ÉPREUVE ORALE D'ANALYSE DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES 2026

Filière Universitaire Française

Dossier : « **Exoplanètes** »

Ce dossier est constitué d'un article du site web Sagascience (collection de dossiers thématiques et d'animations multimédias produits par le CNRS), d'une coupure de journal (découverte d'une « planète polaire ») et de différents extraits du site wikipedia (effet Doppler, spectroscopie stellaire, diagramme des exoplanètes découvertes).

Dans votre exposé, qui durera environ 15 minutes, vous analyserez les deux méthodes qui ont permis de découvrir la plupart des exoplanètes connues à ce jour. Vous vous efforcerez de justifier les ordres de grandeur des valeurs mentionnées. Vous discuterez les problèmes spécifiques intervenant dans la détection d'une exoplanète gravitant autour de plusieurs étoiles en même temps (comme la « planète polaire »). Enfin, dans le diagramme des exoplanètes découvertes, vous chercherez à déterminer quelle méthode (transit ou vitesse radiale) a été utilisée pour chacune des exoplanètes figurées. Où se place la Terre dans ce diagramme ?

Remarques :

L'usage de la calculette est interdit pendant la préparation et la présentation.

A l'issue de l'épreuve, la tablette doit être remise à l'examinateur.

EXOPLANÈTES

À la recherche de nouveaux mondes ?

En octobre 1995, une équipe d'astrophysiciens, dirigée par Michel Mayor et Didier Queloz à l'observatoire de Haute-Provence, détecte pour la première fois de façon formelle une exoplanète : 51 Pégasi b, un Jupiter chaud. En février 2017, un système exoplanétaire, situé à 40 années-lumière du nôtre, est mis au jour par une équipe internationale : sept planètes, de taille semblable à la Terre, probablement rocheuses et potentiellement… habitables. Selon les premières mesures, trois d'entre elles se situeraient dans la zone habitable de leur étoile et pourraient donc contenir de l'eau à l'état liquide. En 2018, le télescope spatial de la NASA, le James Webb, pourrait apporter de nouvelles informations, notamment sur la présence d'atmosphère sur ces exoplanètes.

Depuis 1995, plus de 3000 planètes extrasolaires ont été officiellement répertoriées, et au moins 2400 autres restent à confirmer. Nous ne sommes qu'au début de la quête des nouveaux mondes…

MAIS QU'EST-CE QU'UNE EXOPLANETE ?

Une **exoplanète**, ou planète extrasolaire, est une planète située **en dehors de notre système solaire** et orbitant autour d'une étoile ou d'une naine brune. Tout objet de masse planétaire tournant autour d'une étoile **est** une exoplanète.

C'est le développement d'une nouvelle discipline scientifique, la planétologie, au XIXe siècle, conjointement à la mise au point d'instruments de mesure et d'observation de plus en plus puissants, qui vont permettre de nombreuses avancées dans la connaissance de l'Univers. Plus proche de nous, l'astronome américain Edwin Hubble, à l'origine du concept d'expansion de l'Univers, déclare en 1924 :

> *« La communauté scientifique suppose depuis longtemps que si les étoiles sont des soleils (et réciproquement !), et que le Soleil héberge des planètes, alors il est fort probable que les autres étoiles hébergent elles aussi des planètes. »*



Edwin Hubble (1889 – 1953). © Domaine public/Wikimedia Commons

Dès cette époque, des découvertes d'exoplanètes sont revendiquées, sans qu'aucune ne soit jamais confirmée. Ce n'est qu'à la fin du XXe siècle que les progrès sur les télescopes, les télescopes spatiaux comme Hubble, ou le traitement des images, ont ouvert la voie à de réelles avancées dans ce domaine. **L'aventure pouvait vraiment commencer...**

Une exoplanète, ça ressemble à quoi ?

LES PLANÈTES GAZEUSES

Elles sont plus faciles à « voir » que les telluriques, car elles sont plus volumineuses.
Leur masse varie de dix fois celle de la Terre à plus de cinquante masses terrestres. Ces géantes sont de deux types : les JOVIENNES et les NEPTUNIENNES.

LES JOVIENNES sont composées majoritairement d'hydrogène et d'hélium, à l'instar de Jupiter dans notre système solaire. Ce sont des géantes gazeuses qui, selon leur température de surface, sont qualifiées de JUPITER CHAUD OU DE JUPITER FROID.
Certaines sont composées presque exclusivement d'hélium.

LES NEPTUNIENNES, géantes de glace, sont composées d'eau, de méthane et/ou d'ammoniac.
Là-aussi, en fonction de leur température, on en distingue deux types : LES NEPTUNE CHAUDS, proches de leur étoile, et les NEPTUNE FROIDS, beaucoup plus éloignés.

LES PLANÈTES TELLURIQUES

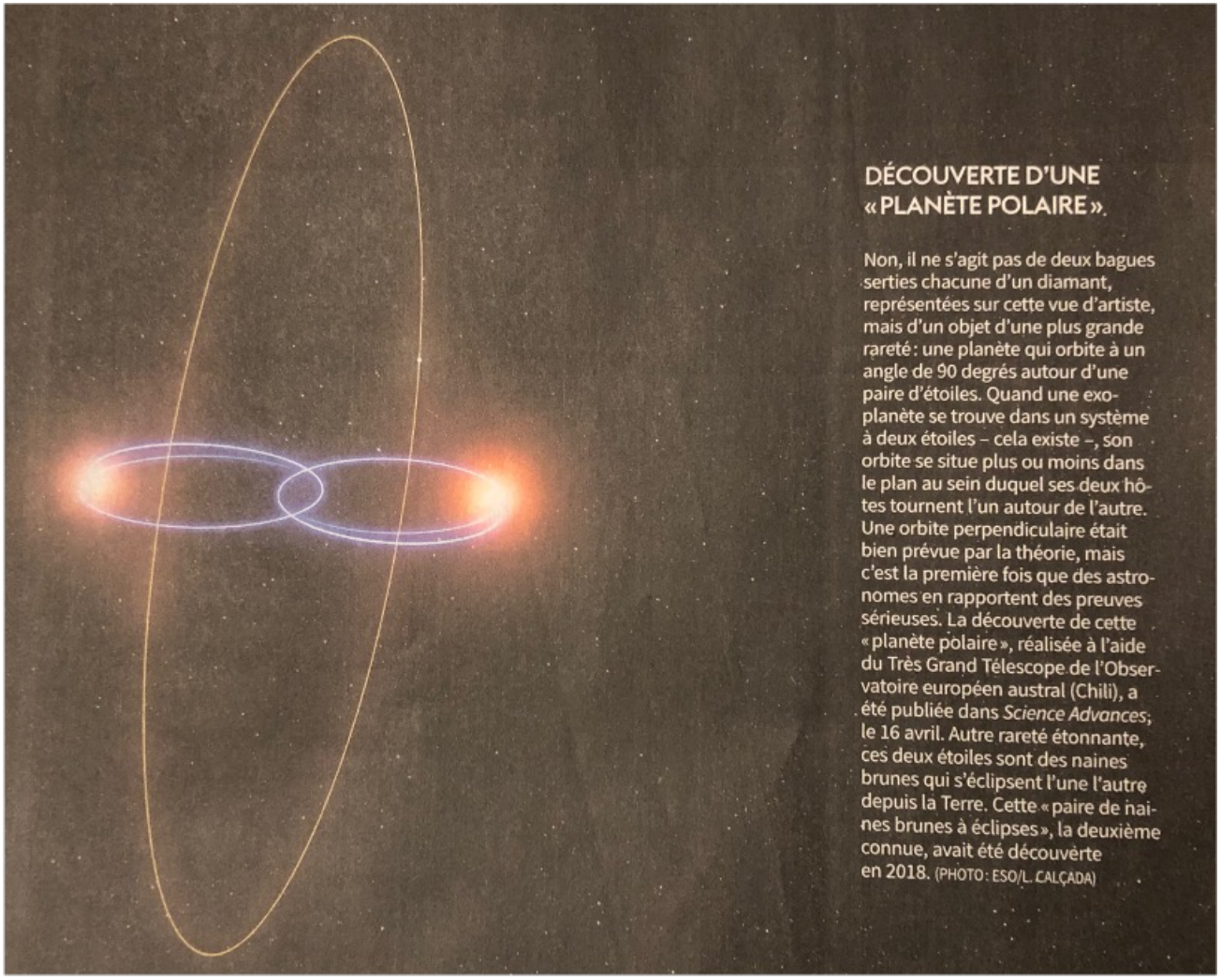
Les planètes telluriques, ou rocheuses, ne sont pas les plus nombreuses à avoir été détectées à ce jour, en raison principalement de leur relative petite taille.
Parmi les milliers d'exoplanètes répertoriés à ce jour, quelques deux cents d'entre elles appartiennent à cette catégorie.

Celles dont la masse est comprise entre une et dix fois la masse de la Terre sont appelées SUPER-TERRES.
Parmi ces exoplanètes telluriques ou rocheuses on en distingue plusieurs types, théoriques pour certains, en fonction de leur composition : planètes de silicates ; planète océan ; planète de carbone…

En fonction de leur distance à leur étoile, elles seront potentiellement habitables : trop près de l'étoile elles seront trop chaudes, trop loin elles seront trop froides.
Seules celles qui se trouvent dans la zone habitable, déterminée à la fois par la distance à l'étoile, mais aussi par la masse de l'étoile elle-même, seraient des candidates potentielles à l'existence d'eau liquide à leur surface et donc à un éventuel développement de la vie.

© CNRS - id-meneo.com

Une exoplanète exotique



DÉCOUVERTE D'UNE « PLANÈTE POLAIRE ».

Non, il ne s'agit pas de deux bagues serties chacune d'un diamant, représentées sur cette vue d'artiste, mais d'un objet d'une plus grande rareté : une planète qui orbite à un angle de 90 degrés autour d'une paire d'étoiles. Quand une exoplanète se trouve dans un système à deux étoiles – cela existe –, son orbite se situe plus ou moins dans le plan au sein duquel ses deux hôtes tournent l'un autour de l'autre. Une orbite perpendiculaire était bien prévue par la théorie, mais c'est la première fois que des astronomes en rapportent des preuves sérieuses. La découverte de cette « planète polaire », réalisée à l'aide du Très Grand Télescope de l'Observatoire européen austral (Chili), a été publiée dans *Science Advances*, le 16 avril. Autre rareté étonnante, ces deux étoiles sont des naines brunes qui s'éclipsent l'une l'autre depuis la Terre. Cette « paire de naines brunes à éclipses », la deuxième connue, avait été découverte en 2018. (PHOTO : ESO/L. CALÇADA)

Les planètes du système solaire

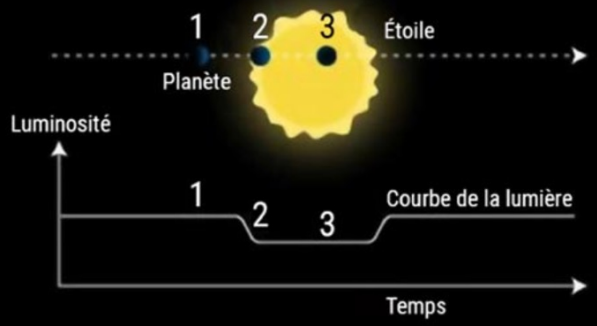
Planètes géantes

Planète	Rayon équatorial[g]	Masse	Gravité de surface[h]	Inclinaison de l'axe
Jupiter[40]	71 492 km (11,209 Terres)	1 898,19 × 10^{24} kg (317,83 Terres)	23,12 m/s^2 (2,364 g)	3,13°
Saturne[41]	60 268 km (9,449 Terres)	568,34 × 10^{24} kg (95,16 Terres)	8,96 m/s^2 (0,916 g)	26,73°
Uranus[173]	25 559 km (4,007 Terres)	86,813 × 10^{24} kg (14,54 Terres)	8,69 m/s^2 (0,889 g)	97,77°[i]
Neptune[180]	24 764 km (3,883 Terres)	102,413 × 10^{24} kg (17,15 Terres)	11,00 m/s^2 (1,12 g)	28,32°

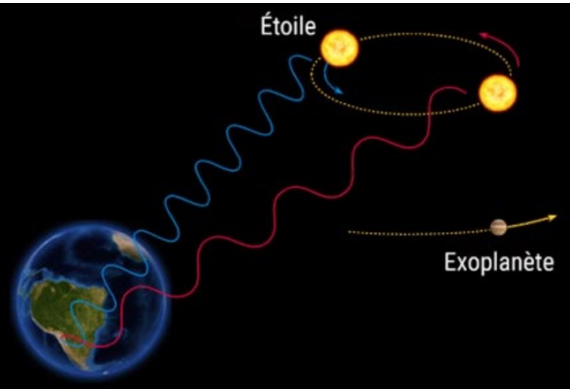
Planètes telluriques

Planète	Rayon équatorial	Masse	Gravité	Inclinaison de l'axe
Mercure[98]	2 439,7 km (0,383 Terre)	3,301 × 10^{23} kg (0,055 Terre)	3,70 m/s^2 (0,378 g)	0,03°
Vénus[106]	6 051,8 km (0,95 Terre)	4,867 5 × 10^{24} kg (0,815 Terre)	8,87 m/s^2 (0,907 g)	177,36°[e]
Terre[113]	6 378,137 km	5,972 4 × 10^{24} kg	9,780 m/s^2 (0,997 32 g)	23,44°
Mars[123]	3 396,2 km (0,532 Terre)	6,441 71 × 10^{23} kg (0,107 Terre)	3,69 m/s^2 (0,377 g)	25,19°

Principales méthodes de détection



Méthode de détection des exoplanètes par transit
Source : Nasa/JPL



Principe de la méthode des vitesses radiales.
Source : ESO

LA MÉTHODE DES TRANSITS :

Elle consiste à détecter la légère baisse de luminosité due au passage d'une planète devant son étoile. L'exemple le plus connu est l'éclipse de Soleil.
La Lune passe devant le Soleil par rapport à l'observateur terrestre. C'est un transit de Lune devant le Soleil. Cette baisse de luminosité est proportionnelle à la taille de la planète. Ce phénomène est observable lorsque l'étoile, la planète et l'observatoire sont alignés.

La méthode des transits fournit des informations relativement précises sur la masse et l'orbite de la planète. Elle permet également de calculer sa taille : plus cette dernière est grande, plus la baisse temporaire de luminosité est marquée. C'est pourquoi la méthode des transits est limitée à des planètes assez grosses (donc plutôt des géantes gazeuses par exemple) car une petite planète ne provoquera pas une baisse de luminosité détectable par les instruments dont nous disposons actuellement.

LA MÉTHODE DES VITESSES RADIALES :

C'est la méthode de détection la plus utilisée actuellement. Elle a permis de détecter le plus grand nombre d'objets célestes, comme 51 Pegasi b, découverte en 1995 par Michel Mayor et Didier Queloz.

Cette technique se base sur le fait que planètes et étoiles tournent autour d'un centre de gravité commun, déterminé par leurs masses respectives. Celui du système Soleil-Terre se trouve par exemple seulement à 450 km du Soleil, distance extrêmement réduite si l'on sait que la distance Terre-Soleil est de 149 597 870,7 km. En présence d'une planète, l'étoile décrit des orbites très petites mais néanmoins décelables.
L'analyse spectroscopique des ondes lumineuses émises va alors permettre de détecter le déplacement qu'une planète impose à son étoile, par effet Doppler : en mouvement, la lumière de l'étoile va passer périodiquement du bleu au rouge. Lorsque l'étoile se rapproche de l'observateur, son spectre lumineux se décalera vers le bleu; lorsqu'elle s'éloigne, son spectre lumineux se décale vers le rouge. L'amplitude de la courbe permet de calculer la masse de l'exoplanète : plus l'amplitude est grande, plus l'étoile se déplace. Plus l'étoile se déplace, plus la masse du corps en orbite est importante.

Effet Doppler

L'**effet Doppler**, ou **effet Doppler-Fizeau**, est le décalage de fréquence d'une onde (mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature) observée entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. On désigne de façon générale ce phénomène physique sous le nom d'effet Doppler.

Explication physique

Imaginons le cas d'une personne sur une plage, debout dans l'eau, au bord du rivage. Des vagues arrivent à ses pieds toutes les dix secondes. La personne marche en direction du large : elle va à la rencontre des vagues, celles-ci l'atteignent alors avec une fréquence plus élevée, par exemple toutes les huit secondes. Lorsque cette personne se met à courir vers le large, les vagues l'atteignent alors toutes les cinq secondes. Lorsque cette personne fait demi-tour, et marche puis court en direction de la plage, les vagues l'atteignent avec une fréquence moins élevée, par exemple toutes les douze, puis quinze secondes. La fréquence des vagues ne dépend pas du mouvement de la personne par rapport à l'eau (elle est notamment indépendante de la présence ou non d'un courant), mais du mouvement de la personne par rapport à l'émetteur des vagues (en l'occurrence un lieu au large où le courant s'oppose au vent).

De manière inverse, on peut imaginer une source mobile de vagues, par exemple un aéroglisseur dont le jet d'air générerait des vagues à une fréquence régulière. Si l'aéroglisseur se déplace dans une direction, alors les vagues sont plus resserrées vers l'avant du mouvement et plus espacées vers l'arrière du mouvement ; sur un lac fermé, les vagues frapperont la berge à des fréquences différentes.

En astronomie, l'effet Doppler permet de déterminer la vitesse radiale d'une étoile, c'est-à-dire la composante de la vitesse de l'étoile le long de la direction d'observation depuis la Terre. En effet en étudiant le *spectre* d'un astre (voir l'annexe « spectroscopie stellaire »), on constate que les raies spectrales sont décalées en longueur d'onde par rapport aux mêmes raies observées en laboratoire. Le décalage d'une raie visible se produit soit *vers le rouge*, ce qui indique que l'étoile s'éloigne, soit *vers le bleu*, si elle se rapproche. Si la source d'ondes se déplace à une vitesse radiale v par rapport au récepteur (par exemple une étoile en mouvement par rapport à la Terre), la variation de fréquence observée est

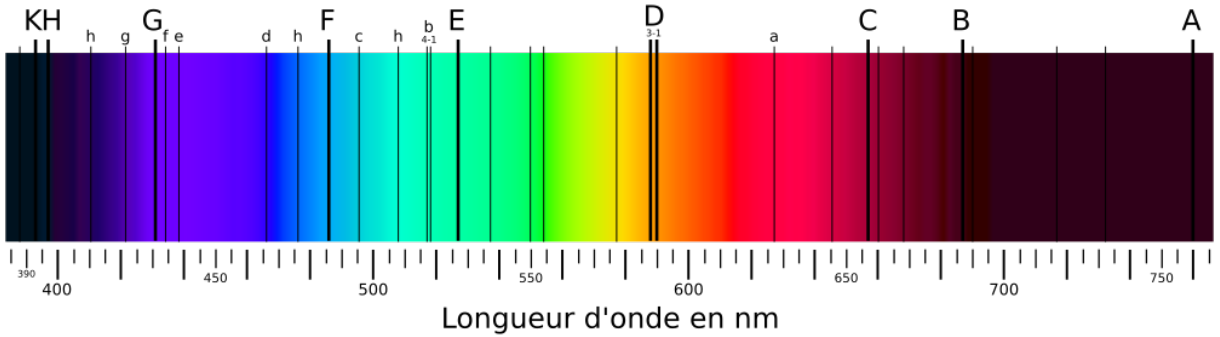
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{c}$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Dans leur article "A Jupiter-mass companion to a solar-type star", Michel Mayor et Didier Queloz (prix Nobel de physique 2019) ont utilisé la méthode des vitesses radiales pour détecter la première exoplanète. Cette technique utilise des spectres d'*absorption* pour observer les variations de la vitesse radiale de l'étoile.

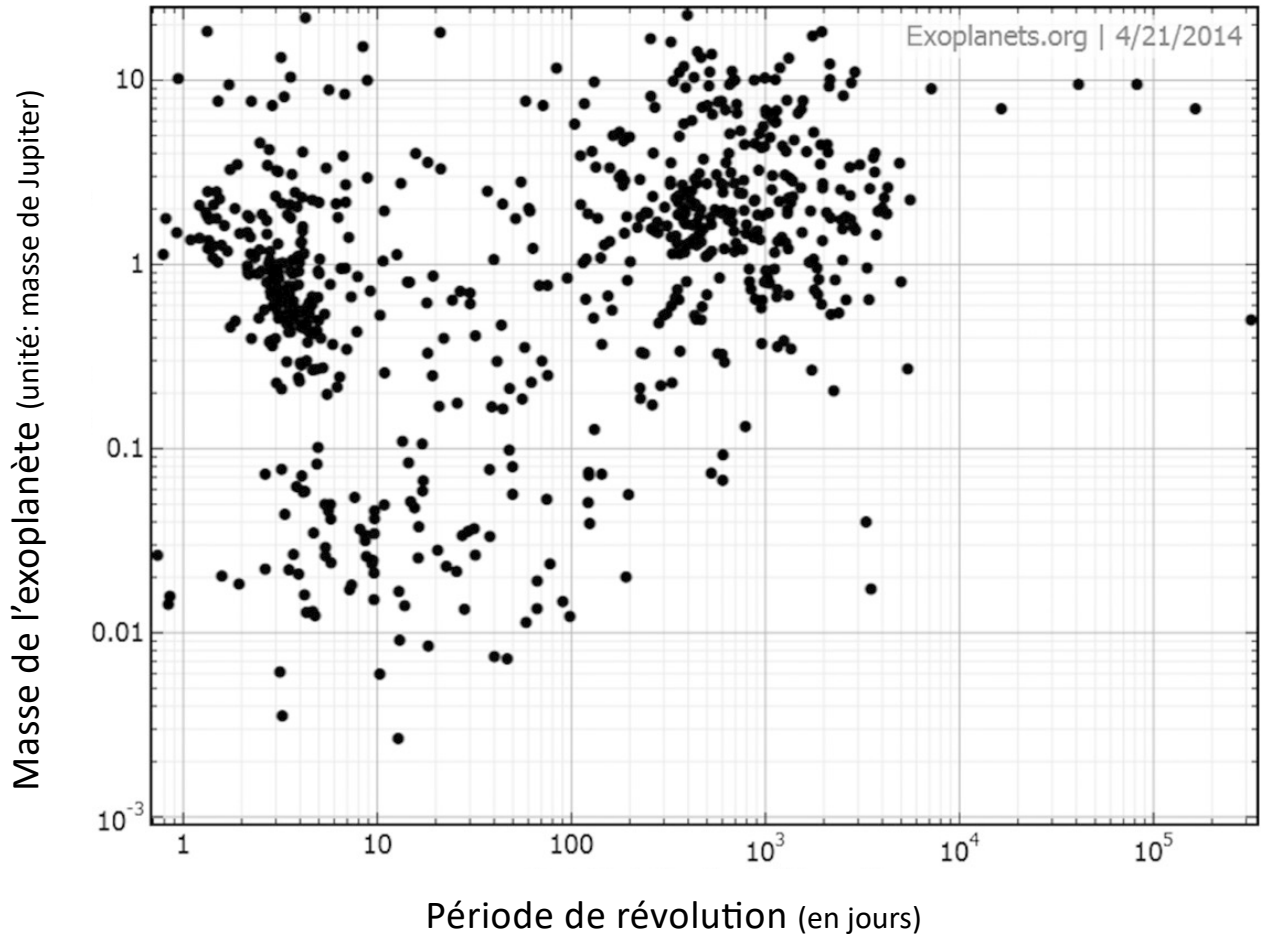
Spectroscopie stellaire

L'absorption dans le spectre stellaire est due aux atomes et molécules présents dans l'atmosphère de l'étoile. Lorsque la lumière (émise par l'étoile) traverse l'atmosphère de l'étoile, certains photons sont absorbés par ces atomes et molécules à des longueurs d'onde spécifiques, créant ainsi des raies d'absorption dans le spectre. L'exemple du spectre solaire est donné sur la figure suivante :



La détection de la première exoplanète a été réalisée en analysant le spectre d'absorption de l'étoile « 51 Pegasi », située à 51 années-lumière dans la direction de la constellation de Pégase. Dans ce cas, les raies d'absorption étaient principalement causées par des éléments comme l'hydrogène, le calcium et le sodium. L'observation sur plusieurs jours, à différentes périodes de l'année, des raies d'absorption de 51 Pegasi ont permis aux astronomes de mesurer avec précision les variations de la vitesse radiale de l'étoile (période d'environ 4 jours), ce qui a permis de confirmer l'existence d'une exoplanète en orbite autour de 51 Pegasi et de mesurer sa masse.

Diagramme des exoplanètes découvertes



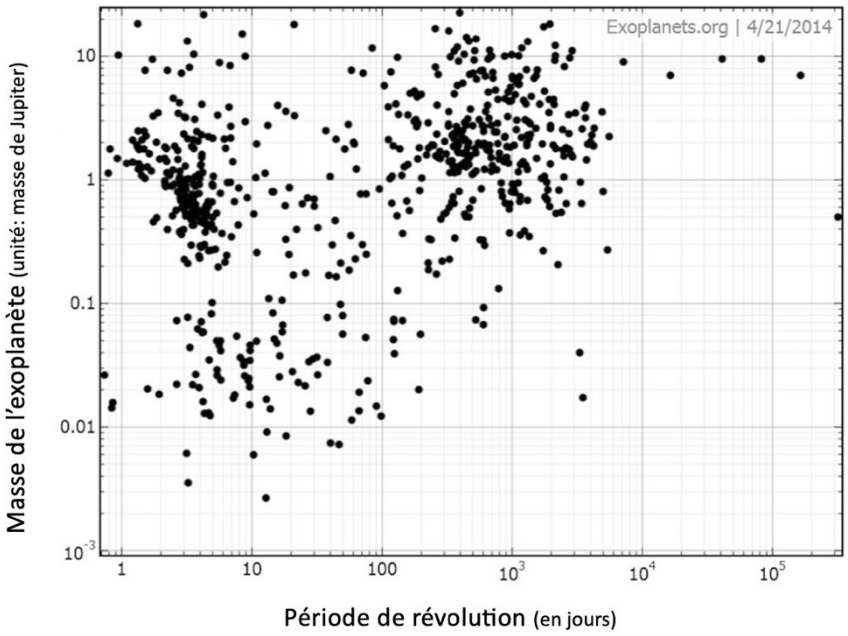
Exemple de sujets – Epreuve d'ADS Physique, FUF

Dossier « Exoplanètes »

Sujet : Ce dossier est constitué d'un article du site web Sagascience (collection de dossiers thématiques et d'animations multimédias produits par le CNRS), d'une coupure de journal (découverte d'une « planète polaire ») et de différents extraits du site wikipedia (effet Doppler, spectroscopie stellaire, diagramme des exoplanètes découvertes).
Dans votre exposé, qui durera environ 15 minutes, vous analyserez les deux méthodes qui ont permis de découvrir la plupart des exoplanètes connues à ce jour. Vous vous efforcerez de justifier les ordres de grandeur des valeurs mentionnées. Vous discuterez les problèmes spécifiques intervenant dans la détection d'une exoplanète gravitant autour de plusieurs étoiles en même temps (comme la « planète polaire »). Enfin, dans le diagramme des exoplanètes découvertes, vous chercherez à déterminer quelle méthode (transit ou vitesse radiale) a été utilisée pour chacune des exoplanètes figurées. Où se place la Terre dans ce diagramme ?

Commentaire des examinateurs : Les exoplanètes sont un sujet particulièrement populaire, notamment parce qu'elles offrent la possibilité d'une vie extraterrestre. Mais dans ce dossier c'étaient les méthodes de détection qui étaient en jeu. L'essentiel était de comprendre comment fonctionnent les deux méthodes qui ont été développées : méthode du transit et méthode des vitesses radiales. C'est cette dernière qui a été utilisée pour la première détection d'une exoplanète par Michel Mayor et Didier Queloz et qui leur a valu le prix Nobel de physique en 2019. Dans cette méthode, la présence d'une exoplanète en orbite autour d'une étoile est trahie par le mouvement de l'étoile autour du centre de gravité du système étoile-exoplanète : on mesure les variations de la vitesse de l'étoile (par rapport à la Terre) au cours de la révolution de l'exoplanète. Cette mesure est effectuée par effet Doppler, dont le principe était rappelé en annexe. Plus précisément, on mesure le décalage des raies du spectre de l'étoile au cours du temps. On peut alors déterminer la période de révolution de l'exoplanète mais aussi sa masse. Dans la méthode du transit, c'est la variation de la luminosité de l'étoile qui est mesurée : la luminosité baisse quand l'exoplanète passe entre l'étoile et la Terre.
La principale difficulté du dossier consistait à déterminer quelle méthode est la mieux adaptée pour découvrir une exoplanète donnée. Il fallait pour cela comprendre qu'il y a deux paramètres qui caractérisent une exoplanète : sa masse et sa distance à l'étoile. Cette distance est reliée à la période de révolution de l'étoile grâce à la troisième loi de Kepler (mais il n'était pas nécessaire de connaître cette loi). Ces deux paramètres constituent les deux axes du diagramme des exoplanètes découvertes :

Diagramme des exoplanètes découvertes



La Terre est en dehors des nuages de points de ce diagramme (masse égale à environ 3.10^{-3} fois celle de Jupiter et période de révolution de 365 jours). Les exoplanètes les plus proches de leur étoile occultent mieux cette étoile et sont donc plus facilement identifiées par la méthode du transit ; les plus massives modifient plus la vitesse de l'étoile et sont donc mieux déterminées par la méthode des vitesses radiales. Les exoplanètes comme la Terre autour du soleil sont trop petites et trop loin de leur étoile pour être déterminées par la méthode du transit. Elles sont aussi trop peu massives pour être déterminées par la méthode des vitesses radiales. Il est probable qu'il existe de nombreux autres exemples de planètes comme la Terre dans notre galaxie (on ne peut pas observer d'exoplanètes dans d'autres galaxies, beaucoup trop lointaines). Mais de telles exoplanètes sont inaccessibles aux instruments actuels dont la précision est encore insuffisante.