

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.

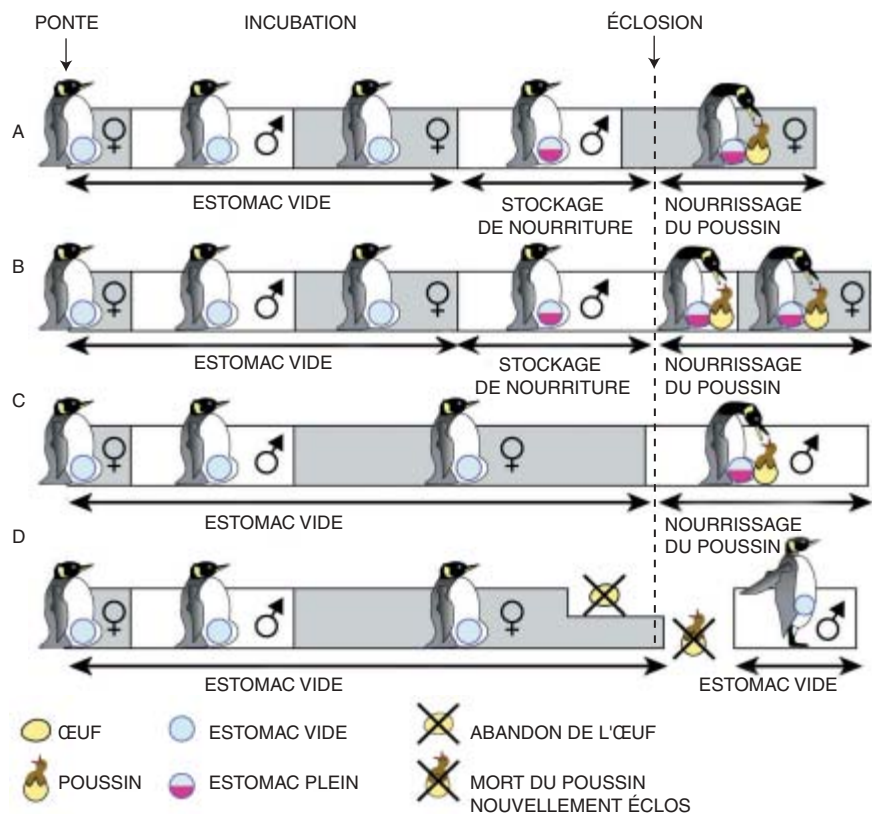
Chez le manchot royal, la diminution de la concentration totale en lipides pourrait provenir d'une « fuite » par le pylore ou de leur dégradation par des bactéries. En cas de démixtion des phases aqueuses et lipidiques, la hauteur du pylore par rapport à l'estomac favoriserait la fuite des huiles surnageant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

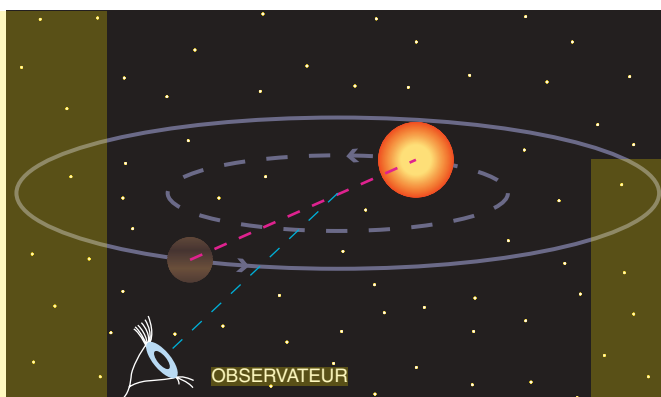
1. UNE PLANÈTE COMPARABLE À LA TERRE aurait été détectée autour de l'étoile binaire CM Draconis. Les auteurs ont observé une légère atténuation de la luminosité des étoiles qui se produit périodiquement et qui révélerait peut-être le passage d'une planète entre l'étoile et les observateurs. L'observation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



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

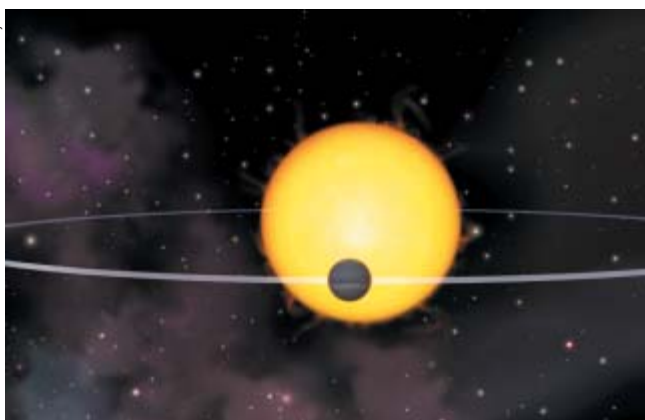
distance entre la planète et l'étoile est insignifiante ; elle pourrait varier de façon importante sans que notre perception de l'atténuation change. En revanche, la sensibilité de la méthode des vitesses radiales diminue avec la racine carrée de la distance entre la planète et l'étoile, car les planètes 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 ?

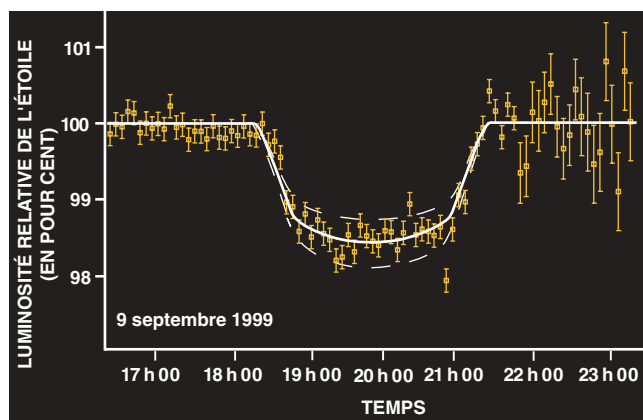
L'augmentation de la distance entre la planète et son étoile réduit la probabilité d'alignement, puisque cette dernière est égale au rapport du rayon de l'étoile sur la distance entre l'étoile et

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

Alfred T. Kamajian

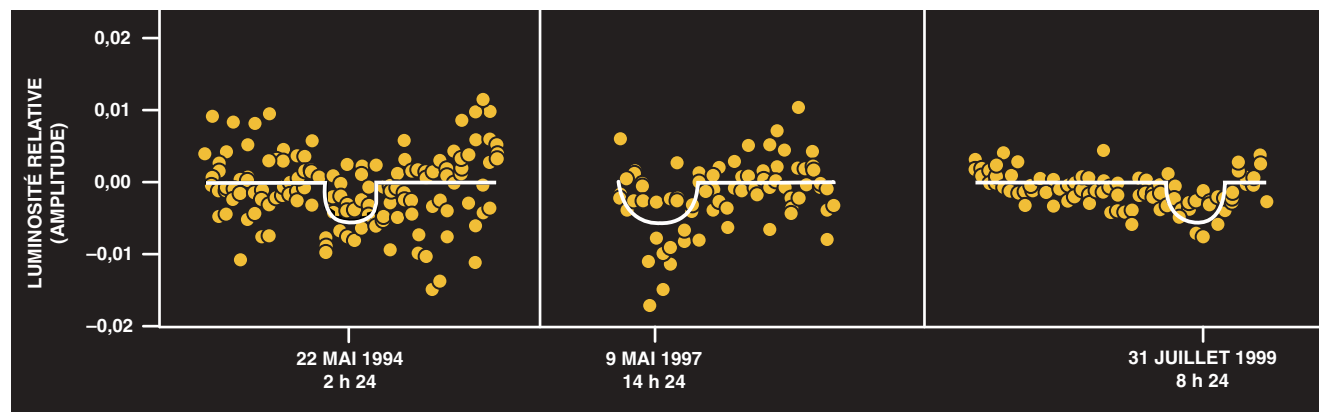


3. LE PREMIER SUCCÈS de la méthode des transits a été la confirmation de la présence d'une planète autour de l'étoile de type solaire HD 209458 (à gauche). La diminution de 1,8 pour cent de la luminosité de l'étoile (les points du schéma à droite avec les barres d'erreurs) apparaît sans ambiguïté. Elle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



Jennifer Johansen

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.



Jennifer Johansen

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.