

TESS ET CHEOPS Traquer l'ombre des exoplanètes

Près de 4 000 planètes extrasolaires ont été détectées à ce jour, dont une bonne partie grâce au télescope spatial *Kepler*. Cette riche moisson de mondes étranges va s'accélérer avec le lancement, cette année, des satellites *Tess* et *Cheops*.

Sur cette vue d'artiste, une exoplanète et sa lune évoluent autour d'une étoile naine rouge. Ces petits astres de faible luminosité présentent de nombreux atouts pour traquer de nouveaux mondes.

L'ESSENTIEL

> Le satellite *Kepler* de la Nasa a été un chasseur d'exoplanètes très efficace. Sa mission s'achève en 2018, mais plusieurs projets prennent la relève.

> Les satellites *Tess* et *Cheops*, dont le lancement est prévu cette année, utiliseront comme *Kepler* la méthode du transit : lorsqu'une planète passe

devant son étoile, elle bloque une partie de sa lumière, et cette baisse de luminosité est mesurable.

> Avec d'autres missions futures, notamment le télescope spatial *James-Webb* et l'observatoire spatial *Plato*, les astrophysiciens devraient recueillir un grand nombre de données sur les exoplanètes.

L'AUTEUR



JOSHUA N. WINN
astrophysicien à l'université de Princeton, aux États-Unis, et coresponsable de la mission spatiale *Tess* (*Transiting exoplanet survey satellite*)

Le 21 août 2017 a été un grand jour pour tous les amoureux du ciel. Dans un champ de l'Idaho, aux États-Unis, j'ai assisté, avec ma famille, au passage de l'ombre de la Lune. De l'Oregon à la Caroline du Sud, nous avons tous eu la chance de voir une éclipse totale du Soleil, qui nous plonge dans une ambiance crépusculaire en plein jour et met en évidence l'intense luminosité de la couronne solaire.

Combien de vocations d'astronomes ce rare spectacle a-t-il suscitées chez les plus jeunes d'entre nous ? Les éclipses ont

longtemps été des sources de fascination et de savoir... et elles le sont encore. Mes propres travaux reposent sur des éclipses, non pas de Soleil, mais d'étoiles bien plus lointaines. En effet, je m'intéresse aux « transits » d'exoplanètes : les télescopes ne permettent pas réellement de voir la silhouette d'une planète passer devant son étoile, mais l'infime baisse de luminosité qui survient lorsque l'exoplanète occulte une partie du rayonnement de l'astre est suffisante pour dire que ce monde extrasolaire existe bel et bien. Des découvertes fascinantes ! ➤

> C'est en 1999 que deux équipes, menées par David Charbonneau, de l'université Harvard, et Gregory Henry, de l'université d'État du Tennessee, ont découvert pour la première fois une exoplanète (HD 209458 b) grâce à son transit. La diminution de la brillance de l'étoile hôte était d'environ 1,7% et l'éclipse a duré environ trois heures.

Dix ans plus tard, on avait ainsi détecté plus d'une centaine d'exoplanètes. Aujourd'hui, le chiffre avoisine les 4000, notamment grâce au télescope spatial *Kepler* dont la mission s'achève bientôt, en 2018. Si la méthode du transit est actuellement la technique la plus efficace pour trouver des mondes lointains, d'autres méthodes ont permis de récolter pas moins de 700 exoplanètes. Cette impressionnante moisson a révélé une grande diversité de mondes, diversité que les théories de formation des planètes étaient loin d'avoir anticipée. Et nous pensons maintenant que nous n'avons fait qu'effleurer la surface d'un vaste océan.

Afin de poursuivre cette exploration, la Nasa et l'ESA, les agences spatiales américaine

et européenne, ont prévu d'envoyer dans l'espace, dès 2018, deux nouveaux télescopes dédiés à la recherche d'exoplanètes par la méthode du transit. En attendant, les télescopes au sol, juchés au sommet de montagnes, participent aussi à cette chasse. Et tout cela ne sera qu'un préambule à l'ultrapuissant télescope spatial chasseur d'exoplanètes, *Plato*, que l'ESA prévoit de lancer en 2026.

LE SUCCÈS DE KEPLER

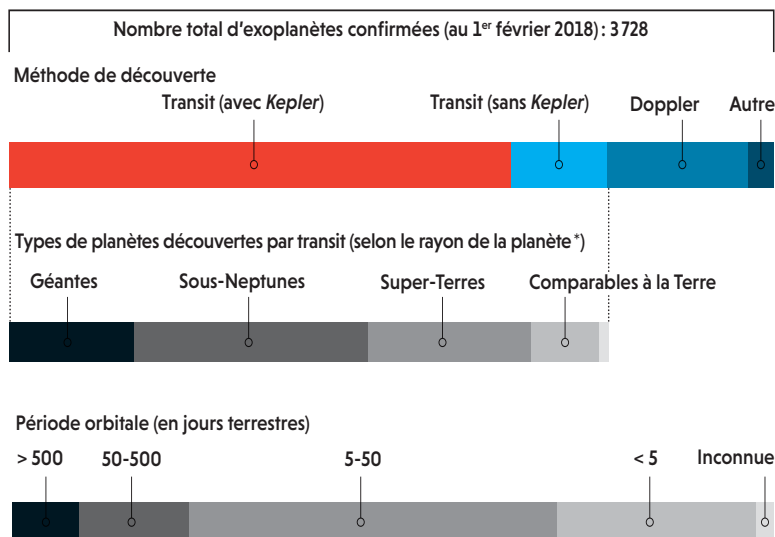
Une grande part de nos connaissances dans le domaine des exoplanètes est à mettre au crédit des observations de *Kepler*. Lancé en 2009, ce télescope a observé une petite région du ciel s'étendant entre les constellations du Cygne et de la Lyre. Il y a scruté la luminosité de près de 150 000 étoiles. Mais en 2013, la mission du télescope a été modifiée à la suite d'une panne qui a touché deux des roues de réaction, qui servent à maintenir la direction de visée du télescope. Étonnamment, le télescope est resté en mesure de continuer sa traque des exoplanètes.

Points rouges

Ils représentent environ 2 650 étoiles dotées d'exoplanètes qui ont été découvertes par *Kepler* et confirmées ensuite par d'autres observations. Leur répartition particulière correspond à la forme des capteurs CCD de la caméra du satellite qui a observé une unique région du ciel.

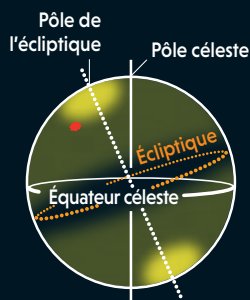
UN VASTE CATALOGUE D'EXOPLANÈTES

La recherche sur les exoplanètes a vraiment démarré dans les années 1990. Depuis, les astrophysiciens ont compilé un catalogue de plus de 3 500 planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil. Elles ne représentent cependant qu'une petite fraction de la multitude d'exoplanètes que contient vraisemblablement la Voie lactée. La plupart des découvertes sont le fruit du télescope spatial *Kepler*. Deux satellites prendront le relais en 2018, le projet de la Nasa *Tess* (*Transiting exoplanet survey satellite*) et le télescope européen *Cheops* (*Characterising exoplanet satellite*).



* Il s'agit ici des définitions des catégories planétaires adoptées par la collaboration TESS. Ces définitions sont en partie arbitraires et varient un peu d'une collaboration à une autre.

Cette carte est une projection du ciel étoilé vu depuis la Terre. Chaque étoile est positionnée en fonction de son ascension droite (l'équivalent astronomique de la longitude) et de sa déclinaison (la latitude). L'écliptique est le plan du Système solaire.



Le halo autour de chaque point indique la brillance de chaque étoile, telle que perçue depuis la Terre.

- Très brillante
- Visible à l'œil nu (limite inférieure)
- 100 fois plus faible
- 10 000 fois plus faible

Illustration de Jan Willem Tulp

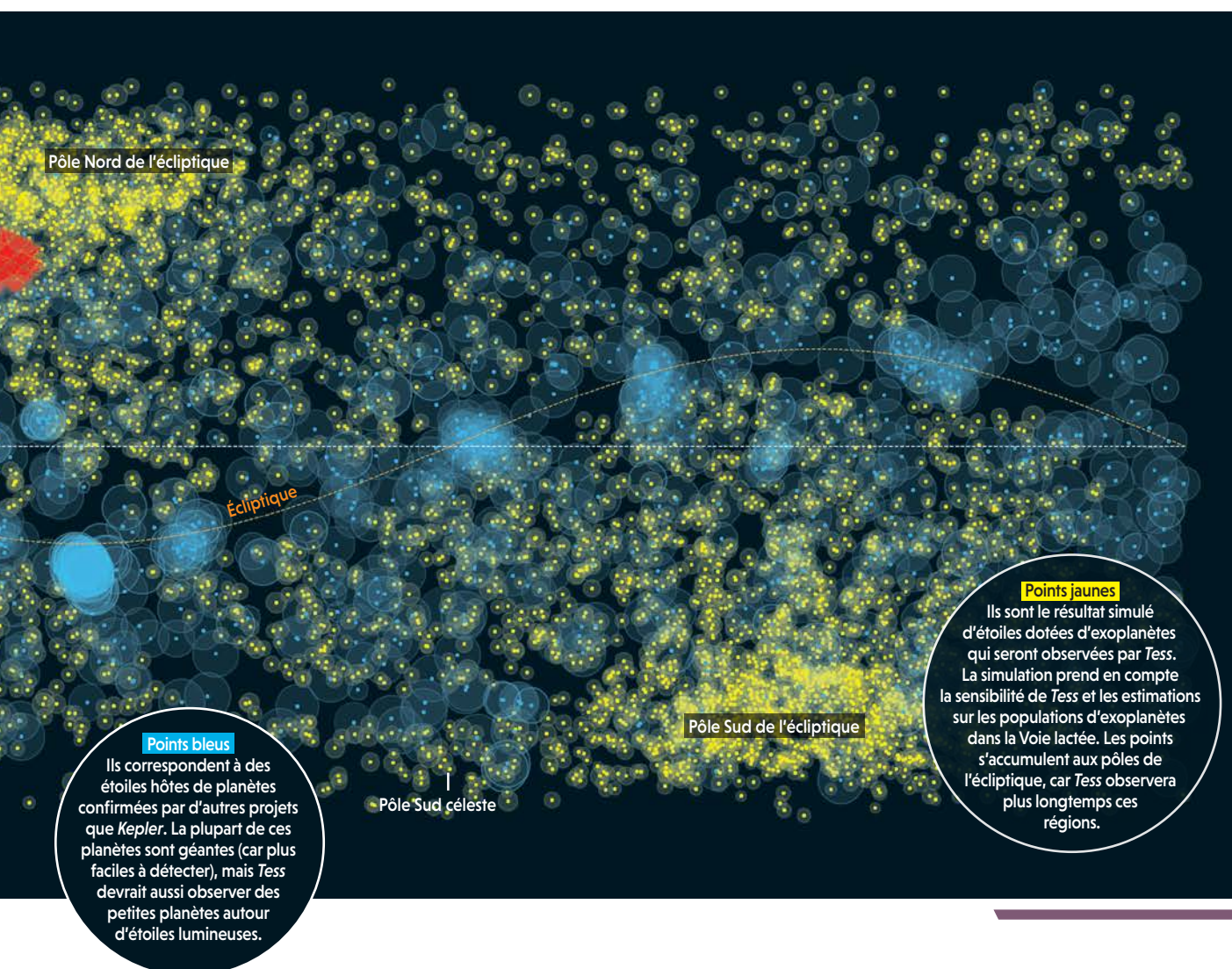
Les transits d'exoplanètes sont rares. *Kepler* n'a observé qu'un faible nombre d'éclipses planétaires par rapport au nombre d'étoiles observées. Elles se présentent sous la forme de brèves et périodiques baisses de luminosité. Chacune trahit l'existence d'une planète qui est, par chance, presque parfaitement alignée avec son étoile dans la ligne de visée du télescope. Dans une telle configuration, qui est exceptionnelle, une mini-éclipse se produit à chaque fois que la planète passe devant l'étoile. L'ampleur de la baisse de luminosité indique la taille de la planète par rapport à celle de l'étoile. Plus une planète est grosse, plus elle occulte de la lumière et donc plus elle est facile à détecter.

Vue de loin, la planète Jupiter passant devant le Soleil provoquerait une variation de luminosité d'environ 1%, alors que la Terre induirait une baisse de 0,01%. Si cette dernière était une exoplanète, il serait impossible de mesurer un effet aussi faible depuis le sol, car l'atmosphère terrestre perturbe trop la lumière provenant des étoiles. C'est pourquoi on fait appel à des télescopes spatiaux.

Le satellite *Kepler* a mis en évidence près de 5000 candidates au titre d'exoplanète, dont plus de 2500 ont été confirmées par des analyses ultérieures (voir l'encadré ci-dessous). La plupart des mondes découverts par *Kepler* se répartissent en trois catégories: les super-Terres, de la taille de la Terre ou un peu plus grandes, les mini-Neptunes, un peu plus petites que la planète géante glacée du Système solaire, et les géantes gazeuses, semblables à Jupiter par leur taille.

La plupart des systèmes planétaires identifiés par *Kepler* ne contiennent qu'une seule planète connue, mais plusieurs centaines de ces systèmes en hébergent plusieurs. Et récemment, une étoile qui héberge huit planètes, comme le Soleil, a été repérée. Ces nombres reflètent en partie la réelle distribution des planètes autour des étoiles, mais aussi certains biais observationnels de *Kepler*, qui détecte plus facilement des grosses planètes en orbite rapprochée autour de leur étoile.

Certaines des découvertes de *Kepler* ont été particulièrement surprenantes. De mon point de vue, l'une des observations les plus ➤



Source : archives des exoplanètes de la Nasa; L. G. Bouma et al., en ligne, arXiv:1705.08891, 24 mai 2017 (pour les cibles de *Tess*)

> captivantes est celle de « systèmes solaires miniatures ». Ceux-ci hébergent jusqu'à six planètes entassées sur des orbites plus proches de leur étoile que celle de Mercure autour du Soleil. Et cette configuration est loin d'être rare. Si vous prenez au hasard dans le ciel une étoile du même type que le Soleil, vous avez 50% de chances qu'elle héberge une planète plus grande que la Terre sur une orbite plus rapprochée que Mercure. Personne n'avait anticipé que de telles planètes pouvaient être monnaie courante. En réalité, certaines des théories de formation des planètes les plus abouties suggéraient même que ces configurations étaient rares.

La mission *Kepler* a aussi découvert des planètes rares, mais si extrêmes qu'elles n'avaient été imaginées que par les auteurs de science-fiction. L'une de mes préférées est KOI 1843.03, une planète de la taille de la Terre si proche de son étoile que la température de la face éclairée y atteint plusieurs milliers de degrés. Sa surface est probablement couverte d'un océan de magma, qui ne serait pas sans rappeler la planète imaginaire Mustafar de la saga *Star Wars*. KOI 1843.03 suit une orbite si rapprochée de l'étoile qu'elle accomplit un tour en 4,25 heures.

Autre exemple : avec ses deux étoiles, l'exoplanète Kepler-16b ressemble à Tatooine, un autre monde de l'univers de *Star Wars*. La planète évolue autour des deux étoiles qui tournent l'une autour de l'autre. Citons aussi le système de l'étoile Kepler-36, où deux planètes évoluent quasiment sur la même orbite, ce qui les amène à interagir l'une avec l'autre de façon chaotique. Ainsi, même si nous connaissions la position au mètre près de ces planètes à un instant donné, nous serions incapables de calculer la position qu'elles occuperont dans une vingtaine d'années. C'est un exemple astrophysique de chaos déterministe, ou « effet papillon » : même en partant de conditions initiales très proches, l'évolution du système conduit à des configurations très différentes. Sur Terre, la révolution scientifique a débuté en comprenant le mouvement des planètes. Imaginez à quel point cela serait compliqué pour les éventuels savants qui vivent dans le système Kepler-36 !

L'une des questions qui motive les astrophysiciens est de savoir si les planètes comparables à la Terre en taille et en masse sont rares dans l'Univers. Les scientifiques cherchent surtout des mondes qui, potentiellement, renferment des océans d'eau liquide. Pour satisfaire ce dernier point, les planètes doivent se trouver à une certaine distance de l'étoile qui leur fournit de la chaleur : trop éloignées, l'eau y serait gelée, trop proches, l'eau n'y existerait que sous forme de vapeur. L'intervalle des distances acceptables est dénommé « zone habitable » par les astrophysiciens, qui supposent que l'eau est un élément essentiel à l'émergence de la vie, comme cela a été le cas sur Terre. Mais cela ne signifie

pas qu'une planète située dans la zone habitable de son étoile contienne de l'eau liquide, que les conditions y soient réellement propices à la vie et que la vie s'y soit développée. Malgré la dizaine de candidates découvertes dans la zone habitable de leur étoile par *Kepler*, il est trop tôt pour dire si la Terre est une planète banale ou rare. Des analyses plus précises des données recueillies sont nécessaires.

ÉLARGIR L'HORIZON

La mission *Kepler* a été un succès malgré certaines limitations : le télescope ne pointait que dans une seule direction et n'observait qu'une petite fraction de la voûte céleste (1/400° pour être précis). Pour compenser la faible taille angulaire de la zone inspectée, *Kepler* devait examiner les étoiles proches dans cette région mais aussi celles plus lointaines afin d'obtenir un échantillon assez fourni, qui se prête à des analyses statistiques. Ainsi, une étoile typique du catalogue de *Kepler* se situe à 1 000 années-lumière.

Certes, il est spectaculaire de pouvoir détecter une exoplanète aussi lointaine. Mais la distance nuit à la qualité des observations. Plus une étoile est lointaine, moins elle est lumineuse, ce qui limite la précision des données recueillies, voire rend impossible certaines mesures. Par exemple, nous sommes incapables d'estimer la masse de la plupart des planètes du catalogue *Kepler*. Le signal du transit permet de



La planète KOI 1843.03 est si proche de son étoile qu'elle est couverte d'un océan de magma



calculer le diamètre de la planète, mais pas sa masse. Cela laisse une grande inconnue sur le type de planète auquel on a affaire. S'agit-il d'une planète dense et rocheuse comme la Terre ? Ou d'une planète diffuse et gazeuse comme Jupiter et Saturne ? Ou de quelque chose d'intermédiaire ? Seule la combinaison des informations de masse et de diamètre nous permettrait de répondre avec certitude.

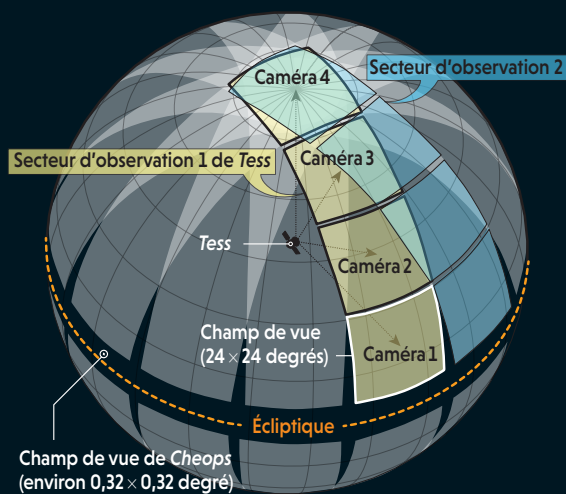
Pour déterminer la masse d'une planète, le moyen habituel est de mesurer les infimes mouvements de l'étoile en réaction à la petite attraction gravitationnelle de la planète. En effet, le

COMMENT TRAQUER UNE EXOPLANÈTE ?

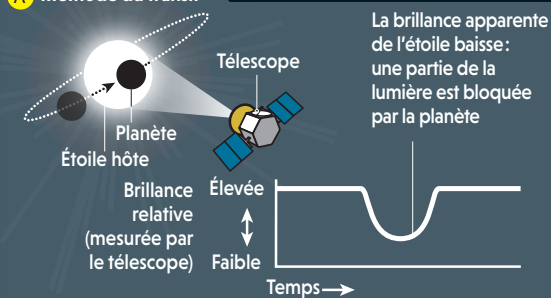
Il existe plusieurs méthodes pour détecter des exoplanètes. Les deux plus efficaces sont la méthode du transit et celle faisant appel à l'effet Doppler. Les informations qu'elles livrent sont cependant complémentaires. Les futurs télescopes spatiaux *Tess* et *Cheops* utiliseront la méthode du transit.

Stratégie d'observation

Tess observera 90 % de la voûte céleste grâce à quatre caméras qui couvriront à tout instant un secteur de 24 degrés par 96. Le ciel sera divisé en 26 secteurs qui se recouvrent, et *Tess* consacra un mois d'observation par secteur. *Cheops* se focalisera sur des étoiles individuelles pour lesquelles on suspecte la présence d'exoplanètes.



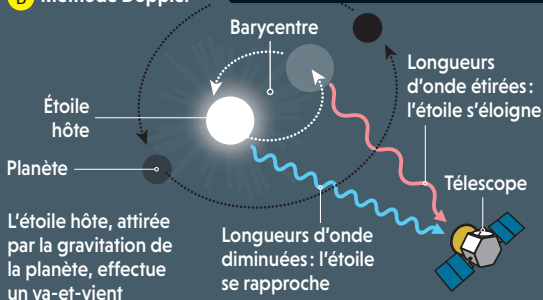
A Méthode du transit



Comment trouver une exoplanète

Les télescopes *Kepler*, *Tess* et *Cheops* utilisent la méthode du transit **A**. Quand une planète passe devant l'étoile dans la ligne de visée du satellite, elle bloque une partie de la lumière stellaire. L'étoile paraît donc moins brillante. L'effet est périodique et se reproduit à chaque passage de la planète en orbite. Une seconde méthode s'appuie sur l'effet Doppler **B**. Si l'on détecte un décalage Doppler périodique dans les longueurs d'onde de la lumière reçue de l'étoile, c'est que celle-ci bouge d'avant en arrière de façon régulière. L'influence gravitationnelle d'une planète en orbite autour de l'étoile en est la cause : les deux corps tournent autour de leur barycentre.

B Méthode Doppler



système étoile-planète évolue autour de son barycentre, qui ne coïncide pas avec le centre de l'étoile. L'étoile a ainsi un petit mouvement de rotation autour de ce barycentre. Il est possible de déceler ce petit mouvement, qui est d'autant plus marqué que la planète est massive, à l'aide de l'effet Doppler : la longueur d'onde du rayonnement reçu de l'étoile diminue ou augmente légèrement selon que l'astre se rapproche de la Terre ou s'en éloigne (voir l'encadré ci-dessus).

Cette technique exige cependant des mesures spectroscopiques de précision, portant sur un minimum d'environ 50 000 longueurs d'onde différentes. Pour des étoiles de faible luminosité, le rayonnement capté est insuffisant pour réaliser ces mesures.

Une future mission de la Nasa, *Tess* (*Transiting exoplanet survey satellite*), pour laquelle je suis coresponsable, a pour objectif de dépasser les limitations de *Kepler*. *Tess* embarquera quatre télescopes, chacun de 10 centimètres de diamètre, soit un dixième du télescope de *Kepler*. Ce choix peut sembler étrange (en général, le progrès s'accompagne plutôt de télescopes de plus en plus grands). Mais les

télescopes plus petits ont l'avantage d'avoir un champ de vision plus large. Cette relation entre taille et champ de vision est dictée par les lois de l'optique. Chaque caméra de *Tess* voit ainsi une portion 6 fois plus grande du ciel que *Kepler*, et *Tess* pourra pivoter de façon à pointer dans différentes directions. Finalement, *Tess* devrait observer beaucoup plus d'étoiles que *Kepler*.

La mission *Tess* décollera entre mars et juin de cette année. Et durant les deux prochaines années, elle passera en revue environ 90 % du ciel qui sera divisé en 26 secteurs se recouvrant. Chaque secteur sera exploré pendant un mois. Comme pour *Kepler*, nous espérons découvrir des milliers d'exoplanètes avec *Tess*, mais celles-ci seront situées autour d'étoiles typiquement 30 fois plus brillantes. Cela permettra notamment aux observatoires au sol de prendre le relais de *Tess*, ce qui était plus difficile avec les étoiles peu lumineuses sondées par *Kepler*.

Peu après *Tess*, c'est la mission européenne *Cheops* (*Characterising exoplanet satellite*) qui prendra son envol à la fin de 2018. *Cheops* est équipé d'un unique télescope de 32 centimètres de diamètre. Son rôle, bien que différent, sera ➤

> complémentaire de celui de *Tess*. Alors que *Tess* procédera à un balayage large et systématique du ciel, *Cheops* pointera sur des étoiles précises, à propos desquelles des indices d'exoplanètes ont été signalés. L'idée est de collecter des données de meilleure qualité pour ces systèmes particuliers.

DEUX STRATÉGIES COMPLÉMENTAIRES

Par exemple, si *Tess* trouve des indices de la présence autour de telle étoile d'une planète intéressante, mais sans avoir de données assez fiables pour le confirmer, l'un de mes collègues ou moi contacterons l'équipe de *Cheops* pour voir s'ils peuvent y jeter un œil. Ou considérons Proxima du Centaure et Ross 128, deux étoiles voisines pour lesquels la technique Doppler a suggéré la présence de planètes comparables à la Terre. *Cheops* pourrait alors traquer des éclipses de ces deux étoiles. Il faudra encore un peu de chance pour que l'orbite de la planète soit dans le bon alignement avec notre ligne de visée : pour Proxima du Centaure, la probabilité est de 1,4%. Mais si on a de la chance, on en saura beaucoup plus sur ces planètes.

Ces satellites nous propulseront dans une nouvelle ère d'étude des exoplanètes, mais ils ne sont pas parfaits. Pour être sûrs qu'une baisse de luminosité est bien le fait d'un transit et non d'une erreur de l'instrument, les chercheurs aiment observer plusieurs occurrences de ce phénomène périodique. Malheureusement, *Tess* ne scrutera chaque étoile que pendant un mois, une durée bien trop courte pour observer plusieurs transits d'une planète comme la Terre, qui met un an pour faire un tour complet. Néanmoins, pour une petite portion du ciel, où tous les secteurs se recouvrent, *Tess* observera certaines étoiles sur une période qui s'étirera jusqu'à un an (mais cela restera bien inférieur aux quatre ans de la vision fixe de *Kepler*).

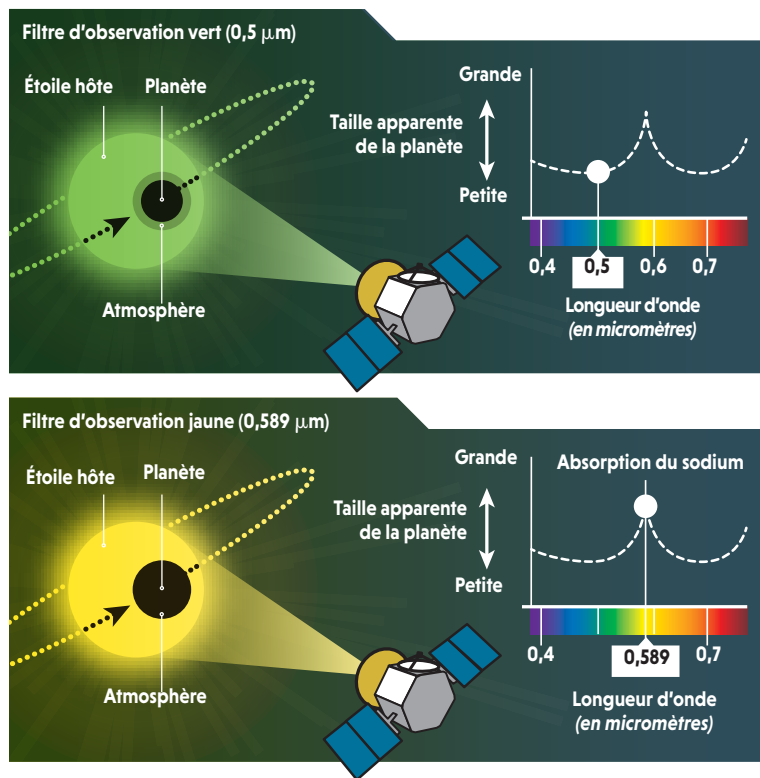
Par conséquent, *Tess* sera surtout efficace pour la découverte de planètes ayant une très courte période de révolution, quelques semaines ou moins. Ce n'est pas idéal, mais c'était la seule façon pour l'équipe qui a conçu la mission de maintenir un budget inférieur à l'enveloppe prévue de 228 millions de dollars (environ 183 millions d'euros). C'est néanmoins un bon compromis, car *Kepler* nous a montré qu'il existe une grande variété de planètes proches de leur étoile (donc ayant une période de révolution courte) : des mondes de lave, des planètes enflées de faible densité, des planètes en interaction sur des trajectoires chaotiques et même des planètes qui s'évaporent sous l'effet de la chaleur extrême de leur étoile. *Tess* devrait trouver les exemples les plus proches de toutes ces catégories exotiques de planètes, et donner l'occasion de les étudier dans les meilleures conditions possible avec d'autres instruments.

Pour détecter une planète vraiment semblable à la Terre en orbite autour d'une étoile comparable au Soleil, il faudra attendre. Néanmoins, *Tess* jouera aussi son rôle dans la quête à long terme de la recherche de vie sur d'autres planètes. Nous estimons que *Tess* devrait trouver une dizaine de planètes de taille terrestre dans la zone habitable de leur étoile, autant que *Kepler*. Pour ce faire, il faudra examiner d'autres étoiles que celles ressemblant au Soleil. En effet, si le Soleil n'est finalement qu'une étoile assez ordinaire parmi des centaines de milliards dans la Voie lactée, il n'appartient pas à la famille la plus répandue, celle des naines rouges, plus froides et moins lumineuses, de masse inférieure à la moitié de celle du Soleil.

ÉTUDIER L'ATMOSPHÈRE GRÂCE AU TRANSIT

Le transit est aussi utilisé pour déterminer la composition de l'atmosphère planétaire. Lorsqu'une planète passe devant son étoile, une partie de la lumière traverse l'atmosphère. Les molécules de cette dernière absorbent la lumière à des longueurs d'onde particulières et laissent une signature dans le rayonnement qui parvient sur Terre. En comparant le spectre de l'étoile à la lumière captée pendant le transit, il est possible de récupérer ces informations.

La taille apparente de la planète diffère selon la longueur d'onde à laquelle on regarde la lumière émise par l'étoile (ci-dessous). Elle est plus petite dans le vert, car la lumière traverse l'atmosphère de la planète sans être absorbée. La composante jaune est bloquée par l'atmosphère ; la planète paraît alors plus grande. Cette absorption est typique du sodium ; on en déduit la présence de cet élément.



Si le Soleil était un projecteur sur une scène de théâtre, une naine rouge serait une bougie. Il faudrait alors être bien plus près de la bougie pour ressentir autant de chaleur qu'on ne le ressent à une certaine distance du projecteur. Dès lors, autour d'une naine rouge, la zone habitable est bien plus proche de l'astre qu'autour du Soleil. Et la période de révolution des planètes dans cette zone habitable sera alors plus courte, assez pour faire les affaires de *Tess*: pour une naine rouge de un cinquième de la masse solaire, la période de révolution dans la zone habitable se compterait en quelques semaines.

Le satellite *Kepler* a examiné quelques milliers de naines rouges et a découvert qu'elles étaient souvent accompagnées de bien plus de planètes que les étoiles de type solaire. Sur les quelques centaines de milliers d'étoiles ciblées par *Tess*, environ 50 000 seront des naines rouges. Bien que ces astres soient peu lumineux, leur petite taille est un atout: au cours du transit d'une éventuelle planète, celle-ci occulterait alors une plus grande portion de l'astre. La baisse de luminosité serait donc plus marquée, et plus facile à repérer. Par exemple, une planète serait tout aussi détectable autour d'une étoile 16 fois moins lumineuse qu'une autre si le diamètre de cette étoile est seulement la moitié de celui de la seconde. En réalité, le signal de transits de planètes autour de naines rouges est si net qu'il ne serait en principe même pas nécessaire d'utiliser un télescope spatial.

TRAPPIST, SPECULOOS, DES TRAQUEURS D'EXOPLANÈTES

Et, effectivement, plusieurs projets de recherche au sol de transits se consacrent à la recherche d'exoplanètes autour de naines rouges. Ces étoiles étant peu lumineuses, les astrophysiciens doivent faire appel à des télescopes de grand diamètre, donc à champ de vision étroit. Ils doivent suivre alors les étoiles une par une, ce qui réduit l'efficacité de la traque et en fait une entreprise à long terme. Après des années de traque, seuls trois systèmes planétaires ont été découverts par cette approche. Mais ces trois systèmes sont parmi les découvertes les plus sensationnelles du domaine. L'un d'eux, Trappist-1, a fait les grands titres en 2017. Ce petit système n'a pas moins de sept planètes de la taille de la Terre sur des orbites serrées autour d'un astre si petit qu'il entre tout juste dans la catégorie des étoiles. Et au moins deux des sept planètes se trouvent dans la zone habitable.

Pour l'anecdote, le nom du télescope, *Trappist*, grâce auquel la découverte a été réalisée, est un acronyme (*TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope*), mais c'est surtout le nom d'une bière belge bien connue. Dans le même esprit, le responsable de *Trappist*, Michaël Gillon, a nommé *Speculoos* (*Search for*

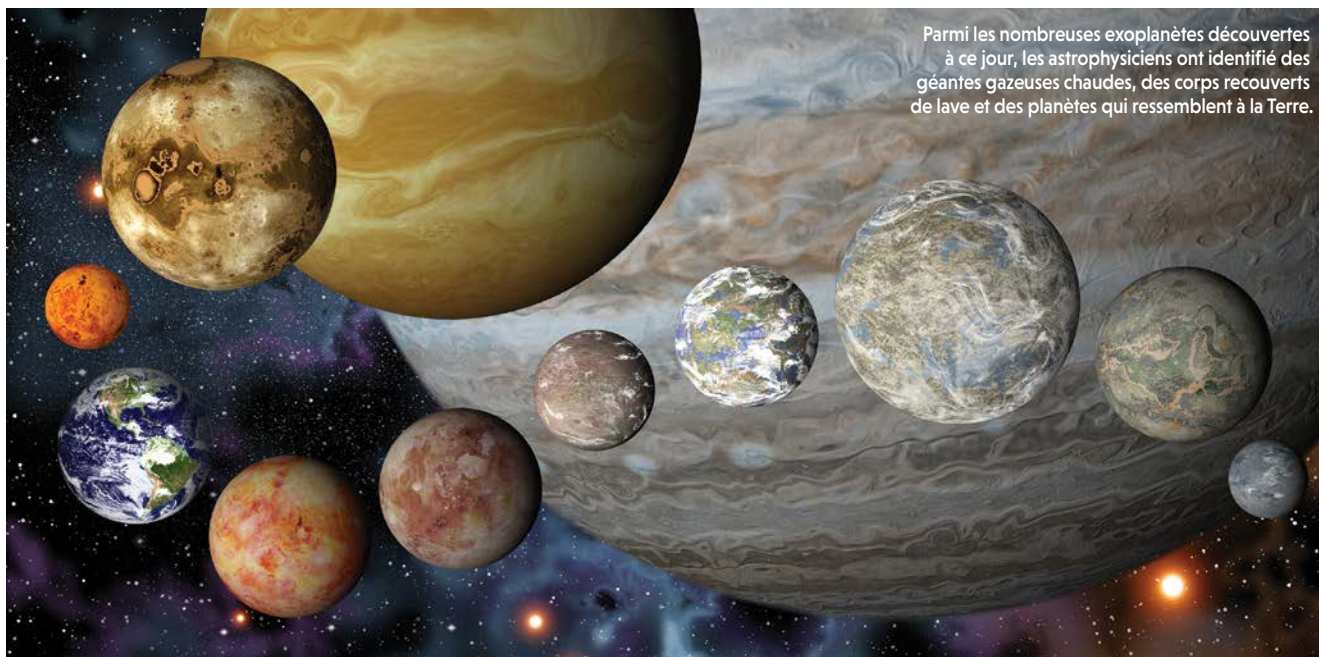
habitable Planets Eclipsing ULtra-coOL Stars) un autre projet de recherche d'exoplanètes; ce nom désigne un biscuit également belge.

Grâce aux futures missions spatiales évoquées et aux projets au sol, nous connaissons la position de milliers de planètes qui transitent devant leur étoile. Nous déterminerons certaines de leurs caractéristiques telles que la masse, et la densité, ce qui nous permettra de mettre à l'épreuve nos modèles de formation planétaire. Et si nos prévisions sont justes, nous aurons enrichi notre collection de planètes de la taille de la Terre dans la zone habitable de leur étoile.

Mais comment aller plus loin et savoir si un monde potentiellement habitable héberge effectivement une forme de vie? L'approche classique, proposée dans les années 1950, consiste à pointer un grand radiotélescope vers la planète et espérer capter les émissions électromagnétiques d'une civilisation extraterrestre intelligente. Même si le raisonnement n'est pas absurde, nous n'avons aucune idée de ses chances de réussite.

Une autre approche consiste à analyser l'atmosphère de l'exoplanète pour y rechercher des traces de vie. C'est possible en utilisant une petite astuce au cours de l'observation d'un transit. Les couches les plus externes de la planète correspondent à l'atmosphère et sont en partie transparentes. Ainsi, lorsque la planète effectue un transit, une fraction de la lumière de l'étoile est filtrée par l'atmosphère avant de nous parvenir. Grâce à une analyse spectroscopique de cette lumière qui a traversé les couches gazeuses de la planète, nous sommes en mesure de déterminer la composition de l'atmosphère. En effet, chaque atome ou molécule absorbe ou diffuse la lumière à différentes longueurs d'onde. Ils laissent donc une signature assez claire dans le rayonnement capté par les télescopes. Ainsi, en comparant le spectre de l'étoile avant, pendant et après le transit, il est possible de déduire la présence de certains éléments dans l'atmosphère de l'exoplanète. Par exemple, le sodium absorbe des photons de lumière d'une longueur d'onde de 589 nanomètres.

Les astronomes ont utilisé cette technique sur des planètes en transit de la taille de Jupiter et même sur certaines plus petites, comparables à Neptune et Uranus. Ils ont découvert des molécules de méthane, de monoxyde de carbone et d'eau dans ces atmosphères extraterrestres. Mais la méthode n'a jamais été appliquée sur des planètes de la taille de la Terre parce que leur signal est trop faible, et parce que les étoiles autour desquelles elles ont été trouvées sont trop peu lumineuses et lointaines. Mais si, grâce aux projets à venir, nous trouvons de l'oxygène dans l'atmosphère d'un tel corps, l'émotion serait grande. En effet, si l'atmosphère de la Terre contient une importante ➤



Parmi les nombreuses exoplanètes découvertes à ce jour, les astrophysiciens ont identifié des géantes gazeuses chaudes, des corps recouverts de lave et des planètes qui ressemblent à la Terre.

> proportion d'oxygène, c'est grâce aux organismes vivants. Si la vie sur notre planète disparaissait subitement, les roches absorberaient l'oxygène en quelques millions d'années pour former des oxydes. Dès lors, une exoplanète dont l'atmosphère présente de grandes quantités d'oxygène pourrait être le siège d'une vie.

Dans ce contexte, *Tess*, *Cheops* et *Speculoos* serviront d'éclaireurs au futur grand observatoire spatial, le télescope *James-Webb*, qui prendra la succession du télescope *Hubble*. D'un coût de 10 milliards de dollars (environ 8 milliards d'euros), *James-Webb* décollera en 2019. Il sera alors l'outil le plus efficace pour réaliser des mesures de spectroscopie lors de transits. Mais la durée de vie de cette mission sera assez courte: les réserves de carburant nécessaires au maintien de l'orbite s'épuiseront au bout de 5 à 10 ans. Étant donné ce calendrier serré, il y a une certaine urgence à découvrir les meilleures cibles à proposer au télescope *James-Webb*.

Comme le temps d'observation sur le télescope *James-Webb* sera très demandé, certains spécialistes des exoplanètes se sont associés pour concevoir et proposer des télescopes qui seront dédiés uniquement à l'analyse spectrale des transits. La mission américaine se nomme *Finesse* (*Fast infrared exoplanet spectroscopy survey*) et son alter ego européen est *Ariel* (*Atmospheric remote-sensing infrared exoplanet large survey*). Le terme infrarouge apparaît dans les deux noms, car les molécules telles que l'eau et le dioxyde de carbone sont plus faciles à détecter dans cette gamme du spectre électromagnétique. Dans un an ou deux, nous saurons si ces projets auront le feu vert pour être réalisés.

À plus long terme, un projet européen, *Plato*, est prévu pour décoller en 2026. Je vois *Plato* comme un super-*Tess*: il aura 24 télescopes pour surveiller le ciel, au lieu de 4. *Plato* devrait traquer des exoplanètes avec une meilleure sensibilité et sur de plus longues périodes que tous les autres télescopes.

Par ailleurs, la précision des données de *Plato* sera assez élevée pour détecter les variations de luminosité liées aux vibrations de l'étoile. En effet, les étoiles sont parcourues par des ondes, comme des vagues, à la façon des tremblements de terre. Leur étude est nommée astérosismologie. Les fréquences et les motifs de ces vibrations dépendent de la structure interne des étoiles, notamment leur densité et leur composition.

Quand *Plato* découvrira une planète, nous bénéficierons donc d'une meilleure connaissance des propriétés de son étoile hôte, son âge par exemple. En effet, en vieillissant, une étoile transforme son hydrogène en hélium; ce changement de composition se manifeste par de subtiles modifications dans les vibrations de l'étoile, de quoi estimer son âge. Par l'astérosismologie, nous pourrions ainsi déterminer si l'étoile est au début de sa vie ou si elle a déjà brûlé son hydrogène depuis 10 milliards d'années. Autrement dit, nous pourrions étudier l'évolution des systèmes planétaires au cours du temps cosmique.

Entre les analyses en cours des données de *Kepler* et celles à venir de *Tess*, *Cheops*, *James-Webb* et *Plato*, la chasse aux exoplanètes a un programme bien chargé. Mais cette quête ne s'arrêtera probablement pas là. Et tous les astronomes en herbe qui ont été époustouffés par l'éclipse du Soleil en 2017 auront encore de nombreuses éclipses planétaires à étudier quand ils seront devenus des chercheurs. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. G. Bouma et al., **Planet detection simulations for several possible TESS extended missions**, en ligne, 2017 (arXiv:1705.08891).

G. R. Ricker et al., **Transiting exoplanet survey satellite**, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments and Systems*, vol. 1(1), article 014003, 2015.

R. Heller, **Des exoplanètes plus accueillantes que la Terre**, *Pour la Science*, n° 449, mars 2015.

K. Heng, **Le climat des exoplanètes**, *Pour la Science*, n° 421, novembre 2012.

ÉRIC BAPTESTE

est directeur de recherche
au CNRS à l'institut
de biologie Paris-Seine.
Il codirige l'équipe Adaptation,
intégration, réticulation
et évolution à Sorbonne
Université, à Paris.



Évolution: des réseaux plutôt que des arbres



Pour en savoir plus :
É. Baptiste
Tous entrelacés !
Belin, 2018

Molécules, cellules, organismes, sociétés, aucun élément biologique n'agit seul, tous interagissent. L'affirmation paraît banale, mais, développée, elle invite à élargir notre vision de l'évolution. Telle est la thèse qu'Éric Baptiste défend dans son dernier livre, *Tous entrelacés !*.

Le constat principal de votre livre est qu'à toutes les échelles, le monde vivant est complexe et interconnecté – «entrelacé». Ses composants interagissent tous, qu'il s'agisse de protéines associées, d'organismes en symbiose, de transfert de gènes, de cycles géochimiques... Quelles conséquences en tirez-vous?

La première question que pose ce constat est: pourquoi tout est collectif? Sans doute parce qu'il ne peut en être autrement, parce que rien dans le monde biologique n'est vraiment capable de se reproduire ni de persister seul. Et si tout est collectif, alors comment les composants entrent-ils en interaction? Comment s'entègrent-ils, s'appuient-ils les uns sur les autres?

Je crois que l'objet de la biologie est de comprendre les interactions par lesquelles se déploient les processus dans le temps. Il existe plusieurs définitions d'un processus, mais on peut retenir qu'il modifie un état initial et arrive à un état transformé. Des patrons d'interactions décrivent donc des processus. Certains processus sont remarquables, car ils se répètent. Par exemple, presque toutes les cellules emploient une machine moléculaire, l'ATP synthase, pour produire de l'énergie. Elle utilise l'énergie potentielle engendrée par un gradient de concentration de protons pour transformer une molécule (ADP) en une autre (ATP) que la cellule exploite. Mais avant d'utiliser ce gradient, les cellules dépensent de l'énergie pour le créer en faisant sortir les protons à l'extérieur de leur membrane. Certains y voient les vestiges d'un processus passé, à une époque où les cheminées hydrothermales des grands fonds sous-marins produisaient un gradient naturel de protons, autour duquel les premières structures biologiques se seraient développées. Cette organisation autour de tels gradients serait devenue un élément structural de l'évolution.

Les processus de la biologie prolongeraient les processus géologiques. Le défi à mon sens est donc d'étendre la théorie de l'évolution pour en faire non pas la science de l'évolution des espèces, mais celle de l'évolution des processus.

Comment analyser ces entités collectives et suivre leurs modifications?

À toutes les échelles de la biologie, on peut modéliser les processus par des réseaux: entre les gènes, les protéines, les gènes et les protéines, les cellules, etc. Nous disposons d'un concept, le réseau, d'une méthode, la théorie des graphes, et des objets décrits par la biologie. À partir de ces éléments, nous pouvons construire des réseaux, les analyser, les comparer. Dans un premier temps, on identifie les composants essentiels au processus étudié, qui constituent les nœuds du réseau. Puis on caractérise les relations entre les éléments – les arêtes du réseau. Ces liens sont de diverses natures, d'ordre chimique, électrique, métabolique, une relation de parenté, etc.

On code chaque type d'interaction par une représentation spécifique dans le réseau et on détermine le moment où chacune intervient.

Auparavant, pour étudier l'évolution, on dessinait des arbres de lignées. Aujourd'hui, les réseaux les englobent dans un ensemble plus large, car les arbres montrent des parentés, alors que les réseaux représentent des organisations et des fonctionnements. On trouve d'ailleurs des réseaux dans chaque ramification de l'arbre du vivant puisqu'il en existe dans chaque individu: réseaux métaboliques, de régulation, de coexpression (expression simultanée de gènes), etc. Le défi maintenant est de développer une science des réseaux qui permettra de penser les processus et les interactions. Elle se heurte à des défis méthodologiques considérables, notamment dans la comparaison des graphes entre eux.

Si le collectif est au centre de la biologie, pourquoi a-t-on si longtemps négligé les formes d'association du vivant comme l'endosymbiose, suggérée dès 1890 pour les mitochondries?

Les mitochondries – les centrales énergétiques des cellules eucaryotes – sont les descendantes captives d'anciennes bactéries. Mais il a fallu presque un siècle pour que cette idée s'impose. Une raison est que dans une approche réductionniste, on étudie les objets partie par partie. Dans une culture pure de bactéries, on ne peut observer ni les interactions ni les constructions collaboratives, ni même les soupçonner. Mais il existe une difficulté pratique à analyser un objet complexe pour ce qu'il est: comment cultiver une diversité de partenaires en laboratoire? Par ailleurs, nous avons l'habitude de penser en termes de lignées divergentes et séparées. Le modèle central de l'évolution est celui de l'arbre sur lequel s'organisent les lignées, et les propriétés des organismes qui sont le fruit d'associations n'ont pas leur place dans cette représentation.

Votre conception de l'évolution va-t-elle à l'encontre de l'existence d'un objet unique sur lequel l'évolution s'appliquerait, comme le gène pour le biologiste britannique Richard Dawkins?

Je suis un évolutionniste, je m'intéresse à ce qui se transforme, je n'ai pas un objet d'étude privilégié. Molécules, organismes, langages... tous ces objets susceptibles de se modifier m'intéressent, mais il n'existe pas un modèle unique qui s'applique à l'ensemble. Si l'on considère une définition de l'espèce fondée sur l'interfécondité, le mécanisme qui cause la variabilité s'appuie sur la méiose. Il n'est donc pas applicable à l'évolution des organismes qui se reproduisent par mitoses, comme les bactéries.

De plus, les processus responsables de l'évolution changent. Ceux observés chez les animaux ne sont sans doute pas les plus ➤