

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira - Bejaia
Faculté des Sciences exactes
Département de Physique
Filière Physique Fondamentale
Spécialité Physique Théorique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

MÉMOIRE DE MASTER ACADÉMIQUE
En
Physique Théorique
Thème

Détection et Etude des Caractéristiques des Exoplanètes

Présentée par
Mlle. MAUCHE Sabiha

Soutenue le 26 Octobre 2020 devant le jury composé de :

Président	A. GHARBI	Professeur	U. A/Mira Béjaia.
Examineur	A. BELABBAS	Maitre de conf A	U. A/Mira Béjaia.
Encadreur	S. AOUDIA	Maitre de conf. A	U. A/Mira Béjaia.

Dans chaque difficulté se cache une opportunité

Albert Einstein

Remerciements

Pour ce moment précieux de ma vie, les mots me semblent insuffisants pour remercier chaque personne qui n'a pas cessé de m'aider.

Avant tous je tiens à remercier le Dieu Tout Puissant qui m'a donné le courage et la patience pour surmonter mes difficultés et mes lacunes, qui m'a donné la foi pour viser trop loin, et à se lever à chaque fois que je tombe!

Je tiens en premier à remercier très infiniment Dr S. AOUDIA qui a proposé ce thème intéressant, pour son accord pour qu'il soit mon promoteur. J'ai vraiment bénéficié de ses compétences scientifiques, pas uniquement durant mon mémoire, mais durant tous mon cursus universitaire. Je suis très fière d'être son étudiante, j'aimerais le remercier pour les efforts qu'il a fournis pour que ses étudiants puissent comprendre, la manière avec laquelle il transmet l'information aux étudiants et surtout pour les conseils qu'il me donne à chaque fois que je suis devant une difficulté; il n'a jamais arrêté de nous dire "tout ira vers le mieux". Je tiens aussi à le remercier pour m'avoir appris ce qu'était la recherche en astrophysique, pour avoir été présent durant mon mémoire.

Je tiens aussi à remercier Mr BELABBAS et Mr GHARBI qui ont accepté d'être membres de jury de ma soutenance, c'est un honneur d'être jugée par des enseignants comme eux. Leurs remarques et conseils ont été d'une grande aide pour moi.

Un très grand merci pour Mr Belhadi qui a été pour moi une source d'enrichissement dans le domaine de la mécanique quantique.

Je suis trop honorée de citer Mme Oulebsir et Mr Foughali. Qu'ils reçoivent également le témoignage de ma profonde reconnaissance pour toute leur précieuse aide.

Je tiens aussi à remercier très chaleureusement ma famille, mes amis qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de mon travail.

Dédicace

Pour ma mère qui m'aide à chaque fois par ses prières,

Pour mon père pour sa confiance

Surtout pour mon enseignant Dr S. AOUDIA qui m'a donné le courage de choisir une telle spécialité et qui m'a aidé à mieux comprendre ce thème. Il m'a beaucoup appris

Pour mes amis qui ne m'ont pas laissé tombé durant toutes les épreuves que j'ai enduré, Surtout NADINE qui m'a vraiment encouragé pour surmonter mes difficultés.

Table des matières

Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Liste d'abréviations	iii
Liste d'unités	vi
Introduction aux exoplanètes	1
I Partie théorique	3
1 Histoire des exoplanètes	4
2 Techniques de détection des exoplanètes	6
2.1 Introduction	6
2.2 Méthodes directes	7
2.2.1 Imagerie directe	7
2.2.2 La haute résolution angulaire et le fort contraste	8
2.3 Méthodes indirectes	10
2.3.1 Méthode des vitesses radiales	11
2.3.2 Méthode du transit	15
2.3.3 Méthode astronomique (astrométrie)	17
2.3.4 Les Micro-lentilles gravitationnelles	18
2.3.5 Méthode interférométrique	20
2.3.6 Méthode chronométrique	21
2.4 La différence entre les méthodes de détection des exoplanètes	22
2.5 Le fruit des méthodes de détection	23
2.6 Les détecteurs des exoplanètes	24
2.6.1 Depuis l'espace	24
2.6.2 Depuis la Terre	27
3 Étude des caractéristiques des exoplanètes	28
3.1 Introduction	28
3.2 Caractéristiques physiques	28
3.3 Caractéristiques orbitales	32

4	Le classement des exoplanètes	38
4.1	Introduction	38
4.2	Classement par leurs masses	38
4.2.1	Les exoplanètes géantes	38
4.2.2	Les petites masses	39
4.2.3	Les terres	39
4.3	Classement par leurs compositions chimiques	39
4.3.1	Les exoplanètes telluriques rocheuses	39
4.3.2	Les exoplanètes gazeuses	39
4.3.3	Les exoplanètes Chtoniennees	39
4.4	Classement par leurs distances avec leurs étoiles	39
4.4.1	les exoplanètes internes	39
4.4.2	Les exoplanètes externes	40
4.5	Classement par rapport à leurs températures	40
4.5.1	Les Jupiters chauds	40
4.5.2	Les Jupiters froids	40
II	Partie analyse	41
5	Détection d'une exoplanète par le logiciel salsaj avec la méthode du transit	42
5.1	Introduction :	42
5.2	Présentation du Logiciel	42
5.3	Intensité d'une étoile lors d'un passage de l'exoplanète en fonction de la distance	43
5.4	Intensité d'une étoile lors d'un passage de l'exoplanète en fonction du temps	43
	Annexe 1 : Une extraordinaire diversité des exoplanètes	49
	Annexe 2 : Les lois de Kepler	52
	Annexe 3 : La liste de quelques exoplanètes connues et confirmées	54
	Bibliographie	65

Table des figures

2.1	diagramme de Michael Perryman	7
2.2	Schéma explicatif du principe de la méthode de l'optique adaptative	9
2.3	Schéma explicatif de la méthode des vitesses radiales	12
2.4	Le profil de la vitesse radiale de l'étoile 51 pégase indique la présence de l'exoplanète 51 pégase b qui tourne autour d'elle	13
2.5	la variation de vitesse de l'étoile lorsque l'exoplanète passe devant ou derrière son étoile	13
2.6	La courbe de lumière d'un transit d'exoplanète observée par le satellite Corot en mai 2007	16
2.7	L'espace-temps est déformé en la présence des objets massifs comme les étoiles, la lumière alors suit le plus court chemin	19
2.8	La méthode des micro-lentilles gravitationnelles	19
2.9	Courbe de lumière d'un astre éloigné, lorsque l'étoile lentille OGLE • 2005-BLG • 390 est passée dans la ligne de visée	20
2.10	a- interférence constructive b-interférence destructive	21
2.11	La détection des exoplanètes depuis 1995 jusqu'au moment présent	23
3.1	la masse des exoplanètes en fonction de leurs longueurs de demi grand-axe	29
3.2	La densité des exoplanètes en fonction de leurs masses	30
3.3	Le transit de l'exoplanète HD189733 b lors de son passage devant son étoile.	32
3.4	La période orbitale en fonction du demi grand axe	33
3.5	inclinaison de l'orbite	34
3.6	Excentricités des exoplanètes	35
3.7	Aphélie et périhélie de l'exoplanète	36
3.8	Demi grand axe des explanètes et leurs méthodes de détection	37
5.1	Le passage de l'exoplanète HD209458 b devant son étoile et l'intensité de cette dernière	43
5.2	Indication des trois étoiles étudiées	44
5.3	Les caractéristiques obtenues de l'étoile 1	45
5.4	Les caractéristiques obtenues de l'étoile 2	45
5.5	Les caractéristiques obtenues de l'étoile 3	45
5.6	Les normalisations obtenues	46
5.7	L'intensité lumineuse mesurée pour chaque étoile en fonction du temps	47

Liste des tableaux

2.1	La différence entre les méthodes de détection	22
2.2	Comparaison des caractéristiques de TESS avec celles de Kepler	25
3.1	La répartition des exoplanètes par température	31
3.2	La composition atmosphérique de quelques exoplanètes	32
5.1	Paramètres de photométrie	44
5.2	Les écarts types mesurés	46
5.3	liste de quelques exoplanetes	55
5.4	Liste de quelques exoplanètes	56
5.5	Liste de quelques exoplanetes	57
5.6	Liste de quelques exoplanètes	58
5.7	Liste de quelques exoplanètes	59
5.8	Liste de quelques exoplanètes	60
5.9	Liste de quelques exoplanètes	61
5.10	Liste de quelques exoplanètes	62
5.11	Liste de quelques exoplanètes	63
5.12	liste de quelques exoplanètes	64

Liste d'abréviations

UAI		Union Astronomique Internationale
OHP		Observatoire de Haute Provence
UA		Unité Astronomique
CCD		Charge Coupled Device
ESO		European Southern Observatory
NaCo		NAOS-CONICA
VLT		Very Large Telescope
MD :		Miroir Déformable
HST		Hubble Space Telescope
LESIA		Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique
IRDIS		InfraRed Dual-band Imaging and Spectroscopy
ESA		European Space Agency
MPIA		Max Planck Institut für Astronomie
OA		Optique Adaptative
SPHERE		Spectro Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch
SoHo		Solar and Heliospheric Observatory
NASA		National Aeronautics and Space Administration
CoRot		Convection, Rotation et Transits planétaires
TESS		Transiting Exoplanet Survey Satellite
RG		Relativité Générale
SOPHIE		Spectrographe pour l'Observation des Phénomènes des Intérieurs stellaires et des Exoplanètes
HARPS		High Accuracy Radial velocity Planet Searcher
FCC		Fonction de Corrélation Croisée
HR		Haute Résolution
TTV		transit timing variation
TDV		transit duration variation
TPV		transit depth variation
AAS		Alcatel Alenia Space

PLATO		PLAnetary Transits and Oscillations of stars
LBT		The Large Binocular Telescope
GTC		Le Grand Telescopio Canarias
HD		Henry Draper
OGLE		Optical Gravitational Lensing Experiment
NTT		New Technology Telescope
SIRTF		Space Infrared Telescope Facility
CHEOPS		acronyme de CHaracterising ExOPlanets Satellite
WASP		Wide Angle Search for Planets
CNRS		Centre national de la recherche scientifique
HAT		Hungarian-made Automated Telescope
ASO		analyseur du surface d'onde

Liste d'unités

Unité astronomique	$150 * 10^6$ km	ua
Parsec	$3,26 * ua$	pc
masse de Jupiter	$1,898 * 10^{27}$ kg	M_J
masse de la Terre	$5,972 * 10^{24}$ kg	M_T
Masse de Neptune	$1,024 * 10^{26}$ kg	M_N
Masse de Soleil	$1,989 * 10^{30}$ kg	M_S
Rayon de Jupiter	$7,3896 * 10^{-9}$ ua	R_J
Rayon de la Terre	$6,7417 * 10^{-10}$ ua	R_T
Rayon de Neptune	$2,6025 * 10^{-9}$ ua	R_N
Rayon du Soleil	$7,35355 * 10^{-8}$ ua	R_S
Seconde d'arc	$4,84814 * 10^{-6}$ rad	as ou ''
degré	$0,0174533$ rad	deg
kelvin	-273.15 degré Celsius	K

Résumé

Depuis 25 ans, date de la découverte de la première exoplanète 51 pégase b en 1995, l'histoire de l'étude des exoplanètes a connu un grand changement. Les exoplanètes ont, en effet, commencé par être prédites par des physiciens avec de simples hypothèses puis suite aux améliorations des techniques et des instruments, elles sont devenues un des champs d'exploration les plus intéressants dans l'astrophysique et dans la recherche spatiale actuelle. L'objectif de cette étude est de savoir quelles sont les différentes méthodes de détection des exoplanètes, leurs caractéristiques et leurs classifications.

Il existe deux méthodes de détection des exoplanètes ; La méthode directe qui consiste à imager directement une exoplanète, en exploitant quelques principes comme l'optique adaptative et la coronographie stellaire, même si le fait d'imager directement des planètes extrasolaires reste toujours difficile. Pour cela, les astrophysiciens ont développé des moyens de détection indirectes qui reposent sur les effets engendrés par la présence d'une exoplanète sur son étoile.

Une fois les exoplanètes détectées, une nouvelle approche a été suivie afin de déterminer leurs caractéristiques physiques comme la masse, la température, la densité, et orbitales comme le rayon, la période orbitale, ou encore leurs compositions atmosphériques...etc.

La phase de caractérisation est suivie par une nouvelle phase qui est celle de la classification des exoplanètes dans différentes catégories.

A titre d'application, en utilisant un logiciel d'analyse de données ; le logiciel Salsaj qui traite des images réelles qui ont été photographiées par le télescope spatial Spitzer, une tentative de détection d'une exoplanète par la méthode du transit a été effectuée.

En Conclusion, plus de 4150 exoplanètes ont été découvertes et une des constatations qui s'impose est que ces exoplanètes n'ont rien de commun avec les planètes du système solaire.

Abstract

Since the discovery of 51 Pegasus b in 1995, the exploration of exoplanets becomes one of the most interesting fields in space research. Predicted by physicists using simple hypotheses, new techniques and instruments, exoplanets research field is undergoing a great development through original publications each year. In this study, a summary of the characteristics of the different exoplanets, used detection methods and the new approach used for the classification of these exoplanets is provided.

Exoplanets are subject to two detecting methods. The direct method consists of imaging them ; this is done by eliminating frictions that can cause invisibility via adaptive optics and stellar coronagraphy. Drawbacks related to direct method gives rise to the emergence of indirect methods, in which exoplanets are explored by observing its arising effects on a parent star.

In this study, the characteristics of the different exoplanets were investigated literately. Therefore, a new approach has been applied for their classification. Salsaj software has been used for the data treatment of the images obtained by Spitzer telescope. In conclusion, 4150 exoplanets were discovered ; however, the observed characteristics are abnormal against the planets of our solar system.

Introduction aux exoplanètes

« Le commencement est la moitié de tout »
Pythagore

Quand on regarde le ciel la nuit, on peut voir des milliards d'objets lumineux qui nous entourent comme les étoiles, les planètes et la Lune, tout ça nous a donné envie de mieux connaître notre monde et le monde qui se trouve au delà de notre propre planète. C'est ce qui nous a motivé à faire des investigations sur chacun des objets célestes qui existent dans l'univers en commençant par notre système solaire.

Le système solaire est un système composé du Soleil qui est une étoile naine jaune¹ et de huit planètes qui orbitent autour de notre Soleil avec leurs satellites naturels qui tournent aussi autour d'elles. Il existe deux types de planètes ; planètes telluriques comme la Terre et des planètes géantes ; géantes gazeuses comme Jupiter et Saturne et les géantes de glaces comme Uranus et Neptune.

La naissance et la formation de notre système solaire date d'environ 4.7 milliards années, commençant par la naissance de notre étoile ; le Soleil ; par l'effondrement d'une nébuleuse² solaire issue d'une explosion d'une supernova³. C'est dans cette nébuleuse qu'il y avait tous les éléments chimiques qui se trouvent dans le système solaire, y compris au sein des planètes. Parmi ces éléments, on trouve les minéraux, l'oxygène et le carbone surtout l'hélium et l'hydrogène. Ce dernier est un gaz indispensable pour la création de notre étoile qui a commencé suite à la formation d'un disque constitué essentiellement de gaz et de poussière.

Le Soleil s'est formé par un nuage de gaz et de poussière dont la partie centrale de la nébuleuse qui s'est effondré sur elle-même. La forte concentration de la matière au centre de la nébuleuse a fait augmenter l'énergie d'interaction qui s'est manifesté sous forme d'une très grande chaleur. La forte concentration de la matière s'est aussi manifesté sous forme d'une augmentation de la masse et de l'attraction de cet objet central qui est devenu de plus en plus grande, formant ainsi une boule géante entourée d'un disque proto solaire. Au départ, ce disque proto solaire était trop chaud, mais il a fini par se refroidir jusqu'à que son état devienne solide, et ses atomes soient collés les uns aux autres, pour former des grains de matière.

Ces grains de matières se sont rapproché entre-eux, grâce aux interactions gravitationnelles, et ont fini par former des objets de plus en plus grands jusqu'à former des planètes. Près du Soleil, on trouve des petites planètes rocheuses et plus loin on trouve des planètes géantes gazeuses. Plus une planète est éloignée de son étoile, plus sa masse est grande et sa densité devient plus faible. Les distances de ces planètes sont exprimées par les unités astronomiques ; une unité astronomique est égale à la distance entre le Soleil et la Terre.

1. étoile d'une masse moyenne comprise entre 0.07 et 1.2 masse solaire
2. un objet qui se compose essentiellement de gaz, plasma ou de poussières interstellaires
3. une étoile massive ayant atteint un stade avancé de son évolution, qui explose et se manifeste temporairement par un éclat lumineux

En 1930, un objet lointain en orbite autour du Soleil a été découvert, à une distance plus grande que Neptune, surnommé Pluton. Il a été déclaré comme étant la 9^{ème} planète du système solaire.

Désormais un corps céleste doit satisfaire trois conditions simultanément pour qu'il soit considéré comme une planète. Premièrement, il doit être assez massif pour qu'il reste en un équilibre hydrostatique ce qui veut dire que son champ gravitationnel attire toute sa matière, pour qu'il aura une forme sphérique. Deuxièmement, il faut qu'il soit en orbite autour du Soleil. Troisièmement, il doit être assez gros pour nettoyer sa zone gravitationnelle, c'est-à-dire éliminer tout corps rival qui passe devant son orbite,

Mais Les apparences peuvent en effet être trompeuses ; en 2006 UAI a décidé de retirer Pluton de la liste des planètes. C'est sur la troisième condition que Pluton ne peut pas être considérée comme une planète ! En effet, suite aux travaux de recherches menaient par deux théoriciens K. Edgeworth et G. Kuiper, ils ont découvert une nouvelle classe d'objets appelés comètes⁴ dans une région nommée par la ceinture de Kuiper⁵. Cette ceinture contient des milliers de petits astres qu'ils n'ont pas encore été attiré par Pluton. Pour cela, Pluton est considéré, depuis 2003, comme étant le Premier et le plus massif objet transneptunien⁶ qui a été identifié.

Malgré toutes les découvertes réalisées, la formation de notre système solaire reste toujours un mystère qui n'est pas totalement élucidé. Il reste toujours quelques détails auxquels les scientifiques ne connaissent absolument rien. C'est pour cela qu'ils essayent de scruter l'univers bien au delà du système solaire, à la découverte des planètes extra solaires,

Le but de la découverte des exoplanètes est d'avoir plus d'informations sur notre propre système solaire et analyser la possibilité d'une vie en dehors de notre planète Terre. La détection d'une exoplanète en 1995 a révélé que notre système solaire est loin d'être unique. Il peut exister d'autres systèmes planétaires et on peut aussi trouver d'autres planètes comme la notre qui peuvent abriter de la vie avec les mêmes conditions que celles sur Terre.

A partir de ce moment où d'autres systèmes planétaires ont été découverts, un nouveau champ de recherche a été mis en place afin de se projeter dans le monde au delà de nous ; les exoplanètes. Le but étant de les détecter, les comprendre et les explorer, cela grâce aux informations que nous avons déjà du système solaire et de ses composants et surtout grâce aux développements des instruments et les techniques d'observations et de détections.

Pour ce fait, le but de ce travail, est de voir quelles sont les techniques de détections des exoplanètes, comment peut-on déduire leurs caractéristiques, comment peut-on les étudier et au final comment peut-on les classer ?

Afin de mener à bien la rédaction de ce mémoire, nous avons organisé ce travail en le divisant en deux parties ; une partie théorique composée en quatre chapitre comme suit : Dans le premier chapitre nous allons parler un peu sur l'histoire des exoplanètes. Dans le deuxième chapitre nous allons voir les différentes techniques de détections. Dans le troisième chapitre nous allons voir quelles sont les caractéristiques des exoplanètes. Dans le quatrième chapitre nous allons voir comment peut-on classer les exoplanètes. La dernière partie sera dédiée à une analyse qui consiste à détecter une exoplanète en ayant recours au logiciel Salsaj par la méthode de transit.

4. un objet céleste composé d'un noyau de glace et de poussière en orbite

5. située dans le système solaire, en delà de la planète Neptune, elle a une forme d'anneaux

6. correspond a tout objet de système solaire situé au delà de l'orbite de Neptune

Première partie

Partie théorique

Histoire des exoplanètes

« On ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en connaît pas l'histoire »
Auguste Comte

Depuis des années, les astronomes essayent de confirmer leurs hypothèses sur le monde au delà du système solaire, car l'univers qu'on connaît ne s'arrête pas uniquement à ce système, et que le notre est loin d'être unique. En revanche il existe beaucoup d'autres systèmes extrasolaires dans l'univers où des planètes orbitent autour de leurs propres étoiles. Ces planètes sont appelées exoplanètes, autrement dit des planètes extra solaires.

Les exoplanètes sont donc des planètes qui se trouvent en dehors de notre système solaire. Elles tournent au tour de leurs propres étoiles. En grec, « exo » veut dire « en hors de ». Cependant, l'origine de l'idée de l'existence d'autres système dans l'univers a été proposé en 1543 par **Copernic**¹, lorsqu'il a réfuté l'idée que la terre est le centre de notre univers, et qu'elle est stationnaire et sans mouvement, autour de laquelle tournent un certain nombre de sphères. C'est aussi Copernic qui a remarqué qu'il existe un lien entre la distance des planètes au Soleil et la durée de leur révolution. Plus cette distance est grande, plus la période de révolution est longue.

Il a été suivi par **Bruno**² qui, en 1585, a publié un livre, dans le quel il stipule l'existence d'autres planètes qui orbitent autour d'autres étoiles. C'est donc lui qui a le premier affirmé l'existence des exoplanètes, d'un point de vue philosophique, sans, toutefois, s'appuyer sur une démonstration astrophysique; "Il y a donc d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept « terres » que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche."

Le Néerlandais Huygens (1629 – 1695), mathématicien, physicien et astronome, est le premier qui a pensé d'utiliser les instruments d'observations, pour observer les objets lointains. Il fut suivi par par **Edwin Hubble**³ qui a dit : " La communauté scientifique suppose depuis longtemps que si les étoiles sont des soleils, et que le Soleil héberge des planètes, alors il est fort probable que les autres étoiles hébergent elles aussi des planètes. "

Les astrophysiciens se sont lancés dans une campagne de recherche des exoplanètes afin d'avoir la moindre observation qui puisse lever le doute, mais hélas sans succès jusqu'en 1992 où l'impossible est devenu réalité,

1. Un mathématicien, médecin et astronome, né en 1473 à Thorn
2. Né en 1548 en Italie, physicien cosmologue, c'est lui qui a eu l'idée que l'univers est infini
3. astronome américain c'est lui qui est l'origine du concept d'expansion de l'Univers, déclare en 1924, et la démonstration de l'existence d'autres galaxies en observant un décalage vers le rouge de leur spectre

et les efforts dans ce sens furent récompensées par la découverte des deux premières exoplanètes par l'astronome **Alexander Wolszczan**⁴. Ces deux planètes extra-solaires orbitent autour d'une étoile de type pulsar⁵ PSR1257+12.

Trois années plus tard, en 1995, une nouvelle exoplanète est découverte par une équipe franco-suisse dirigée par **Michel Mayor** et **Didier Queloz** de l'Université de Genève. En exploitant l'observatoire de Haute-Provence, situé près de Forcalquier, équipé de divers télescopes, dont un de 1,93 mètre et dont la spectrographie a servi à découvrir 51 Pegasi b. 51 signifie 51 années lumière dans la constellation⁶ de Pégase et 'b' signifie le deuxième membre de son système. 51 Pegasi b est une géante, sa masse avoisine la moitié de la masse de Jupiter.

Après cette découverte, de très nombreuses recherches ont été effectuées afin de scanner le ciel à la recherche d'autres exoplanètes. Plusieurs chercheurs ont placés des équipes afin qu'ils obtiennent des résultats similaires, ce qui a conduit, à la fin du mois d'août 1999, à la découverte de la première exoplanète de type rocheuse HD 209458 b par l'astronome **David Charbonneau** du centre astrophysique grâce à une nouvelle méthode de détection.

En 2014, la première exoplanète de type rocheuse a été observée dans la zone habitable⁷ de l'étoile naine rouge⁸ Kepler 186, située dans la constellation de cygne, environ 490 années lumière de la terre, grâce au télescope spatial Kepler. Cette exoplanète fut surnommée 186 Kepler f. Le nom Kepler-186 f lui a été donné, car elle a été découvert grâce au télescope Kepler, le nombre 186 fait référence au nombre des systèmes stellaires, et f l'ordre de cette exoplanète, car on a 5 planètes orbitant autour de Kepler 186, sachant que la première lettre "a" signifie toujours l'étoile principale. En juillet 2017, selon la NASA, 3496 exoplanètes avaient été détectées autour de 2606 étoiles, dont une toute petite proportion qui ressemblent à la Terre.

Les recherches qui ont été effectuées au départ avaient comme cible les grandes planètes et les grandes étoiles, puis ces recherches se sont affinées, à mesure que les instruments et les techniques de détection ont été améliorés. La liste s'allonge jusqu'à dépasser 4160 exoplanètes de différents types, rocheuses, telluriques...etc. ce chiffre représente un succès incroyable, et revient au développement des instruments et à la recherche astronomique active.

Décembre 2019 a vu la découverte de la première exoplanète de type Neptune chaud⁹, autour d'une étoile naine blanche¹⁰ surnommée WDJ0914+1914 b. En janvier 2020, la découverte de l'exoplanète tellurique de type terrestre, surnommée par TOI 700 d, En 15 avril 2020, la découverte de l'exoplanète Kepler 1649 c. Néanmoins, toutes ces exoplanètes. détectées se trouvent dans notre galaxie 'la voie lactée' et personne, jusqu'à présent, n'a pu se projeter au-delà de cette limite

En résumé, nous avons pu voir qu'en 25 ans, les recherches sur les exoplanètes ont connues des progrès considérables, ce qui a permis aux astrophysiciens de découvrir un très grand nombre d'exoplanètes et de déduire leurs propriétés et leurs caractéristiques.

4. astronome polonais né en 1946, professeur en astrophysique, son domaine concerne les pulsars

5. (pulsating stars) sont des étoiles à neutrons créées par des explosions d'étoiles trop massives sous forme de supernovae. Trop petites mais extrêmement denses, ils ont des champs gravitationnel trop intenses. Ils ont été détecté la première fois en 1967 grâce à un signal radio.

6. est un groupe d'étoiles voisines sur la sphère céleste, elle porte un nom latin

7. Est une région dans l'espace dont les conditions sont favorables pour une apparition de la vie telle que nous la connaissons sur terre.

8. Sont des petites étoiles rouges, leurs masses sont comprises entre 0.08 et 0.8 masse solaire.

9. c'est une exoplanète qui est située à moins d'une unité astronomique de son étoile

10. c'est un objet de densité trop forte et de masse petite, sa température de surface est trop élevée.

Techniques de détection des exoplanètes

« Le visible ouvre nos regards sur l'invisible »
Anaxagore

2.1 Introduction

Peut-on voir les exoplanètes avec un télescope simple? la difficulté est qu'une planète extra-solaire est trop proche de son étoile, et infiniment moins brillante pour qu'on la voit avec un simple télescope. Pour cela, es chercheurs, les astronomes et les équipes d'observations ont élaboré des programmes et des plans afin qu'ils puissent observer ces objets lointains.

Ces techniques de détection sont différentes d'une exoplanète à une autre. Une qui permettrait de détecter la présence d'une exoplanète par une imagerie et une autre qui nous permettrait de l'observer en se basant sur la variation qu'elle exerce sur la luminosité de l'étoile. Grâce à ces méthodes, on pourra déterminer les caractéristiques fondamentales de ces objets telle que sa masse, sa taille, sa densité, son rayon...etc, ou elles nous permet de mesurer la distance qui sépare une exoplanète et son étoile ou bien son demi grand axe de son orbite.

Néanmoins, en gros, il existe deux types de méthodes de détection, les méthodes directes et les méthodes indirectes.

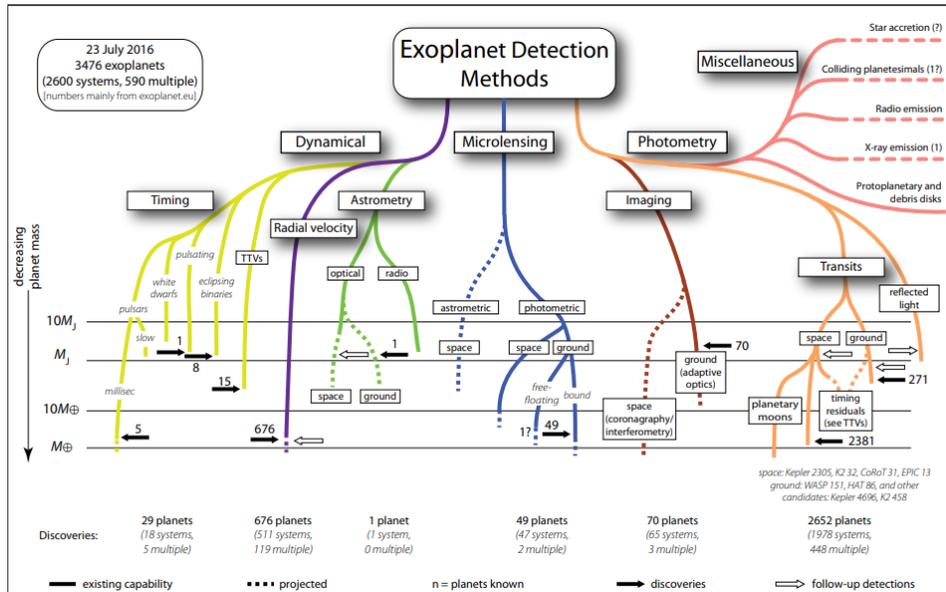


FIGURE 2.1 – diagramme de Michael Perryman

2.2 Méthodes directes

La méthode directe pour la détection des exoplanètes est extrêmement difficile. Elle est considérée comme la plus importante dans l'histoire de la Planétologie¹, l'astronomie² et l'astrophysique³; cette méthode consiste à voir les planètes extra-solaires par l'imagerie, ce qui rend la tâche difficile à cause de la grande masse de l'étoile centrale comparée à la masse de l'exoplanète et aussi à cause de sa luminosité qui est trop intense. Malgré ses difficultés, il a été tout de même possible d'observer par imagerie quelques exoplanètes grâce aux méthodes construites et développées au cours de ces dernières années.

Aujourd'hui, les astrophysiciens sont arrivés à mettre en place des instruments d'une haute résolution et de nombreux projets et missions spatiales sont envisagés afin qu'ils permettent de trouver des exoplanètes par la méthode directe, dans l'espoir de les imager, et actuellement des dizaines de ces exoplanètes ont pu être détectées grâce à ces techniques.

2.2.1 Imagerie directe

Cette méthode consiste à voir des planètes extra-solaires, directement grâce à l'obtention d'une image de cette dernière à partir de la lumière réfléchissante et/ou émise par l'exoplanète. Mais l'efficacité des instruments et des techniques d'observations doivent être trop élevées pour qu'on puisse la détecter.

Le but de cette méthode est de détecter des images numériques des exoplanètes et cela grâce aux capteurs CCD. Ces capteurs sont des composants électroniques constitués de cameras. Ils ont la fonction de convertir un rayon lumineux en un signal électrique analogique. La détection d'une image numérique se fait après avoir amplifié ce signal puis le numériser par un convertisseur analogique-numérique.

1. la science qui étudie les planètes
2. la science de l'observation de l'univers et ses origines
3. est une branche de l'astronomie qui concerne la physique et l'étude de les propriétés de l'univers

La première découverte qui a été effectuée par cette technique de détection est une planète géante gazeuse qui orbite autour de la *Glossary Link* naine brune 2M1207, par l'équipe de l'astronome **François Gaël Chauvin** en 2004, grâce à l'instrument NaCo du VLT de l'ESO, au Chili. Suivie par la découverte de quelques exoplanètes qui tournent autour de HD 8799 étoile variable de type γ^4 Doradus, découverte en 2008.

Malgré les difficultés pour pouvoir détecter une planète extra-solaire par l'imagerie directe, cette technique a quand même permis de détecter une dizaines d'exoplanètes jusqu'à ce jour. Elle est considérée comme la plus vieille méthode de détection. On l'utilise pour les exoplanètes qui sont suffisamment lointaines de leurs étoiles et surtout si elles sont suffisamment massives. Cette méthode repose sur les principes suivants :

1. imagerie à haute résolution angulaire et à fort contraste
 - (a) optique adaptative
 - (b) Coronographe stellaire
2. la couverture spectrale

2.2.2 La haute résolution angulaire et le fort contraste

Dans la nuit lorsqu'on regarde la lune, on la voit comme étant une boule blanche et brillante, mais on arrive jamais à détailler sa structure ou bien sa forme exacte. Néanmoins, lorsqu'on utilise une jumelle astronomique, on verra plus de détails qu'à l'œil nu. Encore mieux, en utilisant un télescope avec un grand miroir on aura accès à des structures beaucoup plus détaillées. Par cet exemple, on voit très bien que la résolution de la Lune à l'œil nu est négligeable par rapport à celle d'une jumelle astronomique qui est également petite par rapport à la résolution du télescope. Cela signifie que plus le miroir est grand, plus la résolution est meilleure.

Les télescopes de grandes taille utilisant des miroirs plus grands ont été développés au cours des dernières années et cela a permis aux chercheurs et aux astrophysiciens d'avoir la capacité d'observer et de détecter les exoplanètes dont le signal est trop faible par rapport à l'étoile centrale et avec une séparation angulaire trop petite. Tout ceci est rendu possible grâce à la combinaison de ces deux principes ; la haute résolution angulaire et le fort contraste.

Optique Adaptative

L'optique adaptative est une méthode qui a été développée dans les années 1950, on l'utilise généralement dans le domaine d'astronomie.

Son but est de corriger les déformations d'un front d'onde, et de même l'image, causées par des turbulences atmosphériques⁵. Cette technique permet aux télescopes de s'affranchir la barrière de ce problème. La méthode de l'optique adaptative est différente de la méthode d'optique active, car cette dernière consiste à corriger des problèmes dus à la gravité, les déformations du télescope lui-même et l'effet du vent...etc.

Son principe est simple (figure 2.2), la lumière qui arrive au télescope est modifiée par les turbulences atmosphériques donc sa surface n'est plus plane et elle est irrégulière et perturbée ; on parle ici du front d'onde. Grâce à un miroir déformable⁶ on peut déformer en retour la lumière arrivante sur le télescope pour avoir une surface plane, mais le problème qu'on aura c'est que la déformation de cette lumière il faut qu'elle soit l'inverse exacte de celle du front d'onde. Pour cela il faut enlever une partie de la lumière à l'aide d'une lame séparatrice, puis on va l'envoyer à un dispositif qui va l'analyser (ASO). Le résultat de ce dernière

4. Est une étoile de luminosité variable due à des pulsations non radiales de sa surface

5. C'est une partie de l'atmosphère qui brutalise la régularité de déplacement d'un signal lumineux

6. C'est un élément de correction dans l'optique adaptative

analyse va être envoyé à un système de contrôle (ordinateur) qui va nous générer des fronts d'ondes corrigés, et à la fin on obtiendra une image à haute résolution.

Cette méthode est utilisée plusieurs fois et avec succès sur des grandes télescopes comme le VLT de l'ESO au Chili.

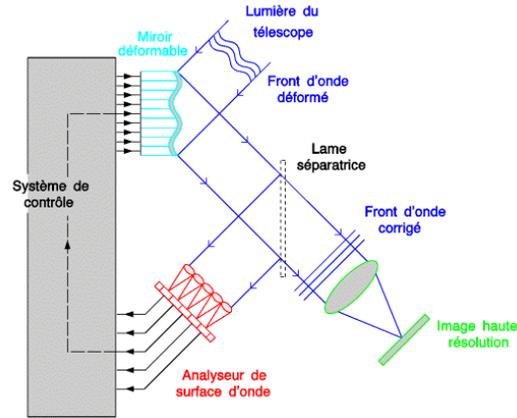


FIGURE 2.2 – Schéma explicatif du principe de la méthode de l'optique adaptative

Théoriquement, une bonne résolution angulaire pour un télescope est donnée par le critère de Rayleigh, dont la résolution est proportionnelle à la longueur d'onde et inversement proportionnelle au diamètre, la formule de Rayleigh est la suivante :

$$\theta_{Tel} = 1.22 * \frac{\lambda}{D_{Tel}} \quad (2.1)$$

avec

- λ : la longueur d'onde de l'observation.
- D : le diamètre de la pupille

On voit bien que la résolution est meilleure si le diamètre est grand et la longueur d'onde est petite.

Toutefois, les télescopes souffrent d'un problème de turbulence atmosphérique. Pour y remédier, on utilise les mesures de seeing⁷. Le but étant de caractériser la qualité optique du ciel, cela veut dire l'évaluation des turbulences atmosphériques, autrement dit mesurer l'étalement de l'image non corrigée de l'étoile exprimée en arcsec⁸.

$$\theta_{seeing} = \frac{\lambda}{r_0} \quad (2.2)$$

avec :

-
- 7. un mot en anglais qui veut dire la qualité d'image
 - 8. unité qui mesure des angles

- λ = la longueur d’onde
- r_0 = le paramètre de Fried

Coronographe stellaire

La coronagraphie est une technique de l’imagerie directe qui nous permet d’atteindre de forts contrastes qui permettent la détection des exoplanètes plusieurs fois moins lumineuses que leurs étoiles. Cette technique est inventée dans les années 30 du siècle passé par **Bernard Lyot** pour observer la couronne⁹ solaire en masquant le disque solaire.

Son principe est simple, il est similaire au principe de la lune lorsqu’elle passe devant le soleil lors d’une éclipse¹⁰. Pour que la lumière de l’étoile n’arrive pas jusqu’au détecteur, on va la bloquer. Autrement dit, masquer l’étoile en mettant un écran coronographique opaque sur l’axe optique pour occulter sa lumière. Toutefois, un problème subsistera toujours, car la lumière de l’étoile sera diffractée partout sur le plan focal par ce disque. La solution proposée par Lyot est de mettre un diaphragme¹¹.

La première découverte effectuée par la méthode de la coronagraphie est celle de l’exoplanète Fomalhaut b prise par le télescope Hubble, par l’équipe de Paul Kalas, d’une masse proche de celle de Jupiter. Un des avantages de cette méthode c’est qu’elle nous permet d’analyser les photons qui parviennent directement de l’exoplanète et cela nous aide à connaître ses conditions atmosphériques et celle de sa surface. Parmi les satellites qui utilisent ce genre de principe, on a le satellite SoHo de la NASA, lancé en 1995. Son but étant d’étudier le Soleil.

2.3 Méthodes indirectes

Le problème avec les exoplanètes c’est qu’en générale, on ne peut pas les voir directement à cause de certains paramètres. L’imagerie directe se heurte, en effet, à deux obstacles majeurs :

1. L’éclat de la planète est extrêmement faible par rapport à celui de l’étoile.
2. A la distance où on observe le système extra-solaire, la planète va se trouver extrêmement proche de l’étoile sur l’image.

La combinaison de ces deux facteurs, fait en sorte que l’exoplanète soit noyée dans l’éclat de son étoile. Ceci a fortement réduit le champ d’application de la technique directe de détection des planètes extra-solaires, et des approches indirectes ont vu le jour. Dans ces dernières, on se focalise sur l’observation de l’impact que les exoplanètes ont sur leurs étoiles au niveau de leurs luminosité (méthode des transits), dans leurs mouvement (astrométrie) ou leurs variation spectrale par effet Doppler (vitesse radiale).

Durant des années, les astrophysiciens n’ont cessé de chercher à trouver des moyens pour visualiser indirectement une exoplanète et ils ont tenté de détecter leurs présences sans pour autant les voir. Ils ont fini par trouver quelques techniques qui leurs permettent de déterminer la présence ou l’absence d’une exoplanète.

En principe, chaque méthode de détection a son propre objectif, néanmoins, ces techniques sont complémentaires. Certaines déterminent des exoplanètes plus ou moins proche de l’étoile centrale, qui peut être plus

9. est la couche la plus externe de l’atmosphère du Soleil.

10. Un phénomène qui correspond à une dissimulation de la lumière par rapport à un objet physique

11. c’est un instrument optique conditionnant la quantité de lumière transmise ainsi que l’ouverture du système

ou moins massive. Certaines d'entre elles permettent de savoir la composition de leurs atmosphères comme pour les exoplanètes gazeuses ou bien connaître leurs caractéristiques. Et finalement, d'autres méthodes nous permettent de découvrir des exoplanètes dont les caractéristiques sont semblables à celles la Terre.

2.3.1 Méthode des vitesses radiales

L'effet Doppler et l'effet Doppler fizeau

Cet effet est un changement de la fréquence ou bien des longueurs d'onde dues au mouvement d'un objet (dans notre cas l'objet est l'exoplanète), En résumé, l'effet Doppler fonctionne avec tous types d'ondes. Connaissant la variation de la fréquence on peut trouver la vitesse de déplacement.

Dans le cas des ondes mécaniques comme les ondes sonores¹² on utilise l'effet doppler, et dans le cas des ondes électromagnétiques¹³ dont la lumière fait partie on utilise l'effet doppler-fizeau.

Soit une onde électromagnétique ou mécanique qui se déplace avec une vitesse V_{onde} émise par l'émetteur avec une fréquence $f_{émise}$ et perçu par le récepteur avec une fréquence qui sera différente de la fréquence initiale ; celle de l'émetteur, alors cette différence de fréquence due aux mouvements de chacun de l'émetteur et du récepteur va nous permettre de calculer la vitesse de l'émetteur (ou du récepteur) en mouvement grâce à l'effet Doppler.

Pour calculer la vitesse avec l'effet Doppler, on utilise la formule qui suit :

$$V = V_{onde} * \frac{\Delta f}{f_{émise}} \quad (2.3)$$

$$\Delta f = f_{recepteur} - f_{émise} \quad (2.4)$$

avec :

V = vitesse en m/s

f = fréquence en Hz

Principe de la méthode des vitesses radiales

La méthode des vitesses radiales a été utilisée pour la première fois en 1867 par **William Huggins** et sa femme **Margaret**, afin de suivre le mouvement de quelques objets terrestres par rapport à la terre.

Dans le champ qui nous intéresse, chaque exoplanète est attirée par la gravité de son étoile, mais l'étoile est également attiré par son exoplanète, ce qui peut être interprété comme une attraction des deux par le centre de gravité.

La méthode des vitesses radiales consiste à mesurer les vitesses de déplacement des exoplanètes grâce aux perturbations (oscillations) qu'elles créent sur le mouvement de leurs étoiles. Ceci va nous permettre d'observer les oscillations de la luminosité des étoiles lors de la présence des exoplanètes. A leurs absences le spectre restera constant. Plus la masse de l'exoplanète est grande plus les oscillations qu'elle crée sur la luminosité de l'étoile deviennent importantes. Lorsque l'exoplanète se rapproche de son étoile, on aura un

12. ce sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans un fluide grâce à leurs déformations élastiques

13. c'est une représentation pour expliquer les rayonnements électromagnétiques comme les rayons lumineux

décalage vers le bleu ¹⁴ (**blueshift**), et dans le cas contraire on aura un décalage vers le rouge ¹⁵ (**Redshift**)

Actuellement cette méthode permet d'atteindre des résolutions de l'ordre du mètre par seconde. et à ce jour plusieurs planètes extra-solaires sont découvertes grâce à cette technique. Pour calculer l'amplitude de cette perturbation (**K**) on applique la formule suivante :

$$K[m/s] = 28.4 * \frac{M_p * \sin i}{M_*^{2/3} P^{1/3}} \quad (2.5)$$

Avec :

P : la période en années lumière.

M_p : la masse planétaire exprimée en masse de Jupiter.

M_* : la masse stellaire exprimée en masses solaires. On la calcule en connaissant les valeurs observées de la luminosité, de la couleur, de la température et l'âge de l'étoile.

i : est l'inclinaison de l'orbite planétaire.

L'amplitude de la variation de la vitesse radiale est proportionnelle à la masse de l'exoplanète et inversement proportionnelle à la masse de son étoile.

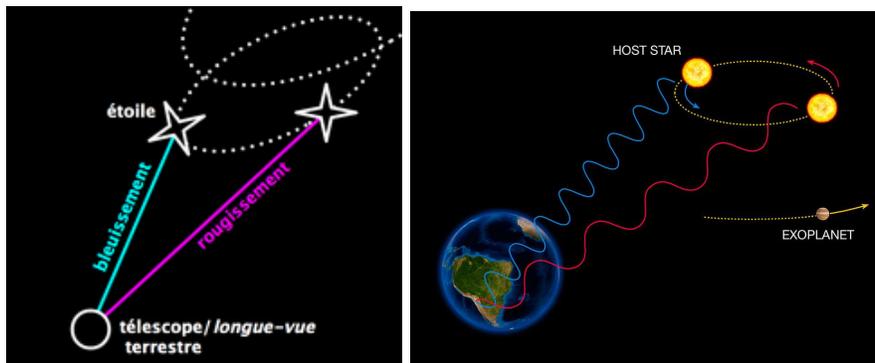


FIGURE 2.3 – Schéma explicatif de la méthode des vitesses radiales

14. c'est un décalage vers les petites longueurs d'onde d'un spectre lumineux et l'augmentation de ses fréquences

15. c'est le décalage vers les grandes longueurs d'onde d'un spectre lumineux et la diminution de ses fréquences, ce phénomène correspond à la preuve initiale de l'expansion de l'univers

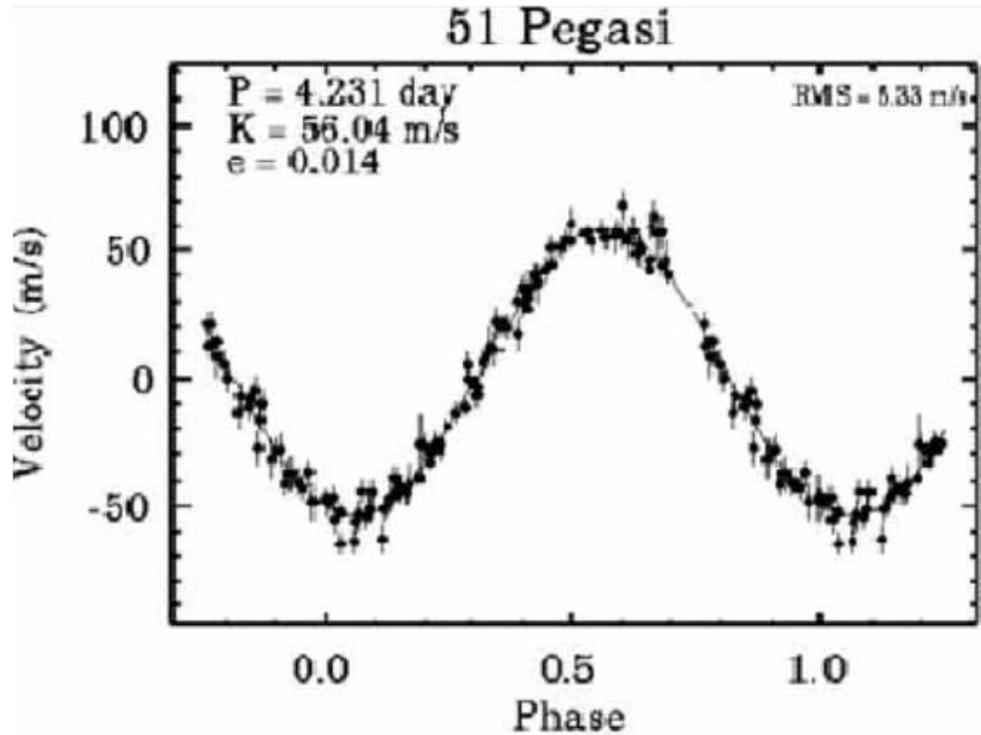


FIGURE 2.4 – Le profil de la vitesse radiale de l'étoile 51 pégase indique la présence de l'exoplanète 51 pégase b qui tourne autour d'elle

La méthode des vitesses radiales nous permet aussi de distinguer facilement les orbites circulaires des orbites éclipiques. Si les exoplanètes passent devant leurs étoiles, leurs orbites seront circulaires et les variations des vitesses radiales seront régulières et symétriques. Leurs formes sont sinusoïdales (figure à gauche). Par contre si la planète est passée derrière l'étoile, la trajectoire sera elliptique, et elle sera représentée dans la courbe des vitesses par des pics (figure à droite).

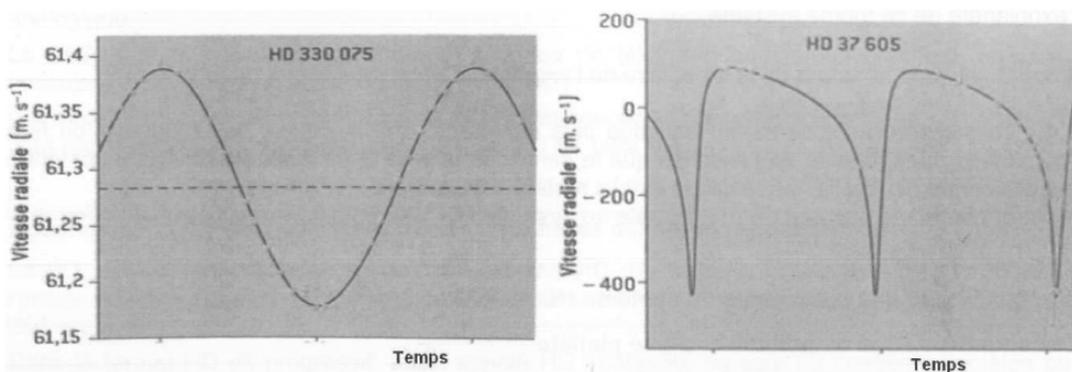


FIGURE 2.5 – la variation de vitesse de l'étoile lorsque l'exoplanète passe devant ou derrière son étoile

Démonstration de la formule de l'amplitude des perturbations

1. La loi sinusoïdale nous donne :

$$v = v_* \sin i \quad (2.6)$$

D'autre part, on a la vitesse tangentielle :

$$v_* = \frac{2\pi a_*}{P} \quad (2.7)$$

Le demi grand axe de l'étoile (a_*) est lié à celui de l'exoplanète (a) avec la forme suivante :

$$a_* = a \frac{M_p}{M_* + M_p} \quad (2.8)$$

qui peut aussi s'exprimer en supposant $M_p \ll M_*$:

$$a_* = a \frac{M_p}{M_*} \quad (2.9)$$

en remplaçant (2.9) dans (2.7) on aura :

$$v_* = \frac{2\pi a}{P} \frac{M_p}{M_*} \quad (2.10)$$

2. Dans le cas d'une orbite circulaire, la seule accélération est centripète, selon la loi fondamentale de la dynamique, et la 3ème loi de Kepler on a :

$$M_p \left(\frac{2\pi}{P} \right)^2 a = \frac{GM_p M_*}{a^2} \quad (2.11)$$

donc :

$$a^3 = GM_* \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2 \quad (2.12)$$

$$a = (GM_*)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{P}{2\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.13)$$

en remplaçant (2.13) dans (2.9) :

$$a_* = (GM_*)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{P}{2\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{M_p}{M_*} \quad (2.14)$$

$$a_* \frac{2\pi}{P} = (GM_*)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{P}{2\pi} \right)^{-\frac{1}{3}} \frac{M_p}{M_*} \quad (2.15)$$

La projection de l'équation (2.15) sur la ligne de visée (observateur), nous donne :

$$\begin{aligned} v_* \sin i &= (GM_*)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{P}{2\pi} \right)^{-\frac{1}{3}} \frac{M_p}{M_*} \sin i \\ &= G^{\frac{1}{3}} M_*^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{P}{2\pi} \right)^{-\frac{1}{3}} M_p \sin i \\ &= (2\pi G)^{\frac{1}{3}} M_*^{-\frac{2}{3}} \frac{M_p \sin i}{P^{\frac{1}{3}}} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Dans ce cas, l'amplitude des perturbations s'écrit comme suit :

$$K = v_* \sin i = (2\pi G)^{\frac{1}{3}} \frac{M_p \sin i}{P^{\frac{1}{3}} M_*^{\frac{2}{3}}} \quad (2.17)$$

Remarque :

l'équation (2.16) est valable si seulement si l'excentricité $e = 0$ c'est à dire une orbite circulaire, mais dans le cas contraire, cette équation s'écrira sous la forme suivante :

$$K = v_* \sin i = (2\pi G)^{\frac{1}{3}} \frac{M_p \sin i}{p^{\frac{1}{3}} M_*^{\frac{2}{3}}} (1 - e^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

1. Les limites de la méthode des vitesses radiales :

- (a) Si 'i' n'est pas détecté par une autre observation, la principale limite consiste en l'impossibilité de mesurer la vraie masse d'un objet (exoplanète) avec cette méthode uniquement. En effet, c'est la masse minimale ($m^* \sin i$) qui est déterminée par cette méthode.
- (b) Si un système planétaire orbitait orthogonalement à la ligne de visée, il serait impossible de le détecter avec cette méthode, tout le mouvement de l'étoile étant dans un plan ortho-radial.
- (c) Il faut des milliers de raies stellaires pour pouvoir mesurer avec une précision suffisante la vitesse radiale instantanée d'une étoile. Cela rend donc la détection des exoplanètes autour d'étoiles chaudes particulièrement difficile.
- (d) Elle ne peut pas détecter des exoplanètes de type petites planètes comme la Terre, à moins qu'un jour elle va atteindre une résolution suffisante.

2.3.2 Méthode du transit

Définition du transit

Le phénomène de transit en astronomie est un phénomène qui se produit lorsque un objet céleste passe entre un observateur et un autre objet céleste. Dans notre cas, c'est un phénomène qui se produit lorsqu'une exoplanète passe entre un observateur et une étoile.

Principe de la méthode du transit

La méthode des transits est une méthode photométrique pour détecter les exoplanètes (photométrie veut dire mesure de l'intensité lumineuse). Elle est la plus utilisée et c'est une méthode très prometteuse. Elle consiste à mesurer régulièrement la luminosité de l'étoile lorsqu'une planète passe entre l'observateur et l'étoile. Le passage de la planète devant son étoile est nommé "le transit", c'est une éclipse dans le cas du Système solaire. Si cette luminosité varie (augmentation ou diminution) cela signifie qu'un objet est passé devant l'étoile,

L'avantage de cette méthode c'est que lorsqu'on aura la forme de la courbe on peut déterminer la taille des exoplanètes et c'est ce qui va permettre aux astronomes d'évaluer la structure et la composition de ces planètes extra solaires. Ça permettra entre autres de savoir quel est le type de cette exoplanète. Est-ce que c'est une géante gazeuse, rocheuse...etc. La méthode des transits nous permet surtout de connaître la période de révolution puis la distance étoile-exoplanète grâce à la troisième loi de Kepler.

Malgré l'efficacité de cette méthode, elle a, cependant, quelques limites dont la plus importante est le fait que la ligne de l'orbite d'une exoplanète quelconque doit être alignée avec le point de vue des astronomes, c'est-à-dire l'exoplanète doit être dans l'axe de visée. Pour cela, l'angle de l'inclinaison "i" doit être proche

de 90° , ce qui est rare à trouver.

Parmi les télescopes qui ont réalisé un grand succès avec une telle méthode, on peut citer le télescope spatial Kepler, le Satellite TESS de la NASA et le satellite CoRoT. La première exoplanète qui a été découverte par cette méthode est HD 209458 b. C'est une Jupiter chaude trouvée par l'équipe de **David Charbonneau**. Cette détection fut confirmée par le télescope spatial Hubble et rebaptisée après par le nom d'Osiris¹⁶.

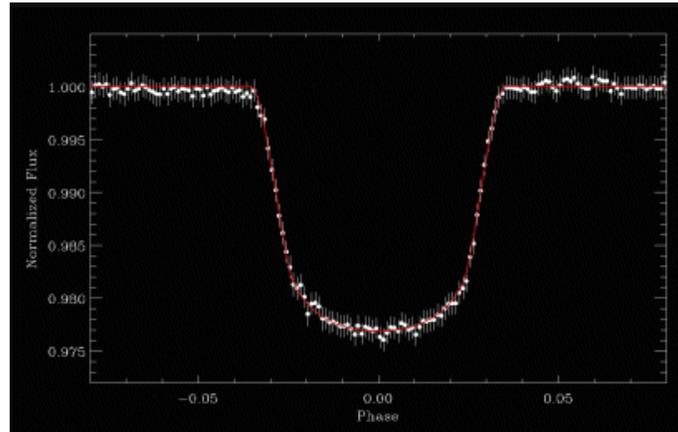


FIGURE 2.6 – La courbe de lumière d'un transit d'exoplanète observée par le satellite Corot en mai 2007

Les techniques dérivées du transit

Elles sont utilisées pour détecter des exoplanètes supplémentaires dans des systèmes planétaires dans lesquels d'autres exoplanètes furent déjà découvertes. Elles consistent en la

1. variation du moment de transit TTV
2. variation de la durée du transit TDV
3. variation de la profondeur du transit TPV

Les limites du transit

1. Les transits tous seuls ne permettent pas de mesurer la masse et l'excentricité de l'exoplanète.
2. Cette méthode ne permet pas de trouver le rayon de la planète. Elle calcule juste le rapport entre le rayon de l'étoile et celui de la planète, sauf dans le cas où il y a des perturbations gravitationnelles qui entrent en jeu (TTV). C'est pour cela qu'il vaut mieux connaître d'abord le rayon de l'étoile pour pouvoir accéder à celui de l'exoplanète.

Complémentarité entre la méthode du transit et la vélocimétrie

Le couplage de ces deux méthodes est le moyen le plus efficace pour la détection des exoplanètes. A condition bien sûr que l'inclinaison de l'orbite i doit être égale ou proche à 90° pour les deux méthodes. On aura ainsi accès à

16. le nom qui a été donné pour l'exoplanète HD 209458 b d'une façon informelle

- une estimation de la masse de l'exoplanète.
- à la densité de l'exoplanète.

2.3.3 Méthode astronomique (astrométrie)

Définition de l'astronomie

L'astronomie est un domaine d'observation du monde à grande échelle : observation de l'univers ; ses objets célestes, comme les étoiles, les planètes, les galaxies, les exoplanètes...etc. afin de déterminer leurs compositions, leurs caractéristiques physico-chimiques...etc.

Principe de la méthode astrométrie

L'astrométrie est une partie de l'astronomie. Elle consiste à calculer la distance et la position de l'étoile par l'observation de son mouvement autour du centre de masse du système étoile- exoplanète. Plus l'exoplanète est massive, plus le mouvement de l'étoile est affecté, Cette méthode est la plus utilisée depuis des années ; elle remonte à plus de 50 ans. Le principe de cette méthode ressemble à celui de l'effet Doppler-Fizeau.

L'astrométrie est plus adaptée à la détection de planètes géantes et de rayon orbital assez grand. Elle n'est donc pas adéquate pour la détection des exoplanètes semblables à la Terre, c'est à dire celle qui orbitent dans la zone habitable¹⁷ de leurs étoiles. Il existe plusieurs méthodes d'astrométrie. On peut citer **La lunette méridienne**,¹⁸, **l'astrométrie spatiale**, **l'astrométrie photographique**...etc.

La première exoplanète qui a été découverte par cette technique est l'exoplanète VB 10b, découverte par Steven pravdo et stuart shaklan de la NASA. C'est une Jupiter froide. Sa masse est de six (06) fois la masse de Jupiter avec une période orbitale qui est égale à 272 jours. Elle tourne autour d'une étoile naine rouge, à une distance d'environ 0.36 UA. Cette méthode et celle des vitesses radiales sont complémentaires car les deux mesurent le mouvement de l'étoile par rapport à son centre de gravité¹⁹.

La différence entre la méthode d'astrométrie et la méthode des vitesses radiales

Le mouvement périodique autour du centre de masse du système peut être décomposé en deux mouvements :

- un déplacement radial (ou projeté sur la ligne de visée)
- un déplacement ortho-radial (dans le plan du ciel).

Le premier est observable grâce à l'effet Doppler-Fizeau, ce qui revient à mesurer des variations de vitesse radiale de l'étoile, tandis que le second déplacement n'est pas mesurable par effet Doppler. Le seul moyen de le quantifier est par astrométrie. Cela veut dire que pour la vitesse radiale, l'exoplanète se meut dans un déplacement radial autrement dit dans le plan de visée, Par contre pour l'astrométrie, l'exoplanète se meut dans le plan du ciel. ÷ ÷

17. C'est une région de l'espace dont les conditions sont favorables pour une apparition de la vie telle que nous la connaissons sur terre.

18. C'est un instrument pour observer le passage et la position des étoiles

19. C'est le point d'application de la résultante des forces de gravité, il dépend des champs gravitationnels auquel les objets sont soumis.

2.3.4 Les Micro-lentilles gravitationnelles

Les méthodes que nous avons vu jusqu'à maintenant, à savoir la méthode des vitesses radiales et celle du transit sont efficaces uniquement pour une distance limitée. Elles ne sont valables, en effet, que pour la détection des exoplanètes proches du système solaire, c'est-à-dire des distances de quelques centaines à quelques milliers d'années-lumière tout au plus. Pour aller au delà, c'est-à-dire pour les grandes distances, on utilise généralement la méthode des micro-lentilles gravitationnelles.

Définition des lentilles gravitationnelles

Les lentilles gravitationnelles sont un phénomène qui consiste à détecter les objets célestes qui émettent beaucoup de lumière et qui sont trop massifs comme les étoiles, les amas d'étoiles²⁰, les nébuleuses, les amas des galaxies²¹ ...etc. car si nous sommes en présence d'une grande concentration de la masse, celle-ci peut agir comme une sorte de lentille gravitationnelle.

Ce phénomène a été découvert en 1912 par Albert Einstein 3 ans avant la publication de sa théorie de la Relativité Générale²².

Définition des micro-lentilles gravitationnelles

Cette méthode est basée sur la théorie de la Relativité Générale. Cette dernière nous renseigne que chaque objet dans l'univers courbe l'espace-temps²³, et cause la déviation des rayons lumineux, on parle dans ce cas de **lentilles gravitationnelles**. Cependant, si ces objets ne sont que des exoplanètes, dans ce cas, on parle de micro-lentilles gravitationnelles. Ce sont donc des phénomènes qui permettent de détecter des objets célestes qui n'émettent que peu ou bien pas de lumière.

Cette méthode a été utilisée la première fois en 1993 dans le but de détecter la nature de la matière noire²⁴. C'est aussi un moyen pour déceler la présence des trous noirs²⁵ ou encore la détection des exoplanètes.

Le principe des micro-lentilles gravitationnelles dans le cas des exoplanètes

Beaucoup d'observations du ciel peuvent être considérées comme des tentatives de recherche des exoplanètes, Inversement, une expérience dont le but est de détecter des planètes extra-solaires peut permettre de mieux connaître certaines caractéristiques de ces objets astrophysiques.

Un exemple frappant est fourni par l'utilisation des micro-lentilles gravitationnelles. Nous avons vu plus haut la définition de ces micro-lentilles gravitationnelles, dans ce qui suit on verra son principe,

20. C'est un rassemblement d'étoiles dans le ciel

21. c'est la combinaison de plusieurs galaxies qui sont liées entre elles par un champ gravitationnel

22. C'est une théorie relativiste plongée dans un champ de gravitation, elle décrit le mouvement des astres à la présence de la matière ou de l'énergie, en tenant compte des principes de la relativité restreinte

23. C'est une méthode pour représenter l'espace et le temps d'une façon mathématique et les relier dans une seule notion. Cet espace-temps est déformée par la présence de la matière

24. C'est une notation qui a été inventée pour expliquer certains phénomènes astrophysiques

25. C'est un objet dans l'univers dont son champ gravitationnel tend vers l'infini. Ni la matière ni la lumière ne peut s'en échapper

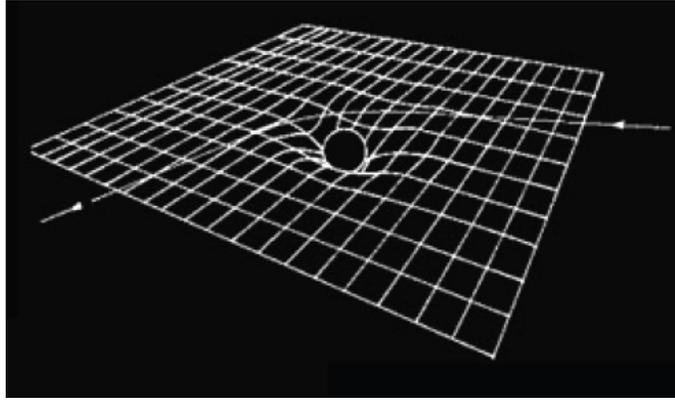


FIGURE 2.7 – L'espace-temps est déformé en la présence des objets massifs comme les étoiles, la lumière alors suit le plus court chemin

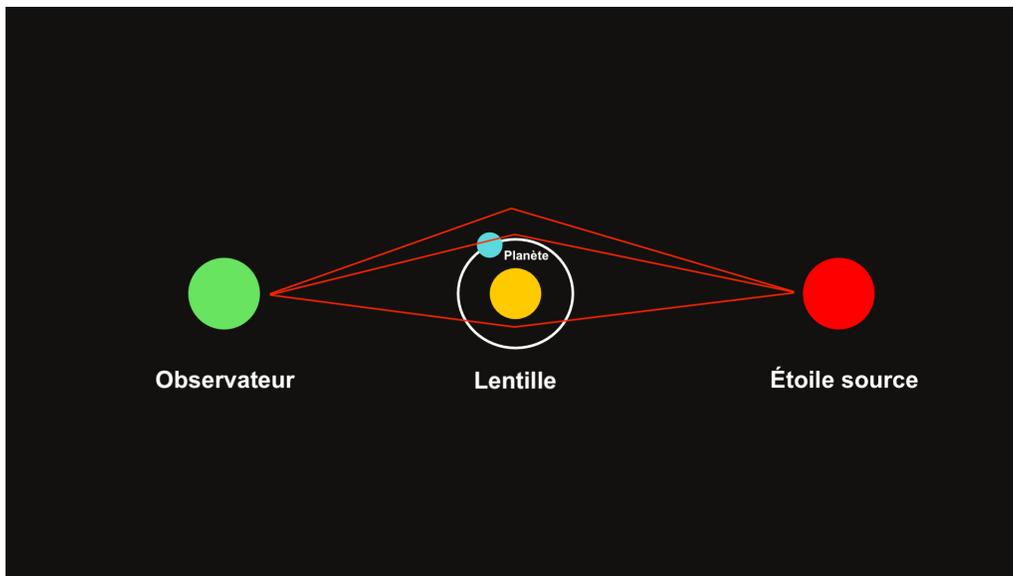


FIGURE 2.8 – La méthode des micro-lentilles gravitationnelles

Le principe de la technique des micro-lentilles gravitationnelles est basé sur le même effet que celui des lentilles gravitationnelles. Le champ gravitationnel²⁶ d'un objet (la lentille) peut courber l'espace autour de lui. La trajectoire des rayons lumineux est déviée ce qui entraîne un changement de l'apparence de l'image d'un autre objet situé derrière. Quand la lentille a une masse de l'ordre de la masse solaire, l'effet peut être assez important. Entre autres, le flux lumineux de l'image peut être amplifié par le passage de la lentille. Cela a motivé plusieurs scientifiques de tenter la détection d'exoplanètes, ayant des masses sub-solaires, avec cette technique.

Cette dernière méthode consiste à surveiller un certain nombre d'étoiles, et quand une d'entre elles devient soudainement plus brillante, on se penche plus en détail sur elle. Il y a, en effet, plusieurs phénomènes, à part les lentille gravitationnelle qui peuvent causer cet éclat soudain (une variation de la luminosité de l'étoile). Différents tests permettent alors d'isoler le scénario des micro-lentilles gravitationnelles. Par exemple, dans le cas des micro-lentilles gravitationnelles, la variation de luminosité est indépendante de la couleur, ce qui

26. c'est un champ qui existe dans l'univers, du à la présence d'une masse

n'est pas le cas pour les autres phénomènes.

La première exoplanète qui a été détectée par cette méthode est OGLE-2005-BLG-390L b surnommée par Hoth. C'est une super terre de glaces, d'une masse de 5.5 masse terrestre. Elle tourne autour d'une étoile naine rouge avec une période orbitale de 10.4 années. Elle fut découverte en 2005 et annoncée en 2006.

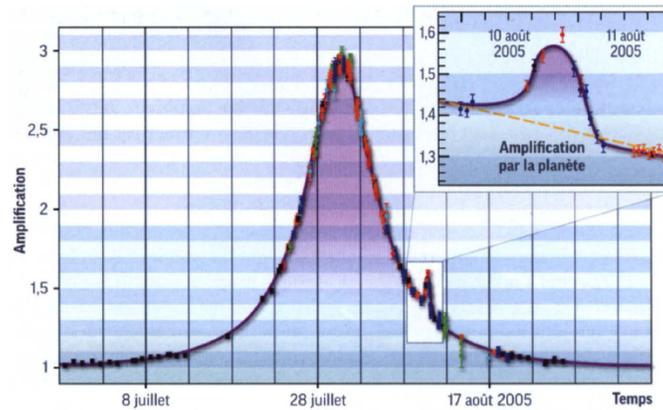


FIGURE 2.9 – Courbe de lumière d'un astre éloigné, lorsque l'étoile lentille OGLE • 2005-BLG • 390 est passée dans la ligne de visée

Les différentes couleurs de la figure 2.9 correspondent à des mesures par différents observatoires. Le passage d'une planète en orbite autour de l'étoile (lentille) a perturbé la courbe de lumière pendant quelques heures en accentuant l'effet d'amplification.

Catégorie des exoplanètes pouvant être détectées par cette méthode

Cette méthode permet de détecter les exoplanètes les plus petites et qui sont éloignées de leurs étoiles,

La limite de cette méthode

- une observation ne peut être répétée, ce qui rend l'étude ultérieure du système par une autre méthode nécessaire.
- cette détection nous donne peu d'informations sur l'exoplanète.

2.3.5 Méthode interférométrique

Définition des interférence

Le phénomène d'interférence est un phénomène qui résulte de la combinaison de deux ondes qui sont en interaction. Autrement dit, c'est une collision entre deux ondes. Mais pour que cette technique marche, il va falloir que les deux ondes aient la même fréquence. Généralement, on trouve ce phénomène en optique, mais il peut résulter de l'interaction aussi bien des ondes électromagnétiques que des ondes sonores...etc.

Principe de la méthode de l'interférométrie

C'est une méthode indirecte pour observer des objets célestes y compris les exoplanètes. Elle consiste à trouver une image de la planète extra-solaire sous forme d'un point lumineux. La méthode d'interférométrie est basée sur l'utilisation de deux télescopes qui sont pointés sur la même source et qui sont éloignés l'un par rapport à l'autre. Les faisceaux ainsi détectés par les deux télescopes vont se recombiner pour produire une interférence. La réception de la lumière ne se fait pas au même instant, ce qui introduit une différence de phase (φ) entre les deux faisceaux. Lorsque deux ondes de la même fréquence se fusionnent, le diagramme de l'intensité lumineuse sera déterminé par la différence de phase entre les deux ondes. Les ondes en phase (superposées) vont subir une interférence constructive donc un renforcement de l'intensité, en produisant une onde de plus grande amplitude. Les ondes déphasées²⁷ de 180° vont subir une interférence destructive et cela se traduit par un affaiblissement de l'intensité.

Le but de ces télescopes interférométriques est de nous donner une image qui contiendra des informations sur les exoplanètes. Si l'image comporte des couleurs vertes, ceci veut dire que cette exoplanète se compose d'une matière vivante. La technique d'interférométrie nous permet d'atteindre une résolution angulaire bien meilleure que les autres méthodes. Elle permet aussi de nous dévoiler quelques paramètres trop importants des exoplanètes tels que leurs rayons, de plus, elle est mieux adaptée pour les exoplanètes qui se trouvent proches de leurs étoiles.

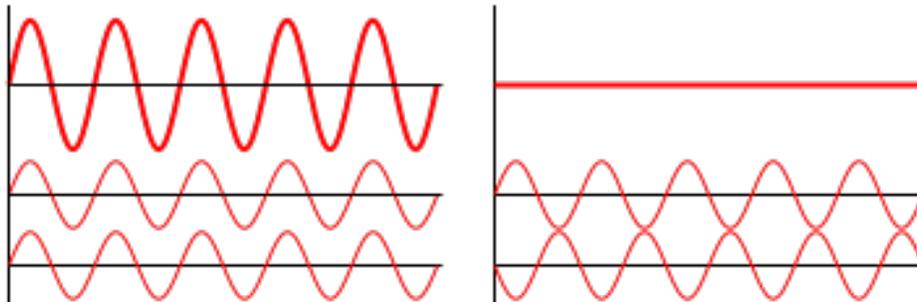


FIGURE 2.10 – a- interférence constructive b-interférence destructive

La première exoplanète qui a été découverte par cette méthode est l'exoplanète HR8799 e en 2010, grâce à l'instrument GRAVITY,

2.3.6 Méthode chronométrique

La méthode chronométrique s'applique pour détecter des exoplanètes qui tournent autour des étoiles de type pulsars. Un pulsar émet des rayons électromagnétiques dans la direction de son axe magnétique. Ce dernier n'est pas parfaitement aligné avec l'axe de rotation de l'étoile, ce qui se traduit par un jet conique des faisceaux de lumière émises par les pôles magnétique²⁸. Si le pulsar est isolé, son rayonnement restera constant mais dans le cas contraire où il y a des planètes qui tournent autour de lui, il y aura des perturbations gravitationnelles qui feront osciller l'étoile. Cette variation peut être périodique le long de la période

27. la différence entre deux phases.

28. Ce sont des points de convergence des lignes de champ magnétique

des pulses qui sont émises par le pulsar.

C'est autour d'un pulsar de type pulsar milliseconde²⁹ PSR B1257+12 qu'a été découvert les deux premières exoplanètes en 1992 par Aleksander Wolszczan en utilisant cette technique. Leurs demi grand axe est de 0.36 UA pour PSR B1257+12 c avec une période de rotation d'environ 66.5 jours, c'est la plus massive planète du système, et 0.46 UA pour PSR B1257+12 d avec une période d'environ 98 jours. Le pulsar PSR B1257+12 quant à lui est située environ 2314 UA (710 parsec).

La raison de la facilité de détection de ces exoplanètes autour de ce pulsar, c'est que ce dernier est une étoile à neutrons qui fait une rotation trop rapide sur elle-même. En effectuant un tour sur elle-même toutes les 6.22 milliseconde. Cette découverte a surpris les astrophysiciens car ils n'ont jamais suspecté l'existence d'exoplanètes qui tournent autour des pulsars.

Si on suppose que l'orbite de l'exoplanète est circulaire et perpendiculaire à son axe de rotation, alors l'amplitude de la variation des pulses des ondes sera mesurée avec la formule qui suit :

$$\tau = 1.6 * \frac{M_{planète} * P^{2/3}}{M_{pulsar}^{1/3}} \quad (2.19)$$

l'amplitude est en millisecondes

P : la période orbitale de la planète

2.4 La différence entre les méthodes de détection des exoplanètes

			exoplanète	
			masse	rayon
méthodes	mouvement dynamique de l'étoile	vitesse radiale	géante	proche
		astrométrie	petite	proche
		chronométrie	qui tourne autour d'un pulsar	
	signal photométrique de l'étoile	transit	géante	courte
		microlentilles	petite	lointaine
	méthode directe	imagerie directe	géante	courte

TABLE 2.1 – La différence entre les méthodes de détection

29. c'est un type de pulsar qui a une période de rotation de 1 à 10 millisecondes autrement dit un pulsar recyclé

2.5 Le fruit des méthodes de détection

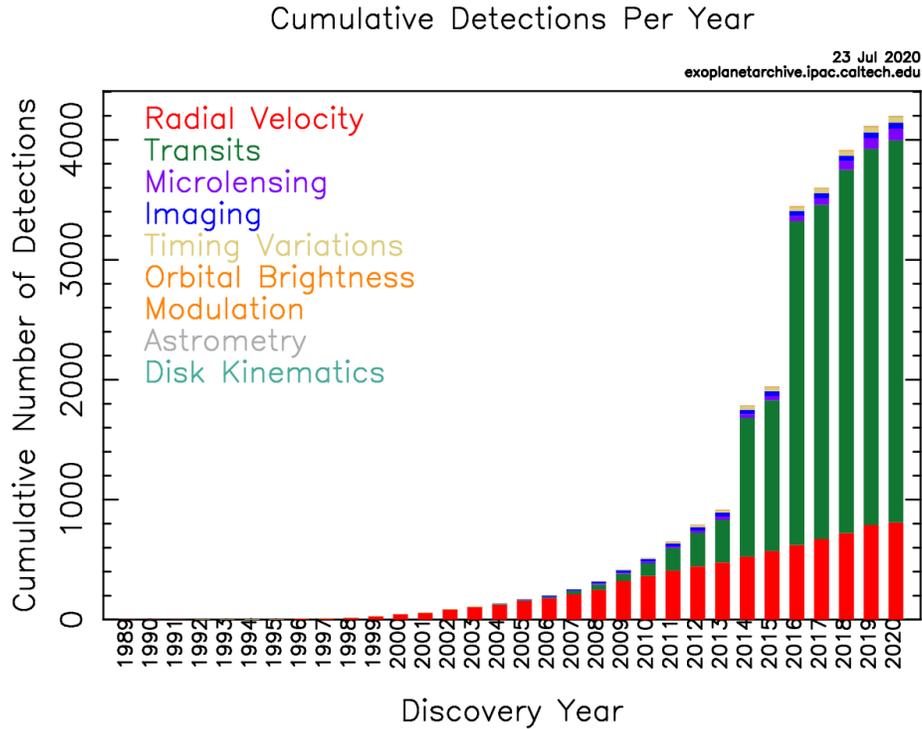


FIGURE 2.11 – La détection des exoplanètes depuis 1995 jusqu’au moment présent

La figure 2.11 nous montre qu’à mesure du développement des techniques de détection, les astrophysiciens ont pu découvrir plus de 4100 exoplanètes. On voit clairement que la méthode des transit est la 1^{ère} qui a détecté un nombre important des planètes extra solaires. Elle est suivie par la méthode des vitesses radiales, puis par celle de l’imagerie directes et celle des micro-lentilles gravitationnelles. En dernière position vient la méthode d’astrométrie qui a permis de découvrir peu d’exoplanètes.

2.6 Les détecteurs des exoplanètes

2.6.1 Depuis l'espace

Par la méthode du transit

Ce sont des télescopes spatiaux utilisant la technique du transit et ils permettent aujourd'hui de détecter un grand nombre d'exoplanètes.

1. Telescope spatial kepler :

Le télescope spatial Kepler est un télescope développé par la NASA. Il a été mis en orbite le 07 mars 2009, afin de détecter les exoplanètes situées dans la voie lactée. Le télescope Kepler est la dixième mission du programme Discovery³⁰ de la NASA. Le détecteur de ce télescope lui permet d'observer les exoplanètes de type terrestre orbitant autour d'étoiles semblables au Soleil. La NASA a déclaré que sa mission est terminée après 3.5 années, ce qui correspond à la durée de sa mission primaire.

La méthode de détection qu'il utilise est celle du transit, en mesurant la variation de la luminosité de l'étoile lorsque la planète passe. Il a détecté 2 662 objets dont la moitié représente des exoplanètes, Il a réussi à découvrir plusieurs phénomènes, comme par exemple la découverte des systèmes multi-planétaires, la découverte des planètes de masse proche de celle de la Terre.

C'est le 30 octobre 2018 que la NASA a annoncé la mort définitive du télescope spatial Kepler après sa mission K2³¹ ceci suite à l'impossibilité de remplir le réservoir de Kepler.

2. telescope TESS :

Le satellite TESS est un télescope qui a été lancé le 18 avril 2018 dans le but de détecter des exoplanètes, Il va permettre aux astronomes d'établir le catalogue des objets célestes. Il est aussi en mesure de détecter plusieurs exoplanètes type tellurique qui orbitent dans les zones habitables de leurs étoiles, de types naine jaune comme le soleil, et aussi de type naine orange.

Le télescope TESS peut observer des étoiles plus brillantes que celle qui sont détectées par Kepler.

La durée de vie de sa mission primaire devrait être de 2 ans.

– Comparaison entre TESS et Kepler :

3. Satellite CoRot

Le satellite CoRot est un télescope spatial développé dans le but de réaliser deux objectifs : étudier la sismologie stellaire³² afin de déterminer la structure interne des étoiles et détecter des exoplanètes.

30. c'est un programme de plusieurs missions spatiales, il a été initié en 1992

31. K2 signifie Kepler 2, c'est la deuxième mission de Kepler après avoir prolonger sa première mission

32. est la science qui étudie les vibrations et les pulsations des étoiles

Caractéristiques	Kepler	TESS
Programme	Discovery	explorer
Masse	1050 kg	350 kg
Temps en pose	6 secondes	2 secondes
Durée de la mission	3.5 années	2 années
Période orbitale des exoplanètes	jusqu'à 1 an	10 jours
Types d'étoiles observées	tous les types	naines jaunes et naines orange

TABLE 2.2 – Comparaison des caractéristiques de TESS avec celles de Kepler

Ce satellite embarque un photomètre de haute précision, un télescope de 27 cm et deux paires de détecteurs CCD. Deux de ces capteurs sont consacrées à la sismologie et deux autres à la recherche des exoplanètes. Dans ce dernier cas, il s'agit d'observer un très grand nombre d'étoiles moins lumineuses afin qu'on puisse observer les transits des exoplanètes.

CoRot est lancé par l'agence AAS le 27 décembre 2006, à l'aide de Souyouz 2.1.B³³ au kazakhstan. Sa mission devait s'achever le 30 juin 2009, mais grâce à ses résultats prometteurs, ils l'ont prolongée jusqu'au 13 mars 2013. Après 7 ans et demi d'observations, ils ont décidé de désactivé CoRot le 17 juin 2014 suite à une panne d'alimentation des calculateurs de bord. Il a réussi à détecter 32 exoplanètes parmi lesquelles CoRot-7-b la première exoplanète de type super terre rocheuse qui a été découverte en 2009.

4. La mission PLATO

PLATO est un télescope spatial qui utilise la méthode du transit planétaire pour trouver les caractéristiques de ces objets et détecter des exoplanètes de type terrestres qui tournent autour de leurs étoiles avec une distance trop petite et surtout avec une magnitude apparente trop importante comprise entre 4 et 16. Il a été développé par l'ESA,

La mission PLATO a été proposée en 2007. Le satellite se compose de 26 télescopes de type lunette astronomique³⁴. Il a été sélectionné en février 2014 pour être mis en orbite en 2026. Sa mission primaire va durer 6 ans et il va utiliser aussi la méthode d'astérosismologie afin d'étudier le comportement des étoiles.

Il sera le troisième observatoire spatial consacré à l'étude des exoplanètes après Corot et Kepler.

Par la méthode des micro-lentilles gravitationnelles

1. Telescope spatial Spitzer

SIRTF, est un télescope développé par la NASA. Il a été lancé le 25 août 2003, et rebaptisé après par le nom de Spitzer en hommage à l'astronome Lyman Spitzer qui a eu l'idée en 1946 d'envoyer des

33. C'est une version de la fusée souyouz 2 possède un moteur amélioré sur son 3^{ème} étage

34. C'est un instrument optique, elle nous permet lors d'une observation de modifier la taille et la luminosité des objets observés

télescopes vers l'espace. Son objectif est de détecter les exoplanètes, observer l'univers y compris les galaxies ou les étoiles...etc ou tout autre phénomènes qui peut être observé en infrarouge qui est la longueur d'onde des détecteurs de ce satellite.

Parmi les premières cibles visées par ce télescope, on peut citer la nébuleuse de la Tarentule en janvier 2004, ainsi que la détection des premières images de l'exoplanète HD 209458 b et TrES-1b en 2005,

En 2016, il a permis la détection de trois (03) exoplanètes de type telluriques Trappist-1 b, Trappist-1 c et Trappist-1 d qui orbitent autour de l'étoile naine rouge ultra froide Trappist-1 de type spectral M8, située dans la constellation de verseau. La période de révolution de la plus proche de ces exoplanètes est de 1.5 jours, et elle est située à 0.01 UA de son étoile. Elle fut découverte par la méthode du transit.

Ce télescope a pu trouver les exoplanètes les plus lointaines que nous connaissons à ce jour.

Après 16 ans de service, il a terminé sa mission le 30 janvier 2020,

2.6.2 Depuis la Terre

Ces télescopes sont très grands, ils ont plus de 10 mètres de diamètre et sont situés dans les régions où le ciel est pur et sans pollution.

Par la méthode des vitesses radiales :

Parmi ces télescopes, on peut citer :

NTT qui est un télescope de 3.58 mètres de diamètre. Il a été mis en fonctionnement en 1989 et a été fabriqué par l'ESO.

Le télescope optique de 3.6 mètres il a été classé parmi les plus grands télescopes de l'observatoire ESO. Il a été mis en service en 1977.

Le LBT est le plus grand télescope de type Binoculaire à réflexion. Il a 11.8 mètres de diamètre. Il l'a été mis en service en 2005. C'est un projet collaboratif de plusieurs observatoires astronomiques.

GTC est un télescope de type optique de 10.4 mètres de diamètre. Il a été mis en service en 2003. Jusqu'à présent, c'est le plus grand télescope optique dans le monde.

Par la méthode d'imagerie directe

1. le VLT :

C'est un projet européen développé par l'ESO et a été lancé en 1987. Il regroupe 4 télescopes principaux ayant des miroirs primaires de 8.2 mètres de diamètre et 4 télescopes auxiliaires mobiles, de 1.8 mètre. Il est situé au Chili. Il utilise la méthode d'imagerie directe infrarouge pour détecter des astres comme les exoplanètes. Il est capable d'observer la lumière dans un large spectre, et cela grâce à la constitution de ses instruments comme NACO pour l'imagerie infrarouge et NACOS pour l'optique adaptative. Les très grands télescopes ont été appelés Antu (le Soleil), Kueyen (la Lune), Melipal (la croix du sud) et Yepun (Vénus).

2. Télescope SHPERE :

Le développement de la recherche scientifique autour de la détection des exoplanètes par imagerie directe a permis aux astronomes de mieux connaître le monde à l'extérieur de notre système solaire. Cela grâce aux améliorations des instruments développés au cours des années tels que l'instrument SPHERE installé sur le VLT de l'ESO au Chili.

Le projet SPHERE est développé par l'ESO en se basant sur les deux concepts fondamentaux des deux instruments CHEOPS et le VLT. Toutefois il est dirigé par l'Institut de paléontologie et d'astrophysique de Grenoble et le laboratoire de LESIA. Son but est de détecter et d'étudier les exoplanètes de type géante gazeuse qui sont proches de leurs étoiles.

En 2016, la découverte de l'exoplanète HD 131399 autour de l'étoile HD 131399 a été effectuée grâce au télescope SPHERE. En 2017, il a permis la découverte de l'exoplanète HIP 65426 b qui tourne autour de l'étoile HIP 65426, par l'institut max Planck d'astronomie en Allemagne. Cette exoplanète est située à environ 385 année lumière de la Terre. C'est une exoplanète de type planète géante.

Étude des caractéristiques des exoplanètes

« L'expérience est une observation provoquée dans le but de faire naître une idée »
Claude Bernard

3.1 Introduction

Le domaine des planètes extra-solaires est l'un des domaines en astrophysique qui évolue le plus rapidement. En effet, après la détection de la première planète extra-solaire plus de 4000 exoplanètes ont été découvertes et ce domaine ne cesse de s'améliorer en passant par une phase de détection des exoplanètes vers une autre phase de caractérisation des planètes extra-solaires connues.

De la simple découverte des systèmes exoplanétaires nous sommes passé aux différentes variétés physiques et des propriétés orbitales des exoplanètes, Pour mieux connaître les propriétés des planètes détectées (masse, rayon, ...), il existe différentes méthodes.

Pour les planètes de notre système solaire, les chercheurs envoient des sondes¹ afin de mesurer et de capturer des images plus précises de ces dernières.

Pour les exoplanètes, grâce aux méthodes des vitesses radiales et celle des transits il est possible de déterminer la densité moyenne des planètes, car on connaît leurs masses et leurs rayons. Pour les autres propriétés, on peut utiliser, par exemple, la spectroscopie, pour connaître la composition chimique de leurs atmosphères.

Selon le contexte qui nous intéresse dans ce mémoire, ce chapitre est consacré à l'étude des différentes caractéristiques des exoplanètes.

3.2 Caractéristiques physiques

Une fois que les astrophysiciens ont pu observer les exoplanètes, ils se sont lancés tout de suite dans la recherche de leurs caractéristiques. Ceci a été fait dans le but de les regrouper dans des catégories suivant leurs propriétés physiques comme par exemple leurs masses, températures d'équilibre, leurs périodes de révolution ainsi que leurs densités. Néanmoins, ces propriétés sont liées aussi avec les propriétés physiques de leurs étoiles centrales.

1. une sonde est un vaisseau inhabité envoyé dans l'espace pour des missions spatiales

Les exoplanètes ont deux paramètres importants : la masse et la température de leurs surface. La masse va fixer la structure interne des exoplanètes, surtout sa luminosité. Plus une exoplanète est massive, plus elle devient plus chaude, et plus elle sera lumineuse c'est-à-dire que son flux lumineux sera trop important. Sa densité peut nous aider donc à distinguer son type : est ce qu'elle est tellurique, rocheuse, gazeuse...etc. et la température de sa surface nous aide à connaître la composition chimiques de ces objets.

La masse des exoplanètes

Elle peut être connue grâce à quelques méthodes de détection comme l'astrométrie ou bien en combinant la méthode des vitesses radiales avec celle de transit, mais à condition que la masse de son étoile soit connue, car la vitesse radiale toute seule ne fournit qu'une limite de la masse de ces objets.

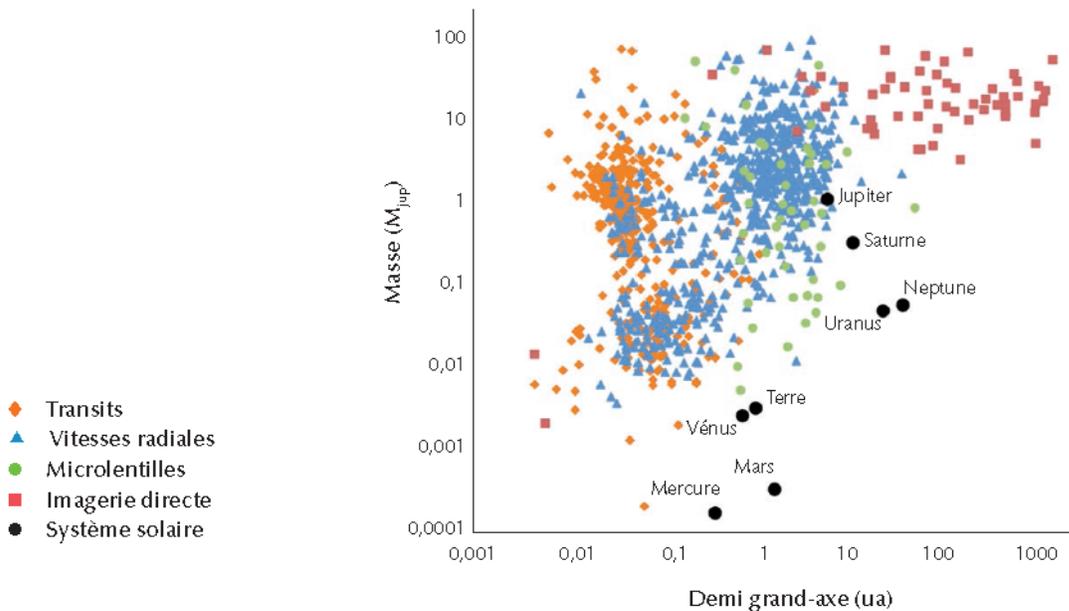


FIGURE 3.1 – la masse des exoplanètes en fonction de leurs longueurs de demi grand-axe

La densité des exoplanètes

Pour calculer la densité de l'exoplanète, on utilise la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.1)$$

avec :

M : la masse de l'exoplanète.

V : le volume l'exoplanète.

La densité nous permet de différencier entre une exoplanète tellurique et une exoplanète gazeuses. Si la densité calculée est très faible, ceci implique que cet objet est composé principalement d'hydrogène.

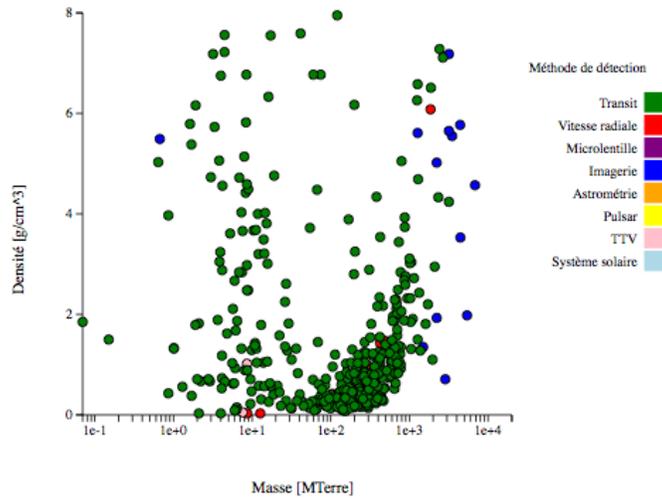


FIGURE 3.2 – La densité des exoplanètes en fonction de leurs masses

La température des exoplanètes

En ce qui concerne la température, les méthodes de détection ne nous permettent pas de la déterminer. Pour le faire, on exploite plutôt les propriétés de l'étoile et sa distance avec l'exoplanète. En général, pour calculer la température d'équilibre, on applique la relation suivante :

$$T_{equilibre} = T * \left(\frac{R}{2a}\right)^{0.5} (1 - A)^{0.25} \quad (3.2)$$

avec :

R : le rayon de l'étoile.

T : température de l'étoile.

a : demi grand axe de l'orbite de la planète.

A : l'albédo de la planète.

l'albédo (A) est le rapport entre la quantité de rayon lumineux réfléchi sur la quantité de rayon lumineux incident venant de l'étoile. La valeur de l'albédo est sans dimension. Elle est comprise entre 0 et 1 comme la probabilité.

La valeur de A est différente d'une surface à l'autre. Plus la surface absorbe les rayons lumineux et plus l'albédo devient faible.

- A=0, si la surface est noire, c'est à dire qu'elle absorbe toute la lumière ou bien la chaleur, sans réfléchir aucune radiation, comme le trou noir, par exemple.
- A=1 si la surface est réfléchissante, mais elle n'absorbe aucune radiation, comme les miroirs réfléchissants.
- on aura une surface blanche si son Albédo est de 80 % .
- pour toutes les exoplanètes qui ont des albédo inconnus, on utilise la valeur d'albédo de la Terre.

Dans le cas de la Terre $A=0.3$. L'appareil qui mesure l'albédo est un albédo-mètre.

exoplanètes	température d'équilibre en Celsius	température d'équilibre en kelvin
exoplanètes chaudes	$T > 100^\circ$	$T > 373^\circ$
exoplanètes tièdes	$100^\circ > T > 0^\circ$	$373^\circ > T > 273^\circ$
exoplanètes froides	$T < 0^\circ$	$T < 273^\circ$

TABLE 3.1 – La répartition des exoplanètes par température

L'atmosphère des exoplanètes

Plusieurs planètes, découvertes en dehors du système solaire, possèdent des atmosphères. Toutefois, ces exoplanètes ne doivent pas être petites pour pouvoir retenir ces atmosphères. La seule méthode qui peut détecter la présence de l'atmosphère des exoplanètes est celle de la spectroscopie. Cela, en comparant le spectre lumineux de l'étoile en l'absence de transit avec le spectre lumineux en sa présence. Ceci nous permet de connaître la composition chimique de ces atmosphères : présence des molécules de gaz, le carbone, l'oxygène, de l'eau, le sodium...etc.

En général, les raies d'absorption nous permettent de déterminer la composition chimique d'une atmosphère, tant dis que le spectre d'émission nous permet de connaître sa température.

Il existe deux catégories d'atmosphères :

- celles constituées. de gazes rares, et d'azote, avec une concentration constante.
- celles constituées. de dioxyde de carbone et surtout de vapeur d'eau.

L'eau joue un rôle trop important dans la composition de l'atmosphère. Son état peut être sous forme liquide, solide ou gazeux.

Lors de la première découverte effectuée par Hubble, dans le domaine visible et l'infrarouge proche, après le passage de l'exoplanète HD209458 b devant son étoile, les scientifiques ont détecté dans son atmosphère de l'hydrogène, de l'oxygène, du carbone et du Sodium. En 2005, des observations sur la même exoplanète, réalisées dans l'infrarouge par Hubble et Spitzer, ont permis la détection de la vapeur d'eau ainsi que le méthane CH_4 ,

La figure 3.3 est une observation spectroscopique réalisée lors de la détection de l'exoplanète HD 189733 b sachant que la couleur bleue signifie la présence de la vapeur d'eau dans son atmosphère. Alors que la couleur orange signifie la présence du méthane.

Parmi les télescopes spatiaux qui seront dédiés à la détection des atmosphères des exoplanètes on peut citer le télescope spatial JWST qui sera lancé en mars 2021.

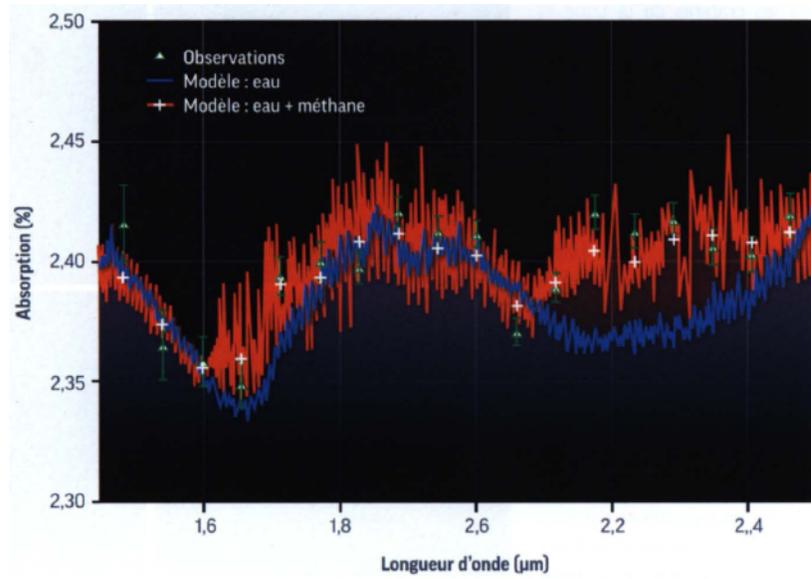


FIGURE 3.3 – Le transit de l'exoplanète HD189733 b lors de son passage devant son étoile.

l'exoplanète	année de découverte	composition atmosphérique
HD 209458 b	2001	sodium, hydrogène, carbone et oxygène
HD 189733 b	2008	l'eau, carbone, méthane
HAT-P-11 b	2014	vapeur d'eau, oxygène
WASP-33	2015	ozone, hydrocarbures

TABLE 3.2 – La composition atmosphérique de quelques exoplanètes

La magnitude des étoiles

La magnitude est une grandeur qui permet de mesurer la luminosité des étoiles. Plus l'étoile est brillante, plus sa magnitude est petite. La mesure de la magnitude se fait par photométrie. Il existe deux types de magnitude :

- La magnitude apparente : une mesure de l'irradiance² d'un objet céleste observé depuis la Terre.
- La magnitude absolue : indique la luminosité intrinsèque d'un objet céleste.

3.3 Caractéristiques orbitales

Parmi les propriétés qui peuvent caractériser les exoplanètes, on peut citer celles de leurs orbites. Ces caractéristiques sont différentes d'une exoplanète à une autre, à cause de leur diversité. Les caractéristiques orbitales sont, à titre d'exemple, la période orbitale, l'altitude, l'excentricité, l'inclinaison, le demi grand axe, l'argument du périégée. Ces paramètres déterminent la trajectoire et l'orientation des exoplanètes.

². autrement dit éclaircissement énergétique. C'est un terme radiométrique utilisé pour mesurer l'intensité du flux des rayons lumineux

La période orbitale

Grâce à la troisième loi de Kepler, on sait que plus l'objet est massif et proche de son étoile, plus grande sera sa vitesse. Ce qui va rendre sa période de révolution courte. La période orbitale afin qu'une exoplanète puisse accomplir un tour complet autour de son étoile est donnée par la relation suivante :

$$P = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{GM}} \quad (3.3)$$

avec :

a : demi grand axe, en mètre,
 G : la constante gravitationnelle,
 M : la masse de l'étoile, en kg.

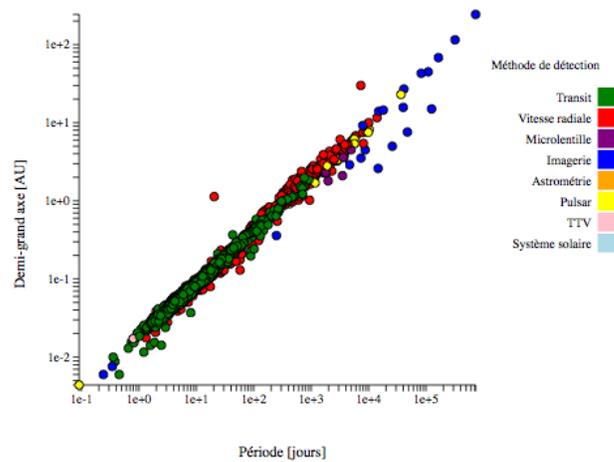


FIGURE 3.4 – La période orbitale en fonction du demi grand axe

Le diagramme illustré dans la figure (3.4) montre la période de révolution qui est proportionnelle au demi grand axe. Ceci nous explique la troisième loi de Kepler. A noter que ce diagramme est en coordonnées logarithmiques.

La métallicité des étoiles

Les étoiles auxquelles on a pu trouvé des exoplanètes sont plus riches en éléments lourds comme le fer, le carbone, l'oxygène...etc. La métallicité varie d'une étoile à l'autre. On peut la mesurer grâce aux signatures des atomes métalliques comme le fer, qui sont présents dans leur spectre visible ou ultraviolet. Nous avons remarqué que plus la métallicité des exoplanètes est grande et plus sa détection est facile.

Inclinaison de l'orbite

C'est l'angle entre le plan de l'orbite et le plan équatorial³. Il se compte de 0° à 90° dans le cas d'une orbite directe. Si il est compris entre 90° et 180° c'est celui d'une orbite rétrograde. Le diagramme illustré dans la figure (3.5) montre qu'un fort pourcentage des exoplanètes ont un angle d'inclinaison qui est presque égale à 90°. ceci veut dire qu'elles ont des orbites perpendiculaires à l'axe de rotation de l'étoile.

3. C'est un plan qui est perpendiculaire à l'axe de rotation de l'étoile

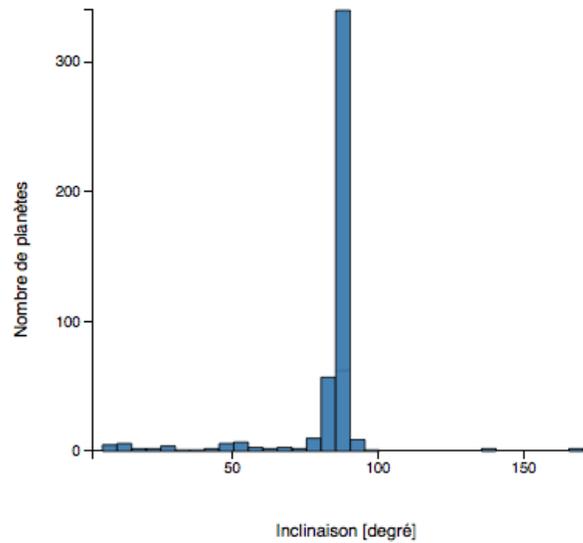


FIGURE 3.5 – inclinaison de l'orbite

L'excentricité :

Une ellipse est formée par deux foyers. L'excentricité e est le rapport de la distance entre un foyer et le centre de l'ellipse sur le demi-grand-axe. Elle définit le type de trajectoire.

$e = 0$: trajectoire circulaire

$0 < e < 1$: trajectoire elliptique

$e = 1$: trajectoire parabolique⁴

$e > 1$: trajectoire hyperbolique⁵

4. le mouvement d'un objet soumis à un champ de pesanteur uniforme

5. le mouvement d'un objet autour d'un corps central avec une vitesse suffisante pour échapper à l'attraction gravitationnelle de ce corps

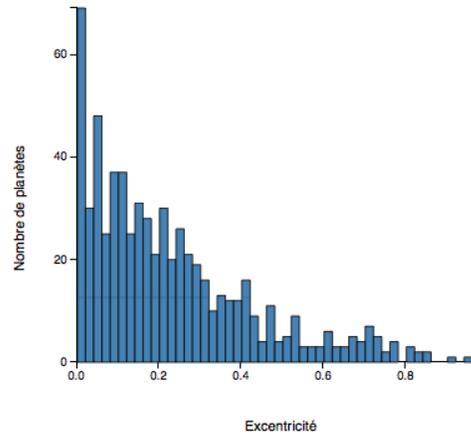


FIGURE 3.6 – Excentricités des exoplanètes

Le diagramme illustré dans la figure (3.6), montre l'excentricité des exoplanètes en fonction de leurs orbites. D'un côté, on voit qu'il y en a plusieurs qui ont des excentricités presque nulles et cela implique que la forme de leurs orbites est circulaire. De l'autre côté on voit que il y en a aussi des excentricités qui sont égale à 0.2 et cela veut dire que leurs orbites sont un peu trop excentrique.

L'importance de l'excentricité est de pouvoir se prononcer sur le type de trajectoire de l'orbite. C'est un nombre sans dimension et il existe deux méthodes pour la calculer :

1.

$$e = \frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (3.4)$$

avec :

$$c = \sqrt{a^2 - b^2}$$

a : la longueur de demi grand axe.

b : la longueur de demi petit axe.

2.

$$e = \frac{R_a - R_p}{R_a + R_p} \quad (3.5)$$

avec :

R_a signifie le rayon de l'aphélie⁶.

R_p signifie le rayon de périhélie⁷.

Exemple

L'excentricité de la Terre :

$$R_p = 147098074km$$

$$R_a = 152097701km$$

6. C'est le point de l'exoplanète le plus éloigné de l'étoile

7. C'est le point de l'exoplanète le plus proche de l'étoile

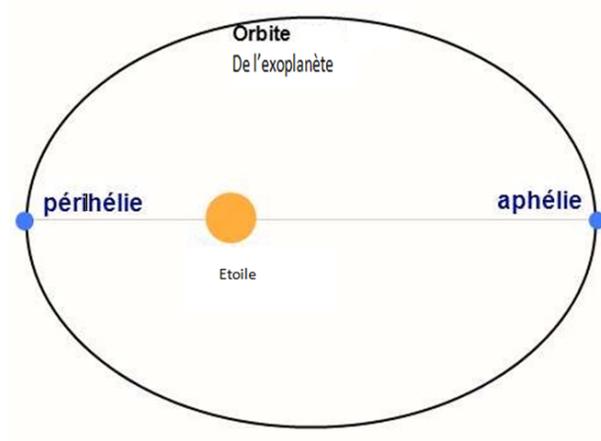


FIGURE 3.7 – Aphélie et périhélie de l'exoplanète

donc

$$e = \frac{152097701 - 147098074}{152097701 + 147098074} = 0.0167$$

L'excentricité des exoplanètes peut varier à cause de leurs interactions avec d'autres objets, comme dans le cas de la Terre; $e = 0.0167$, néanmoins, elle a déjà atteint une valeur de $e = 0.07$.

L'altitude

L'altitude d'une orbite, dépend de son type, si elle est elliptique ou bien circulaire,

- si l'orbite est circulaire, c'est une orbite basse.
- si son altitude est inférieur à 1500 km, c'est une orbite moyenne.
- si son altitude est entre 1500 km et 20 000 km donc c'est une orbite haute et au-delà.
- si son altitude est de plus de 36 000 km, c'est une orbite géostationnaire⁸.

L'argument du périhélie

C'est l'angle formé par la ligne des nœuds et la direction du périhélie'

Demi grand axe :

C'est la moitié du grand axe; si l'ellipse est un cercle donc le demi grand axe est le rayon.

8. une orbite d'une inclinaison nulle

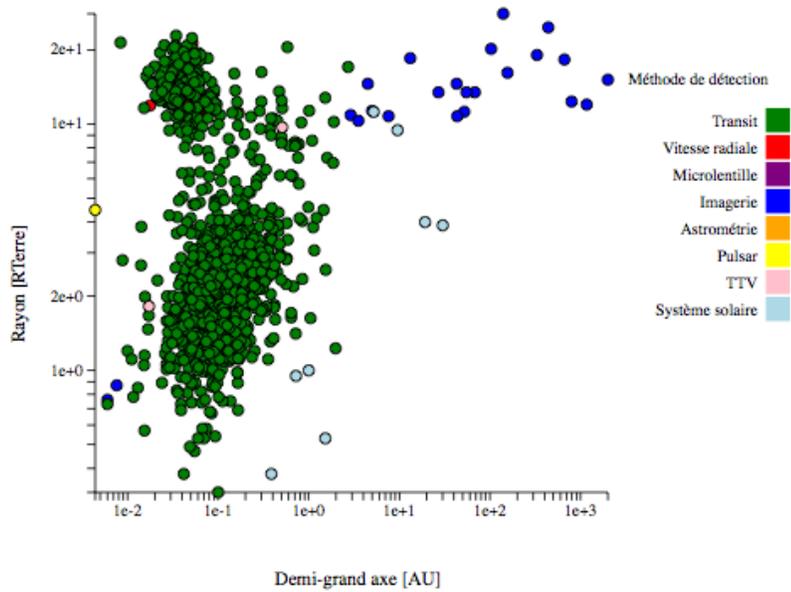


FIGURE 3.8 – Demi grand axe des exoplanètes et leurs méthodes de détection

Le diagramme illustré dans la figure (3.8) indique que la majorité des rayons des orbites sont découverts grâce à la méthode du transit et l'imagerie directe. Elle nous indique aussi que la plupart des exoplanètes qui ont été découvertes par la méthode du transit sont des planètes géantes et celle qui ont été découvertes par l'imagerie directe sont des planètes géantes trop éloignées de leurs étoiles.

Le classement des exoplanètes

« Sans l’astronomie, l’homme ignore la place qu’il occupe »
Aristote

4.1 Introduction

Une fois que nous avons trouvé les caractéristiques fondamentales des exoplanètes et que nous connaissons les périodes de leurs révolutions ainsi que les distances les séparant de leurs étoiles, leurs masses, leur composition chimiques autant que leurs densités, d’autres recherches ont été effectuées pour classer les exoplanètes.

4.2 Classement par leurs masses

On peut déterminer trois types d’exoplanètes grâce a leurs masses :

4.2.1 Les exoplanètes géantes

Ce sont de grosses exoplanètes. Elles sont très volumineuses et peu denses. Cette faible densité trahit la présence d’un petit noyau dense même si leurs masses sont trop importantes. Dans notre système solaire on distingue 4 planètes géantes ; Jupiter, Saturne, Uranus, et Neptune.

Dans cette catégorie, la température des exoplanètes géantes est suffisamment basse pour contenir de la glace dans leurs noyau. Elles ont acquis une masse suffisante pour que leurs atmosphères soit accretée par la gravité autour du noyau, pour qu’elle ne puisse pas s’en échapper. Cependant, dans le système solaire, on a deux classes. La première classe contient Jupiter et Saturne les plus massives et l’autre classe contient Uranus et Neptune les plus denses.

Toutes les planètes géantes sont formées par un noyau de glace à l’intérieur, et ce noyau est différent d’une classe à l’autre. Dans le cas de Jupiter et Saturne, le noyau de glace est de quelques fraction de leurs masse totale. Par contre, dans le cas de Uranus et Neptune, il représente plus de la moitié de leurs masses. Du coup, les chercheurs ont classé les planètes géantes en deux catégories ; les planètes géantes gazeuses et les planètes géantes de glace. En suivant ce même principe, on distingue deux types d’exoplanètes dans cette catégorie : les exoplanètes géantes glacées et les exoplanètes géantes gazeuses

4.2.2 Les petites masses

Ce sont des exoplanètes qui ont des masses petites, et très denses,. Toujours dans le système solaire, on peut citer Mercure, Venus, et Mars, et la Terre comme étant la plus grande.

4.2.3 Les terres

Ce sont des exoplanètes qui ont des masses semblables à celle de la Terre. Ils sont situées dans la zone habitables de leurs étoiles, comme l'exoplanète proxima centauri b. Certaines de ces exoplanètes pourraient contenir de l'eau liquide.

4.3 Classement par leurs compositions chimiques

4.3.1 Les exoplanètes telluriques rocheuses

Les exoplanètes telluriques sont des exoplanètes constituées essentiellement de roches et de métal. A titre d'exemple Mercure c'est une planète composée à 70 % de métal. Leurs surfaces sont solides, et leurs densités sont trop élevées. Généralement elle est comprise entre 4 et 5.7. Ces exoplanètes n'ont pas d'anneaux et peu de satellites.

La première exoplanète détectée est Gliese 581 c en avril 2007, puis Kepler 186 f en 2014. Elles sont une masse terrestre et elles sont situées dans la zone habitable de leurs étoiles. Toujours à titre exemple, on peut citer l'exoplanète HD 219134b, située à 21 années lumière de la Terre et découverte le 30 juillet 2015. Sa période orbitale est de 3 jours.

4.3.2 Les exoplanètes gazeuses

Les exoplanètes gazeuses sont des exoplanètes qui sont composées essentiellement de gaz comme l'hydrogène et l'hélium. Ce sont les exoplanètes les plus éloignées de leurs étoiles, Saturne en est un exemple de notre système solaire.

4.3.3 Les exoplanètes Chtonienne

Ce genre d'exoplanètes sont des résidus de géantes gazeuses dont l'atmosphère était composée essentiellement de l'hélium et de l'hydrogène, mais qui s'est évaporée du fait qu'elle est proche de son étoile. Ce type d'exoplanète a été proposé après la découverte de Osiris.

4.4 Classement par leurs distances avec leurs étoiles

4.4.1 les exoplanètes internes

Ce sont des exoplanètes qui sont proches de leurs étoiles. Elles sont composées de matières lourdes comme l'oxygène, le fer, le carbone. Ce sont des exoplanètes telluriques.

4.4.2 Les exoplanètes externes

Ce sont des exoplanètes qui sont trop éloignées de leurs étoiles. Ce sont les exoplanètes gazeuses.

4.5 Classement par rapport à leurs températures

Grâce au diagramme des masses des exoplanètes en fonction de leurs longueurs de demi grand-axe, on peut identifier deux familles particulières des exoplanètes :

4.5.1 Les Jupiters chauds

Les Jupiters chauds sont des exoplanètes qui sont proches de leurs étoiles. La température de ce type d'exoplanètes est de 1000 ° C. Elles ont des atmosphères trop chaudes ce qui explique leurs nom, Elles ont aussi des masses et des rayons proche de ceux de Jupiter, ces exoplanètes sont les 1^{ère} à être découvertes.

4.5.2 Les Jupiters froids

Les Jupiters froids sont des exoplanètes qui sont loins de leurs étoiles. Leurs masse est proche de celle de Jupiter et leurs température est trop faible.

Deuxième partie

Partie analyse

Détection d'une exoplanète par le logiciel salsaj avec la méthode du transit

5.1 Introduction :

Après avoir passé en revue les techniques de détection, la caractérisation et la classification des exoplanètes. Ce chapitre sera consacré essentiellement à détecter des exoplanètes par un logiciel Salsaj grâce à la méthode des transits. Nous présenterons aussi les principales étapes de traitement des données par ce Logiciel. Qui nous a mené à des résultats exploitables.

5.2 Présentation du Logiciel

Le logiciel Salsaj est un logiciel de traitement des données et d'analyse des images à partir d'images d'astronomie obtenues par des télescopes professionnels comme Spitzer, ou même directement depuis des télescopes robotisés. On peut peser une galaxie, découvrir des planètes...etc. Il a été conçu par un étudiant de l'observatoire de Nice. Développé dans le cadre du projet EU-HOU.

5.3 Intensité d'une étoile lors d'un passage de l'exoplanète en fonction de la distance

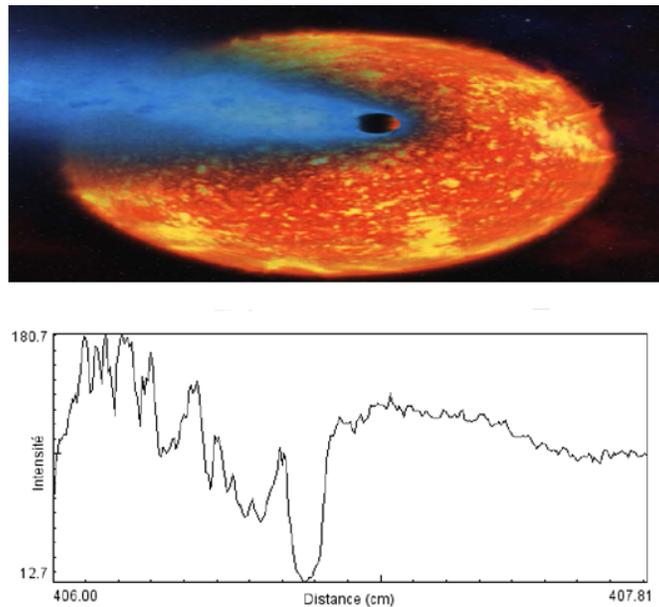


FIGURE 5.1 – Le passage de l'exoplanète HD209458 b devant son étoile et l'intensité de cette dernière

La figure au-dessus nous montre la présence d'une exoplanète autour d'une étoile. Grâce au logiciel Salsaj de traitement des images à partir d'images d'astronomie obtenues par des télescopes professionnels, nous avons pu tracer une courbe qui correspond au flux lumineux de l'étoile en fonction de la distance.

Au début, l'intensité lumineuse de l'étoile est trop élevée puis au fur et à mesure et à une distance donnée (sur la ligne de visée de l'observateur) elle s'est affaiblie. Ceci indique qu'une exoplanète tourne autour d'elle.

Du fait que l'exoplanète occulte la lumière de son étoile sur l'ensemble de sa surface, le flux observé de l'étoile est proportionnel à la surface non cachée.

5.4 Intensité d'une étoile lors d'un passage de l'exoplanète en fonction du temps

On dispose de 20 images réelles qui ont été obtenues à l'aide du télescope Spitzer. Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre 2, dans la partie théorique, ce télescope a été développé par la NASA et lancé en 2003 dans le but de détecter des exoplanètes.

Ces images représentent en réalité une seule image qui représente 3 étoiles mais à 20 instant différents. Le but de cette partie est de découvrir quelle est l'étoile parmi les trois qui possède une planète ? et pour cela nous allons étudier l'intensité de chacune de ces étoiles en fonction de temps.

Étapes à suivre pour étudier l'intensité de l'étoile

On ouvre les 20 images, puis en cliquant sur fenêtre → séparer pour les ordonner

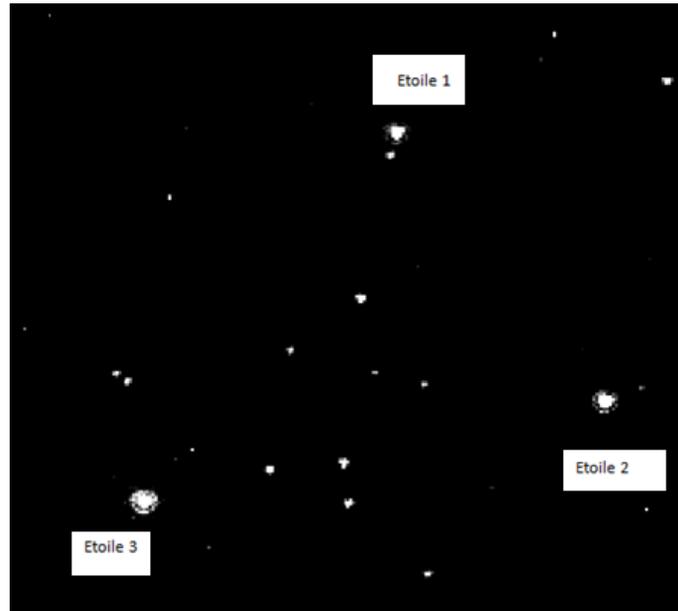


FIGURE 5.2 – Indication des trois étoiles étudiées

Après avoir ouvert les images et les avoir séparées, on va ensuite cliquer sur image → ajustement → luminosité/contraste → Auto, afin d'éclairer les images.

Juste après nous allons régler la photométrie en cliquant sur Analyse → paramètres de photométrie :

Coordonnées du centre étoile :	Auto
Ciel :	Rayon manuel = 36
étoile :	Rayon manuel = 6

TABLE 5.1 – Paramètres de photométrie

Nous avons choisi ces paramètres afin de minimiser la lumière venant du ciel lors de la mesure de l'intensité.

Puis pour chaque étoile, en cliquant sur analyse → photométrie, nous avons trouver ses caractéristiques, et à l'aide de l'excel nous avons pu copier les résultats dans trois tableaux.

Résultats :

Mesure	Image	X	Y	Intensité étoile	Rayon étoile	Intensité ciel	Rayon ciel	normalisation
1	SPITZER_I2_24538368_0000_0000_1_bcd.fits	147	58	29521	6	11	9	235,25
2	SPITZER_I2_24538368_0100_0000_1_bcd.fits	146	58	29280	6	12	9	-5,75
3	SPITZER_I2_24538368_0200_0000_1_bcd.fits	146	58	29455	6	12	9	169,25
4	SPITZER_I2_24538368_0300_0000_1_bcd.fits	147	57	29797	6	8	9	511,25
5	SPITZER_I2_24538368_0400_0000_1_bcd.fits	146	58	29137	6	11	9	-148,75
6	SPITZER_I2_24538368_0500_0000_1_bcd.fits	146	57	29665	6	7	9	379,25
7	SPITZER_I2_24538368_0600_0000_1_bcd.fits	146	58	29632	6	10	9	346,25
8	SPITZER_I2_24538368_0700_0000_1_bcd.fits	146	58	29516	6	12	9	230,25
9	SPITZER_I2_24538368_0800_0000_1_bcd.fits	146	58	28922	6	12	9	-363,75
10	SPITZER_I2_24538368_0900_0000_1_bcd.fits	146	58	28659	6	11	9	-626,75
11	SPITZER_I2_24538368_1000_0000_1_bcd.fits	147	58	28747	6	10	9	-538,75
12	SPITZER_I2_24538368_1100_0000_1_bcd.fits	146	57	28922	6	9	9	-363,75
13	SPITZER_I2_24538368_1200_0000_1_bcd.fits	146	58	28768	6	10	9	-517,75
14	SPITZER_I2_24538368_1300_0000_1_bcd.fits	146	57	29007	6	8	9	-278,75
15	SPITZER_I2_24538368_1400_0000_1_bcd.fits	147	58	29002	6	11	9	-283,75
16	SPITZER_I2_24538368_1500_0000_1_bcd.fits	147	58	29367	6	11	9	81,25
17	SPITZER_I2_24538368_1600_0000_1_bcd.fits	146	58	29335	6	10	9	49,25
19	SPITZER_I2_24538368_1700_0000_1_bcd.fits	146	57	29751	6	8	9	465,25
20	SPITZER_I2_24538368_1800_0000_1_bcd.fits	146	57	29694	6	8	9	408,25
21	SPITZER_I2_24538368_1900_0000_1_bcd.fits	146	58	29538	6	11	9	252,25
			moyenne :	29285,75				

FIGURE 5.3 – Les caractéristiques obtenues de l'étoile 1

Mesure	Image	X	Y	Intensité étoile	Rayon étoile	Intensité ciel	Rayon ciel	Message	normalisation
1	SPITZER_I2_24538368_0000_0000_1_bcd-1.fits	221	165	37766	6	9	9		58,7368421
2	SPITZER_I2_24538368_0100_0000_1_bcd.fits	221	165	37637	6	10	9		-70,2631579
3	SPITZER_I2_24538368_0200_0000_1_bcd.fits	221	165	37731	6	9	9		23,7368421
4	SPITZER_I2_24538368_0300_0000_1_bcd.fits	221	165	37612	6	9	9		-95,2631579
5	SPITZER_I2_24538368_0400_0000_1_bcd.fits	221	165	37567	6	9	9		-140,2631579
6	SPITZER_I2_24538368_0500_0000_1_bcd.fits	221	165	37793	6	9	9		85,7368421
7	SPITZER_I2_24538368_0700_0000_1_bcd.fits	221	165	37665	6	8	9		-42,2631579
8	SPITZER_I2_24538368_0800_0000_1_bcd.fits	221	165	37647	6	9	9		-60,2631579
9	SPITZER_I2_24538368_0900_0000_1_bcd.fits	221	165	37700	6	9	9		-7,26315789
10	SPITZER_I2_24538368_1000_0000_1_bcd.fits	221	165	37902	6	8	9		194,7368421
11	SPITZER_I2_24538368_1100_0000_1_bcd.fits	221	165	37711	6	9	9		3,73684211
12	SPITZER_I2_24538368_1200_0000_1_bcd.fits	221	165	37705	6	9	9		-2,26315789
13	SPITZER_I2_24538368_1300_0000_1_bcd.fits	221	165	37598	6	9	9		-109,2631579
14	SPITZER_I2_24538368_1400_0000_1_bcd.fits	221	165	37766	6	10	9		58,7368421
15	SPITZER_I2_24538368_1500_0000_1_bcd.fits	221	165	37750	6	9	9		42,7368421
16	SPITZER_I2_24538368_1600_0000_1_bcd.fits	221	165	37606	6	10	9		-101,2631579
17	SPITZER_I2_24538368_1700_0000_1_bcd.fits	221	165	37764	6	9	9		56,7368421
18	SPITZER_I2_24538368_1800_0000_1_bcd.fits	221	164	37794	6	9	9		86,7368421
19	SPITZER_I2_24538368_1900_0000_1_bcd.fits	221	165	37724	6	9	9		16,7368421
			moyenne :	37707,26316					

FIGURE 5.4 – Les caractéristiques obtenues de l'étoile 2

Mesure	Image	X	Y	Intensité étoile	Rayon étoile	Intensité ciel	Rayon ciel	Message	Normalisation
1	SPITZER_I2_24538368_0000_0000_1_bcd-1.fits	56	205	60243	6	14	9		103,75
2	SPITZER_I2_24538368_0100_0000_1_bcd.fits	56	205	60140	6	15	9		0,75
3	SPITZER_I2_24538368_0200_0000_1_bcd.fits	56	205	60159	6	15	9		19,75
4	SPITZER_I2_24538368_0300_0000_1_bcd.fits	56	205	60233	6	15	9		93,75
5	SPITZER_I2_24538368_0400_0000_1_bcd.fits	56	205	60084	6	15	9		-55,25
6	SPITZER_I2_24538368_0500_0000_1_bcd.fits	56	205	60253	6	15	9		113,75
7	SPITZER_I2_24538368_0600_0000_1_bcd-1.fits	56	205	60113	6	15	9		-26,25
8	SPITZER_I2_24538368_0700_0000_1_bcd.fits	56	205	60483	6	14	9		343,75
9	SPITZER_I2_24538368_0800_0000_1_bcd.fits	56	205	59999	6	15	9		-140,25
10	SPITZER_I2_24538368_0900_0000_1_bcd.fits	56	205	59957	6	16	9		-182,25
11	SPITZER_I2_24538368_1000_0000_1_bcd.fits	56	205	60071	6	14	9		-68,25
12	SPITZER_I2_24538368_1100_0000_1_bcd.fits	56	205	60155	6	14	9		15,75
13	SPITZER_I2_24538368_1200_0000_1_bcd.fits	56	205	60153	6	15	9		13,75
14	SPITZER_I2_24538368_1300_0000_1_bcd.fits	56	205	60180	6	15	9		40,75
15	SPITZER_I2_24538368_1400_0000_1_bcd.fits	56	205	60266	6	14	9		126,75
16	SPITZER_I2_24538368_1500_0000_1_bcd.fits	56	205	60134	6	14	9		-5,25
17	SPITZER_I2_24538368_1600_0000_1_bcd.fits	56	205	60105	6	15	9		-34,25
18	SPITZER_I2_24538368_1700_0000_1_bcd.fits	56	205	59818	6	15	9		-321,25
19	SPITZER_I2_24538368_1800_0000_1_bcd.fits	56	205	59820	6	15	9		-319,25
20	SPITZER_I2_24538368_1900_0000_1_bcd.fits	56	205	60419	6	15	9		279,75
			moyenne :	60139,25					

FIGURE 5.5 – Les caractéristiques obtenues de l'étoile 3

Remarque :

Normalisation = la valeur correspondante à la différence entre l'intensité de l'étoile et celle de la moyenne.

Récapitulation :

étoile 1	étoile 2	étoile 3
235,25	58,7368421	103,75
-5,75	-70,2631579	0,75
169,25	23,7368421	19,75
511,25	-95,2631579	93,75
-148,75	-140,263158	-55,25
379,25	85,7368421	113,75
346,25	-42,2631579	-26,25
230,25	-60,2631579	343,75
-363,75	-7,26315789	-140,25
-626,75	194,736842	-182,25
-538,75	3,73684211	-68,25
-363,75	-2,26315789	15,75
-517,75	-109,263158	13,75
-278,75	58,7368421	40,75
-283,75	42,7368421	126,75
81,25	-101,263158	-5,25
49,25	56,7368421	-34,25
465,25	86,7368421	-321,25
408,25	16,7368421	-319,25
252,25		279,75

FIGURE 5.6 – Les normalisations obtenues

On peut même calculer l'écart type de chaque courbe de l'intensité de l'étoile.

écart type étoile 1 :	écart type étoile 2	écart type étoile 3	écart type moyenne
363.753658	83.9820365	164.649188	204.1282943

TABLE 5.2 – Les écarts types mesurés

L'intensité lumineuse de chaque étoile en fonction du temps est représentée dans le diagramme ci-dessous.

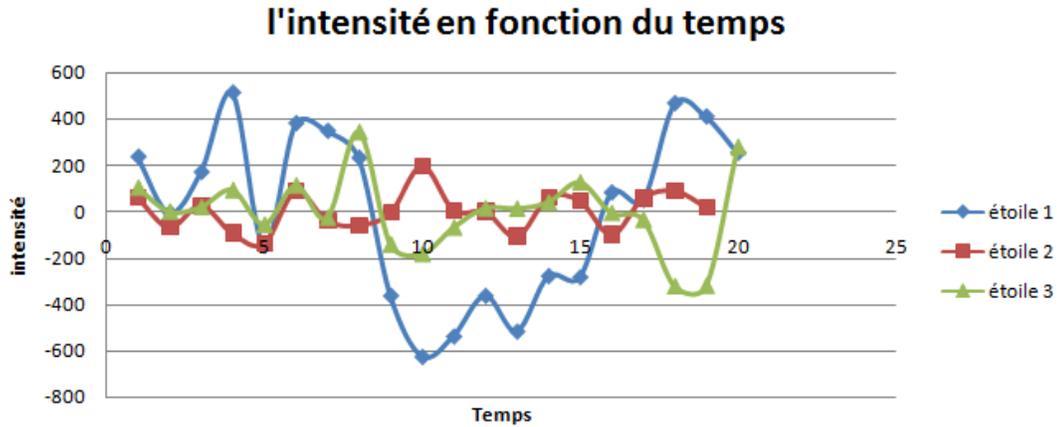


FIGURE 5.7 – L'intensité lumineuse mesurée pour chaque étoile en fonction du temps

Analyse des résultats :

Dans la figure 5.7, on observe une chute de l'intensité lumineuse de l'étoile 1 dans l'intervalle de temps [9,11]. Par comparaison avec les autres courbes de l'intensité lumineuse, à savoir celles de l'étoile 2 et l'étoile 3, on observe une légère variation de l'intensité, mais par rapport à l'étoile 1, ces fluctuations sont pratiquement constantes et donc on peut les négliger.

Conclusion :

D'après ces résultats on peut alors conclure que l'étoile 1 possède une planète car elle présente une baisse de sa luminosité, par contre les autres étoiles n'ont aucune planète qui orbitent autour d'elles.

Perspectives et conclusion générale

A travers ce mémoire, nous avons pu voir que la chasse aux exoplanètes ne fait que commencer. Néanmoins, depuis la 1^{ère} découverte de l'exoplanète 51 pégase b en 1995, toutes les découvertes qui se sont succédées ont déjà laissé apparaître d'importantes conclusions. Premièrement, l'existence d'autres mondes planétaires en dehors du système solaire est vérifiée. Deuxièmement, la majorité des exoplanètes découvertes ne se ressemblent absolument pas aux planètes du système solaire ; l'existence des exoplanètes géantes gazeuses qui s'évaporent, des exoplanètes océan, des exoplanètes géantes proches de leurs étoiles ; Jupiter chaud, la diversité des étoiles autour desquelles elles tournent ; de l'étoile de type soleil aux étoiles plus exotiques comme les étoiles à neutrons, il y en a même celles qui tournent autour des pulsars ! Certaines des systèmes planétaires sont dotées d'étoiles double ou multiple. C'est toute notre compréhension de la formation stellaire et planétaire qui se trouve remise en question, et de nouvelles théories ont été supposées. Comme dans le cas des Jupiter chaud ; une théorie évoquée est celle de la migration des planètes, qui permettent d'expliquer comment une planète géante se retrouve à proximité de son étoile.

Nous avons vu aussi qu'il est possible de diviser les méthodes de détection en deux catégories ; les méthodes directes qui permettent d'imager directement des exoplanètes, à l'aide de deux principes ; l'optique adaptative et le coronarographie stellaire. Les méthodes indirectes quant à elles, on peut les diviser en deux groupes ; celles qui exploitent les perturbations de l'étoile centrale par le champ gravitationnel de l'exoplanète lors de sa présence, et d'autres qui exploitent la perturbation de signal photométrique de l'étoile centrale.

Chaque méthode de détection a son propre rôle pour accéder ou étudier les caractéristiques physiques et orbitales des exoplanètes. La méthode du transit est la seule qui nous permet d'accéder avec précision au rayon de l'exoplanète. En combinant cette dernière avec la méthode des vitesses radiales, on aura accès à sa masse, ce qui nous mènera aussi à sa densité. En ce qui concerne les paramètres orbitaux, comme dans le cas de l'excentricité, on a trouvé que la majorité des orbites des exoplanètes sont bien circulaires et ce n'est pas le cas des planètes du système solaire qui dont les orbites sont quasi circulaires.

Jusqu'au jour d'aujourd'hui, et suivant les données que nous ont été disponibles, on peut dire que les scientifiques ont découverts plus de 4150 exoplanètes. La majorité sont des exoplanètes géantes, car elles sont plus faciles à détecter que les exoplanètes telluriques. Toutefois, la caractérisation des exoplanètes reste toujours une énigme et les connaissances actuelles sont particulièrement limitées, en particulier en ce qui concerne l'étude de leurs atmosphères et leurs structures internes. Mais cela ne nous a pas empêché de classer les exoplanètes dans différentes catégories.

Pour ce qui est des perspectives, je suis persuadée qu'il existe plusieurs milliards de planètes extrasolaires dans notre galaxie ; en cherchant constamment à mettre au point de nouvelles techniques et de nouveaux instruments afin de les découvrir comme par exemple le télescope spatial James-Webb, successeur du télescope Hubble qui sera lancé en Mars 2021, il sera en mesure à la communauté scientifique de multiplier le

nombre de découvertes, ce qui va enrichir la base de données des exoplanètes et ouvrir ainsi de nouvelles perspectives à la mise en place de nouvelles théories sur la formation et l'évolution des systèmes planétaires. Un immense champ reste donc à découvrir, notamment celui des planètes de type terrestre, car si un jour on trouvera des exoplanètes de type terres, cela voudrait dire peut-être qu'elles abritent de la vie ! Nul doute que dans l'avenir proche, il y aura de très grandes nouvelles découvertes dans le domaine des exoplanètes et nous comptons y contribuer.

Annexe 1 : Une extraordinaire diversité des exoplanètes

Au fur et à mesure que les astrophysiciens progressaient dans l'exploration du système solaire, ils ont conclu qu'aucune planète ne ressemble à sa voisine, chaque objet porte en soi l'histoire de sa formation et de son évolution. Cette remarque s'applique également dans le cas des exoplanètes. Chaque nouvelle découverte apporte des nouvelles surprises. Voici une liste de quelques exoplanètes :

1. 51 pégasi b :

Découverte en 1995 par la méthode des vitesses radiales, c'est une exoplanète de type Jupiter chaud, car c'est une géante gazeuse proche de son étoile 51 pégasi qui, quant à elle, est une naine jaune d'une magnitude apparente d'environ 5.49.

Sa période de révolution autour de son étoile est seulement 4.2 jours. Elle est située seulement à 50.9 année lumière du soleil (15,36 parsecs). Les astrophysiciens ont été surpris lors de la détection de cette exoplanète car ils ne s'attendaient pas à découvrir une planète assez proche de son étoile. Ceci les a poussé à rajouter une nouvelle classe des exoplanètes "les Jupiter chauds", elle a la moitié de la masse de Jupiter et 150 fois la masse de la Terre. A la surprise générale, le 26 Janvier 2017, a vu la détection de l'eau dans l'atmosphère de 51 pég b.

2. Proxima centauri b

Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil, qui est une naine rouge¹, appartenant au système d'alpha de centaur², possède une planète. Celle-ci est rocheuse, d'une taille comparable à celle de la Terre, et située dans la zone habitable de son étoile, donc l'eau liquide peut y exister en surface. Découverte par une équipe internationale de chercheurs dont Julien Morin, du Laboratoire Univers et Particule de Montpellier (CNRS/Université de Montpellier),

Proxima b est l'exoplanète la plus proche du Soleil, seulement à 4.2 années lumière de nous. La méthode de sa détection, le 24 août 2016, est celle des vitesses radiales. C'est une exoplanète tellurique comme la Terre. Sa magnitude apparente est de 11,2.

3. Exoplanète HD209458 b

1. ce sont de petites étoiles rouges, leurs masses sont comprises entre 0.08 et 0.8 celle du Soleil.

2. le système planétaire le plus proche de nous

HD209458 b est une exoplanète qui a été découverte avec la méthode des transits en 1999 par l'équipe de David Charbonneau, c'est une Jupiter chaude.

Elle a une masse de 0.69 la masse de Jupiter et un rayon égale à 94000 km, équivalent à 1.32 rayons de Jupiter. Elle est située environ 154 UA du Soleil équivalent à 47.1 parsec.

4. Exoplanète Kepler 1649 c

La fin d'une mission spatiale ne veut pas dire la fin des recherches scientifiques. Le télescope spatial Kepler avec la méthode du transit, a pu découvrir une nouvelle exoplanète semblable à la terre « exotérique », le 15 avril 2020 en se basant sur d'anciennes observations. Au début, ils l'ont déclaré comme étant un faux positif, autrement dit c'est un signal produit par un autre phénomène par exemple une variation de la luminosité intrinsèque de l'étoile. Cependant, d'après l'équipe de **Andrew Vanderburg** après avoir analysé les données de Kepler 1649, ils ont conclu que c'est une exoplanète.

Kepler 1649 c une exoplanète fabuleuse grâce à sa ressemblance frappante avec la Terre. Sa période de révolution est de 19.5 jours. Elle est située à 300 années lumière de notre système solaire. Son diamètre est un peu supérieur par rapport au diamètre de notre planète. Son rayon est d'environ 1.06 fois le rayon de la Terre. Toutefois, elle est située dans la zone habitable de son étoile Kepler 1649 dans la constellation du cygne. Elle est soumise à 75% de rayonnement de son étoile autant que ce que reçoit la Terre du Soleil, et sa température de surface est proche de celle de la Terre. Raisons pour lesquelles les astronomes ont déclaré que cette exoplanète est la plus ressemblante à notre planète. Il existe toutefois une légère différence entre les deux, l'étoile Kepler 1649 est une naine rouge, alors que notre Soleil est une naine jaune,

5. Exoplanète NGTS-4B

L'exoplanète NGTS-4 b est une planète Neptune chaude. Elle tourne autour de son étoile NGTS-4 qui est une naine rouge. Elle a été découverte par Next Generation transit Survey en 2019. C'est la seule exoplanète de taille Neptunienne, environ 80% de sa taille. Elle s'appelle une exoplanète interdite, car elle orbite autour d'une étoile trop petite, située dans le désert Neptunien chaud de son étoile.

6. Exoplanète Corot 7-b

Corot 7-b est une exoplanète de type super terre qui gravite autour de l'étoile Corot 7 de type naine orange. Elle est située à environ 490 années lumière du système solaire, ce qui est équivalent à 150 parsec³ (pc). Son diamètre est de 1.7 diamètre de la Terre. C'est l'une des exoplanètes détectées les plus petites à ce jour, située dans la constellation de la licorne.

Sa densité est estimée à $5.6g/cm^3$ ($5600kg/m^3$). Elle est proche de celle de la Terre qui est de $5.52g/cm^3$ ($5520kg/m^3$). C'est pour cette raison qu'on la considère comme une exoplanète tellurique.

C'est la septième exoplanète détectée par le satellite Corot, découverte en 2009 par la méthode du transit. Le système auquel elle appartient contient deux exoplanètes. La seconde est Corot 7-c.

Corot 7- b est tellement proche de son étoile ; qu'elle orbite autour cette dernière à seulement 0.017 UA. Elle expose toujours la même face à l'étoile ce qui a laissé la température de la face exposée atteindre

3. c'est une unité astronomique, elle mesure la distance entre les objets célestes, $1\text{parsec} = 3.26\text{annéelumièrre}$

plus de 2500°C alors que l'autre partie est glacée avec une température de -200°C.

7. Exoplanète 2M1207 b

2M1207 b est la première exoplanète qui a été découverte grâce à la méthode d'imagerie directe par infrarouge en 2004, au VLT de l'observatoire européenne austral au Chili.

Elle est de type géante gazeuse et tourne autour de l'étoile 2M1207 qui est une naine brune⁴ de type spectral⁵ M8⁶. Elle est située dans la constellation du centaure à environ 170 années lumière de la Terre et son rayon est de 1.5 fois le rayon de Jupiter.

En se basant sur les longueurs d'ondes ainsi que sur son spectre infrarouge, nous pouvons voir qu'elle a des molécules d'eau dans son atmosphère et que sa masse est entre 3 et 10 fois celle de Jupiter.

8. Exoplanète Gliese 1214 b

Gliese 1214 b est une exoplanète de type super terre qui gravite autour de l'étoile Gliese 1214 qui est une naine rouge de type spectral M4.5. Elle a été découverte en 2009 en utilisant la méthode du transit et cela grâce au projet Mearth⁷. Elle est située à environ 40 année lumière du Soleil,

Son rayon est 2.68 rayon de la Terre, son demi grand axe est égale à 6 millions de km et sa densité est faible.

Cette exoplanète est la première planète océan⁸ qui fut découverte, ce qui veut dire qu'elle est recouverte d'un gigantesque océan.

9. Exoplanète OGLE -2014 -BLG -0124 Lb

C'est l'une des exoplanètes les plus éloignées, située à une distance de 13 000 UA équivalent à 4100 parsec du système solaire. C'est une géante gazeuse, découverte, le 15 octobre 2014, par les télescopes spatial, Spitzer, et du télescope terrestre, Warsaw, en utilisant la méthode des micro-lentilles gravitationnelles,

Sa période orbitale est de 150 jours. Sa masse est la moitié de celle de Jupiter, sa distance par rapport à son étoile est de 3.1 UA.

4. Ce sont des étoiles de taille moyenne. Comprise entre 13 masse de Jupiter et 75 masse de Jupiter. Elle ne peut pas être une étoile car elle est moins massive tout étant plus massive que la planète géante

5. c'est un spectre qui correspond à un échelle de température

6. ce type spectral n'émet pas les rayons UV

7. C'est un projet développé par la NSF. Son but est de découvrir des exoplanètes qui tournent autour des étoiles de types naines rouges. en utilisant la méthode du transit

8. C'est une planète recouverte d'un océan d'une profondeur de dizaines de kilomètres

Annexe 2 : Les lois de Kepler

Les lois de Kepler décrivent les propriétés principales du mouvement des planètes autour du soleil. Il les a établis lors de l'observation et de la mesure de la position des planètes qui a été faite par Brahe.

La masse des planètes est trop faible comparée à celle du Soleil. alors dans ce cas, d'après Kepler, les interactions des planètes peuvent être négligées lors du calcul de leurs trajectoires. Ça se résume donc à un problème à deux corps ; la planète et le Soleil.

La force qui lie ces deux corps est la force de la gravitation solaire, qui est proportionnelle à la masse de chaque corps, et inversement proportionnelle au carré de la distance héliocentrique. Kepler a publié ses deux premières lois en 1609, Puis sa troisième en 1619.

1. La 1^{ère} loi : loi des orbites :

L'orbite d'une planète est une ellipse dont le Soleil et l'un des foyers. Le mouvement de l'objet peut être décrit par la formule suivante :

$$r = a \frac{(1-e^2)}{(1+e \cos \theta)} \quad (5.1)$$

avec :

- r : la distance héliocentrique
- a : le demi grand axe de la planète
- e : l'excentricité de la planète

2. La 2^{ème} loi : loi des aires :

Le rayon vecteur entre le centre du Soleil et la planète balaie des surfaces égales en temps égaux. Cette loi s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} \pi^2 \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = \frac{h}{2} \quad (5.2)$$

avec :

- h : la constante des aires
- A : la surface balayée par le rayon

3. **La 3^{ème} loi : loi des périodes :**

Le rapport du cube du demi grand axe de l'ellipse au carré de la période de révolution de la planète est constant.

$$\frac{a^3}{p^2} = k \quad (5.3)$$

Les planètes et les astéroïdes ont des orbites elliptiques quasi circulaires. Les satellites ont aussi des orbites quasi circulaires autour de leur planètes. Les comètes ont des trajectoires souvent fortement excentriques.

Les orbites des planètes, des astéroïdes et des comètes se définissent par rapport au plan de l'écliptique, qui est celui de l'orbite de la Terre.

Annexe 3 : La liste de quelques exoplanètes connues et confirmées

Dans ce qui suit une liste de quelques exoplanètes rassemblée dans le tableau suivant :

L'exoplanète	Masse (MJ)	Rayon exoplanète (RJ)	Période orbitale (Jours)	Rayon orbital (UA)	Excentricité	inclinaison	Distance (pc)	Méthode de détection
11 Com b	19.4	—	326.03	1.29	0.231	0.011664	110.6	Vitesses radiales
11 UMi b	10.5	—	516.22	1.54	0.08	0.012887	119.5	Vitesses radiales
14 And b	5.33	—	185.84	0.83	0	0.010864	76.4	Vitesses radiales
14 Her b	4.64	—	1773.4	2.77	0.369	0.153039	18.1	Vitesses radiales
16 Cyg B b	1.68	—	799.5	1.68	0.689	0.078468	21.41	Vitesses radiales
18 Del b	10.3	—	993.3	2.6	0.08	0.035568	73.1	Vitesses radiales
1RXS1609 b	8	1.7	—	330	—	2.27586	145	Imagerie
1SWASP J1407 b	20	0	3725	3.9	—	—	133	Transit
24 Sex b	1.99	—	452.8	1.333	0.09	0.017821	74.8	Vitesses radiales
24 Sex c	0.86	—	883	2.08	0.29	0.027807	74.8	Vitesses radiales
2M 0103(AB) b	13	—	—	84	—	—	47.2	Imagerie

TABLE 5.3 – liste de quelques exoplanetes

L'exoplanète	Masse (MJ)	Rayon exoplanète (RJ)	Période orbitale (Jours)	Rayon orbital (UA)	Excentricité	inclinaison	Distance (pc)	Méthode de détection
2M 0122-2439 b	–	—	13	52	–	–	36	Imagerie
2M 044144 b	7.5	–	–	15	–	0.107143	140	Imagerie
2M 0746+20 b	30	0.97	4640	2.897	0.487	0.237265	12.21	Imagerie
2M 2140+16 b	20	0.92	7340	3.53	0.26	0.1412	25	Imagerie
2M 2206-20 b	30	1.3	8686	4.48	0	0.167979	26.67	Imagerie
2M1207 b	4	–	–	46	–	0.877863	52.4	Imagerie
30 Ari B b	9.88	–	335.1	0.995	0.289	0.025254	39.4	Vitesses radiales
4 Uma b	7.1	269.3	–	0.87	0.432	0.011083	78.5	Vitesses radiales
42 Dra b	3.88	–	479.1	1.19	0.38	0.01223	97.3	Vitesses radiales
47 Uma b	2.53	–	1078	2.1	0.032	0.150322	13.97	Vitesses radiales
47 Uma c	0.54	–	2391	3.6	0.098	0.257695	13.97	Vitesses radiales
47 Uma d	1.64	–	14002	11.6	0.16	0.830351	13.97	Vitesses radiales
51 Peg b	0.468	–	4.23077	0.052	0	0.003537	14.7	Vitesses radiales
55 Cnc b	0.8	–	14.651	0.1134	0.0159	0.009303	12.34	Vitesses radiales
55 Cnc c	0.169	–	44.3446	0.2403	0.053	0.019473	12.34	Vitesses radiales
55 Cnc d	3.835	–	5218	5.76	0.025	0.466775	12.34	Vitesses radiales
55 Cnc e	0.02617	0.177536	0.736542	0.0156	0.06	0.001264	12.34	Transit
55 Cnc f	0.144	–	260.7	0.781	0.0002	0.06329	12.34	Vitesses radiales

TABLE 5.4 – Liste de quelques exoplanètes

L'exoplanète	Masse (MJ)	Rayon exoplanète (RJ)	Période orbitale (Jours)	Rayon orbital (UA)	Excentricité	inclinaison	Distance (pc)	Méthode détection
6 Lyn b	2.4	–	899	2.2	0.134	0.038664	56.9	Vitesses radiales
61 Vir b	0.016	—	4.215	0.050201	0.12	0.005892	8.52	Vitesses radiales
61 Vir c	0.0573	–	38.021	0.2175	0.14	0.025528	8.52	Vitesses radiales
61 Vir d	0.072	—	123.01	0.476	0.35	0.055869	8.52	Vitesses radiales
7 CMa b	2.6	–	763	1.9	0.14	0.096203	19.75	Vitesses radiales
70 Vir b	6.6	—	116.67	0.48	0.43	0.021818	22	Vitesses radiales
75 Cet b	3	–	691.9	2.1	–	–	81.5	Vitesses radiales
81 Cet b	5.3	–	952.7	2.5	0.206	0.02572	97.2	Vitesses radiales
91 Aqr b	3.2	–	181.4	0.7	0.027	0.006593	45.9	Vitesses radiales
AB Pic b	13.5	–	–	275	–	5.81395	47.3	Imagerie
alf Ari b	1.8	—	380.8	1.2	0.25	0.059406	20.2	Vitesses radiales
alf Cen B b	0.0036	—	3.2357	0.04	0	–	1.3	Vitesses radiales
BD +48 738 b	0.91	—	392.6	1	0.2	–	–	Vitesses radiales
BD+15 2940 b	1.11	—	137.48	0.539	0.26	–	585	Vitesses radiales
BD+20 274 c	4.2	—	578.2	1.3	–	–	–	Vitesses radiales

TABLE 5.5 – Liste de quelques exoplanetes

L'exoplanète	Masse (MJ)	Rayon exoplanète (RJ)	Période orbitale (Jours)	Rayon orbital (UA)	Excentricité	inclinaison	Distance (pc)	Méthode de détection
BD-061339 b	0.027	—	3.8728	0.0428	0	—	20	Vitesses radiales
BD-061339 c	0.17	—	125.94	0.435	0	—	20	Vitesses radiales
BD-082823 b	0.045	—	5.6	0.056	0.15	0.001327	42.2	Vitesses radiales
BD-082823 c	0.33	—	237.6	0.68	0.19	0.016114	42.2	Vitesses radiales
BD-10 3166 b	0.48	—	3.487	0.046	0.05	0.000697	66	Vitesses radiales
BD-17 63 b	5.1	—	655.6	1.34	0.54	0.038728	34.6	Vitesses radiales
BD14 4559 b	1.47	—	268.94	0.777	0.29	0.01554	50	Vitesses radiales
BD20 2457 b	21.42	—	379.63	1.45	0.15	0.00725	200	Vitesses radiales
BD20 2457 c	12.47	—	621.99	2.01	0.18	0.01005	200	Vitesses radiales
beta Cnc b	7.8	—	605.2	1.7	0.08	—	92.99	Vitesses radiales
beta Pic b	7	1.65	7890	9.04	0.06	0.440415	19.3	Imagerie

TABLE 5.6 – Liste de quelques exoplanètes

L'exoplanète	Masse (MJ)	Rayon exoplanète (RJ)	Période orbitale (Jours)	Rayon orbital (UA)	Excentricité	inclinaison	Distance (pc)	Méthode de détection
beta Umi b	6.1	–	522.3	1.4	0.19	–	40.14	Vitesses radiales
CD-35 2722 b	31	–	–	67	–	3.14554	21.3	Imagerie
CFBDS 1458 b	6.5	–	14600	2.6	–	0.112554	23.1	Imagerie
CHXR 73 b	12	–	–	200	–	–	–	Imagerie
CoRoT-1 b	1.03	1.49	1.50896	0.0254	0	5.5e-05	460	Transit
CoRoT-10 b	2.75	0.97	13.2406	0.1055	0.53	0.000306	345	Transit
CoRoT-11 b	2.33	1.43	2.99432	0.04351	0	7.8e-05	560	Transit
CoRoT-12 b	0.917	1.44	2.82804	0.04016	0.07	3.5e-05	1150	Transit
CoRoT-13 b	1.308	0.885	4.03519	0.051	0	3.9e-05	1310	Transit
CoRoT-14 b	7.6	1.09	1.51214	0.027	0	2	1340	Transit
CoRoT-16 b	0.535	1.17	5.35227	0.0618	0.33	7.4e-05	840	Transit
CoRoT-17 b	2.43	1.02	3.76813	0.0461	0	5	920	Transit
CoRoT-18 b	3.47	1.31	1.90007	0.0295	0.08	3.4e-05	870	Transit
CoRoT-19 b	1.11	1.29	3.89713	0.0518	0.047	6.5e-05	800	Transit
CoRoT-2 b	3.31	1.465	1.743	0.0281	0	9.4e-05	300	Transit
CoRoT-20 b	4.24	0.84	9.24285	0.0902	0.562	7.3e-05	1230	Transit
CoRoT-21 b	2.26	1.3	2.72474	0.0417	0	–	–	Transit
CoRoT-22 b	0.03838	0.435365	9.75598	0.092	0.077	0.000149	592	Transit
CoRoT-23 b	2.8	1.08	3.6314	0.0477	0.16	8	600	Transit
CoRoT-24 b	0.018	0.33	5.1134	0.056	0	9.3e-05	600	Transit
CoRoT-24 c	0.088	0.44	11.759	0.098	0	0.000163	600	Transit

TABLE 5.7 – Liste de quelques exoplanètes

L'exoplanète	Masse (MJ)	Rayon exoplanète (RJ)	Période orbitale (Jours)	Rayon orbital (UA)	Excentricité	inclinaison	Distance (pc)	Méthode détection
CoRoT-25 b	0.27	1.08	4.86069	0.0578	–	–	1000	Transit
CoRoT-26 b	0.52	1.26	4.20474	0.0526	0	–	1670	Transit
CoRoT-27 b	10.39	1.007	3.57532	0.0476	0.065	–	–	Transit
CoRoT-3 b	21.77	1.01	4.2568	0.057	0	8.4e-05	680	Transit
CoRoT-4 b	0.72	1.19	9.20205	0.09	0	–	–	Transit
CoRoT-5 b	0.467	1.33	4.0379	0.04947	0.09	0.000124	400	Transit
CoRoT-6 b	2.96	1.166	8.88659	0.0855	0.1	–	–	Transit
CoRoT-7 b	0.02334	0.148988	0.853585	0.0172	0	0.000115	150	Transit
CoRoT-7 c	0.0264	–	3.698	0.046	0	0.000307	150	Vitesses radiales
CoRoT-8 b	0.21583	0.569187	6.21229	0.063	0	0.000166	380	Transit
CoRoT-9 b	0.84	0.94	95.2738	0.407	0.11	0.000885	460	Transit
CT Cha b	17	2.2	–	440	–	2.66667	165	Imagerie
DE0823-49 b	28.5	–	246.36	0.36	0.345	–	20.77	Astrométrie
DH Tau b	11	–	–	330	–	–	–	Imagerie
DP Leo b	6.05	–	10230	8.19	0.39	–	–	Chronométrie
eps CrB b	6.7	–	417.9	1.3	0.11	–	67.9	Vitesses radiales
eps Eridani b	1.55	–	2502	3.39	0.702	1.05938	3.2	Vitesses radiales
eps Tau b	7.6	–	594.9	1.93	0.151	0.042889	45	Vitesses radiales
eta Cet b	2.55	–	403.5	1.27	0.13	–	38	Vitesses radiales
eta Cet c	3.32	–	751.9	1.93	0.1	–	38	Vitesses radiales
Fomalhaut b	3	–	320000	115	0.11	14.9273	7.704	Imagerie
FU Tau b	15	–	–	800	–	5.7 1429	140	Imagerie
FW Tau b	10	–	–	330	–	–	145	Imagerie
gamma Leo b	8.78	–	428.5	1.19	0.144	0.030909	38.5	Vitesses radiales

L'exoplanète	Masse (MJ)	Rayon exoplanète (RJ)	Période orbitale (Jours)	Rayon orbital (UA)	Excentricité	inclinaison	Distance (pc)	Méthode de détection
gamma Cephei b	1.85	–	903.3	2.05	0.049	0.148658	13.79	Vitesses radiales
GJ 1214 b	0.02032	0.238202	1.5804	0.01411	0.27	0.001077	13	Transit
GJ 160.2 b	0.03209	–	5.2354	0.053	0.06	–	–	Vitesses radiales
Gj 163 b	0.0334	–	8.633	0.06069	0.0106	–	15	Vitesses radiales
Gj 163 c	0.02285	–	25.645	0.1254	0.094	–	15	Vitesses radiales
Gj 163 d	0.06945	–	600.895	1.02689	0.399	–	15	Vitesses radiales
GJ 176 b	0.0265	–	8.7836	0.066	0	0.007006	9.42	Vitesses radiales
GJ 180 b	0.02611	–	17.38	0.103	0.11	–	–	Vitesses radiales
GJ 180 c	0.02013	–	24.329	0.129	0.09	–	–	Vitesses radiales
GJ 221 BD-061339 d	0.02296	–	500	1.06	0.04	–	20	Vitesses radiales
GJ 229 b	0.10068	–	471	0.97	0.1	–	–	Vitesses radiales
GJ 27.1 b	0.04090	–	15.819	0.101	0.08	–	–	Vitesses radiales
GJ 3021 b	3.37	–	133.71	0.49	0.511	0.027809	17.62	Vitesses radiales
GJ 317 b	1.8	–	691.78	1.15	0.11	0.076159	15.1	Vitesses radiales
GJ 317 c	2	–	10000	30	0.81	1.98676	15.1	Vitesses radiales
GJ 328 b	2.3	–	4100	4.5	0.37	–	19.8	Vitesses radiales
GJ 3470 b	0.04373	0.373807	3.33671	0.03557	–	–	30.7	Transit
GJ 3634 b	0.022	–	2.64561	0.0287	0.08	0.001449	19.8	Vitesses radiales
GJ 422 b	0.03114	–	26.161	0.119	0.05	–	–	Vitesses radiales

L'exoplanète	Masse (MJ)	Rayon exoplanète (RJ)	Période orbitale (Jours)	Rayon orbital (UA)	Excentricité	inclinaison	Distance (pc)	Méthode détection
GJ 433 b	0.01667	–	7.3697	0.06	0.05	0.006416	9.04	Vitesses radiales
GJ 433 c	0.14	–	3693	3.6	0.17	0.39823	9.04	Vitesses radiales
GJ 436 b	0.0737	0.365	2.6439	0.02887	0.15	0.00283	10.2	Transit
GJ 504 b	4	–	–	43.5	–	–	17.56	Imagerie
GJ 667C b	0.0176	–	7.2004	0.0505	0.13	0.007368	6.84	Vitesses radiales
GJ 667C c	0.0119	–	28.14	0.125	0.02	0.018289	6.84	Vitesses radiales
GJ 667C d	0.01604	–	91.61	0.276	0.03	0.044371	6.84	Vitesses radiales
GJ 667C e	0.0085	–	62.24	0.213	0.02	–	6.84	Vitesses radiales
GJ 667C f	0.0085	–	39.026	0.156	0.03	–	6.84	Vitesses radiales
GJ 667C g	0.0145	–	256.2	0.549	0.08	–	6.84	Vitesses radiales
GJ 674 b	0.037	–	4.6938	0.039	0.2	0.00859	4.54	Vitesses radiales
GJ 676A b	4.95	–	1050.3	1.8	0.328	0.109422	16.45	Vitesses radiales
GJ 676A c	3	–	4400	5.2	0.2	–	16.45	Vitesses radiales
GJ 676A d	0.014	–	3.6	0.0413	0.15	–	16.45	Vitesses radiales
GJ 676A e	0.036	–	35.37	0.187	0.24	–	16.45	Vitesses radiales
GJ 682 b	0.013843	–	17.478	0.08	0.08	–	–	Vitesses radiales
GJ 682 c	0.027365	–	57.32	0.176	0.1	–	–	Vitesses radiales

TABLE 5.10 – Liste de quelques exoplanètes

L'exoplanète	Masse (MJ)	Rayon exoplanète (RJ)	Période orbitale (Jours)	Rayon orbital (UA)	Excentricité	inclinaison	Distance (pc)	Méthode détection
GJ 832 b	0.689048	–	3416	3.6	0.08	0.688259	4.94	Vitesses radiales
GJ 832 c	0.015731	–	35.67	0.162	0.03	–	4.94	Vitesses radiales
Gl 15 A b	0.016832	–	11.4433	0.0717	0	–	3.587	Vitesses radiales
Gl 179 b	0.82	–	2288	2.41	0.21	0.195935	12.3	Vitesses radiales
Gl 581 b	0.05	–	5.36865	0.041	0.031	0.006602	6.21	Vitesses radiales
Gl 581 c	0.017	–	12.9182	0.073	0.07	0.011755	6.21	Vitesses radiales
Gl 581 e	0.0061	–	3.14945	0.028	0.32	0.004509	6.21	Vitesses radiales
Gl 649 b	0.328	–	598.3	1.135	0.3	0.109768	10.34	Vitesses radiales
Gl 649 c	0.03	–	4.4762	0.043	0.2	–	10.34	Vitesses radiales
Gl 687 b	0.058	–	38.14	0.16353	0.04	–	4.5	Vitesses radiales
Gl 785 b	0.067960	–	74.39	0.319	0.3	0.035911	8.911	Vitesses radiales
Gl 86 b	4.01	–	15.766	0.11	0.046	0.010092	10.9	Vitesses radiales
Gliese 876 b	1.927	–	61.03	0.208317	0	0.044323	4.7	Vitesses radiales
Gliese 876 c	0.637	–	30.23	0.12959	0.002	0.027572	4.7	Vitesses radiales
Gliese 876 d	0.017	–	1.94	0.0208066	0.081	0.004427	4.7	Vitesses radiales
Gliese 876 e	0.039	–	124.69	0.3343	0.073	0.071128	4.7	Vitesses radiales
GQ Lup b	21.5	1.8	–	103	–	0.735714	140	Imagerie
GSC 6214-210 b	17	–	–	320	–	2.2069	145	Imagerie

TABLE 5.11 – Liste de quelques exoplanètes

GU Psc b	11	–	–	2000	–	–	48	Imagerie
HAT-P-1 b	0.525	1.319	4.4653	0.05561	0.067	0.000398	139	Transit
HAT-P-11 b	0.082434	0.421983	4.8878	0.053	0.198	0.001395	38	Transit
HAT-P-12 b	0.21049	0.954592	3.21306	0.0384	0	0.000269	142.5	Transit
HAT-P-13 b	0.85	1.28	2.91624	0.0426	0.0142	0.000199	214	Transit
HAT-P-13 c	14.28	–	446.27	1.186	0.6616	0.005542	214	Vitesses radiales
HAT-P-14 b	2.2	1.2	4.62766	0.0594	0.095	0.00029	205	Transit
HAT-P-15 b	1.946	1.072	10.8635	0.0964	0.19	0.000507	190	Transit
HAT-P-16 b	4.193	1.289	2.77596	0.0413	0.036	0.000176	235	Transit
HAT-P-17 b	0.534	1.01	10.3385	0.0882	0.346	0.00098	90	Transit
HAT-P-17 c	1.4	–	1798	2.75	0.1	0.030556	90	Vitesses radiales
HAT-P-18 b	0.196961	0.990277	5.50802	0.0559	0.084	0.000337	166	Transit
HAT-P-19 b	0.292	1.132	4.00878	0.0466	0.067	0.000217	215	Transit
HAT-P-2 b	8.74	0.951	5.63347	0.0674	0.5171	0.000571	118	Transit
HAT-P-20 b	7.246	0.867	2.87532	0.0361	0.015	0.000516	70	Transit
HAT-P-21 b	4.063	1.024	4.12446	0.0494	0.228	0.000194	254	Transit
HAT-P-22 b	2.147	1.08	3.21222	0.0414	0.016	0.000505	82	Transit
HAT-P-23 b	2.09	1.368	1.21288	0.0232	0.106	5.9e-05	393	Transit
HAT-P-24 b	0.685	1.242	3.35524	0.0465	0.067	0.000152	306	Transit
HAT-P-25 b	0.567	1.19	3.65284	0.0466	0.032	0.000157	297	Transit

TABLE 5.12 – liste de quelques exoplanètes

Bibliographie

- [1] NASA. National Aeronautics and Space Administration.
- [2] LESIA- l'observatoire de paris
- [3] Futura SCIENCES. URL : <https://www.futura-sciences.com/sciences/>
- [4] ODYSSESPACE, astronomie sous toutes ces formes. URL : <http://www.odysseespace.fr/index.php>
- [5] WIKIPÉDIA. L'encyclopédie libre
- [6] NASA EXOPLANET ARCHIVE. URL : <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
- [7] ESO. Europe du Sud Observatoire. URL : <https://www.eso.org/public/france/science/exoplanets/>
- [8] Les exoplanètes. URL : <http://exoplanetes.esep.pro/index.php>
- [9] Livre : SYSTÈME SOLAIRE, SYSTÈMES STELLAIRES. Auteur : Thérèse Encrenaz
- [10] Livre : Les planètes, Les nôtres et les autres. Auteur : Thérèse Encrenaz
- [11] Livre : L'exploration des Planètes. De Galilée à nos jours. Auteur : Thérèse Encrenaz-James lequeux
- [12] Thèse de doctorat. Thème : Détection et caractérisation de l'exoplanète HD209458 b par photométrie des transits. Par hamza YOUSFI. Lien : <https://bu.umc.edu.dz/theses/physique/YOU6115.pdf>
- [13] Thèse de doctorat. Thème : Détection et Caractérisation des Exoplanètes par Imagerie Directe avec IRDIS. Par Arthur Vigan. Lien : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00460567/document>