumises à une chaleur intense, tandis que dans le second cas, elles sont plongées dans un froid abyssal. Et bien entendu, il existe une distance particulièrement intéressante où il fait ni trop chaud ni trop froid.

Cette distance tempérée est dite la *zone habitable*<sup>17</sup> autour d'une étoile. Il s'agit de la distance où l'eau à la surface d'une planète peut être liquide.

Dans le cas de notre Système solaire, la zone habitable s'étend entre 100 et 250 millions de kilomètres environ, soit là où gravitent Vénus, la Terre et Mars.

Il va sans dire que les planètes que nous venons d'évoquer se trouvent en zone habitable de leur étoile, c'est-à-dire qu'une planète de taille océan qui se trouve trop proche de son étoile ou trop distante n'aura pas à sa surface un bel océan d'eau liquide. De même pour les super-terres qui, trop proches ou trop loin de leur étoile, n'offrent pas les conditions propices à la vie.



Mais où se situent au juste les limites de la zone habitable autour d'une étoile? C'est une question chaudement débattue par les spécialistes puisqu'une fois de plus, si la situation semble assez simple dans notre Système solaire, elle se complique lorsqu'on explore plus à fond le domaine des exoplanètes.

L'un des facteurs qui vient compliquer les choses, c'est la nature même de l'étoile autour de laquelle gravitent des planètes. Tel que mentionné plus haut, nous avons la chance de vivre autour d'une belle grosse étoile stable.

Mais le Soleil fait partie d'une classe minoritaire. En grande majorité, les étoiles sont beaucoup plus petites que lui. Par conséquent, la zone habitable est plus proche et plus étroite autour de ces petites étoiles. En outre, nombre d'étoiles sont instables et émettent d'intenses soubresauts de radiations nocives. Là encore, les spécialistes débattent d'un certain nombre de facteurs à prendre en compte.

Une autre particularité qui distingue le Soleil de la grande majorité des autres étoiles est le fait qu'il s'agit

d'une étoile solitaire, tandis que pour la plupart, les étoiles se tiennent par deux, par trois ou davantage. Pendant longtemps, on s'est d'ailleurs demandé si la présence de plus d'une étoile dans un système n'allait pas entraver la formation des planètes. Or, on sait à présent que ce n'est pas le cas. Toutefois, la présence de plusieurs étoiles au sein

d'un même système complique la notion de zone habitable.

Comme quoi rien n'est jamais simple lorsqu'on s'aventure hors de notre Système solaire, alors que notre conception de système planétaire bien ordonné vole en éclat!



Quelques-unes des planètes dont la taille et la distance à laquelle elles se trouvent de leur étoile les rendent potentiellement habitables.

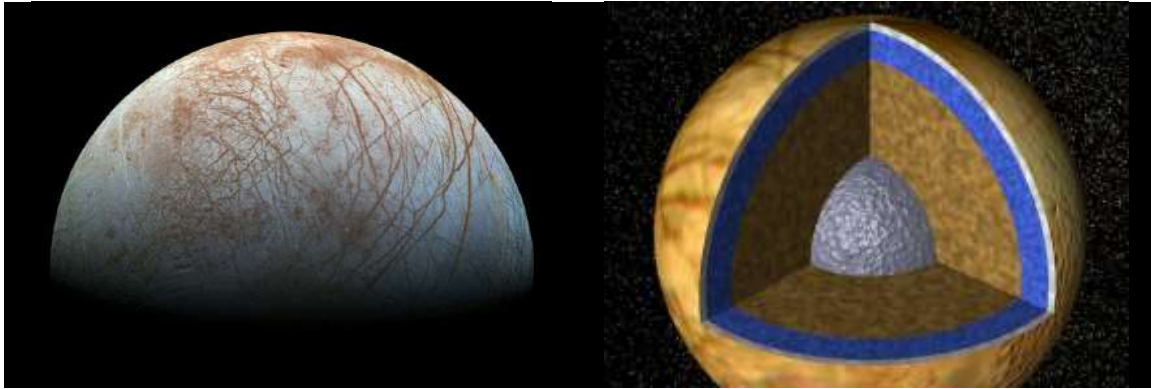
## V – Des microterres?

On a longtemps cru que la vie ne pourrait exister que sur des planètes rocheuses de la taille de la Terre circulant dans la zone habitable de leur étoile. À la limite, une planète aussi petite que Mars (une demi-Terre) pourrait aussi être hospitalière. Mais voilà qu'avec les plus récentes recherches menées auprès de Jupiter et de Saturne, on a mis au jour une nouvelle classe de planètes potentiellement habitables. C'est entre autres le cas d'Europe et d'Encelade, deux satellites naturels de ces géantes gazeuses.

Europe est un astre de trois mille kilomètres de diamètre où la température de surface est au maximum de  $-150^{\circ}\text{C}$ , tandis qu'Encelade est six fois plus petit!<sup>18</sup> Or, Europe serait entouré d'une couche de glace d'une cinquantaine de kilomètres d'épaisseur sous laquelle existerait un océan de 90 kilomètres d'épaisseur.<sup>19</sup> (Rappelons-nous que nos océans ne dépassent pas la di-

zaine de kilomètres de profondeur.) Encelade présente des caractéristiques semblables à Europe.<sup>20</sup> Il s'agit en fait d'une nouvelle catégorie de planètes: des petites planètes où abondent l'eau et la glace.

Cette découverte est renversante puisque ces satellites naturels se trouvent si loin du Soleil – bien au-delà de la zone habitable – qu'on ne pouvait



La surface d'Europe est recouverte d'une épaisse couche de glace craquelée. Sous cette couche blanche (illustration de droite) se trouverait un imposant océan (en bleu).

autrefois s'attendre à y dénicher des possibilités de vie. Or, la présence d'importants océans laisse présager qu'il s'agit là de milieux favorables à la vie... même si cela reste à confirmer.

### Les fabuleuses planètes du système TRAPPIST-1

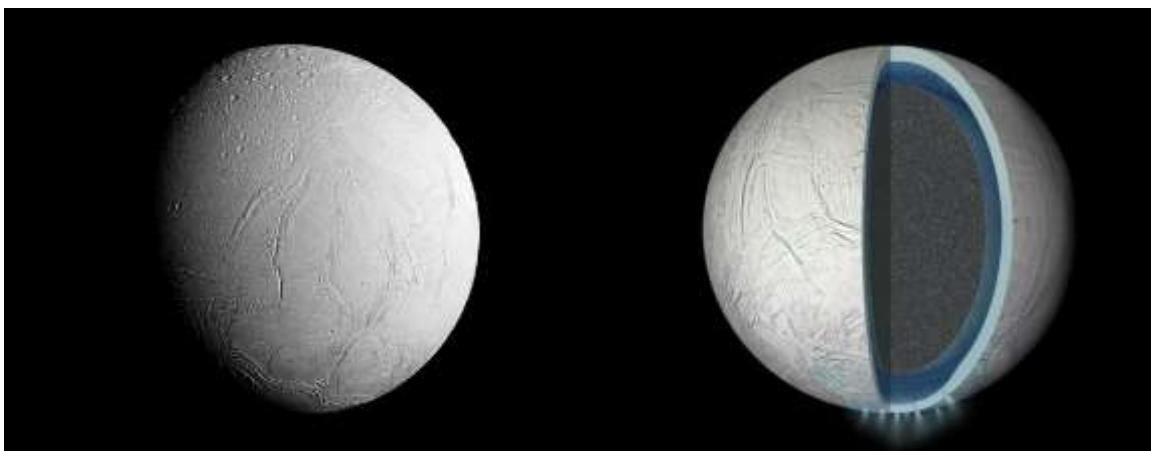
Et voilà qu'une équipe de chercheurs de la NASA vient de franchir un pas de plus: selon eux, des *milliards* de petites planètes semblables à Europe et à Encelade pourraient exister à travers la galaxie!<sup>21</sup>

Lynnae Quick, titulaire de cette équipe, estime en effet que quantité

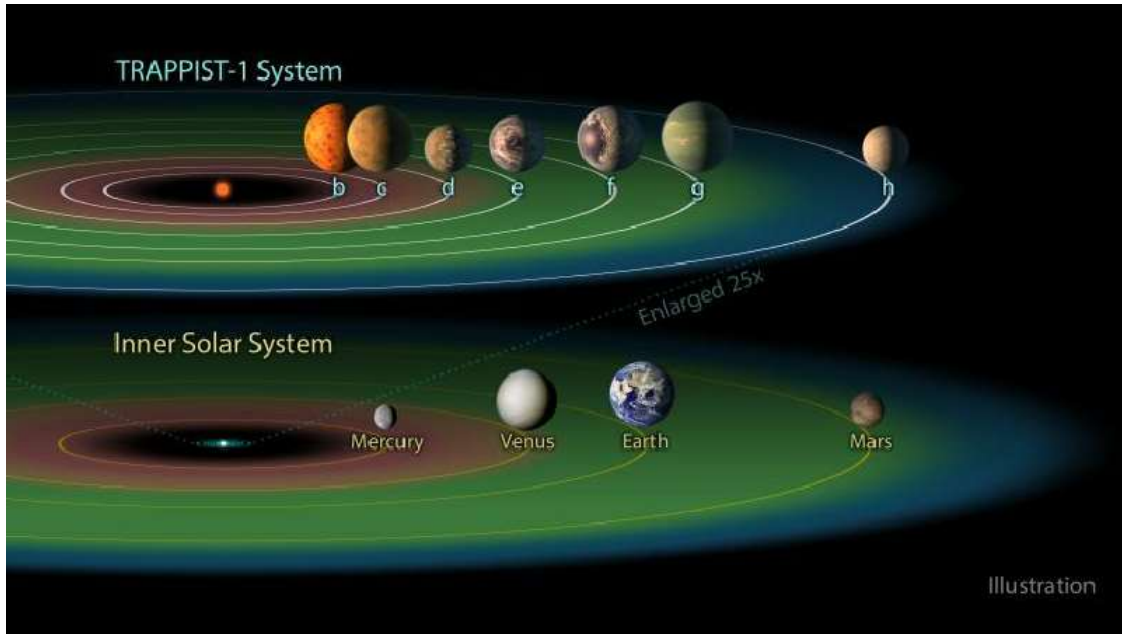
de planètes fort différentes de la Terre pourraient être néanmoins hospitalières. Elle cite entre autre le cas fascinant du système planétaire TRAPPIST-1, dont la découverte en 2017 a fait sensation.<sup>22</sup>

Cette année-là, la NASA a annoncé avoir repéré un ensemble de sept planètes qui s'apparentent beaucoup à la Terre et baptisé TRAPPIST-1.<sup>23</sup>

Ce système est constitué d'au moins sept planètes de la taille de la Terre alors que trois d'entre elles se trouveraient juste à la bonne distance de l'étoile pour que l'eau liquide puisse exister à leur surface. Il s'agit de planètes rocheuses susceptibles de receler de l'eau liquide en surface.



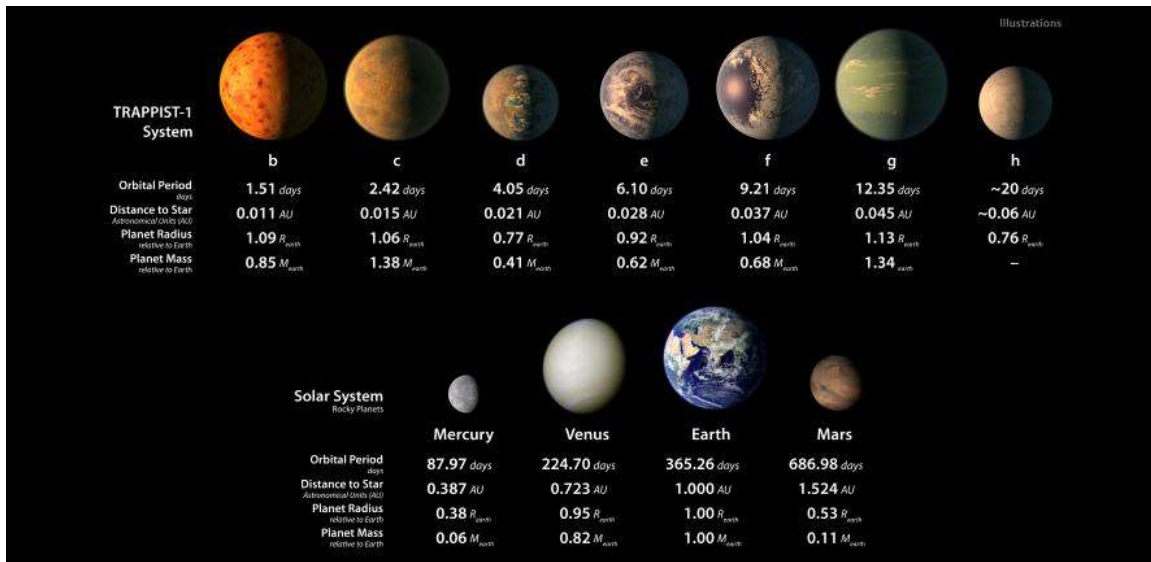
Comme Europe, Encelade est entouré d'un immense océan, sous une épaisse couche de glace. Pourtant, cette lune de Saturne est six fois plus petite que sa consœur.



Comparaison du système TRAPPIST-1 (en haut) avec notre Système solaire. Alors que le nôtre comprend quatre planètes rocheuses, TRAPPIST-1 en compte au moins sept.

Mais TRAPPIST-1 est néanmoins extrêmement différent du nôtre. D'abord, l'étoile au centre de ce système planétaire est minuscule (un peu plus grosse que Jupiter); c'est une naine froide<sup>24</sup> qui a peu en commun avec notre Soleil. En outre, les sept planètes gravitent vingt fois plus proche

de leur étoile que ne le fait la Terre; elles en font le tour en quelques jours seulement. Et alors que Mercure, Vénus, Terre et Mars sont distantes de centaines de millions de kilomètres les unes des autres, les distances séparant les TRAPPIST-1 sont de quelques millions de kilomètres tout au plus.



Comparaison des sept planètes entourant l'étoile TRAPPIST-1a avec les quatre planètes rocheuses du Système solaire.

Enfin, ces planètes comportent un sérieux écueil à la vie; il semble bien que chacune d'elles présente toujours la même face à son étoile. C'est dire qu'il fait toujours jour, et probablement chaud, sur la face constamment éclairée... et toujours nuit et froid, sur la face perpétuellement opposée à l'étoile. Si certaines de ces planètes sont dotées d'atmosphère (ce qui reste à voir), il doit par conséquent y régner des conditions météo extrêmes... comme on ne peut en imaginer ici sur Terre.

Néanmoins, Lynnae Quick s'est inspirée des exemples d'Europe, d'Encelade et de TRAPPIST-1 pour imaginer une nouvelle catégorie de petites planètes étonnamment habitables, il s'agit de planètes qu'on pourrait qualifier de microterres.

Elle estime ainsi que plus du quart des microterres que son équipe a étudiées pourrait être entouré d'un important océan (à l'instar d'Europe et d'Encelade).

C'est là une hypothèse intéressante puisque, comme le faisait remarquer sa collègue Aki Roberge, nos recherches sur les exoplanètes habitables se concentrent habituellement sur des planètes semblables à la nôtre. Or, même dans notre Système solaire, il y a semble-t-il de petites planètes très distantes du Soleil où la vie pourrait être possible.

Comme quoi, nos modèles de ce qu'on devrait retrouver autour des autres étoiles et sur les autres planètes sont toujours à remettre en question.

Cette affiche de la NASA (ci-contre) fait ressortir neuf petits mondes de glace qu'on connaît encore mal et qui ont beaucoup à nous apprendre à propos de nos recherches de planètes habitables.





## Conclusion: l'abîme d'un paradoxe

Nous vivons à une époque remarquable de l'histoire de l'humanité, celle où pour la première fois, nous avons les capacités d'explorer des planètes qui pourraient abriter de la vie. Peut-être qu'on se rappellera de notre époque comme de celle où on aura découvert les premières traces de vie extraterrestre. Nul ne sait quand viendra ce jour mais tout semble indiquer que celui-ci n'est pas si lointain.

Mais quelle sorte de vie découvrirons-nous? Bien sûr, on pense immédiatement à des formes de vie qui nous sont familières, en particulier à des humanoïdes avec qui nous pourrions échanger. C'est du moins ce à quoi on rêve.

Pendant, les recherches d'exoplanètes que nous menons depuis plus de 150 ans – et tout particulièrement les résultats obtenus depuis vingt-cinq ans – nous servent une grande leçon, une leçon d'humilité pourrait-on dire.

Comme nous l'avons rapporté, au point de départ, on s'attendait à trouver des systèmes planétaires semblables au nôtre, notre Système solaire nous paraissant être le modèle logique et bien ordonné à suivre. Mais voici qu'on trouve de tout – y compris des planètes aussi invraisemblables que des Jupiter chaudes – mais rien qui ressemble à ce qui nous est familier.

Par contre, on a repéré une abondance de planètes nettement plus grande que ce à quoi on s'attendait. Il y a vingt-cinq ans, on se demandait si

la présence de planètes autour des étoiles était quelque chose de fréquent ou de plutôt rare. On sait à présent que la grande majorité des étoiles sont entourées de planètes. On a en outre repéré une multitude de planètes fort différentes de celles qu'on pouvait imaginer, et quantité de planètes où la vie pourrait exister. Voilà donc que notre espoir de trouver de la vie extraterrestre a fait un bond prodigieux. Dans les faits, on n'aurait pas pu rêver de mieux!

Mais dans bien des cas, ces planètes présentent des conditions d'habitabilité fort différentes de celles qu'on retrouve sur Terre. On n'a qu'à penser aux planètes-océan où il serait très surprenant que la vie n'existe pas. Mais quelle sorte de vie?

Et même dans notre Système solaire, il y a vingt-cinq ans, on n'imaginait pas que la vie puisse exister par-delà Mars. Or, tel que nous l'avons relaté dans notre précédent balado – À l'assaut de la planète Mars – on a tout lieu de croire que la vie est apparue sur Mars (sans toutefois s'y être développée comme ici sur Terre).<sup>25</sup> C'est ainsi qu'on estime possible l'existence de

formes de vie sur des satellites comme Europe et Encelade – quelque chose d'impensable il n'y a pas si longtemps. Mais encore là, il s'agit d'environnements extrêmement différents de celui qui nous a vu naître et prospérer.

Voilà donc que nos vingt-cinq années de découverte d'exoplanètes nous placent devant un paradoxe. On découvre en effet un univers où les exoplanètes abondent, un univers riche d'une variété incroyable de planètes et qui nous offre des possibilités de découvrir quantité de formes de vie. Mais, d'un autre côté, il s'agit d'un univers qui a très peu à voir avec ce qui nous est familier, c'est-à-dire des systèmes planétaires et des planètes semblables à celles qu'on connaît.

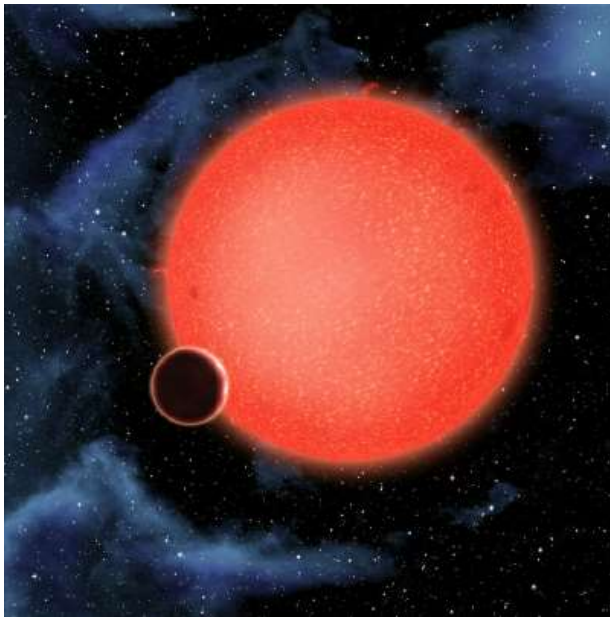
Voilà qui nous mène à deux conclusions logiques. Premièrement, on risque de découvrir tout... sauf ce qu'on cherche et, deuxièmement, si la vie abonde dans notre galaxie, il se pourrait bien que nous soyons quasiment les seuls de notre genre. Ainsi, à la question «Sommes-nous seuls dans l'Univers?», la réponse pourrait bien être: «Oui, seuls de notre genre mais dans une galaxie où la vie foisonne!»



Dans un ouvrage rédigé en 2013, Claude Lafleur raconte l'extraordinaire aventure scientifique que constitue notre quête de vie dans l'Univers. Ce véritable roman d'aventure est disponible uniquement en format électronique sur Amazon. Il s'agit du Tome 1 et du Tome 2 de *Terres en vue!*



Quelques tableaux d'artiste de mondes à faire rêver



# Les Fascicules de Voyage dans l'espace

<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 1 DESTINATION MARS	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 2 LA LUNE AU TEMPS ÉPARGNOL	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 3 DE LA MIE DANS L'UNIVERS	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 4 VOLKSYMPY ET LE PREMIER LE SYSTÈME SOLAIRE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 5 LES SATELLITES MILITAIRES	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 6 VOYAGE À LA RECHERCHE DE TERRE VOYAGE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 7 PLANÈTES ET ENOCHIMTES
<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 8 VOYAGE, VOYAGE DANS L'ESPACE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 9 DÉCHETS SPATIAUX	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 10 HOMME DANS L'ESPACE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 11 LA VOIE LACTÉE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 12 SOMME JOUR, LES BIEN PROCHAINS	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 13 LE JEU DES DATES	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 14 PLURIFON
<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 15 10 HOMMES SUR LA LUNE (Première partie)	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 16 10 HOMMES SUR LA LUNE (Deuxième partie)	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 17 MARS À BORD DE LA TROISIÈME SÉRIE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 18 UN ALPHABÈTE PLANÉTAIRE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 19 LES EXPÉRIENCES DE LA RECHERCHE DE TERRE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 20 VOYAGE DANS L'ESPACE AU CÉLESTE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 21 MILLEUX, TRACER, L'ASTRONOMIE
<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 22 MYSTÈRE SPATIALISTE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 23 MOEL 1968	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 24 DÉPART LA LUNE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 25 À QUI SERT L'ESPACE?	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 26 ALEXEI LÉONOV	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 27 MILIEUX DE LA CARRIÈRE SPATIALE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 28 MARS, CARRIÈRE SPATIALE ET LA VOIE LACTÉE
<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 29 LA GRANDE PEUR DE 1918	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 30 PRODIGES SPATIAUX	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 31 MARS QU'EST-CE QUE C'EST ?	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 32 MELISSA ET APOLLO 11	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 33 APOLLO 11	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 34 NOTRE HISTOIRE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 35 MÉTÉORITES
<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 36 LES SURPRISES DE L'ÉTÉ 2019	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 37 POURQUOI MARS?	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 38 QUEYTERONOMIE EN 7 JOURS	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 39 L'ASTRONOMIE PAR L'IMAGE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 40 LA LUNE, CETTE INCONNUE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 41 LA GRANDE CARRIÈRE SPATIALE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 42 LA GRANDE CARRIÈRE SPATIALE
<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 43 L'ASTRONOMIE PAR L'IMAGE	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 44 LES GRANDES CARRIÈRES SPATIALES	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 45 LES GRANDES CARRIÈRES SPATIALES	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 46 LES GRANDES CARRIÈRES SPATIALES	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 47 LES GRANDES CARRIÈRES SPATIALES	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 48 LES GRANDES CARRIÈRES SPATIALES	<b>VOYAGE BASS L'ESPACE</b> Épisode 49 LES GRANDES CARRIÈRES SPATIALES

## Pour en savoir plus...

<sup>1</sup> [\*The Nobel Prize in Physics 2019\*](#) de la Fondation Nobel.

<sup>2</sup> Voir [\*The Extrasolar Planets Encyclopaedia\*](#) et le site [Exoplanètes](#).

<sup>3</sup> On mesure la distance nous séparant des étoiles en année-lumière, qui est la distance parcourue par un photon de lumière en une année, à la vitesse de 300 000 km/sec., soit 10 000 milliards de kilomètres. La plus proche étoile est à 4,24 années-lumière, soit à 42 000 milliards de kilomètres, mais la grande majorité des étoiles se trouve à des dizaines, des centaines voir à des milliers d'années-lumière. Le Soleil est quant à lui à seulement 8,2 minutes-lumière de nous (150 millions de kilomètres).

<sup>4</sup> [\*Notre Univers: bizarre, mystérieux... et époustouflant\*](#), Fascicule 35 de *Voyage dans l'espace*, p. 16.

<sup>5</sup> Dans son ouvrage [\*Strange New Worlds\*](#), l'astronome [Ray Jayawardhana](#) rapporte que la première annonce de la présence d'un astre extrasolaire remonte à 1855, autour du duo d'étoiles 70 Ophiuchi.

<sup>6</sup> Voir l'article [51 Pegasi](#) dans Wikipédia.

<sup>7</sup> Jupiter mesure 140 000 kilomètres de diamètre, soit onze fois la Terre, et prend douze ans pour faire le tour du Soleil.

<sup>8</sup> Voir [\*Méthode du Transit\*](#) de l'Institut de recherche sur les exoplanètes, [\*The Transit Method of Detecting Extrasolar Planets\*](#) de la NASA et [\*5 Ways to Find a Planet\*](#) de la NASA.

<sup>9</sup> Voir l'article [\*Méthode des vitesses radiales\*](#) dans Wikipédia, [\*Radial Velocity Detection of Extra-Solar Planetary System\*](#) de la NASA et [\*5 Ways to Find a Planet\*](#) de la NASA.

<sup>10</sup> Voir [\*Vue d'artiste de l'exoplanète 51 Pegasi B\*](#) de l'ESO, l'article [51 Pegasi b](#) dans Wikipédia et [\*51 Pegasi b - NASA Exoplanets\*](#) de la NASA.

<sup>11</sup> Claude Lafleur raconte en détail l'extraordinaire découverte de la première exoplanète, par l'entremise d'entrevues accordées par Didier Queloz et Michel Mayor, dans le tome 2 de son livre [\*Terres en vue!\*](#), chapitre 10.

<sup>12</sup> Voir l'article [Jupiter chaud](#) dans Wikipédia et [\*Hot Jupiter - Exoplanet Exploration\*](#) de la NASA.

<sup>13</sup> NASA, [\*Investigating the Mystery of Migrating 'Hot Jupiters'\*](#), 26 mars 2016.

<sup>14</sup> Voir l'article [Planète-océan](#) dans Wikipédia, [\*Ocean Worlds\*](#) de la NASA et [\*Ocean Worlds\*](#) du JPL.

<sup>15</sup> Imaginons un instant si, à la place de Vénus, il y avait eu une planète deux fois plus grosse que la Terre, une planète entourée d'un océan mesurant de 200 à 300 kilomètres d'épaisseur. Ça aurait été un monde fascinant à explorer, un monde où abonde probablement une riche vie marine. Et de l'«autre côté» de la Terre, il y a Mars, sur laquelle on a longtemps cru qu'il y avait des Martiens constructeurs de canaux et sur laquelle on cherche à présent des traces de vie semblable à ce qu'a été la vie à ses débuts sur Terre.

<sup>16</sup> Voir l'article [Super-Terre](#) dans Wikipédia et [\*Earth and Super-Earth - Exoplanet Exploration\*](#) de la NASA.

---

<sup>17</sup> Voir l'article [Zone habitable](#) dans Wikipédia et [What is the habitable zone?](#) de la NASA.

<sup>18</sup> Voir l'article [Europe \(lune\)](#) dans Wikipédia et [In Depth: Europa](#) de la NASA.

<sup>19</sup> NASA, [Europa: Evidence for an Ocean](#).

<sup>20</sup> Voir l'article [Encelade \(lune\)](#) dans Wikipédia et [In Depth: Enceladus](#) de la NASA.

<sup>21</sup> NASA, [Are Planets with Oceans Common in the Galaxy? It's Likely, NASA Scientists Find](#), 18 juin 2020.

<sup>22</sup> Voir l'article [TRAPPIST-1](#) dans Wikipédia et [All About TRAPPIST-1](#) de la NASA.

<sup>23</sup> TRAPPIST est l'acronyme de *Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope* («Petit télescope dédié aux planètes en transit et aux planétésimaux»). Il s'agit du duo de télescopes installé au Chili par l'Université de Liège et qui a le premier repéré ce système planétaire.

<sup>24</sup> Voir l'article [Naine ultra-froide](#) dans Wikipédia.

<sup>25</sup> Voir aussi le Fascicule 47, [À l'assaut de la planète Mars](#), disponible chez Amazon.