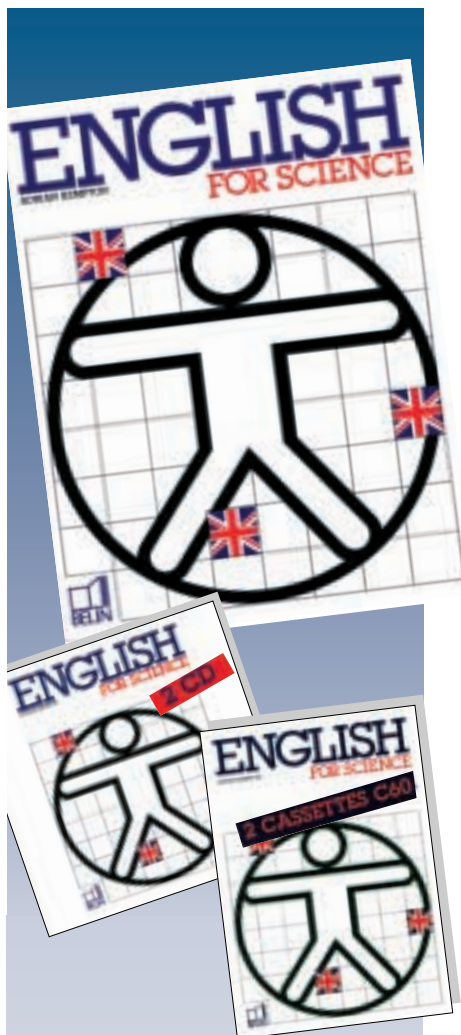




ENGLISH FOR SCIENCE

Enrichissez et améliorez
votre vocabulaire,
maîtrisez les expressions
et la prononciation
de l'anglais scientifique.

Le livre : 256 pages – 135 F **Code 1647**

Le corrigé : 112 pages – 50 F **Code 1648**

2 cassettes : 250 F **Code 0680**

Le CD : 250 F **Code 0699**



Bon de commande en p. 98

damment du degré d'enroulement de la molécule, l'ADN sous-enroulé s'allonge brusquement. Cette transition reflète sans doute la formation de régions d'ADN dénaturé (ce que nous nommons des bulles) dans la structure double hélice standard, dite forme B, en raison d'une dissociation des paires de bases. En absorbant le déficit d'enroulement, ces bulles permettent la relaxation torsionnelle du reste de la molécule. À des forces supérieures (au-delà de un piconewton), l'extension de la molécule est similaire à celle d'un ADN relaxé.

On observe un comportement qualitativement similaire pour une molécule d'ADN surenroulée, mais à des forces d'intensité supérieure. La molécule d'ADN étant chirale (enroulée comme une vis), on s'attend bien à des différences selon qu'on l'enroule dans le sens de l'hélice (surenroulement) ou dans le sens inverse. De fait, à partir d'une force critique de trois piconewtons, environ, la molécule surenroulée s'allonge brusquement. Comme précédemment, cette transition révèle la présence de zones qui absorbent l'excès de surenroulement, probablement par la formation d'une forme plus enroulée que la forme B naturelle ou par dénaturation partielle de la molécule (formation de bulles).

Ces expériences indiquent qu'une molécule d'ADN enroulée et soumise à des tractions relativement faibles peut modifier localement sa structure afin de réduire ses contraintes de torsion. Elles sont en très bon accord avec une théorie récente due à J. Marko et E. Siggia, de l'Université Cornell. Celle-ci décrit l'ADN comme un fil, caractérisé par des modules de flexion et de torsion, en équilibre thermodynamique avec la solution environnante. Les brusques transitions observées dans nos expériences sont bien décrites par les différences d'énergie entre la forme B de l'ADN et ses autres structures.

Autrement dit, nous disposons d'un système expérimental dont la compréhension théorique nous permettra d'aborder des phénomènes plus complexes, telle l'interaction de l'ADN et de certaines protéines, notamment les enzymes topo-isomérases qui assurent la relaxation des contraintes de torsion dans l'ADN, lors de la transcription de la molécule en ARN et de sa réplication.

L'ensemble des résultats présentés ici montrent le rôle considérable que peuvent jouer les propriétés élastiques de l'ADN. Dans les prochaines années, on s'efforcera de comprendre le rôle physique de la superhélicité dans les phénomènes cellulaires aussi fondamentaux que l'initiation de la transcription ou le démarrage de la réplication, et aussi le rôle de l'extensibilité de la molécule dans les phénomènes de reconnaissances mutuelles entre acides nucléiques, par leurs séquences.

Un des aspects fondamentaux de la mécanique cellulaire réside dans l'interaction des protéines et de l'ADN. Les biologistes disposent aujourd'hui de tous les outils permettant de connaître l'agencement chimique des molécules, mais peu de moyens sont à leur disposition pour aborder la dynamique de ces protéines. Quelques belles expériences ont été réalisées récemment : notamment Hong Yin et ses collègues de l'Université Brandeis ont utilisé des pinces optiques pour mesurer la force que peut développer la polymérase en se déplaçant sur l'ADN. Gageons que l'apport des techniques physiques fines à ce domaine de la biologie jouera un rôle important dans l'avenir.

Aaron BENSIMON est à l'Institut Pasteur. Jean-François ALLEMAND, David BENSIMON, François CARON, Vincent CROQUETTE et Terence STRICK sont à l'École Normale Supérieure de Paris. Didier CHATENAY est à l'Institut Curie, à Paris. Jean-Louis VIOVY est à l'ESPCI et à l'Institut Curie. Christophe HELLER est à l'ESPCI. Richard LAVERY et Anne LEBRUN sont à l'Institut de Biologie Physico-Chimique, à Paris.

D. BENSIMON, A.-J. SIMON, V. CROQUETTE et A. BENSIMON, *Stretching DNA with a receding meniscus : Experiments and models*, in *Phys. Rev. Lett.*, vol. 74, pp. 4754-4757, 1995.

C. BUSTAMANTE, J. F. MARKO, E. D. SIGGIA et S. SMITH, *Entropic elasticity of λ -phage DNA*, in *Science*, vol. 265, pp. 1599-1600, 1994.

Ph. CLUZEL, A. LEBRUN, C. HELLER, R. LAVERY, J.-L. VIOVY, D. CHATENAY et F. CARON, *DNA : An extensible Molecule*, in *Science*, vol. 271, 792-794, 1996.

T. STRICK, J. F. ALLEMAND, D. BENSIMON, A. BENSIMON, V. CROQUETTE, *The Elasticity of a single Supercoiled DNA Molecule*, in *Science*, vol. 271, p. 1835, mars 1996.

À la recherche de la vie

ROGER ANGEL • NEVILLE WOOLF

Nous ne connaissons la vie que sur la Terre, mais un nouveau télescope sera lancé dans l'espace pour chercher des signes de vie sur d'autres planètes.

Sommes-nous seuls dans l'Univers? Au début du XVII^e siècle, quand Galilée tourna la lunette qu'il avait inventée vers les cieux, il vit des montagnes sur la Lune et observa que les autres planètes étaient sphériques, comme la Terre. Des peuples habitaient-ils ces mondes extraterrestres? Environ 60 ans plus tard, d'autres contemplateurs du ciel observèrent des calottes glaciaires aux pôles de Mars, ainsi que des variations de couleur de la surface de la planète, qu'ils attribuèrent à des changements saisonniers de végétation (nous savons aujourd'hui qu'elles résultent de tempêtes de poussières). Plus récemment, des caméras embarquées dans des sondes spatiales ont pris des photographies rapprochées de Mars, montrant des canaux creusés par des fleuves disparus depuis longtemps. On a pensé que la vie s'était développée sur Mars, dans un lointain passé, mais les échantillons de sol martien que les sondes *Viking* ont prélevés dans les années 1970 n'ont pas retrouvé de vestiges d'une telle vie. Ailleurs que sur la Terre, la vie terrestre serait impossible dans notre Système solaire.

Et ailleurs qu'autour du Soleil? Après des années d'observations, les astronomes ont détecté des planètes en orbite autour d'étoiles lointaines, sem-

blables au Soleil (voir l'encadré de la page 87). Ces planètes abritent-elles des organismes vivants?

Aujourd'hui le télescope spatial *Hubble*, en orbite autour de la Terre, distingue à peine les montagnes de Mars. Pour obtenir des images suffisamment détaillées du relief de planètes autour d'autres étoiles que le Soleil, il faudrait un réseau de télescopes spatiaux de la taille de l'Europe tout entière. En outre, Carl Sagan, de l'Université Cornell, a calculé que seules des images de très haute résolution pourraient révéler la présence de vie sur la Terre. Des images détaillées pourraient être obtenues par une sonde inhabitée, lancée vers d'autres systèmes planétaires, mais les distances entre la Terre et toute planète extrasolaire sont excessives : on n'obtiendrait les images que dans plusieurs décennies.

Les photographies ne sont cependant pas le meilleur moyen d'étudier la vie extraterrestre ; la spectroscopie, notamment, donne des informations plus globales. Cette méthode consiste à analyser la lumière provenant d'un objet afin de déterminer des caractéristiques telles que la température du corps, la pression de son atmosphère et sa composition chimique.

Les signes de vie les plus faciles à reconnaître seraient des signaux radio

1. UN TÉLESCOPE SPATIAL d'une longueur de 50 à 75 mètres pourrait rechercher la vie sur d'autres planètes que la Terre. L'instrument pourrait être assemblé près de la future station spatiale internationale (en bas à gauche). Par la suite, le dispositif serait placé sur une orbite héliocentrique comparable à celle de Jupiter. Une telle mission constitue l'un des programmes clés de la NASA pour l'étude de systèmes planétaires voisins.





émis par des extraterrestres pour communiquer à travers l'espace interstellaire : facilement discernables des signaux associés aux phénomènes naturels, ils nous permettraient de localiser une vie intelligente ailleurs que sur la Terre. Cependant les surveillances de systèmes planétaires lointains n'ont révélé aucun signal, ce qui indique que les extraterrestres qui maîtrisent les radiocommunications interstellaires ne sont pas légion.

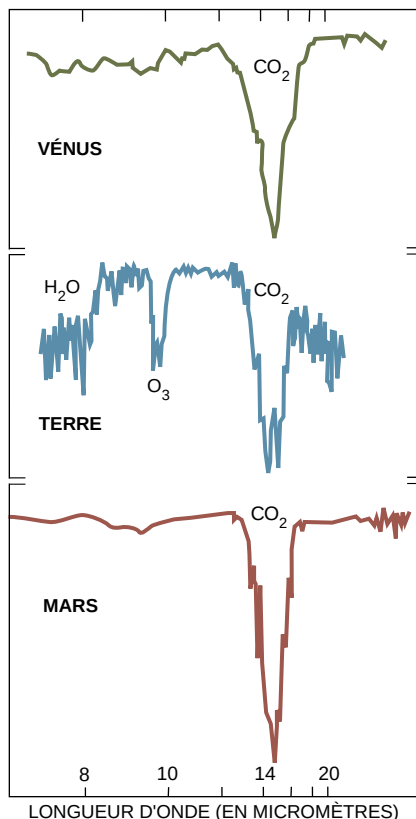
Des planètes abritent-elles alors des formes de vie moins évoluées ? Afin de chercher les traces d'organismes très simples, nous avons proposé un nouveau type de télescope.

Sur notre planète, les formes de vie les plus simples ont modifié l'environnement d'une façon qui serait perceptible par un observateur lointain : au cours du milliard d'années qui a suivi la formation de la Terre, dès la fin du bombardement intensif par les astéroïdes, des organismes primitifs comme les bactéries et les algues avaient recouvert la quasi-totalité du Globe. Ces organismes constituèrent la seule vie terrestre pendant les deux milliards d'années suivants ; par conséquent, si la vie existe sur d'autres planètes, elle pourrait très bien se trouver sous cette forme.

Les algues et l'atmosphère

Les algues bleu-vert terrestres ne maîtrisent pas les communications radio, mais elles modifient la chimie du Globe : en proliférant, elles ont progressivement enrichi l'atmosphère en oxygène. Plus généralement, les organismes les plus élémentaires consomment de l'eau, de l'azote et du dioxyde de carbone, et libèrent de l'oxygène dans l'atmosphère. Or l'oxygène est un gaz chimiquement réactif, dont la concentration chuterait sans un apport continu par les algues et, plus tard dans l'évolution terrestre, par les plantes. Aussi l'abondance d'oxygène dans l'atmosphère d'une planète est un bon indicateur de l'existence d'une forme de vie carbonée.

L'oxygène présent sur une planète modifie le rayonnement de cette dernière. Ainsi une partie de la lumière solaire atteignant la surface terrestre est réfléchie, vers l'espace, à travers l'atmosphère. L'oxygène atmosphérique absorbe une partie de ce rayonnement, de sorte qu'un observateur extraterrestre étudiant par spectro-



2. LA SIGNATURE INFRAROUGE DE LA VIE ne s'observe que sur la Terre : si Vénus, la Terre et Mars possèdent tous trois une atmosphère riche en dioxyde de carbone (CO₂), seule la Terre contient en abondance de l'eau (H₂O) et de l'ozone (O₃), une forme d'oxygène que l'on trouve habituellement dans la haute atmosphère. L'eau est indispensable au maintien d'une vie carbonée ; l'oxygène est un signe de sa présence. Le rayonnement infrarouge émanant de planètes membres de systèmes planétaires lointains pourrait dévoiler d'autres mondes semblables au nôtre.

scopie la lumière réfléchie par la Terre détecterait la présence de l'oxygène.

En 1980, à l'Université d'État de Stony Brook, Toby Owen proposa de rechercher la vie extraterrestre en analysant la lumière rouge réfléchie par les planètes. Puis, en 1993, C. Sagan utilisa le vaisseau spatial *Galileo* pour enregistrer le spectre distinctif de l'oxygène dans la région rouge de la lumière réfléchie par la Terre. Ce signe de vie existe depuis plus de 500 millions d'années. Est-il parfaitement convaincant ?

Des planètes sans vie ne pourraient-elles néanmoins contenir une source non biologique d'oxygène ? Et d'autres formes de vie pourraient-elles ne pas produire d'oxygène ? Des arguments convaincants nous conduisent à supposer que la vie sur d'autres planètes serait fondée sur une chimie semblable à la nôtre, car le carbone se prête remarquablement bien à la construction de

la vie ; il est abondant dans l'Univers, et aucun autre élément connu ne peut former la myriade de molécules stables qui sont nécessaires à la vie que nous connaissons.

À la recherche d'une autre Terre

La présence d'eau sur notre planète a manifestement favorisé le développement de la vie. L'eau est un solvant où les réactions biochimiques se déroulent et elle sert de source d'hydrogène pour la matière vivante. Aussi les planètes comparables à la Terre, en taille et en distance par rapport à leur étoile, sont les pouponnières de vie carbonée dans les autres systèmes planétaires, parce que ces mondes pourraient contenir de l'eau liquide. Trop proches de l'étoile, les planètes sont glacées, et trop éloignées, elles ne contiennent que de la vapeur d'eau.

On peut facilement estimer « l'orbite d'or », c'est-à-dire la distance à laquelle la vie peut se développer comme elle l'a fait sur la Terre. Pour une grosse étoile chaude, 25 fois plus brillante que notre Soleil, une planète rocheuse comme la Terre occuperait à peu près l'orbite de Jupiter. Pour une petite étoile froide, dix fois moins brillante que le Soleil, la bonne orbite serait celle de Mercure.

Toutefois la distance de la planète à son étoile n'est pas une condition suffisante pour l'existence de la vie. L'attraction gravitationnelle de la planète doit, en outre, retenir des océans et une atmosphère. Si la distance à l'étoile était le seul facteur important, la Lune posséderait de l'eau liquide. Or la gravité dépend de la densité et de la taille du corps : comme la Lune est plus petite et moins dense que la Terre, son attraction gravitationnelle est bien inférieure : toute pellicule d'eau ou toute atmosphère qui s'y constituerait s'échapperait rapidement dans l'espace.

Inversement, les grosses planètes attirent les gaz de l'espace. On suppose que Jupiter a crû ainsi, accumulant une énorme enveloppe d'hydrogène et d'hélium. De ce fait, la vie terrestre ne semble pas pouvoir exister sur des planètes gazeuses massives comme Jupiter.

Si nous connaissons assez bien le type de planètes pouvant abriter la vie, nous n'avons encore découvert que peu de planètes autour d'étoiles lointaines, car les meilleures méthodes de détection de ces corps célestes sont fondées

Nouvelles planètes autour d'autres soleils

Encore récemment, les astronomes ne disposaient d'aucune preuve directe de l'existence de planètes autour d'autres étoiles que le Soleil, mais en octobre 1995, Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, ont annoncé la détection d'une planète massive autour de l'étoile de type solaire 51 Pegasi. Geoffrey Marcy et Paul Butler, de l'Université de San Francisco, confirmèrent la découverte et, six mois plus tard, découvrirent trois autres corps autour d'étoiles similaires. Plus récemment, George Gatewood a découvert par astrométrie une planète analogue à Jupiter à 2,5 unités astronomiques de l'étoile Lalande 21185.

Personne n'a encore vu ces mondes extraterrestres ; tous trois furent identifiés indirectement, par la mesure de leur influence sur le mouvement de leur étoile. Quand un objet tourne autour d'une étoile, son attraction gravitationnelle fait osciller l'étoile. Ce mouvement crée un déplacement périodique, nommé décalage Doppler, du spectre de l'étoile observé de la Terre. Du décalage, on déduit la dimension et la forme de l'orbite du compagnon ; de l'amplitude du décalage, on déduit la masse minimale du compagnon. Aucune autre particularité (température ou composition, par exemple) n'est révélée par la technique Doppler.

Les planètes nouvellement découvertes ne ressemblent à rien de connu jusqu'ici. Celle qui accompagne 51 Pegasi est la plus étrange : deux fois moins massive que Jupiter, elle n'est éloignée de son étoile que de sept millions de kilomètres, soit moins d'un huitième de la distance Mercure-Soleil. À cette petite distance, la température superficielle de la planète devrait atteindre 1 300 degrés. La période orbitale est égale à 4,2 jours.

L'une des planètes découvertes par G. Marcy et P. Butler tourne autour de l'étoile 47 Ursae Majoris, et cet objet présente des caractéristiques moins extrêmes. Elle parcourt en trois ans une orbite circulaire à environ 300 millions de kilomètres de son étoile (correspondant à une orbite entre celles de Mars et de Jupiter), et sa masse est au minimum 2,3 fois celle de Jupiter ; dans notre Système solaire, elle ne semblerait pas particulièrement étrange.

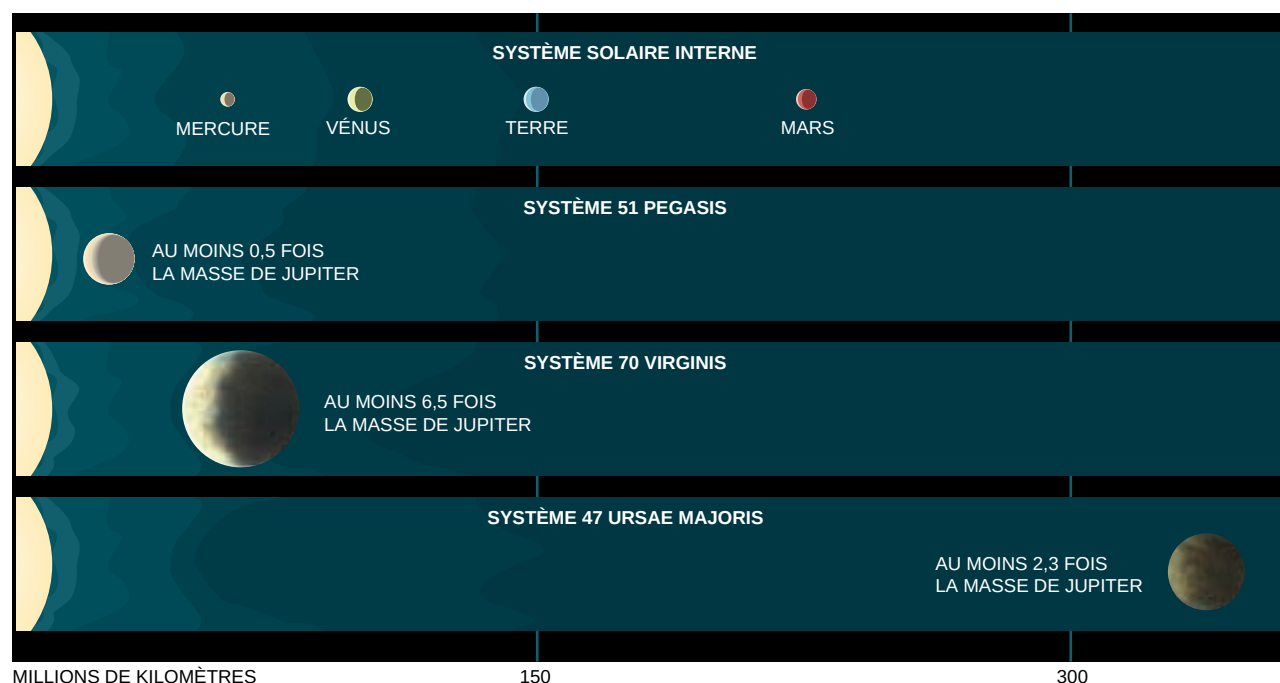
Le troisième objet, également identifié par G. Marcy et P. Butler, tourne autour de l'étoile 70 Virginis. Cette « planète » diffère sensiblement des deux autres. Elle est la plus massive du groupe, avec une

masse plus de 6,5 fois supérieure à celle de Jupiter, et son orbite, parcourue en 117 jours, est très elliptique. G. Marcy prétend qu'elle occupe la « zone d'or » : sa distance permettrait l'existence d'eau à l'état liquide. Malgré cette hypothèse optimiste, la planète possède sans doute une épaisse atmosphère qui bloque l'apparition de la vie. De surcroît, sa grande masse et son orbite elliptique font penser qu'il s'agit d'une naine brune, un objet gazeux qui se forme un peu comme une étoile mais ne possède pas suffisamment de masse pour briller.

Pourquoi les astronomes ne découvrent-ils que des objets massifs sur des orbites de périodes relativement courtes ? Parce que ce sont les plus faciles à détecter par la technique Doppler. Observer une planète sur une orbite lente, comme celle de Jupiter, nécessiterait au moins dix ans d'observations. Aussi cherche-t-on d'autres planètes à l'aide du phénomène de lentille gravitationnelle, par lequel la gravité d'une étoile amplifie temporairement la lumière d'une étoile plus lointaine, située dans la même direction. Si l'étoile qui fait office de lentille cosmique possède des planètes, ces dernières pourraient modifier la courbe de lumière (la variation de l'éclat au cours du temps) observée. De nombreuses étoiles pouvant être observées en même temps, cette approche pourrait fournir une statistique de l'abondance des planètes. Malheureusement, cette méthode ne peut servir à détecter des planètes autour d'étoiles proches.

Une autre possibilité consiste à rechercher directement le rayonnement réfléchi par de grosses planètes autour d'autres étoiles. Normalement l'atmosphère terrestre rendrait irrémédiablement floue l'image de l'étoile et de la planète. L'optique adaptative, une technique qui élimine les perturbations atmosphériques, peut pallier cette difficulté. Théoriquement un système d'optique adaptative conçu par Roger Angel et amélioré par David Sandler et Steve Stahl, de la Société *Thermotrex*, pourrait prendre une image d'une grosse planète à la distance de Jupiter en une seule nuit d'observation.

Les planètes nouvellement découvertes ne représentent que le sommet de l'iceberg. Des observations ininterrompues, une analyse minutieuse des données et des techniques perfectionnées, telle l'interférométrie spatiale, multiplieront bientôt le nombre de découvertes, nous procurant une meilleure perception de la réelle variété de ces mondes.



sur l'observation de leur étoile : les astronomes recherchent les variations d'éclat ou d'orbite qui ne peuvent s'expliquer que par la présence de planètes. Malheureusement ces observations indirectes des planètes nous renseignent peu sur leurs caractéristiques. Toutes les techniques indirectes ne révèlent que la masse et la position des corps célestes ; prouver qu'ils abritent des habitants demeure impossible.

Voir dans l'infrarouge

Une autre technique donnerait-elle des indications sur la nature des composés présents sur les planètes ? Nous avons vu que le rayonnement d'une planète peut révéler la présence de certaines molécules vitales, telle la molécule d'oxygène. Mais repérer les faibles signaux de l'oxygène dans la lumière réfléchie par une petite planète serait extrêmement difficile, même pour un système planétaire qui serait proche du Système solaire.

Comme les étoiles sont des milliards de fois plus brillantes que les planètes qui peuvent les accompagner, la détection d'une planète par obser-

vation directe serait aussi difficile que la recherche d'un ver luisant près d'un projecteur, à des milliers de kilomètres de nous. Et si nous pouvions recueillir spécifiquement la lumière réfléchie par une planète, la signature de l'oxygène dans son spectre visible serait faible et remarquablement difficile à isoler.

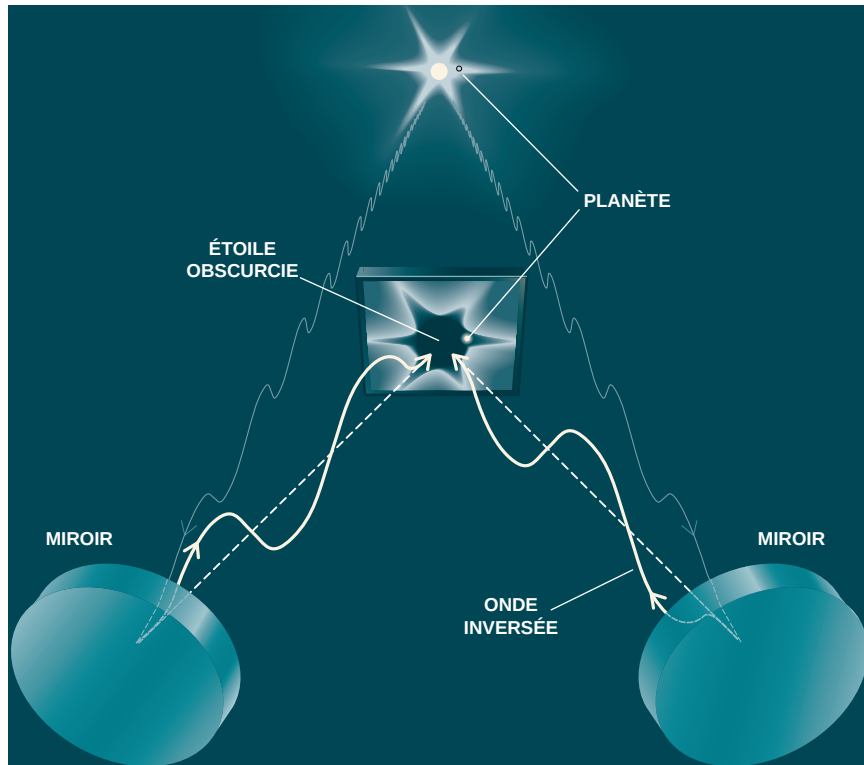
Avec Andrew Cheng, de l'Université de Hong Kong, nous avons cherché à résoudre ce problème et, en 1986, nous avons proposé de rechercher une vie extraterrestre par le rayonnement infrarouge émis par les planètes. Ce type de rayonnement, qui correspond à la chaleur dégagée par la planète, a une longueur d'onde 10 à 20 fois supérieure à celle de la lumière visible. Les planètes en émettent environ 40 fois plus qu'aux longueurs d'onde plus courtes, de sorte que l'étoile voisine n'éclipse plus la planète «que» d'un facteur dix millions : c'est 1 000 fois mieux qu'avec la lumière rouge.

En outre, le spectre infrarouge contiendrait la signature de trois composés qui apparaîtraient ensemble sur des planètes habitées : l'ozone (une forme d'oxygène habituellement loca-

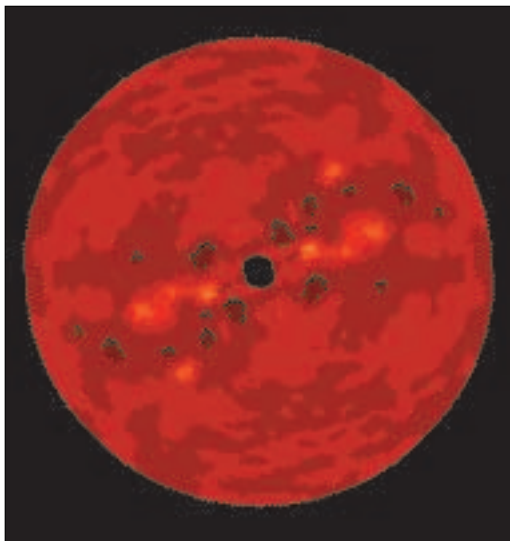
lisée dans la haute atmosphère), le dioxyde de carbone et l'eau. De nouveau, notre Système solaire a servi de banc d'essai : une étude de l'émission infrarouge des planètes de notre voisinage a montré que seule la Terre présente la signature infrarouge de la vie (voir la figure 2). Bien que la Terre, Mars et Vénus possèdent toutes trois des atmosphères contenant du dioxyde de carbone, seule la Terre porte la trace d'eau et d'ozone en abondance.

De quelle sorte de télescope avons-nous besoin pour localiser des planètes de type terrestre et analyser leurs émissions infrarouges ? Certains des télescopes qui sont aujourd'hui en fonctionnement, sur la Terre, peuvent détecter l'intense rayonnement infrarouge émanant des étoiles, mais la chaleur émise par notre atmosphère et par le télescope lui-même noierait complètement tout signal d'une planète. Même l'Antarctique n'est pas assez froid pour que nous prenions une image aussi faible. Et même si l'on refroidissait le télescope à une température inférieure à -225 degrés Celsius, la lumière s'imprégnerait des caractéristiques de l'ozone, du dioxyde de carbone et de l'eau en traversant l'atmosphère terrestre. Nous devons indéniablement transporter le télescope dans l'espace.

D'autre part, pour distinguer le rayonnement de la planète de celui de son étoile, un télescope classique devrait être beaucoup plus grand que n'importe quel instrument au sol ou en orbite construit à ce jour. La lumière ne pouvant être focalisée en un point plus petit que sa longueur d'onde, la lumière d'un point distant dans le ciel peut, au mieux, être focalisée en un centre diffus entouré d'un faible halo ; même un miroir parfait ne peut former d'images parfaites. Or si le halo circumstellaire s'étend au-delà de l'orbite de la planète, on ne discernera pas cette dernière. En accroissant la taille du miroir et celle de l'image résultante, nous pouvons en principe mettre au point autant que nous le désirons l'image de l'étoile, mais la taille de l'équipement nécessaire pour atteindre une telle résolution rend le projet irréalisable. On sait calculer la performance des télescopes et prévoir la qualité des images qu'ils formeront. Par exemple, pour observer le spectre infrarouge d'une planète terrestre tournant autour d'une étoile distante de 30 années-lumière, on devrait employer un énorme télescope spatial de près de 60 mètres de diamètre !



3. LA LUMIÈRE D'UNE PLANÈTE n'est perceptible que si l'on élimine la lumière de l'étoile autour de laquelle tourne la planète. Deux télescopes braqués sur la même étoile (en haut) peuvent éliminer la majeure partie de sa lumière si un télescope inverse la lumière, transformant les crêtes en creux, et vice versa (à droite). Lorsque la lumière inversée est combinée avec la lumière stellaire donnée par le second télescope (à gauche), les ondes lumineuses interfèrent et l'image de l'étoile disparaît (au centre).



4. L'IMAGE DE PLANÈTES LOINTAINES, obtenue à partir de signaux interférométriques simulés, montre ce que les astronomes espèrent voir avec un télescope spatial. Cette étude présente un système distant d'environ 30 années-lumière, composé de quatre planètes à peu près aussi lumineuses que la Terre (chaque planète apparaît deux fois, une image de part et d'autre de l'étoile).

Réinventer le télescope

Les télescopes classiques étant insuffisants, quel nouvel instrument peut-on utiliser ? Il y a 23 ans, à l'Université de Stanford, Ronald Bracewell montra comment adapter deux petits télescopes pour rechercher de grosses planètes froides semblables à Jupiter. L'instrument qu'il proposait se composait de deux télescopes de un mètre de diamètre, séparés de 20 mètres. Chaque télescope aurait fourni une image floue qui n'aurait jamais permis à R. Bracewell de résoudre les images faibles des planètes, mais il en imagina une astucieuse combinaison.

Il proposa de pointer les deux télescopes sur la même étoile et d'inverser les ondes lumineuses de l'un des télescopes, transformant les crêtes en creux, et vice versa. La première image étant alors l'inverse de la seconde, leur recouvrement précis annulerait la lumière de l'étoile, halo compris (l'énergie étant conservée, la lumière ne disparaîtrait pas, mais apparaîtrait dans une autre partie de l'instrument). On nomme interféromètre ce type de dispositif, qui révèle des détails de la source lumineuse à partir d'une interférence des ondes lumineuses.

L'interféromètre de R. Bracewell n'obscurcit une étoile que si celle-ci est perpendiculaire à la ligne joignant les centres des deux télescopes : c'est seulement dans cette configuration que les

deux télescopes reçoivent exactement le même train d'ondes lumineuses de l'étoile. Aussi R. Bracewell avait proposé de balayer le ciel avec l'instrument et de repérer le moment où l'étoile observée s'éteint.

À ce moment, une planète accompagnant l'étoile ne sera pas alignée avec le dispositif, de sorte que les deux télescopes enregistreront son rayonnement : si de la lumière traverse l'interféromètre alors que l'image de l'étoile est éteinte, nous saurons qu'une source de rayonnement infrarouge – peut-être une planète – existe au voisinage de l'étoile. Nous pourrions analyser ce signal en tournant l'interféromètre autour de l'axe joignant l'instrument et l'étoile ; l'intensité de l'image variera avec la rotation du dispositif, et les planètes seront repérables à une variation reconnaissable de la

luminosité (voir la figure 5).

Après avoir conçu cet interféromètre, R. Bracewell comprit que l'obstacle principal à la localisation d'une planète comme Jupiter ne venait pas de la lumière beaucoup plus intense de l'étoile voisine, mais de la chaleur rayonnée par les poussières de notre Système solaire. En raison de cette « lumière zodiacale », le faible signal d'une planète lointaine serait quasi imperceptible sur ce fond éclatant. Une planète n'apparaîtrait qu'au prix du moyennage des données sur au moins un mois. De surcroît, l'interféromètre initial de R. Bracewell n'élimine pas parfaitement la lumière stellaire, de sorte que de la lumière stellaire s'insinue le long des bords et gêne l'observation des petites planètes faibles comme la Terre.

Pour pallier ces inconvénients, de nombreux astronomes ont imaginé de nouvelles méthodes. L'un de nous (R. Angel) proposa, en 1990, d'utiliser quatre miroirs en réseau, afin de mieux supprimer la lumière stellaire. Toutefois l'élimination de la lumière zodiacale nécessitait des miroirs de huit mètres de diamètre. Alain Léger et ses collègues français M. Mariotti, J.-C. Puget, D. Rouan et J. Schneider ont proposé la première solution pratique à cette complication : ils ont imaginé d'installer le dispositif sur une orbite héliocentrique, à peu près à la même distance que Jupiter,

L'UNIVERS DES SCIENCES



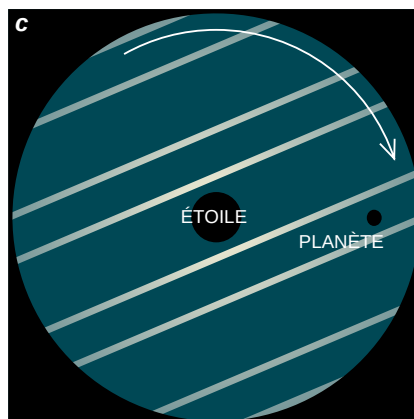
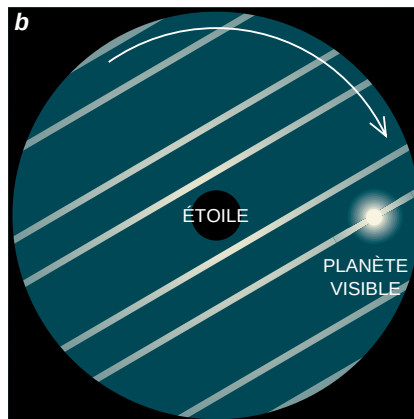
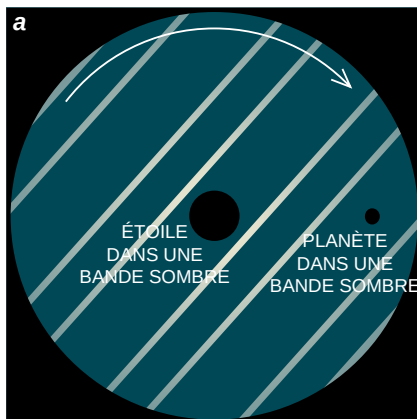
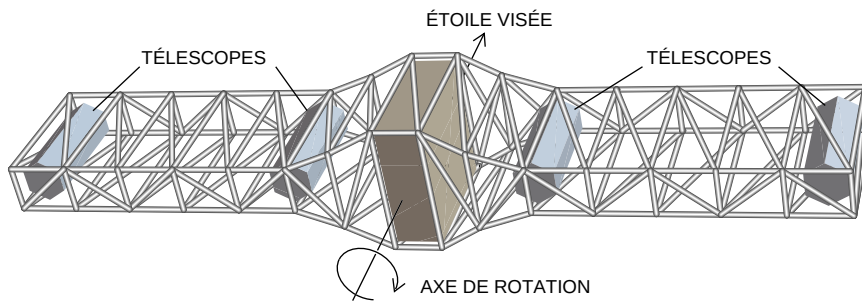
LES HORLOGES DE LA VIE

Des horloges internes déterminent la durée de notre sommeil et commandent plusieurs de nos fonctions physiologiques. Quand nous subissons un décalage horaire, ces horloges se recalent sur les variations lumineuses associées aux levers et aux couchers du soleil. L'un des meilleurs spécialistes des rythmes biologiques, Arthur Winfree, nous révèle le monde mathématique simple de ces resynchronisations.

192 pages – 190 F
Code 1860

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98



5. UN INTERFÉROMÈTRE ROTATIF pourrait révéler l'existence d'une planète autour d'une étoile lointaine. Les quatre télescopes produiraient une vue du ciel partiellement obscurcie par de nombreuses bandes ; l'étoile à masquer serait dissimulée par une bande. Lors d'une rotation de l'interféromètre autour d'un axe joignant le centre du dispositif à l'étoile, les bandes sombres tourneraient également. Une planète voisine serait alternativement masquée, puis découverte (a-c). L'analyse des clignotements permettrait de déterminer la distance séparant la planète de son étoile.

de sorte que le télescope serait naturellement refroidi et que la lumière zodiacale serait minimisée. En raison de la diminution de la lumière de fond, l'interféromètre orbital pourrait être réduit : quatre télescopes de un mètre de diamètre chacun constitueraient un instrument sensible, avec toutefois un inconvénient : il éliminerait si efficacement la lumière stellaire qu'il masquerait parfois une planète proche.

Cette idée a fait l'objet, sous le nom de *Mission Darwin*, d'une proposition de l'Agence spatiale européenne. Elle a été retenue comme l'une des trois pierres angulaires possibles de l'Agence pour les années 2015. En attendant, le CNES décidera peut-être d'un projet plus modeste, nommé *Corot*, pouvant également détecter, par occultation, des planètes de la taille de la Terre sur des orbites analogues à celle de Mercure, ou plus serrées encore.

Enfin, le 7 mai 1996, le CNRS a créé une action spécifique «Planètes extrasolaires».

Puis, en 1995, la NASA lança un appel d'offres pour l'exploration d'autres systèmes planétaires et sélectionna finalement trois équipes afin de comparer différentes techniques de détection. Nous avons constitué une équipe avec R. Bracewell, A. Léger, Jean-Marie Mariotti et une vingtaine d'autres scientifiques et ingénieurs. Nous avons notamment conçu un interféromètre comportant deux paires de miroirs disposés en ligne droite. Chaque paire de miroirs obscurcira l'image principale de l'étoile, et chaque paire éliminera en outre la lumière parasite de l'autre paire.

Cet interféromètre pourrait atteindre 50 à 75 mètres de longueur.

Avec une telle configuration, les signaux de planètes sont complexes et caractéristiques, et une méthode d'analyse appropriée permettra d'utiliser les données de l'interféromètre pour reconstruire l'image d'un système solaire lointain (voir la figure 4). Cet interféromètre orbital pourrait observer chaque jour une étoile différente, revenant parfois à des systèmes intéressants pour des observations plus approfondies.

S'il était pointé sur notre Système solaire à partir d'une étoile voisine, l'interféromètre repèrerait Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne, et l'analyse des données révélerait la composition chimique de l'atmosphère de chaque planète. De notre Système solaire, le dispositif pourrait facilement étudier la planète récemment découverte autour de l'étoile 47 Ursae Majoris. De surcroît, il pourra identifier des planètes de type terrestre qui, autrement, nous échapperaient, et rechercher la présence de dioxyde de carbone, d'eau et d'ozone sur toutes ces planètes.

Un tel instrument pourrait être construit en collaboration avec des astronomes de plusieurs pays. Nous estimons le coût de ce projet à moins de deux milliards de dollars, soit dix pour cent du budget de la NASA consacré à la recherche spatiale pour les dix prochaines années. La découverte de la vie sur une autre planète serait le couronnement de l'exploration spatiale.

La technique nécessaire à cette découverte est à notre portée. Après des siècles d'interrogations, nous devrions bientôt être à même de savoir si nous sommes les seuls êtres vivants dans l'Univers.

Roger ANGEL et Neville WOOLF sont astronomes à l'Université de l'Arizona.

J. Roger P. ANGEL, *Use of a 16 Meter Telescope to Detect Earthlike Planets*, in *The Next Generation Space Telescope*, sous la direction de P. Bely et C.J. Borrows, Space Telescope Science Institute, Baltimore, 1990.

La vie dans l'Univers, numéro spécial de *Pour la Science*, décembre 1994.

A. LÉGER, M. MARIOTTI, J.-C. PUGET, D. ROUAN et J. SCHNEIDER, *How Detect Signs of Primitive Life on Exoplanets*, *The Darwin Mission*, in *Astrophysics and Space Science*, vol. 233, janvier 1995.
