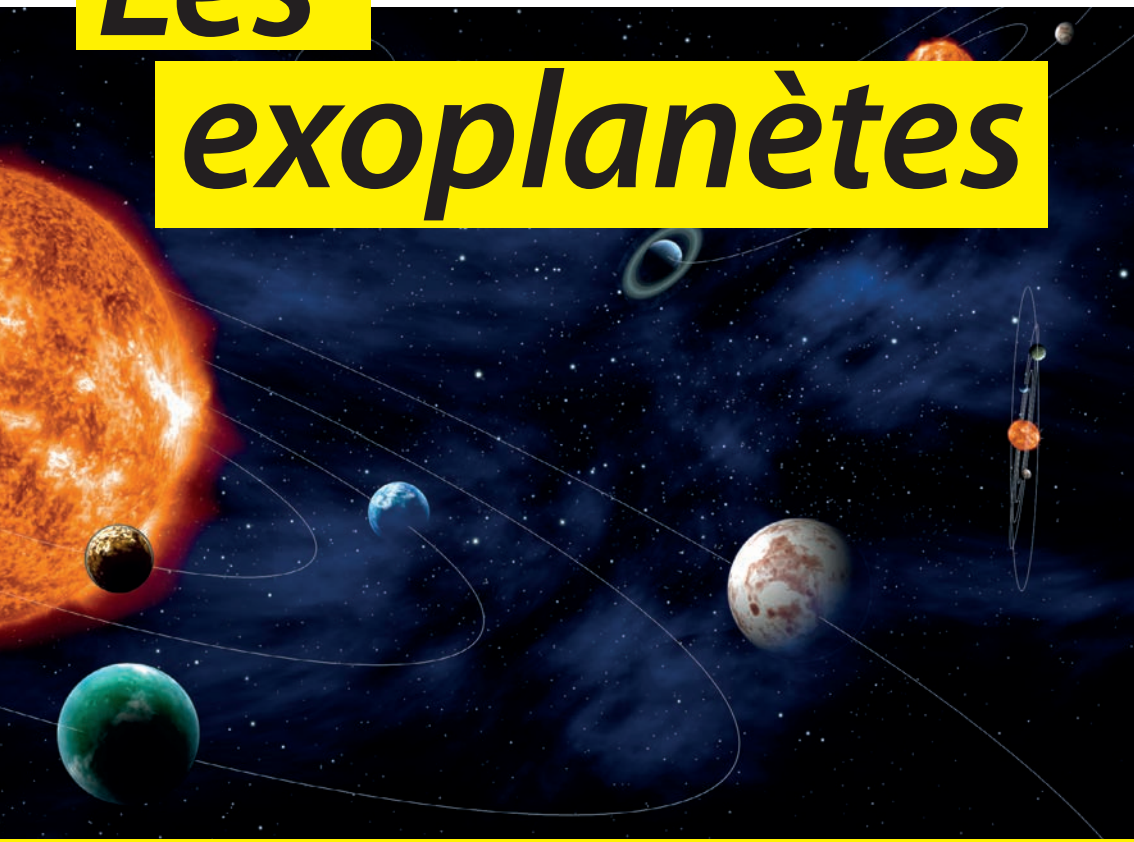
FLAVIEN KIEFER
Préface d'**Alain Lecavelier des Étangs**

Les exoplanètes



À LA RECHERCHE DES NOUVEAUX MONDES

deboeck SUPÉRIEUR

Les exoplanètes

À la recherche des nouveaux mondes

Flavien Kiefer

Les exoplanètes
À la recherche des nouveaux mondes

Préface d'Alain Lecavelier des Étangs

deboeck SUPÉRIEUR

Dans la même collection :

Transition énergétique, Bertrand Cassoret, 160 pages
Les trous noirs. À la poursuite de l'invisible, 2e édition, Alain Riazuelo, 208 pages
Le climat dans tous ses états, Pierre Martin, 192 pages
Pourquoi le nucléaire, Bertrans Barré, 176 pages
Initiation à la physique quantique. La matière et ses phénomènes, Valerio Scarani, 192 pages
L'univers secret de la cryptographie, Gilles Dubertret, 176 pages
La matière noire. Clé de l'Univers ?, Françoise Combes, 192 pages
Constellations et légendes grecques, Marie-Françoise Serre, 224 pages
La météo à l'origine de tous nos maux ?, Jacques Fontan, 160 pages

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web :
www.deboecksuperieur.com

En couverture : Aperçu de la multitude de systèmes planétaires extrasolaires que le photomètre spatial PLATO de l'ESA pourrait permettre de découvrir dés sa mise en route prévue pour 2026. Crédit ESA.

Conception couverture : Primo&Primo
Relecture : Alain Rossignol
Mise en page : SCM, Toulouse

Dépôt légal :
Bibliothèque royale de Belgique : 2019/13647/033
Bibliothèque nationale, Paris : juillet 2019
ISBN : 978-2-8073-1331-6

Tous droits réservés pour tous pays.
Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme ou de quelque manière que ce soit.

© De Boeck Supérieur SA, 2019 – Rue du Bosquet 7, B1348 Louvain-la-Neuve
De Boeck Supérieur – 5 allée de la 2e DB, 75015 Paris

Table des matières

Préface IX
Introduction 1

Chapitre 1
Tour d'horizon : des planètes aux exoplanètes 3
Les premières découvertes : Uranus et Neptune, puis Draugr et Dimidium 3
Les révolutions des exoplanètes : hier, aujourd'hui, demain 7
Quelle idée d'une exoplanète ? 10

Chapitre 2
Des planètes dans le système solaire 13
Typologie du système solaire 13
L'étoile 15
Les petites planètes 17
Les planètes géantes 20
Comparer géantes et petites planètes 22
Les plutoïdes et les satellites naturels : d'autres planètes 23
Les planétoïdes : cent patates ! 25
Planète : une définition 28
De la planète solaire à la planète extrasolaire 29

Chapitre 3
La boîte à outils de l'exoplanétologue 31
Une mallette de professionnel 31
Détecter les mouvements des étoiles 32

L'astrométrie, un outil qui ne tire pas son épingle du jeu 33
Spectroscopie Doppler : l'autre mesure du mouvement stellaire 34
Des ondes, des spectres et des étoiles 35
De l'effet Doppler à la spectroscopie Doppler 38
Une méthode fort adéquate 39
Le spectrographe HARPS 40
La méthode des transits : la chasse aux ombres d'exoplanètes 42
Courbes de transits et rayons planétaires 45
Des problèmes atmosphériques 47
Le photomètre spatial Kepler 48
Observation directe : l'imagerie en optique adaptative 50
Encore et toujours le problème de l'atmosphère... 51
C'est à l'optique de s'adapter... 53
Voir des planètes jeunes 54
SPHERE au Very Large Telescope 55
La relativité générale au service des exoplanètes 58
La microlentille gravitationnelle 59
La voyez-vous ? Elle n'y est plus... 61
Confirmer, valider et caractériser une exoplanète 63
Outils numériques 63
Les outils avancés : analyser plus en profondeur les exoplanètes 65

Chapitre 4

Des exoplanètes comme s'il en pleuvait 67
Près de 4 000 exoplanètes 67
Des biais observationnels 69
Des premières exoplanètes super-bizarres 70
Des orbites extrêmes : polaires, excentriques et courtes périodes 73
Des phénomènes dynamiques entre exoplanètes 77
Y a-t-il des planètes autour de chaque étoile dans le ciel ? 79
Les planètes sont fans de métal 80
Enfin des petites planètes... 81
Systèmes doubles et multiples : une structure différente de celle du système solaire 83
Perspectives de découvertes futures : plus loin, plus petit 87

Les exo-Lunes et la recherche d'anneaux 88
Exocomètes 89

Chapitre 5
Dans la peau d'une exoplanète 93
Caractériser une exoplanète 93
Masse, volume et densité 94
De la densité à la composition globale 96
Atmosphère et océan 99
Dans la peau d'une exoplanète : la modélisation 100
Panorama des exoplanètes 101

Chapitre 6
Une grande variété de mondes 105
Les planètes supergéantes : de Jupiter aux naines brunes 105
Supergéante ou naine brune ? 107
Aspect d'une supergéante 108
Beta Pictoris b 110
Jupiters-chauds : planètes infernales 111
Isis et Osiris 113
Les mini-Neptunes : ces petites planètes-océans 116
GJ1214 b 117
Super-Terres : les super-mondes 118
CoRoT-7b 120
Exo-Terres : les nouveaux mondes 121
Trappist-1 122

Chapitre 7
Mesurer les atmosphères 125
Les indices de leur présence 125
Qu'est-ce qu'une atmosphère ? 126
Des indices à la détection des atmosphères 128
À la recherche de spectres 130
Détection du spectre d'une exoplanète 132
Les phases des exoplanètes et l'atmosphère 135

Chapitre 8

Des atmosphères variées 137
Les ingrédients d'une atmosphère 137
L'exotête dans les nuages... 141
Nuages : les naines brunes d'abord 145
Le fog extrasolaire : des exoplanètes aussi polluées que Londres..... 147
Nuages et brumes : bas les masques !..... 148
La météo des exoplanètes en rotation synchrone..... 149
Des phénomènes hors équilibre 151
Évaporation des exoplanètes chtoniennes 152

Chapitre 9

La vie sur les exoplanètes 155
Le rêve de la vie ailleurs 155
La recherche d'une vie extraterrestre..... 156
Les conditions d'apparition de la vie 158
La zone habitable d'une étoile 161
Zone habitable et habitabilité 166
Biomarqueurs : les traceurs de la vie 169

Chapitre 10

Objectif : exo-Terre habitable..... 171
Mission : exo-Terres 171
Exo-Terres et naines M..... 172
De l'eau sur des exo-Terres ?..... 174
La recherche d'eau et de biomarqueurs dans les exo-Terres avec les futurs télescopes..... 177
Et rejoindre les exo-Terres ?... 181

Table des illustrations 187
Bibliographie..... 191
Index 193

Préface

Les dernières découvertes d'exoplanètes ont fait la une des journaux et ont marqué les esprits. Chaque nouvelle annonce d'une planète « potentiellement habitable » – comme n'oublient jamais de le rappeler les communiqués de la NASA à chaque fois que cela est possible – suscite un vif intérêt. Ces annonces ne sont pas rares, à tel point que l'on se demande parfois quelle est la différence entre une nouvelle planète et celle qui avait été découverte six mois plus tôt qui, elle aussi, avait fait la une.

Force est de constater que, dans ce nouveau champ de l'exploration de l'Univers, les découvertes se font à un rythme soutenu ; et chacune de ces découvertes est excitante. Mais il est facile de s'y perdre. Réalisons-nous que nous, contemporains de ce début du xxi^{e} siècle, nous sommes les premiers humains de l'Histoire pour qui les autres mondes ne sont pas uniquement des concepts d'ordre mythologique, religieux ou philosophique, mais des mondes réels sur lesquelles nous portons notre regard ?

Nous voulons comprendre et les questions se bousculent dans notre esprit. Comment ces planètes sont-elles découvertes ? À quoi ressemblent-elles ? Peut-il y avoir de la vie là-bas ? Pour répondre à ces questions, rien de mieux que le présent ouvrage qui décrit dans des termes accessibles les découvertes les plus récentes sur les exoplanètes. Flavien Kiefer est un expert mondial des exocomètes (les comètes en orbite dans les systèmes planétaires extrasolaires). Il expose ici les toutes dernières connaissances sur un des sujets majeurs de l'astrophysique moderne.

Nous pourrions être tentés de croire que l'objectif premier des recherches sur les exoplanètes est de trouver une planète jumelle de la Terre. Pourtant, à y regarder de plus près, ce n'est que rarement la res-

semblance avec la Terre qui fait l'intérêt des nouvelles planètes découvertes, mais au contraire tout ce qui les différencie de la Terre ou de celles du Système solaire. Car, comme l'a justement rappelé Flavien Kiefer dans le sous-titre de son livre, la recherche des exoplanètes est le plus souvent la recherche de nouveaux mondes, mondes différents de ceux que nous connaissons. En effet, grâce à ce livre, compendium remarquable de l'ensemble de nos connaissances sur les exoplanètes, le lecteur comprendra concrètement ce qu'Épicure écrivait dans sa lettre à Hérodote : « Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents. »

Alain Lecavelier des Étangs*

* Alain Lecavelier des Étangs est ingénieur diplômé de l'École polytechnique et docteur en astrophysique. Il est directeur de recherche CNRS rattaché à l'Institut d'astrophysique de Paris et ancien président de la commission « exoplanètes » de l'Union astronomique internationale. Il est un expert mondial de la détection des atmosphères exoplanétaires.

Introduction

Sommes-nous seuls dans l'Univers ? La Terre et le système solaire sont-ils exceptionnels et uniques ? Pourrait-on trouver des conditions de vie favorables et d'autres formes de vie ailleurs ?

Il y a plusieurs milliers d'années, le regard de nos aïeux se portait vers le ciel et n'y voyait que des points scintillants, fixes pour la plupart, sur la voûte céleste. Certains de ces astres semblaient toutefois changer de place dans le ciel nuit après nuit, et furent baptisés *planètes* – littéralement « astres errants » en grec ancien.

Personne n'avait la moindre idée de ce que ces points fixes et ces astres errants pouvaient réellement être. Pouvait-on seulement imaginer le Soleil comme l'un de ces points fixes, la Terre et les autres planètes tournant autour de lui ? Ce n'est qu'à partir du xvi^{e} et xvii^{e} siècles que des savants tels que Nicolas Copernic, Giordano Bruno et Galileo Galilei (aussi connu sous le nom de Galilée) osent prouver scientifiquement la pertinence de l'héliocentrisme : le Soleil et non la Terre est au centre du système solaire.

Il est bien connu que Galilée fut sévèrement condamné pour cela par l'Église catholique. Il est peut-être moins connu que Giordano Bruno est allé beaucoup plus loin dans son raisonnement. Comme l'avait déjà suggéré Epicure en – 300 av. JC, il a émis l'idée que l'Univers était infini, sans centre et peuplé d'une quantité inombrable de mondes. Jugé athée et hérétique par l'Inquisition – également pour divers autres motifs, comme son attrait pour la magie –, Bruno est malheureusement condamné à être brûlé vif à Rome en 1600.*

* La question de la place de la Terre au sein du système solaire ne fut toutefois pas mentionnée dans le procès-verbal...

Mais Bruno avait osé avancer une idée fort intéressante : que des choses existeraient, en réalité, au-delà de notre perception.

Cette proposition audacieuse correspond au *principe de réalisme* qui sous-tend la philosophie de la science. L'Univers existait bel et bien avant l'humain et existera bien après lui. On peut aujourd'hui voir en dehors de la Voie lactée et constater que l'Univers existe depuis 13,8 milliards d'années. À tout instant, nous recevons une lumière qui a été relâchée dans notre direction par de la matière située à 13,8 milliards d'années-lumière de nous – 1 année-lumière équivaut à 9 461 milliards de km – et qui voyage depuis la formation de l'Univers. Ainsi, la première image de l'Univers, le fond diffus cosmologique, nous provient de ces régions éloignées.

Si, à l'instant même, des milliers d'astrophysiciens à travers le monde, qu'ils soient doctorant(e)s, post-doctorant(e)s, chercheur(e)s ou professeur(e)s, recherchent des planètes en dehors du système solaire, c'est parce qu'il n'y a aucune raison valable de ne pas en chercher. Dès lors qu'il est entendu que l'humain et sa Terre ne sont pas au centre de l'Univers, mais ne sont que de minuscules grains de poussière dans le cosmos, il faut intégrer le concept de l'existence d'autres mondes et d'autres formes de vie – peut-être d'autres humains – et commencer à les chercher.

J'ai tenu à me focaliser dans ce livre sur la diversité des mondes extrasolaires et à vous montrer à quel point avec nos « simples » moyens instrumentaux terriens, nous avons pu déjà décrire en l'espace de vingt-sept ans, depuis la première découverte d'une exoplanète en 1992, une multitude de mondes nouveaux. Décrire leur atmosphère, parfois même leur couleur ou encore leur météorologie, la composition chimique en leur cœur, l'aspect possible de leur surface… Mais il reste tant à faire et à découvrir. Nous avons découvert des exoplanètes extrêmement chaudes, d'autres extrêmement froides, recouvertes de lave ou bien de glace… Quelles surprises nous réserve encore l'Univers ?

Comme l'écrivait Épicure dans sa lettre à Hérodote il y a plus de 2 300 ans, « *ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'Univers. Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents* ».

1 Tour d'horizon : des planètes aux exoplanètes

Les premières découvertes : Uranus et Neptune, puis Draugr et Dimidium

Bien avant de se lancer à corps perdu dans la recherche de planètes extrasolaires à travers le cosmos, la question s'est d'abord posée de l'existence de planètes nouvelles et inconnues dans notre propre système solaire. Imaginez-vous que Uranus n'a été découverte que le 13 mars 1781 par William Herschel et Neptune, le 23 septembre 1846, par Urbain Le Verrier ?

Alors qu'il recherchait des étoiles doubles dans le jardin de sa maison à Bath en Angleterre, William Herschel découvre par hasard un objet en mouvement derrière Saturne. En utilisant un grossissement plus important, il s'aperçoit que l'objet grossit, et qu'il s'agit donc d'un objet à l'intérieur du système solaire. Il émet l'hypothèse d'une planète ou d'une comète. On sait aujourd'hui qu'il s'agissait bien de la planète géante glacée Uranus.

Mais la découverte la plus incroyable a été celle de Neptune. Dès 1781, Anders J. Lexell avance l'idée que des irrégularités dans l'orbite d'Uranus sont dues à la présence de planètes lointaines cachées dans le système solaire. Plusieurs scientifiques étudient le problème en tentant de contraindre la masse et la position de la planète perturbatrice cachée à partir de la modélisation des irrégularités d'Uranus. Il s'agit de John

C. Adams, Alexis Bouvard, puis enfin d'Urbain Le Verrier. Ce dernier est mandaté par François Arago pour résoudre ce problème à la suite de la mort de Bouvard. Le Verrier résout le problème mathématique et annonce que la planète cachée doit être visible, au cours du mois de septembre 1846, en une position précise au degré près dans le ciel.

Johann G. Galle à l'observatoire de Berlin détecte Neptune le 23 septembre 1846 à la position exacte indiquée par Le Verrier.

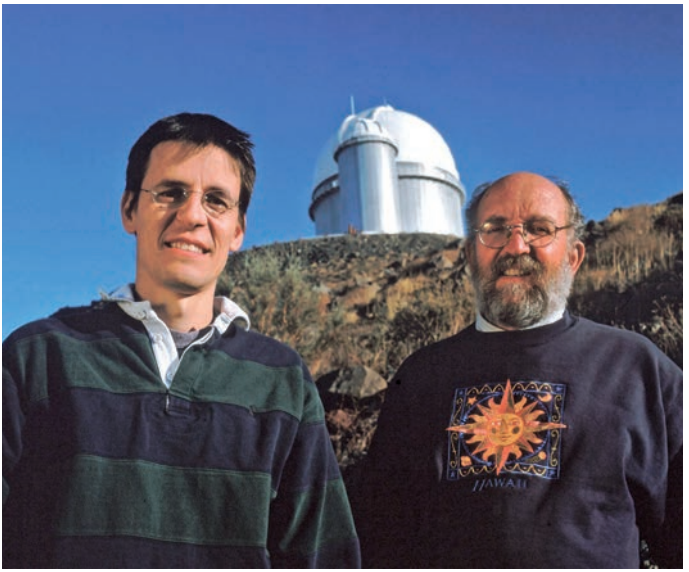
Il faut retenir de ces belles découvertes qu'il n'a jamais été – et ne doit jamais être – exclu que d'autres planètes existent – y compris dans le système solaire – quand bien même on ne les voit pas à l'œil nu. Plus important encore, l'astrométrie et la modélisation mathématique du mouvement des astres ont permis de prédire avec exactitude l'existence de Neptune. Les lois mathématiques de la physique établies par l'Homme sont donc pertinentes et peuvent nous aider à déceler et à décrire des choses qu'on ne peut pas percevoir *a priori*, mais dont les effets sont observables et mesurables.

D'autres planètes cachées ont été recherchées depuis lors dans le système solaire, sans succès. Il avait ainsi été proposé que la trajectoire particulière de Mercure et l'avance du périhélie de son orbite avaient pour origine l'interaction avec une planète intérieure à son orbite. Ces modèles ne fonctionnaient pas parfaitement bien, et surtout la prise en compte de la relativité générale d'Einstein a résolu ce problème. Aujourd'hui encore, on recherche la « Planète 9 », une planète géante au-delà de l'orbite de Pluton, qui pourrait fort bien expliquer les trajectoires d'astéroïdes dans la ceinture de Kuiper…

Mais notre dévolu se jette plus volontiers aujourd'hui sur ces contrées lointaines de l'*outer-space*. Plus loin de nous, mais plus proches de nos rêves science-fictifs. Aussi sérieux que puisse paraître cet astronome qui recherche froidement dans ses calculs des indices de la présence d'une perturbation planétaire autour d'une étoile au nom ressemblant à un numéro de téléphone, ce scientifique rêve. Il rêve de ce futur monde habitable ou peut-être de cette lune perdue autour d'une exo-Jupiter géante, ou peut-être encore de millions d'exocomètes pleuvant sur leur étoile. Et ce rêve est devenu réalité le jour où, le 6 octobre 1995 à Florence en Italie, deux astronomes suisses, Michel Mayor et Didier Quéloz, ont dévoilé leur découverte de l'exo-Jupiter Dimidium – aussi nommé 51 Pegasi b – autour d'une étoile jumelle du Soleil.

Cette réalisation n'est pas sortie d'un chapeau. Elle résulte d'un travail acharné et d'une volonté sans faille de toute une communauté, qui étaient portés par cet espoir et cette certitude que des planètes devaient exister autour d'autres étoiles.

De nombreuses découvertes avortées d'exoplanètes ont précédé l'annonce de Mayor et Quéloz, et aussi d'autres plus tangibles mais peut-être en avance sur leur temps. Il y avait, en effet, de quoi baisser les bras plusieurs fois, car pour atteindre ce domaine planétaire il a fallu traverser le désert de détections qu'était celui des naines brunes. Les recherches d'étoiles doubles dont une des composantes stellaires aurait été une masse inférieure à 0,08 fois la masse du Soleil, se révélaient désespérément infructueuses. Jusque dans les années 1990, on en venait presque à penser que les naines brunes étaient un mythe. Et donc que penser des planètes dont la masse devait être encore plus petite, inférieure à 0,01 fois la masse du Soleil ?



Crédits ESO

Figure 1 : Michel Mayor (à droite) et Didier Quéloz (à gauche) devant le télescope de 3,6 m à La Silla (Chili).

On a cru plusieurs fois avoir enfin détecté une exoplanète pour finalement se rendre compte qu'il s'agissait de corps beaucoup plus massifs,

des étoiles. Ainsi, en 1992, suite à l'analyse en série de systèmes stellaires binaires, l'équipe de Dave Latham, du Smithsonian de Harvard, a publié la découverte d'une étoile, HD114762, dont les variations de vitesse trahissaient la présence d'un compagnon de faible masse. Une exoplanète ? Avec une masse d'au minimum 11 fois la masse de Jupiter, c'était possible. Malheureusement, la mesure de la rotation de l'étoile vue depuis la Terre a prouvé que sa masse était en réalité beaucoup plus grande, et qu'il s'agissait non pas d'une planète, mais d'un corps stellaire, une naine brune ou une naine rouge. Circulez, il n'y a rien à voir…

Puis, il y a eu ces découvertes manquées. En 1981, une variation de la luminosité de l'étoile Beta Pictoris a été observée par un photomètre sur le site de La Silla au Chili. Les astronomes d'alors manquant d'un éclair de révélation provenant du futur, ce n'est qu'en 1995, en découvrant ces données d'archives qu'Alain Lecavelier des Étangs et Alfred Vidal-Madjar, de l'Institut d'astrophysique de Paris, comprennent qu'il a pu s'agir du transit d'une exoplanète dans ce système. En 2009, l'équipe d'Anne-Marie Lagrange à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble, grâce à l'optique adaptative, photographie une planète de dix fois la masse de Jupiter dans le disque de Beta Pictoris…

En 1992, en étudiant le minutage des pulses de lumière émis par l'étoile à neutrons, PSR B1257+12, Aleksander Wolszczan, professeur à l'université Copernic de Torun en Pologne, met en évidence le tout premier objet extrasolaire de masse planétaire jamais découvert. Cette découverte est arrivée peut-être un peu trop tôt dans l'Histoire, car que penser d'une planète logée autour d'un cadavre stellaire – le résidu d'une supernova – autour duquel on n'aurait jamais pu imaginer que des planètes pussent exister, et ce avant même d'avoir jamais vu de planète autour d'une autre étoile « vivante » ? Ce n'est donc pas l'année 1992 et la découverte de cette planète de pulsar que la postérité a retenu, mais bien celle, trois ans plus tard, de la découverte par la méthode des vitesses radiales de Dimidium autour de l'étoile jumelle du Soleil – bien vivante celle-ci – 51 Pegasi, également baptisée Helvetios en l'honneur de ses co-découvreurs helvètes.

Mais n'oublions jamais que la toute première planète jamais découverte en dehors du système solaire, aussi exotique soit-elle, est bien PSR B1257+12 b, baptisée plus tard Draugr – dieu de la mythologie nordique…

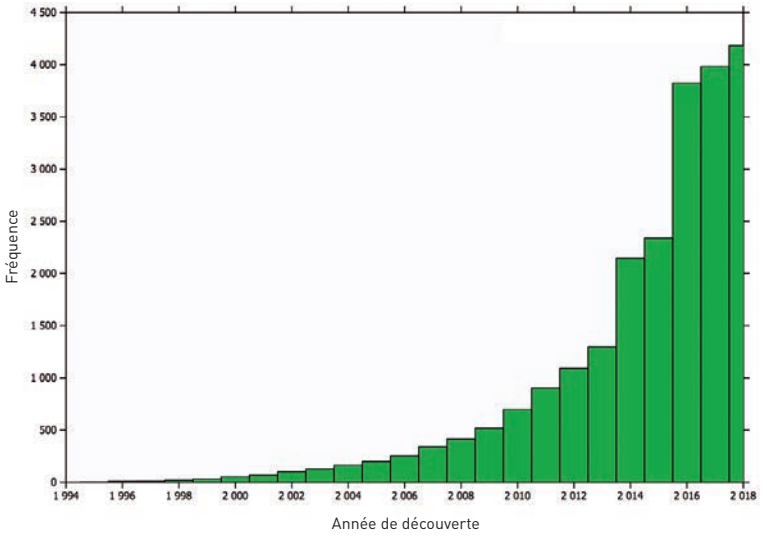
Les révolutions des exoplanètes : hier, aujourd'hui, demain

Une série d'améliorations instrumentales a permis depuis 1995 une multitude de nouvelles détections sous la barrière des dix masses de Jupiter. Dès lors que l'existence de 51 Pegasi b a été annoncée, en moins de cinq ans, près de cent exoplanètes dont la masse avoisine celle de Jupiter – les exo-Jupiters – ont été découvertes, grâce à la méthode de spectroscopie Doppler des vitesses radiales. La quantité de compagnons de masse inférieure à 1 % de la masse du Soleil est ainsi passée d'un nombre proche de l'unité fin 1995 à 1 000 en moins de vingt ans. Le 24 octobre 2013, l'encyclopédie *www.exoplanet.eu* affichait un total de 1 000 planètes confirmées (*cf.* figure 2). De ce désert de détection des compagnons naines brunes a donc surgi ces compagnons planétaires qu'on espérait tant voir apparaître. Finalement, l'existence de ce lien manquant des naines brunes entre étoiles et planètes marque la distinction physique entre les objets stellaires nés par contraction d'un nuage interstellaire et capables de fusion nucléaire, et les objets planétaires, inertes, nés dans des disques primordiaux entourant les étoiles nouvellement créées.

La révolution des exoplanètes et celle des vitesses radiales, puis celle des transits qui en découle, dérivent de l'émergence de cette abondante population d'objets de petites masses dont les étoiles semblent s'entourer communément. Le système solaire apparait aujourd'hui comme un système parmi des milliers et peut-être des millions, voire des milliards d'autres dans notre Galaxie.

Mais la méthode des vitesses radiales a atteint en une dizaine d'années les portes d'une nouvelle barrière : celle des exo-Terres. La précision des mesures de vitesses des étoiles a progressé jusqu'à la création d'instruments si performants qu'ils pouvaient détecter des variations de vitesses stellaires de l'ordre du centimètre par seconde. Mais on s'est alors heurté au problème de l'activité magnétique stellaire qui perturbe les mesures de vitesses avec des signaux parasites de quelques dizaines de mètres par seconde.

La méthode des transits s'est emparée de cette manne foisonnante. La détection des passages – ou transits – d'exoplanètes devant leurs étoiles s'avérant en théorie possible, il n'a pas fallu longtemps pour qu'une exo-



Crédit http://www.exoplanet.eu

Figure 2 : Statistiques des exoplanètes détectées au cours du temps. Les années 2014 et 2016 marquent des booms de validations d'objets détectés en transit avec le satellite Kepler.

planète soit détectée en analysant les variations de luminosité des étoiles. C'est ainsi qu'en 1999, les Américains Gregory Henry, Geoff Marcy, Paul Butler et Steven Vogt ont découvert la première ombre d'exoplanète jamais observée, celle de la planète géante HD209458 b – dont à peine un an plus tard, l'atmosphère est observée en transmission. Cette annonce sonne le signal de la deuxième révolution des exoplanètes qui verra l'avènement de la méthode des transits au cours de la décennie suivante. Et ce, grâce, en particulier, à la mise au point de satellites photométriques d'importance majeure pour le futur du domaine : CoRoT et Kepler.

La méthode des transits est tellement simple, au moins dans le principe, qu'elle a pu être développée et appliquée de façon industrielle. Pour détecter le passage d'une planète devant son étoile, il suffit d'une chose : une caméra et un logiciel de réduction des données. Tout ce que l'on recherche c'est un petit clignement d'œil d'une étoile, qui se reproduit à intervalle régulier – chaque fois qu'une exoplanète passe devant son étoile. Donc cette technique peut être appliquée simultanément à un grand nombre d'étoiles : avec un assez grand capteur et en regardant

assez longtemps sur un grand champ d'étoiles dans le ciel, on doit pouvoir détecter au moins un, si ce n'est plusieurs, transits d'exoplanètes.

C'est cette idée que le satellite français CoRoT, lancé en 2006 et dont la mission s'est terminée en 2014, a exploité le premier. Tout en observant pendant 2 à 6 mois d'affilée les légères variations de luminosité de 120 000 étoiles dues aux ondes sismiques parcourant continûment la surface de toute étoile, CoRoT effectuait une veille constante attendant la moindre chute brutale de luminosité due au transit d'une exoplanète. En tout, 32 exoplanètes ont été découvertes par CoRoT puis confirmées par vitesses radiales, dont la majorité toujours dans le domaine de masse de Jupiter, avec des périodes orbitales inférieures à 3 mois. Ce nombre de 32 semble petit, mais il faut avoir conscience du fait qu'il s'agissait de la première mission de ce type et que de nombreuses détections n'ont pu être confirmées faute de pouvoir observer des variations des vitesses radiales. Toute étoile binaire cachée dans le fond du ciel derrière une quelconque étoile observée peut imiter la signature de transit d'une exoplanète. Il est donc impératif d'exclure toute pollution extérieure et de confirmer la véracité de la détection en utilisant un moyen secondaire : dans ce cas, la spectroscopie Doppler.

Le satellite américain Kepler, d'un principe similaire à celui de CoRoT, entre en scène en 2009. Il finira sa mission le 30 octobre 2018 après de multiples avaries matérielles et un manque de carburant. Mais, contrairement à son homologue français, Kepler a observé en continu un même petit champ du ciel dans la région de la constellation du Cygne, ne contenant pas moins de 150 000 étoiles pendant toute sa durée de fonctionnement nominale, c'est-à-dire 3,5 ans. Alors que CoRoT s'est limité à des périodes orbitales inférieures à 3 mois, Kepler, quant à lui, a pu mettre en évidence des exoplanètes de période orbitale aussi grande que 1 an. Ainsi, pas moins de 3 000 exoplanètes ont été détectées avec Kepler, dont plus de 2 000 sont aujourd'hui confirmées, et la majorité sont des exo-Terres et super-Terres avec des périodes orbitales inférieures ou égales à 1 an. Ce nombre plus grand que celui de CoRoT a tenu pour beaucoup à la capacité de Kepler de suivre le mouvement apparent des astres par astrométrie et d'établir la véracité de l'existence d'une exoplanète, sans recourir aux vitesses radiales.

Les résultats de Kepler représentent une révolution dans le domaine des exoplanètes, car il a percé cette barrière des exo-Terres sur laquelle

la spectroscopie Doppler a buté. Et Kepler nous a fait découvrir la multitude et l'écrasante abondance des mondes terrestres dans les systèmes extraterrestres. Une nouvelle ère a commencé avec la promesse de découvrir un nouveau monde en zone habitable de son étoile.

Cette révolution se poursuit aujourd'hui avec l'amélioration continuelle de nos moyens instrumentaux : des spectrographes et des photomètres spatiaux toujours plus performants, et des méthodes d'analyse qui permettent de contourner les problèmes posés par l'activité stellaire ou d'autres pollutions diverses. Mais n'occultons pas le fait que des méthodes instrumentales, certes plus marginales du point de vue du nombre de détections, ont apporté des découvertes majeures.

L'imagerie directe en optique adaptative a ainsi donné les premières photographies d'exoplanètes et des images marquantes du fascinant ballet d'exoplanètes du système HR8799 autour de leur étoile. Et enfin le développement des méthodes de microlentilles gravitationnelles avec l'automatisation des télescopes robotiques qui, après avoir montré que chaque étoile de l'Univers devait héberger au moins une planète, dévoilera peut-être les déformations gravitationnelles générées par des exo-Lunes autour de planètes vagabondes.

Que nous réserve la prochaine révolution des exoplanètes ? Les prochaines décennies constitueront l'ère de la caractérisation des exoplanètes, de la généralisation de l'observation de leur atmosphère et de leur environnement, en particulier avec le super-télescope James Webb, ou JWST, qui sera lancé dans l'espace d'ici 2022. Composition chimique, structures, nuages, queues d'évaporation et – pourquoi pas ? – lunes, anneaux, océans ou formes de vie.

Quelle idée d'une exoplanète ?

Notre état de connaissance des exoplanètes n'est pas aussi avancé que pour les objets du système solaire. Cela paraît évident, puisque nous avons la possibilité, dans notre système, d'observer avec précision la surface de toutes les planètes et satellites, mais aussi de l'analyser sur place à l'aide de robots et de sondes. Jusqu'à ce qu'on puisse se poser sur d'autres astres, seul l'intérieur de la Terre avait pu être analysé et modélisé à partir des observations sismologiques. Le noyau et sa graine solide,

sa structure en couches de manière générale, avaient été mis en évidence grâce à la propagation et la réfraction des ondes sismiques dans les différentes couches du sous-sol. L'atmosphère terrestre, avant d'envoyer des sondes dans l'atmosphère de Jupiter, de Saturne ou encore de Vénus, était la seule que nous pouvions connaître en détail. Nous connaissons ainsi fort bien la façon dont la température et la composition chimique varient avec l'altitude et les phénomènes météorologiques terrestres. Pendant longtemps, on ne pouvait pas en dire autant des autres planètes…

Mars est aujourd'hui la destination de nombreuses missions robotisées *in situ* – sur le sol martien – qui ont pour but de comprendre la structure, la composition et l'histoire de cette planète, sans se baser sur l'*a priori* d'un modèle terrestre. Les sondes Juno ou encore Cassini-Huygens ont récemment été dédiées à l'exploration de Jupiter et de Saturne et de leurs satellites. Huygens s'est posé sur Titan en 2005, tandis que Cassini a terminé sa mission dans l'atmosphère de Saturne en septembre 2017. Juno qui étudie Jupiter sous toutes les coutures est en cours de mission jusqu'en 2022.

Les planètes du système solaire et le savoir que nous continuons à en récolter constituent notre socle de référence et notre modèle pour décrire les planètes extrasolaires, comme la Terre l'a été pour les autres planètes telluriques de notre système. On est donc tenté au premier abord de supposer que les planètes extrasolaires sont d'un aspect, d'une composition et d'une structure similaires à ceux des planètes solaires.

Pourtant, la première exoplanète découverte tournait autour d'un pulsar, en quelques heures, et la suivante sur la liste a été une géante qui tourne autour de son étoile solaire en 4 jours avec une température de surface de 1 000 °C… Sans parler des exoplanètes dont la masse est bien supérieure à celle de Jupiter.

Les difficultés à se représenter et à décrire une planète extrasolaire à travers le prisme des planètes solaires sont donc apparues dès les premières détections…

Bien qu'on se référera souvent *in fine* aux planètes solaires pour tenter de décrire les exoplanètes, il sera, un jour, indispensable de se défaire de ces modèles et d'établir des descriptions indépendantes basées sur des observations directes de leur surface. L'utilisation de la terminologie « exo-Jupiter », « exo-Neptune » ou « exo-Terre », quoique pratique et évocatrice, n'est pas anodine, car elle force l'imaginaire à s'appuyer sur

la base des planètes solaires. On emploiera ces termes tout au long de l'ouvrage, mais on gardera bien en tête qu'ils n'impliquent aucune réelle similitude.

Malgré tout, il serait faux de dire que l'exoplanétologue n'a aucune idée *non préconçue* de ce à quoi peut ressembler une exoplanète. Nous avons déjà observé directement leurs atmosphères.

Nous citions plus haut HD209458 b, autrement baptisée Osiris. Cette planète, qui est la première à avoir été détectée en transit, est une géante gazeuse dont la masse est de 30 % plus faible que celle de Jupiter, mais est 40 % plus grosse que cette dernière. De plus, elle circule autour de son étoile en à peine 3,5 jours. Excessivement chaude en surface, son atmosphère est dilatée, et elle est aussi en évaporation. On y détecte de nombreuses molécules telles que le monoxyde de carbone, l'eau, l'ammoniac, le méthane ou encore l'oxyde de vanadium. On sait également que sa surface réfléchit très peu la lumière de son étoile et devrait donc avoir l'air sombre.

Dimidium – ou 51 Peg b – ne transite pas devant son étoile, mais des moyens ingénieux ont été trouvés pour observer les composants de son atmosphère. Du monoxyde de carbone et de l'eau y ont été mis en évidence. Ces éléments communs sur Terre se retrouvent donc aussi en abondance dans au moins un autre système. Cela laisse présager de l'existence d'océans d'eau liquide à la surface de cette géante, mais aussi de beaucoup d'autres exoplanètes. De plus, Dimidium réfléchit une grande quantité de la lumière – entre 30 et 50 % – qu'elle reçoit de son étoile. À l'inverse d'Osiris, sa surface serait donc claire et serait peut-être parcourue par des nuages. Peut-on supposer qu'elle ressemble à Neptune, qui a un facteur de réflexion de 40 % ?

De manière générale, la mesure de la densité d'une exoplanète, grâce à la double détection par spectroscopie Doppler et par la méthode des transits, nous apporte des informations cruciales en ce qui concerne sa nature. D'une densité similaire à celle de la Terre, telle exoplanète est rocheuse et constituée de silice et de métal ; au contraire, plus faible et similaire à celle de Jupiter, elle est gazeuse et constituée d'hydrogène et d'hélium. Et ainsi, certaines super-Terres que l'on pensait initialement – et à tort ! – rocheuses, dès lors que leur densité est mesurée s'avèrent être en réalité des mini-Neptunes, presque aussi petites que la Terre mais pourtant entièrement glacées et liquides comme Neptune ou Uranus…

Les exoplanètes

À LA RECHERCHE DES NOUVEAUX MONDES

« Toutes les étoiles fixes que l'œil découvre dans les profondeurs du Ciel, où elles sont semées avec une magnifique prodigalité, sont autant de soleils, centres de systèmes semblables. »

Emmanuel Kant

Aujourd'hui, grâce aux yeux des plus puissants télescopes, nous savons que les étoiles de notre Galaxie sont autant de soleils entourés de planètes. Ces nouveaux mondes extra-terrestres ne sont donc plus une science-fiction. Petits, grands, terrestres, marins, gazeux, tempétueux, infernaux, ils sont aussi incroyablement divers.

Comment ces exoplanètes se sont-elles formées ? Pourront-elles un jour nous révéler une forme de vie à leur surface ? Comment peut-on se les représenter ? Star Wars, Dr. Who, Moebius, Azimov… autant d'inspiration artistique. Mais sont-elles bien à l'image de ce que sont réellement les exoplanètes ?

Ancien étudiant de l'École normale supérieure, docteur en physique théorique, **Flavien Kiefer** est chercheur post-doctorant en astrophysique à l'Institut d'astrophysique de Paris et au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique de l'Observatoire de Paris. Il est l'auteur de nombreuses publications scientifiques dans le domaine des systèmes extrasolaires, dont une étude remarquée des comètes extrasolaires dans le système de Beta Pictoris, publiée dans la revue *Nature*.

ISBN : 978-2-8073-1331-6

9 782807 313316

deboeck SUPÉRIEUR

www.deboecksuperieur.com