

des mécanismes digestifs. Aujourd'hui, avec nos collègues strasbourgeois, nous essayons d'élucider les mécanismes physiologiques et biochimiques impliqués dans l'arrêt de la digestion et la conservation de la nourriture sans fermentation dans l'estomac du manchot royal (dont la température interne est de l'ordre de 38 °C).

Le stockage implique une fermeture du pylore (qui fait communiquer l'estomac avec le duodénum), laquelle évite l'évacuation du bol alimentaire vers les intestins. On sait que le manchot du Cap (*Spheniscus demersus*) retarde cette évacuation, mais de 24 heures seulement.

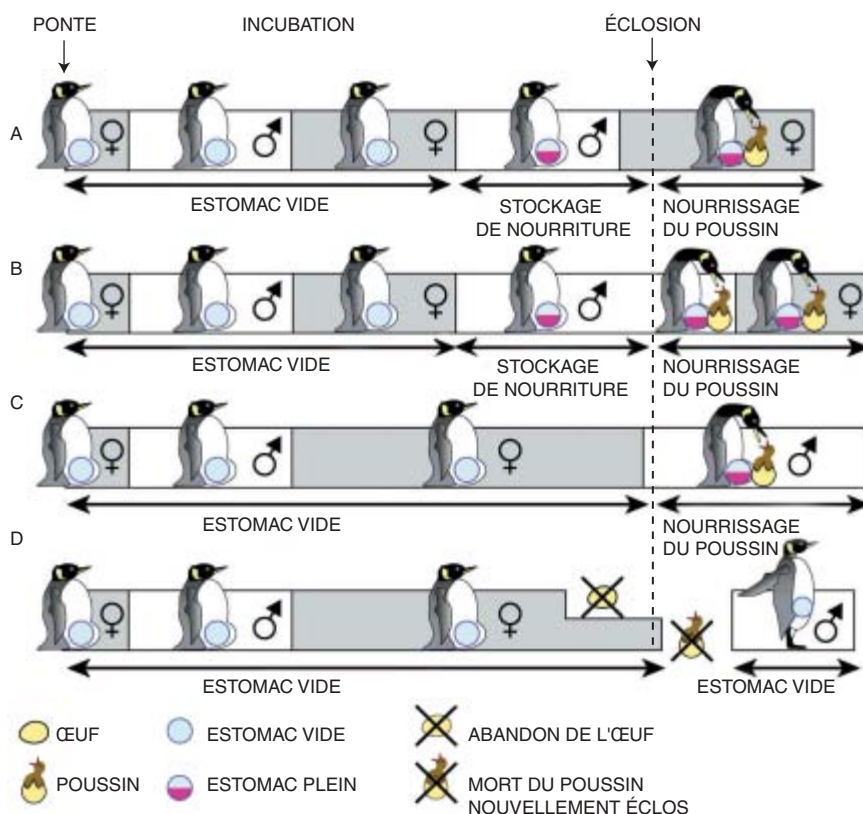
Chez le manchot royal, la diminution de la concentration totale en lipides pourrait provenir d'une « fuite » par le pylore ou de leur dégradation par des bactéries. En cas de démixtion des phases aqueuses et lipidiques, la hauteur du pylore par rapport à l'estomac favoriserait la fuite des huiles surnageant au dessus de la phase aqueuse.

Chez une espèce de grenouille australienne récemment disparue (*Rheobatrachus silus*), la digestion s'arrêtait aussi de façon prolongée pendant la reproduction. Les œufs et les têtards se développaient dans l'estomac de la femelle, en produisant des hormones inhibitrices des sécrétions acides de la muqueuse gastrique. Une inhibition hormonale comparable existe-t-elle chez le manchot royal? La muqueuse gastrique produit-elle des peptides, qui, comme ceux que fabrique la peau des grenouilles ou la muqueuse intestinale des mammifères, inhibent certaines sécrétions, bloquent l'activité d'enzymes ou jouent un rôle antimicrobien?

Une stratégie originale

Lors de l'élevage du poussin chez le manchot de Magellan (*Spheniscus magellanicus*), l'acidité du contenu stomacal diminue pendant les douze heures qui précèdent le retour à la colonie. Une telle variation chez le manchot royal ralentirait l'activité des enzymes gastriques, ce qui aurait pour effet de préserver le bol alimentaire dans un état non digéré jusqu'à l'éclosion du poussin.

La stratégie de stockage de nourriture dans l'estomac du manchot royal diffère des stratégies connues chez d'autres espèces : beaucoup réduisent la durée des voyages en mer à la fin de la période d'incubation, ce qui augmente les chances que le poussin soit rapidement nourri. Le manchot Adé-



4. LE CONTENU DE L'ESTOMAC DES MANCHOTS royaux en période d'incubation, à leur retour de mer et à leur départ, a été étudié par les auteurs et révèle que le stockage de nourriture dépend du délai restant avant l'éclosion. Les parents se relaient pour couvrir : pendant que l'un reste à terre, l'autre part pour un voyage en mer dont la durée varie, de sorte que plusieurs cas se présentent. La femelle revient en général quelques jours avant l'éclosion (A) : c'est elle qui nourrit le poussin, et la nourriture stockée par le mâle n'est pas nécessaire. Quand l'éclosion a lieu avant le retour de la femelle (B), le poussin est nourri par le mâle, qui régurgite le contenu de son estomac : dès son retour, la mère nourrit le poussin, et le père retourne pêcher pour s'alimenter. Quand le mâle arrive juste avant ou juste après l'éclosion (C), il rapporte trois fois plus de nourriture que n'en contenait son estomac dans les cas envisagés en A et B. Quand le mâle ne revient pas à temps (D), la femelle abandonne son œuf si elle n'a plus de réserves corporelles (dans le cas représenté en D, elle en a moins qu'en C) ou attend l'éclosion, mais, son estomac étant vide, le poussin meurt de faim. Si le mâle revient bien après l'éclosion, son estomac est vide : son horloge interne semble lui indiquer qu'il n'aura plus de poussin à nourrir.

lie (*Pygoscelis Adeliae*) réduit la durée de son dernier voyage alimentaire en mer pour que son retour coïncide avec la date d'éclosion. Chez le manchot empereur, l'espèce la plus proche phylogénétiquement du manchot royal, les femelles reviennent de mer en moyenne dix jours après l'éclosion, alors que le mâle jeûne depuis plus de trois mois. Conserver de la nourriture dans l'estomac pendant si longtemps étant probablement impossible, le mâle produit un liquide d'aspect laiteux et très riche en énergie dont il nourrit le poussin en attendant le retour de la femelle, grâce à des cellules sécrétrices situées dans l'œsophage. Chez les pétrels et les albatros, les adultes nourrissent leur poussin à l'aide d'huiles composées principalement de triglycérides et de cires. Ces huiles ont une valeur énergétique très élevée et proviennent d'une digestion sélective des proies. L'eau et les protéines sont évacuées dans les intestins, tandis que les lipides sont

accumulés dans l'estomac sous forme d'huiles. Le stockage par le manchot royal mâle d'une quantité de nourriture ajustée aux besoins du poussin et préservée pendant plusieurs semaines constitue un remarquable exemple d'optimisation du succès reproducteur d'un animal en fonction de ses contraintes environnementales.

Michel GAUTHIER-CLERC, Yvon LE MAHO, Yves HANDRICH sont écophysiologistes au Centre d'écologie et de physiologie énergétiques du CNRS, à Strasbourg.

M. GAUTHIER-CLERC, Y. LE MAHO, Y. CLERQUIN, S. DRAULT et Y. HANDRICH, *Penguin fathers preserve food for their chicks*, in *Nature*, 21 décembre 2000.

C.-A. BOST et al., *Foraging Habitat and Food intake of Satellite-Tracked King Penguins during the Austral summer at Crozet Archipelago*, in *Marine Ecology Progress Series*, vol. 150, pp. 21-33, 1997.

À la recherche d'autres terres

LAURANCE DOYLE • HANS-JÖRG DEEG • TIMOTHY BROWN

Les astronomes ont découvert des dizaines de planètes en dehors de notre Système solaire, mais ils n'ont pas réussi à capturer de sœur jumelle de la Terre... pour l'instant.

Personne n'a jamais vu de planète en dehors de notre Système solaire. Toutefois, au mois de novembre 1999, deux astronomes ont observé, à défaut de planète, ce qui s'en approche le plus : sa silhouette. L'astronome Greg Henry, de l'Université du Tennessee, et David Charbonneau, de l'Université de Harvard, ont étudié, chacun de leur côté, la luminosité de l'étoile HD 209458. Cette étoile est si quelconque que personne n'a jugé utile de lui donner un véritable nom. Toutefois, elle deviendra peut-être célèbre, car une planète, dont la masse est égale aux deux tiers de celle de Jupiter, gravite autour d'elle. C'est

du moins ce que pensent les astronomes, car sa présence demeure hypothétique. Elle a été déduite des faibles modifications périodiques de l'orbite stellaire qu'ils ont observées et qui indiqueraient que l'étoile subit une force gravitationnelle due à un compagnon invisible. D. Charbonneau et G. Henry ont cherché à confirmer son existence par une autre méthode, dite des transits. La planète pourrait-elle, se sont-ils demandé, passer devant l'étoile et masquer momentanément la lumière émise ? Si tel était le cas, la luminosité de l'étoile diminuerait. Un tel événement, connu sous le nom d'occultation ou transit, s'observe seulement

1. UNE PLANÈTE COMPARABLE À LA TERRE aurait été détectée autour de l'étoile binaire CM Draconis. Les auteurs ont observé une légère atténuation de la luminosité des étoiles qui se produit périodiquement et qui révélerait peut-être le passage d'une planète entre l'étoile et les observateurs. L'observation de ces variations s'avère aujourd'hui le meilleur moyen de découvrir des mondes habitables.

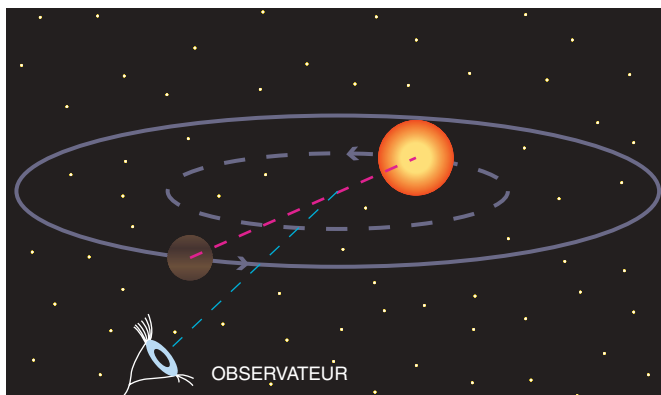


Mark A. Garlick

si l'orbite planétaire est inclinée de sorte qu'on l'observe presque sur la tranche. Pour des planètes en orbite rapprochée autour de leur étoile, on peut calculer la probabilité d'un tel alignement. Elle est égale au rapport du rayon de l'étoile sur la distance entre l'étoile et sa planète. Dans le cas de HD 209458, elle atteint un sur dix. Pourtant, les recherches de passage d'autres planètes devant leur étoile se sont soldées par des échecs. Quelques astronomes remettaient en

cause l'existence même de ces planètes extrasolaires, ou exoplanètes. Les observations des mouvements stellaires avaient-elles été mal interprétées ? D. Charbonneau et G. Henry ont dissipé ces doutes. Ils ont guetté les mouvements de l'étoile qui indiquent un transit. Quand l'étoile se situe le plus loin de l'observateur, la planète est en effet proche du point d'occultation (voir la figure 2). Au moment qu'ils avaient prévu, la luminosité de HD 209458 a diminué d'environ 1,8 pour cent, pendant trois heures. Cette atténuation de luminosité a clairement prouvé l'existence d'une planète, et les astronomes ont même évalué, pour la première fois, la taille d'une exoplanète (voir la figure 3). Son diamètre est de l'ordre de 1,3 fois celui de Jupiter, en accord avec la théorie qui prévoit que, proche de son étoile, une planète gonfle comme du pop-corn. La méthode des transits remportait ainsi son premier succès.

Jusqu'à présent, les chasseurs de planètes se fiaient surtout à la technique des mouvements stellaires, ou méthode des vitesses radiales. Son principe est simple. L'orbite d'une étoile est déviée si une planète gravite autour d'elle. Quand l'étoile se rapproche de nous, les raies de son spectre se décalent vers des longueurs d'onde plus courtes, donc vers le bleu. Quand elle s'éloigne, les raies se décalent vers le rouge. En mesurant ces décalages Doppler périodiques, les astronomes peuvent estimer l'orbite et la masse de la planète ou des planètes en orbite. La présence de Jupiter, par exemple, entraîne une variation de la vitesse du Soleil de 12,5 mètres par seconde sur douze ans. Les raies spectrales du Soleil ne se décalent alors que de 0,00002 nanomètre dans la portion visible du spectre



2. QUAND LA PLANÈTE SE SITUE SUR L'AXE qui passe par l'observateur et l'étoile, alors elle éclipse une partie de la lumière de l'étoile. Cela se produit quand l'étoile atteint la position la plus lointaine par rapport à l'observateur, ce qu'indique la méthode des vitesses radiales

(autour de 500 nanomètres). Pour la Terre, la vitesse change seulement d'un dixième de mètre par seconde sur la même période. Cette méthode a permis la découverte, en 1995, d'une planète en orbite autour de l'étoile de type solaire 51 Pegasi (l'étoile 51 de la constellation Pégase). Depuis, les astronomes ont repéré 50 planètes extrasolaires (voir l'encadré de la page 83). La méthode des vitesses radiales peut être appliquée à n'importe quelle étoile, mais ne détecte pas les planètes trop petites ou trop éloignées de leur étoile. La méthode des transits permet aujourd'hui de repérer des exoplanètes aussi petites que la Terre, mais elle nécessite des alignements fortuits. Nous nous sommes fondés sur cette méthode pour nous lancer, à notre tour, à la recherche de planètes de type terrestre. Certaines sont-elles des havres de vie ?

Une petite tache noire sur le Soleil

L'idée de rechercher des occultations n'est pas nouvelle. Après tout, une éclipse solaire n'est rien d'autre que le passage de la Lune devant le Soleil. Johannes Kepler avait déjà prédit les passages de Mercure devant le Soleil au début du XVII^e siècle, et le capitaine Cook avait entrepris son premier voyage vers les mers du Sud pour observer, notamment, le transit de Vénus en 1769. Les astronomes de l'époque utilisaient ces événements pour trianguler la distance entre la Terre et le Soleil. L'idée d'observer des occultations devant des étoiles autres que le Soleil a été émise pour la première fois en 1951, dans une note d'Otto Struve, de l'Observatoire Yerkes de l'Université de Chicago. Frank Rosenblatt, de l'Université Cor-

nell, a repris l'idée en 1971, puis William Borucki, au début des années 1980, du Centre de recherche Ames de la NASA, en Californie.

Lors d'une occultation de Mercure ou de Vénus, les astronomes aperçoivent un petit point noir passer devant le Soleil. Les passages de planètes extrasolaires sont détectés, non pas aussi directement, mais en suivant l'évolution de la luminosité de l'étoile en fonction du temps. Une diminution périodique correspond au passage régulier d'une planète. La mesure de

la luminosité stellaire représente une branche de l'astronomie, nommée photométrie. L'œil humain peut détecter, sans l'aide d'aucun appareil, des variations d'un facteur 2,5 de la luminosité d'une étoile. En comparant la luminosité de deux étoiles, un œil exercé peut distinguer des variations encore plus faibles. De petits télescopes équipés de caméras numériques très sensibles enregistrent ces variations avec une précision de 0,1 pour cent. En recueillant plus de lumière et en corrigeant les irrégularités atmosphériques, les plus grands télescopes atteignent une précision trois fois supérieure.

Les mesures photométriques de transit sont plus sensibles que les autres méthodes de détection pour les petites planètes : la quantité de lumière stellaire occultée par la planète est proportionnelle au rapport de la surface de la planète sur celle de l'étoile. Ainsi, elle varie comme le carré du rayon de la planète sur le carré du rayon de l'étoile. Par comparaison, la variation de la vitesse radiale d'une étoile est proportionnelle au rapport entre les masses de la planète et de l'étoile, c'est-à-dire proportionnelle au rapport des cubes de leur rayon. Les planètes étant beaucoup plus petites que les étoiles (le rayon de Jupiter mesure environ un dixième de celui du Soleil, et celui de la Terre un centième), le rapport des carrés est supérieur à celui des cubes, ce qui explique l'intérêt des mesures de transit. Par exemple, par la méthode des transits de HD 209458, environ 40 000 photons ont été enregistrés en fonction du temps au moyen d'un photomètre, tandis qu'une mesure équivalente avec la méthode des vitesses radiales avait requis plus de dix millions de photons, subdivisés en bandes

de longueur d'onde par un spectromètre. Ainsi, pour une même taille de planète, la méthode des vitesses radiales exige des télescopes plus gros que la méthode photométrique. Un télescope de un mètre suffit pour détecter une planète de la taille de Jupiter, qui entraîne une baisse de luminosité de son étoile de l'ordre de un pour cent. En revanche, une planète de la taille de la Terre entraîne une diminution de l'ordre de 0,01 pour cent, qu'aucun des plus grands des télescopes actuels ne peut détecter, sauf si on utilise des astuces d'observation pour la détection du signal.

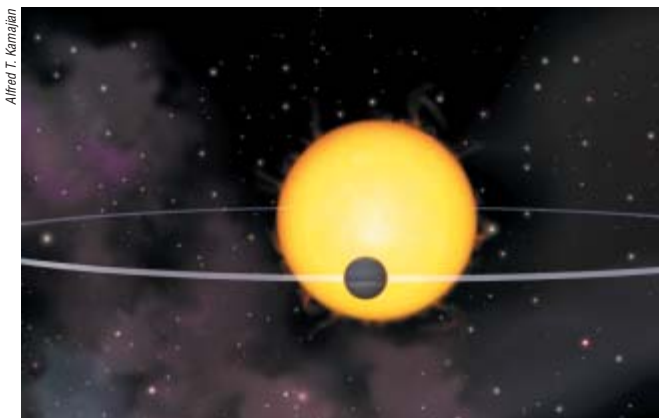
La méthode des transits présente un autre avantage : dès que l'observateur, la planète et l'étoile sont alignés, les transits sont détectés aussi facilement pour des planètes éloignées que pour des planètes proches de l'étoile. Comparée aux années-lumière qui séparent l'étoile de la Terre, la

distance entre la planète et l'étoile est insignifiante ; elle pourrait varier de façon importante sans que notre perception de l'atténuation change. En revanche, la sensibilité de la méthode des vitesses radiales diminue avec la racine carrée de la distance entre la planète et l'étoile, car les planètes lointaines exercent une attraction gravitationnelle plus faible sur leur étoile. Cela explique pourquoi la plupart des planètes découvertes par cette méthode sont en orbite rapprochée et sont, le plus souvent, des corps massifs, de la taille de Jupiter.

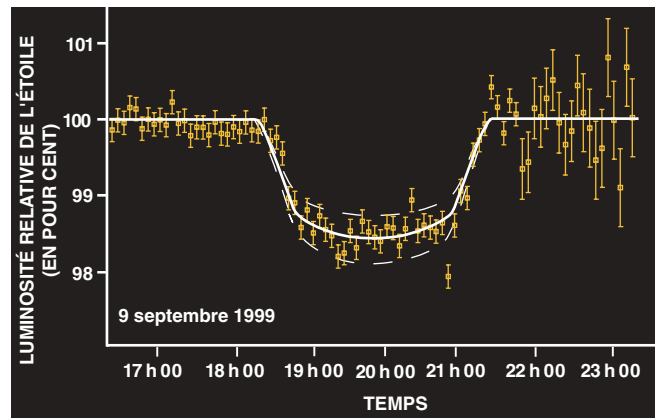
Quelles autres planètes autour des autres soleils ?

L'augmentation de la distance entre la planète et son étoile réduit la probabilité d'alignement, puisque cette dernière est égale au rapport du rayon de l'étoile sur la distance entre l'étoile et

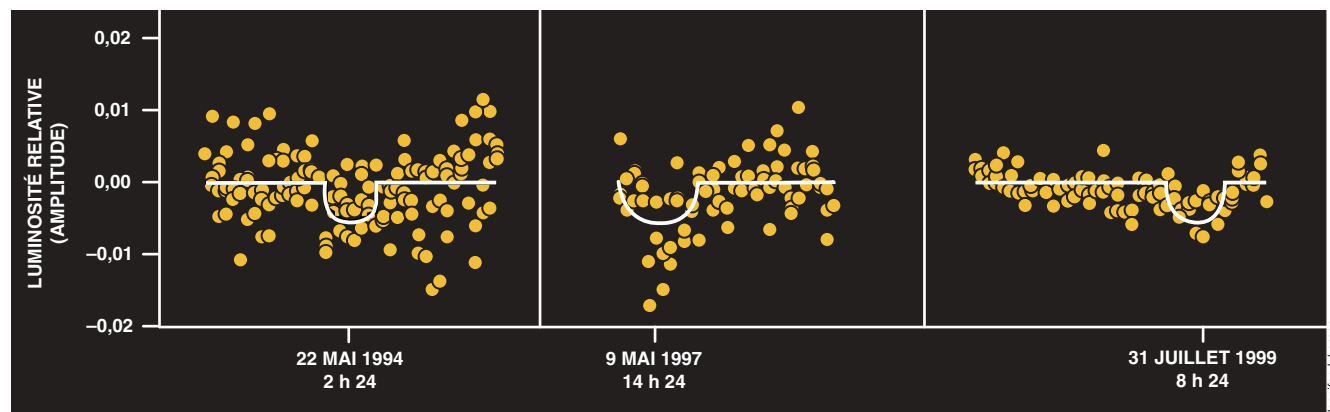
sa planète. Par exemple, la probabilité qu'un astronome extraterrestre soit correctement situé pour observer le passage de la Terre sur son orbite actuelle devant le Soleil ne dépasse pas 0,5 pour cent. C'est pourquoi la méthode des transits a été longtemps négligée. Elle a connu un regain d'intérêt après la découverte de planètes géantes extrasolaires très proches de leur étoile mère. Les orbites rapprochées augmentent la probabilité d'alignement d'un facteur dix. Cette découverte était inattendue, car les planètes géantes de notre Système solaire sont localisées sur des orbites lointaines. De surcroît, l'introduction de systèmes d'imagerie à grand champ, capables de suivre des centaines de milliers d'étoiles à la fois, a aussi ravivé l'intérêt pour la méthode des transits. Plus les étoiles surveillées sont nombreuses, plus les chances d'observer des occultations augmentent. Les astronomes établissent ainsi la liste des



3. LE PREMIER SUCCÈS de la méthode des transits a été la confirmation de la présence d'une planète autour de l'étoile de type solaire HD 209458 (à gauche). La diminution de 1,8 pour cent de la luminosité de l'étoile (les points du schéma à droite avec les barres d'erreurs) apparaît sans ambiguïté. Elle indique la présence d'une planète dont le diamètre vaut 1,3 fois celui de Jupi-



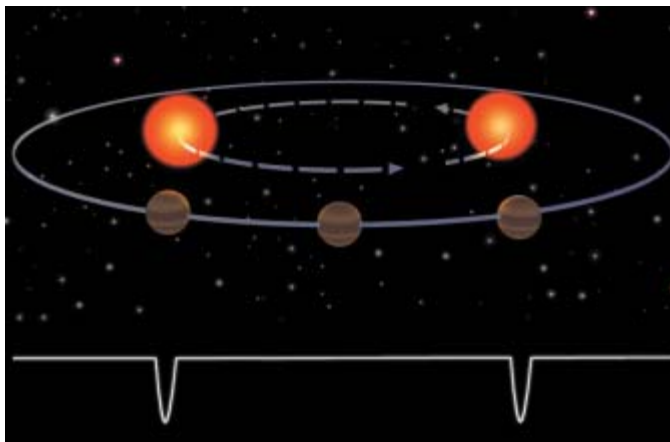
ter (courbe blanche, tracé en plein), bien qu'une planète dix pour cent plus grosse ou plus petite puisse avoir le même effet (courbes blanches tracées en pointillé). D'après des observations récentes, le diamètre serait plutôt égal à 1,6 fois celui de Jupiter. Les barres d'erreurs augmentent après l'occultation, car l'étoile était alors proche de l'horizon.



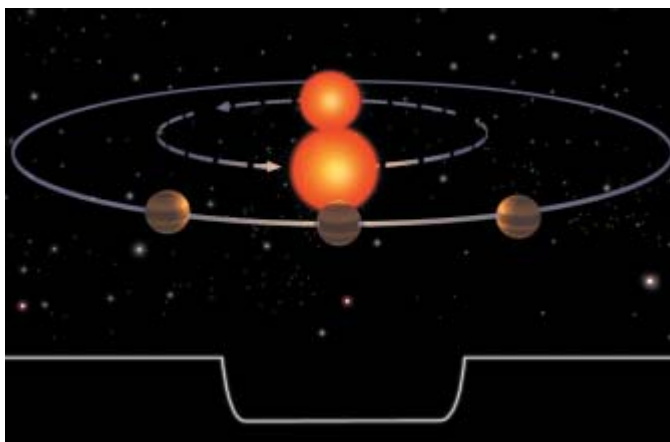
4. LE BRUIT DE FOND risque de masquer des signaux qui indiquent une planète dissimulée dans ces mesures de luminosité de l'étoile binaire CM Draconis (points). Pour distinguer le scintillement des instabilités atmosphériques d'une atténuation causée

par une planète, les auteurs recherchent des variations régulières du signal. Les courbes correspondent à l'atténuation théorique pour un corps gros comme deux fois et demie la Terre sur une orbite de 23 jours.

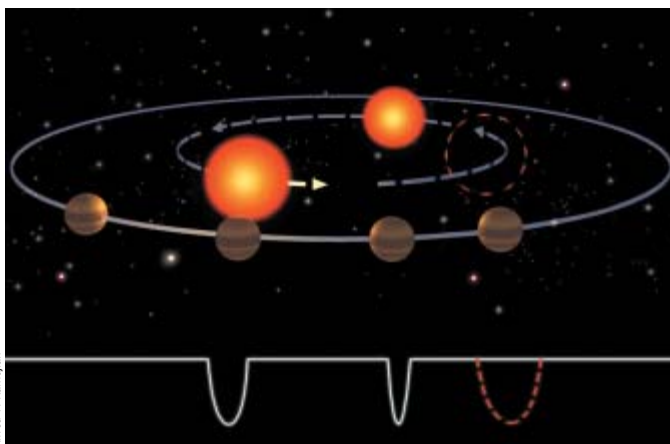
5. MÉTHODE DE DÉTECTION des planètes par occultation. Considérons une planète dans un système stellaire binaire. Les astronomes ne voient pas les deux étoiles isolées : les lumières qu'elles émettent se confondent. Quand la planète passe devant chacune des deux étoiles par rapport à nous, le système s'obscurcit de façon caractéristique. L'ampleur et la durée de l'obscurcissement dépendent de la position des étoiles sur leur orbite.



Ici, la séparation apparente des étoiles est maximale. La planète effectue un double transit : elle passe devant l'une, puis devant l'autre étoile.



Quand la planète passe devant l'une des étoiles, tandis qu'elle-même éclipse la seconde, le transit peut durer plus longtemps et produire une diminution relative de la luminosité supérieure.



Quand la planète passe devant les étoiles juste avant une éclipse stellaire, on observe alors un triple transit : tout d'abord devant l'étoile la plus proche, puis devant la plus éloignée (mais pendant un temps plus court, parce que la planète et l'étoile éloignée se déplacent en sens contraire), et enfin à nouveau devant l'étoile proche.

planètes découvertes et évaluent, d'après leur probabilité d'alignement, le nombre total de planètes existantes.

La plupart des programmes en cours recherchent, à partir de télescopes terrestres, des planètes géantes, telle celle découverte en orbite proche autour de HD 209458. Le projet *Stare* (*Stellar astrophysics and research on exoplanets*, c'est-à-dire astrophysique stellaire et recherche d'exoplanètes), dirigé par T. Brown, et le projet *Vulcan*, dirigé par W. Borucki, D. Koch, du Centre Ames de la NASA, et J. Jenkins, de l'Institut Seti (pour la recherche d'une intelligence extrasolaire), en Californie, visent la Voie lactée, où les étoiles sont très abondantes.

Des recherches ont également été menées grâce au télescope spatial *Hubble*. Les astronomes ont observé 34 000 étoiles dans l'amas globulaire 47 Tucanae pendant huit jours. D'après leurs calculs, ils s'attendaient statistiquement à observer 30 transits. Or, ils n'en ont pas détecté un seul et s'interrogent encore sur ce résultat. Il est possible que l'amas ne contienne aucune planète, soit parce que ses étoiles sont pauvres en éléments lourds, constituants des planètes, soit parce que les étoiles, trop proches, ont perturbé l'orbite des planètes depuis la formation de l'amas, il y a quelque dix milliards d'années.

Les astronomes visent surtout des étoiles massives et les observent sur de courtes durées : ils recherchent les planètes de type géantes gazeuses, qui ne peuvent abriter la vie telle que nous la connaissons.

Afin de rechercher des mondes habitables, c'est-à-dire susceptibles de contenir de l'eau liquide, nous avons choisi une approche différente, suggérée par Jean Schneider et ses collaborateurs. Nous recherchons des étoiles relativement petites. Pourquoi ? Parce que les planètes trop proches de leur étoile subissent un terrible effet de serre. La stratosphère de ces planètes est saturée en vapeur d'eau, la lumière solaire casse l'eau en oxygène et en hydrogène, et l'hydrogène s'échappe dans l'espace. La planète finit par se dessécher et par devenir extrêmement chaude, comme Vénus. De même, les planètes très éloignées de leur étoile subissent un refroidissement aussi catastrophique. Les gaz à effet de serre, tel le dioxyde de carbone, se transforment en neige, qui réfléchit plus de rayonnement que les roches, ce qui accélère le refroidissement. La planète gèle, comme Mars. Les étoiles plus petites que le Soleil sont les plus froides, et les zones habitables sont donc plus proches de l'étoile, ce qui accroît la probabilité d'observer des transits. En outre, une planète donne un signal d'occultation plus net quand elle passe devant une petite étoile. Par conséquent, s'il existe des planètes abritant la vie, nous avons plus de chances de les détecter.

L'ombre des autres terres

Parmi les petites étoiles, nous avons choisi celles qui présentent les alignements indispensables aux occultations. Nous les surveillons longtemps (trois mois), afin que les signaux de transits périodiques s'accumulent et finissent par apparaître, même s'ils sont trop faibles pour être détectés un à un. Nous avons sélectionné des systèmes binaires à éclipse, c'est-à-dire des étoiles doubles dont le plan orbital est parallèle à notre ligne de visée. Elles passent régulièrement l'une devant l'autre, leur

luminosité croît et décroît de façon si caractéristique que les astronomes en ont recensé des milliers. À part leur orientation particulière, rien ne les distingue des autres étoiles binaires, qui constituent les deux tiers des étoiles dans l'Univers. D'après les théoriciens, quand une planète se forme dans un système binaire, elle

apparaît dans le même plan orbital que les deux étoiles. On a alors toutes les chances d'observer des occultations. La planète tourne comme n'importe quelle autre planète, mais elle a deux soleils au lieu d'un dans son ciel. Par ailleurs, d'après des calculs de gravitation, son orbite n'est stable que si sa distance au centre de gravité

des deux étoiles est quatre fois supérieure à la distance entre les deux étoiles. Quand une planète passe devant ses étoiles mères, elle bloque la lumière d'une étoile, puis de l'autre, ce qui engendre une double baisse de luminosité caractéristique, dont la forme dépend de la configuration géométrique des trois (voir la figure 5).

Où en sommes-nous ?

Aujourd'hui, on a dénombré 50 planètes qui gravitent autour d'étoiles semblables au Soleil. Les télescopes du monde entier (Hawaii, Californie, Massachusetts, Chili, Australie, France) en recensent de nouvelles, pour la plupart massives et proches de leur étoile, presque tous les mois. Ces découvertes remettent en cause les théories sur la genèse et sur la diversité des systèmes planétaires.

Ces 50 planètes ont toutes été découvertes en mesurant les mouvements des étoiles, causés par l'attraction des planètes (méthode des vitesses radiales). La toute première planète découverte par M. Mayor et D. Queloz, de l'Observatoire de Genève, en 1995, fut une planète d'une masse équivalente à celle de Jupiter, en orbite très rapprochée (0,05 unité astronomique) autour de l'étoile 51 Pegasi (une unité astronomique correspond à la distance Terre-Soleil). Personne ne s'attendait à une orbite aussi serrée. Peu après, une équipe dirigée par G. Marcy et R. Butler, alors à l'Université de San Francisco, a annoncé la découverte de planètes massives en orbite encore plus proche autour de deux autres étoiles. L'orbite de celle qui gravite autour de 70 Virginis est très aplatie, à la différence de celles des planètes du Système solaire.

En étudiant 800 étoiles à proximité du Soleil, les astronomes ont montré qu'une planète géante gravite autour d'une étoile sur 20 environ. Certaines, comme celles de 51 Pegasi, sont des planètes rapprochées en orbite circulaire. D'autres, comme celles de 70 Virginis, ont des orbites plus larges et étirées. Upsilon, de la constellation d'Andromède, renferme plusieurs planètes. D'autres étoiles, parmi lesquelles 55 Cancri, auraient aussi toute une famille de planètes.

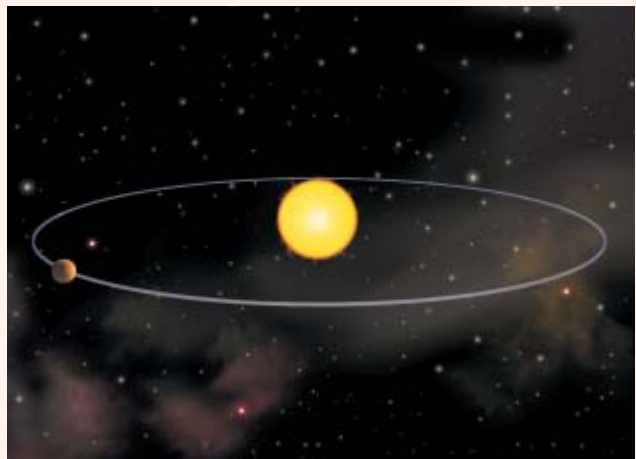
Grâce à l'amélioration de la précision des mesures de vitesses radiales, on a découvert deux autres planètes, d'une masse proche de celle de Saturne, soit environ le tiers de la masse de Jupiter. Cette découverte a été suivie de celle d'une troisième planète de la masse de Saturne par l'équipe suisse. Tout cela confirme les prédictions de l'existence de nombreuses planètes de petite masse. À l'inverse, les naines brunes en orbite serrée (des étoiles « ratées » dont la masse est comprise entre 10 et 80 fois celle de Jupiter) semblent beaucoup plus rares qu'on ne l'avait pensé. Les planètes et des naines brunes ne sont peut-être pas issues des mêmes mécanismes.

Les orbites étirées restent assez mystérieuses aussi. Les planètes se forment dans les disques de gaz et de poussière qui entourent les jeunes étoiles, et la friction devrait rendre leur orbite circulaire. Comment 70 Virginis et ses analogues ont-elles pu échapper à la règle ? Les comètes, dans le Système solaire, fournissent peut-être une indication. Leurs orbites deviendraient elliptiques, suite à des rencontres rapprochées avec les planètes. Peut-être les planètes se livrent-elles à des jeux de lance-pierres identiques ? Si tel est le cas, notre Système solaire, avec ses orbites planétaires pour la plupart circulaires, relève peut-être plus de

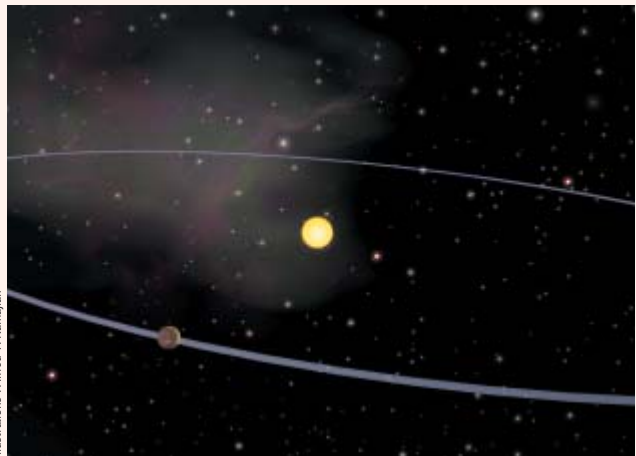
l'exception que de la règle. Dans d'autres cas, par exemple pour 16 Cygni B, l'influence gravitationnelle d'une étoile compagnon serait responsable de la distorsion des orbites.

Par ailleurs, les étoiles qui abritent des exoplanètes ont tendance à avoir des concentrations très élevées en éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. Existe-t-il un seuil critique de concentration en éléments lourds dans les étoiles et leur environnement, au-dessous duquel les planètes ne se forment jamais ? Une explication possible est que les étoiles se seraient enrichies en éléments lourds en absorbant les planètes toutes jeunes.

Ray JAYAWARDHANA étudie l'origine des planètes à l'Université de Berkeley



La planète qui gravite autour de 51 Pegasi illustre l'un des deux types d'orbites planétaires observés : serrée et circulaire.



La planète autour de 70 Virginis illustre l'autre type d'orbites planétaires : plus large et elliptique.

Trois missions spatiales

L'idée de consacrer une mission spatiale à la recherche de planètes analogues à la Terre par la méthode des transits date du milieu des années 1980. Celle de mettre à profit les projets de sismologie stellaire du CNES a germé en 1988. Elle s'est concrétisée par le projet *COROT* (COnvection, ROTation et Transits planétaires), initialement consacré à la seule sismologie stellaire et approuvé par le CNES en octobre 2000. D'autres pays européens (Autriche, Belgique, Espagne et sans doute bientôt l'Italie) et l'Agence spatiale européenne s'y sont joints.

COROT se présente sous la forme d'un petit télescope de 27 centimètres de diamètre, lancé en 2004 sur une orbite «polaire» (perpendiculaire à l'équateur terrestre) à une altitude de 800 kilomètres. La sonde enregistrera, au moyen de caméras numériques très sensibles, leur luminosité toutes les 32 secondes, avec une précision atteignant un pour 10 000 au bout d'une heure d'accumulation des enregistrements. Le télescope sera pointé vers 12 000 étoiles à 30 degrés de la Voie lactée, dans une direction opposée au Soleil. Six mois plus tard, changement de cap : la Terre aura tourné autour du Soleil, *COROT* changera alors son orientation de 180 degrés afin d'éviter la lumière du Soleil, et visera un second champ d'étoiles, avant de revenir au voisinage du premier six mois plus tard, et ainsi cinq fois de suite. Au total, ce seront 60 000 étoiles qui seront suivies pendant deux ans et demi. On devrait détecter 400 planètes géantes, mais surtout des planètes telluriques, sans compter les éventuels satellites et anneaux de planètes. Si tout va bien, *COROT* sera le premier à détecter, à partir de 2005, une autre Terre dans l'Univers.

Deux autres missions sont en cours d'élaboration. La première est celle de l'Observatoire Eddington, projet de l'Agence spatiale européenne. La seconde est le projet Kepler, soumis à la NASA, qui n'a pas encore été adopté non plus. Les deux surveilleront plus de 100 000 étoiles pendant trois à cinq ans et devraient ramener, d'ici 2010, une moisson de plus de 100 terres chacune.

Jean SCHNEIDER, Observatoire de Paris

Ainsi, les binaires à éclipses représentent une aubaine pour les chasseurs de planètes, ainsi que Jean Schneider et Michel Chevreton, de l'Observatoire de Meudon, ont été les premiers à le faire remarquer.

En 1994, nous avons organisé avec eux un réseau mondial de télescopes, afin de rechercher des planètes de type terrestre autour de CM Draconis, l'un des plus petits systèmes binaires à éclipses connus. Il est constitué de deux étoiles quatre fois plus petites que le Soleil, très froides, âgées d'environ neuf milliards d'années et situées à 54 années-lumière. La luminosité de CM Draconis est dix fois plus faible que celle de HD 209458. Les planètes habitables auraient une période orbitale comprise entre 18 et 35 jours. Les six télescopes du réseau ont observé cette zone pendant plus de 1 000 heures. Depuis six ans, des astronomes du monde entier ont réuni leurs mesures, obtenues à diverses longitudes.

La difficulté a consisté à distinguer le signal lié aux occultations dans le

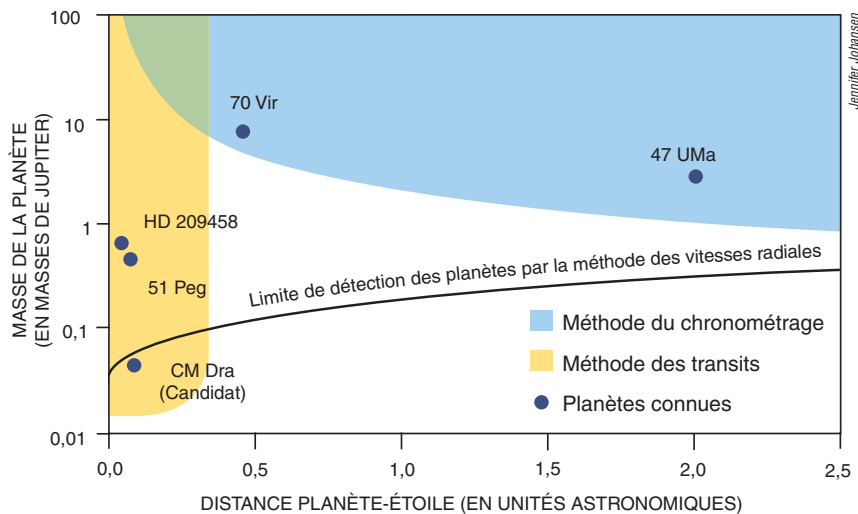
bruit dû aux instabilités de l'atmosphère terrestre, de l'éclat stellaire, voire des instruments. Toutefois, les signatures de transits devant les binaires à éclipses sont réguliers, caractéristiques et prévisibles, si bien que l'algorithme mis au point avec J. Jenkins nous permet de détecter des planètes, alors même que la baisse de luminosité est noyée dans le bruit de fond. En pratique, nous avons comparé aux enregistrements plus de 400 millions de motifs susceptibles de correspondre à des transits. Grâce à cette technique, nous avons identifié neuf possibilités. Toutes correspondent à une planète dont le rayon serait égal à deux fois et demie celui de la Terre, mais neuf orbites sont possibles (voir la figure 4). Nous cherchons si les passages ont toujours lieu à une date et à une heure précises. Aujourd'hui, seules deux orbites semblent identifiées, l'une de 21 jours, l'autre de 26 jours. Nous continuons ces recherches et nous suivons en outre plusieurs centaines d'autres systèmes binaires à éclipses.

Un monde réglé comme une horloge

À terme, les transits pourraient même révéler si les planètes ont des satellites. En effet, les satellites font légèrement varier le mouvement orbital de leur planète mère, et modifient l'heure de l'occultation. Par exemple, si des astronomes extraterrestres suivaient le Soleil, ils remarqueraient que les transits ont lieu tous les 365,24 jours, et en déduiraient la présence de la Terre. Au bout de quelques années, ils remarqueraient que les passages peuvent intervenir avec deux minutes d'avance ou de retard, ce qui témoigne de la présence de la Lune. Si ces astronomes extraterrestres avaient des instruments photométriques très puissants, ils pourraient même détecter directement la petite baisse de luminosité supplémentaire due à la Lune.

Une planète se manifeste autrement que par ses occultations. Une binaire à éclipses est une sorte d'horloge, car les éclipses s'y produisent à intervalles réguliers. Si le mécanisme n'est pas parfaitement régulier, c'est qu'un corps massif invisible attire les étoiles. Par exemple, si une planète de la masse de Jupiter éloignait de nous une étoile binaire, les éclipses interviendraient avec quelques secondes de retard, c'est-à-dire le temps supplémentaire que mettrait la lumière des deux étoiles pour nous parvenir. Plus la planète est éloignée ou plus sa masse est élevée, plus le décalage augmente (méthode du chronométrage). Ainsi, on peut détecter une planète géante même si elle ne passe pas devant les deux étoiles. D'après les données disponibles, les astronomes savent où les planètes géantes ont des chances d'être situées dans certains systèmes. Par exemple, CM Draconis ne contient aucun corps dont la masse est supérieure à trois fois celle de Jupiter et dont l'orbite est plus rapprochée que celle de la Terre.

Les mesures photométriques de haute précision accumulées pendant des années pourraient aussi fournir des informations sur la lumière réfléchie par les planètes. Les planètes situées sur une orbite assez proche de leur étoile, estimée à moins de dix fois le rayon stellaire environ, réfléchissent une fraction perceptible de la lumière stellaire. Elle engendrerait une ondulation cyclique, de moins d'un dix millièmes de l'éclat de l'étoile, mais distincte des autres variations de la luminosité stellaire. Cette technique permettrait de décou-



6. LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS des trois différentes méthodes de détection de planètes sont récapitulés sur cette figure, qui donne la sensibilité de la méthode en fonction de la masse de la planète (axe vertical) et de sa distance à l'étoile mère (axe horizontal). Même à sa limite théorique, la méthode des vitesses radiales (la courbe en noir) ne détecte pas de planètes plus petites que Saturne, à moins qu'elles ne soient très proches de leur étoile. La méthode des transits peut repérer des planètes de la taille de la Terre ; des contraintes pratiques limitent actuellement son application à des planètes assez proches (en jaune), mais les missions spatiales à venir élargiront son domaine. La méthode du chronométrage (en bleu) permet de repérer les planètes lointaines plus facilement que les planètes proches de leur étoile.

vrir des planètes dont la période orbitale ne dépasse pas une semaine.

Pour réduire le bruit de fond, l'idéal serait de réaliser des observations au-dessus de l'atmosphère terrestre. Un observatoire orbital autoriserait une précision photométrique de l'ordre de 0,002 pour cent. Trois missions sont en cours d'élaboration (voir l'encadré de la page ci-contre).

Un jour aussi, des interféromètres spatiaux devraient supprimer l'éclat des étoiles et permettre de photographier des planètes telluriques pourtant un mil-

liard de fois moins brillante que l'étoile. Ces clichés faciliteraient la recherche des signatures spectrales de la vie, telles que l'ozone, l'eau et le méthane.

Ces découvertes pionnières sont exaltantes. L'astronome de la Renaissance Christiaan Huygens écrivait : « Quel merveilleux et étonnant Ordre des Choses nous donne à contempler la magnifique Immensité de l'Univers ! Tant de Soleils, tant de Terres ! » Huygens avait-il raison ? Y a-t-il d'autres planètes semblables à la nôtre ? Sont-elles habitées ? D'ici 2010, nous devrions le savoir.

Laurance DOYLE travaille à l'Institut Seti de Mountain View, en Californie. Hans-Jörg DEEG travaille à l'Institut d'astrophysique d'Andalousie à Grenade, en Espagne. Timothy Brown travaille au Centre national de recherche atmosphérique à Boulder, dans le Colorado.

Circumstellar Habitable Zones : Proceedings of the First International Conference, sous la direction de Laurance R. Doyle, Travis House Publications, 1996.

Gregory W. HENRY, Geoffrey W. MARCY, R. Paul BUTLER et Steven S. VOGT, *A Transiting « 51 Peg-like » Planet*, in *Astrophysical Journal*, vol. 529, n° 1, pp. L41-L44, 20 janvier 2000.

David CHARBONNEAU, Timothy M. BROWN, David W. LATHAM et Michel MAYOR, *Detection of Planetary Transits across a Sun-like Star*, in *Astrophysical Journal*, vol. 529, n° 1, pp. L45-L48, 20 janvier 2000.

Laurance R. DOYLE et al., *Observational Limits on Terrestrial-Sized Inner Planets around the CM Draconis System Using the Photometric Transit Method with a Matched-Filter Algorithm*, in *Astrophysical Journal*, vol. 535, n° 1, pp. 338-349, 20 mai 2000.

J. SCHNEIDER et M. CHEVRETON, *The Photometric Search for Earth-Sized Extrasolar Planets by Occultation in Binary Systems*, in *Astron. and Astrophys.*, n° 232, p. 251, 1990.

J. SCHNEIDER et L.R. DOYLE, *Ground-Based Detection of Terrestrial Extrasolar Planets by Photometry : The Case for CM Draconis*, in *Earth, Moon and Planets*, n° 71, p. 153, 1995.

P. SARTORETTI et J. SCHNEIDER, *On the Detection of Satellites of Extrasolar Planets with the Method of Transits*, in *Astron. and Astrophys.*, n° 134, p. 553, 1999.

