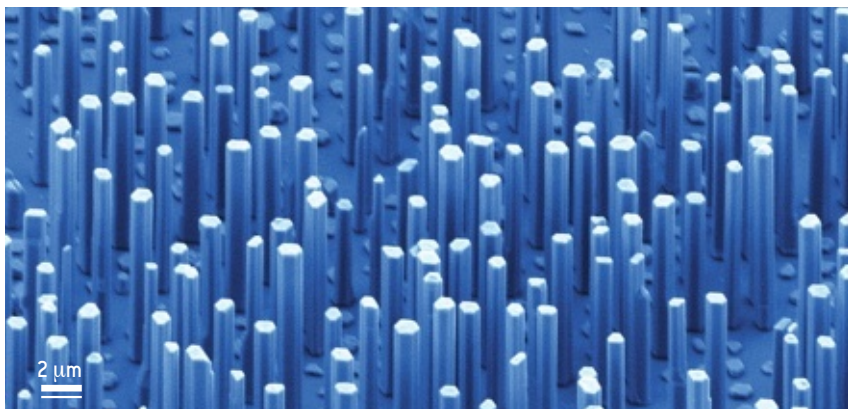




© J. Embury, CEA/INAC

2. DES COLONNES DE NITRURE DE GALLIUM de quelques centaines de nanomètres de diamètre, observées au microscope électronique à balayage, sont une piste d'avenir pour fabriquer des cristaux sans défauts sur un substrat de silicium. Chaque colonne pourrait être transformée en une LED. Mises en parallèle, ces LED formeraient des lampes aux performances exceptionnelles.

■ L'AUTEUR



Nicolas GRANDJEAN est professeur de physique et dirige l'Institut de physique de la matière condensée à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Zuppiroli et D. Schlaepfer, *Lumières du futur*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2011.

P. Mottier, *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*, Hermes/Lavoisier, 2008.

B. Johnstone, *Brilliant 1: Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology*, Prometheus Books, 2007.

très compétitives, avec un rendement lumineux s'élevant jusqu'à 100 lumens par watt (pour des densités de courant de l'ordre de 35 milliampères par millimètre carré), une bonne qualité de lumière et une durée de vie de l'ordre de 50 000 heures. Cependant, le prix d'achat est l'obstacle principal à leur diffusion massive. Il faut déboursier environ 40 euros pour une lampe à LED équivalente à une ampoule à incandescence de 60 watts.

Si les prix ont baissé de 40 pour cent aux États-Unis en 2011, de nouvelles techniques de production peuvent encore les réduire. Le nitrure de gallium est aujourd'hui fabriqué sur un substrat de saphir de 100 millimètres de diamètre. Il serait possible de doubler le diamètre du substrat d'ici quelques années.

Une autre approche serait de remplacer le saphir par du silicium, qui est moins cher et dont la taille standard est de 30 centimètres de diamètre. Le nitrure de gallium produit sur du silicium rattrape en qualité celui fabriqué sur du saphir, ce qui était le principal obstacle de cette technique.

Toujours dans l'optique de fabriquer moins cher, une solution innovante consiste à faire croître le nitrure de gallium en colonnes ou pyramides de tout petit diamètre, de 0,1 à 1 micromètre (voir la figure 2). Cette technique permet non seulement d'obtenir une qualité cristalline parfaite, mais aussi un coefficient d'extraction des photons très élevé, en raison de la grande surface présentée par cette structure. La fabrication du nitrure de gallium de qualité sur un substrat de silicium permettrait d'obtenir un semi-conducteur bon marché. Cependant, il faut garder à l'esprit

que la LED n'est qu'un des éléments qui constituent la lampe. Elle ne représente que 15 à 20 pour cent du coût total. Il faut considérer, par exemple, le système d'alimentation électrique pour adapter la tension au fonctionnement de la LED.

Un autre enjeu majeur des lampes à LED est l'aspect thermique. Le rendement à la prise est dix fois supérieur à celui d'une lampe à incandescence, mais près de la moitié de l'énergie électrique est dissipée en chaleur dans le petit volume de la LED, à cause des effets résistifs et de la perte d'énergie par la fluorescence dans le luminophore. La gestion de la température est cruciale pour ne pas endommager la lampe. Des dissipateurs thermiques en aluminium évacuent la chaleur et évitent que la LED se dégrade.

Un point à considérer lors de la conception d'une lampe à LED concerne la diffusion de la lumière. Une LED est une source lumineuse ponctuelle et, *de facto*, peu agréable pour l'œil. L'une des solutions envisagées par de nombreux constructeurs consiste à intégrer un grand nombre de LED de faible puissance afin de limiter l'éblouissement. Une autre solution repose sur l'intégration du luminophore au diffuseur de la lampe.

Des lampes peu polluantes

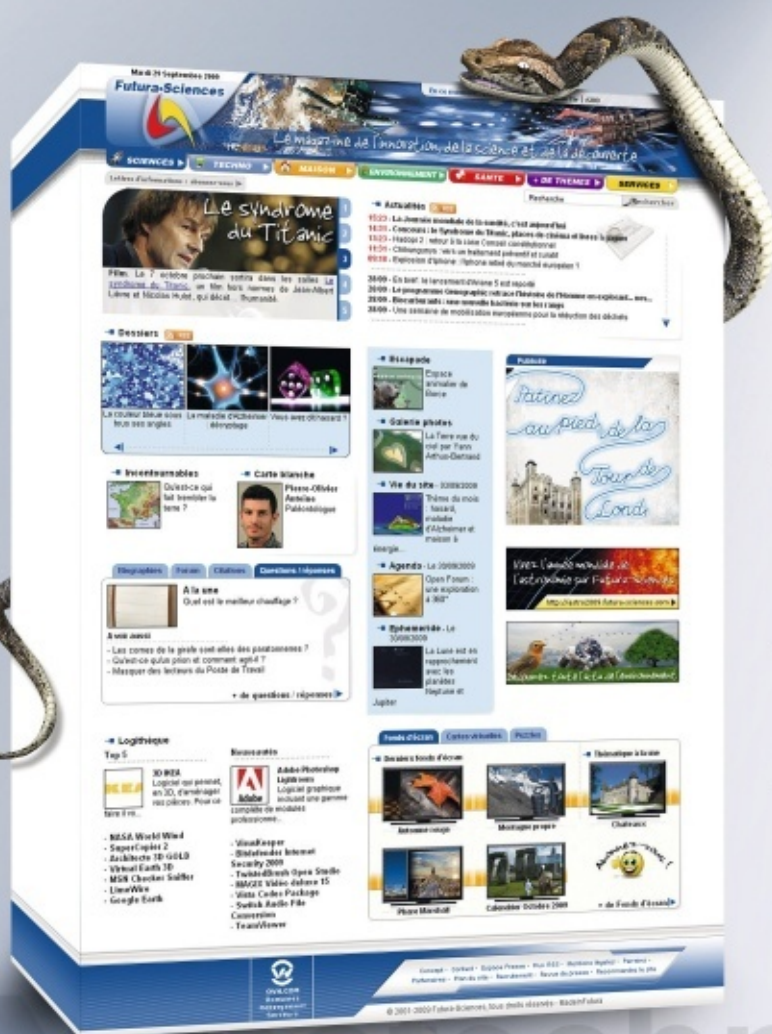
Les contraintes techniques pour le bon fonctionnement des lampes à LED blanches font qu'elles resteront probablement assez coûteuses à fabriquer. Néanmoins, si l'on tient compte de leur durée de vie exceptionnelle et de leur rendement, ces sources de lumière sont tout à fait compétitives. D'un point de vue environnemental, une étude du Département de l'énergie des États-Unis a comparé le cycle de vie, de la fabrication au recyclage, des lampes fluocompactes et des lampes à LED blanches. Les secondes sont beaucoup moins nocives et n'utilisent par exemple pas de mercure, contrairement aux premières.

La même étude compare aussi la consommation électrique de ces deux types de lampes de nouvelle génération. Aujourd'hui, les lampes à LED ont déjà un rendement équivalent, voire supérieur, à celui des lampes fluocompactes pour produire la même quantité de lumière. Elles présentent en plus d'importantes perspectives d'innovation et d'optimisation, ce qui devrait leur assurer un bel avenir. ■

Futura-Sciences, le magazine de la découverte, de la science et de l'innovation



WWW.FUTURA-SCIENCES.COM



• **Actualités** : l'actu des sciences et des technologies analysée en continu.

• **Dossiers** : du réchauffement climatique à la grippe A, les enjeux clés en images avec plus de 800 dossiers.

• **Forums** : 50 forums thématiques pour poser toutes vos questions et échanger avec 300 000 membres.

• **Questions / réponses** : des réponses simples à des questions du quotidien.

• **Services** : fonds d'écran, cartes virtuelles emploi, téléchargements, puzzles...

Retrouvez tous ces thèmes sur
www.futura-sciences.com

Grippe A

Nutrition

Environnement

Jardinage



Le climat des exoplanètes

Kevin Heng

L'étude de l'atmosphère des planètes extrasolaires est désormais à la portée des astronomes. On parvient aujourd'hui à estimer la température et la vitesse des vents à la surface de certaines exoplanètes.

L'ESSENTIEL

- On a découvert à ce jour plus de 800 exoplanètes et plusieurs centaines dont il faudra confirmer le statut.
- Les méthodes de détection donnent aujourd'hui accès au spectre lumineux de certaines exoplanètes, ce qui permet d'étudier les propriétés de leur atmosphère.
- Des modèles numériques, adaptés des modèles climatiques terrestres, reproduisent les caractéristiques de l'atmosphère des jupiters chauds, planètes géantes gazeuses relativement proches de leur étoile.

Ces dernières années, les astrophysiciens ont découvert de nombreuses planètes extérieures au Système solaire. En deux ans, le télescope spatial *Kepler* a localisé plus de 2 000 candidates au titre d'exoplanète, et de l'eau liquide pourrait être présente sur certaines dont la taille est proche de celle de la Terre. Ces objets – qui semblent fréquents dans la galaxie – restent minuscules aux « yeux » des télescopes actuels, mais l'amélioration des techniques permet d'étudier leurs propriétés. Au point qu'établir une carte des températures et des vents de leurs atmosphères ne relève plus de la science-fiction.

Complétant les nombreux relevés du ciel nocturne effectués depuis le sol, les télescopes spatiaux *Hubble*, *Kepler* et *Spitzer* observent le cosmos sans être gênés par l'atmosphère terrestre. Ces instruments détectent une exoplanète en enregistrant la baisse de luminosité au moment où l'objet, situé sur une orbite que l'on voit par la tranche, passe devant son étoile hôte (méthode dite du transit). Depuis quelques années, les astronomes sont capables de détecter la baisse de lumino-

sité due au passage d'une planète derrière son étoile, l'« éclipse secondaire ». En d'autres termes, les techniques astronomiques ont tant progressé que l'on peut détecter à quel moment une étoile masque la lumière de son exoplanète.

Le spectre des exoplanètes devient accessible

Cet effet est faible, tout au plus quelques pour mille dans le rayonnement infrarouge et beaucoup moins dans le visible. Lors d'une éclipse secondaire, la lumière d'un système exoplanétaire est uniquement celle de l'étoile, et ces données permettent de calculer les contributions respectives de chacun des deux astres, notamment la lumière de l'exoplanète et de son atmosphère. Grâce à une telle technique, les astronomes ont effectué les premières détections de la lumière directement émise par une exoplanète, dont le maximum de luminosité se situe généralement dans l'infrarouge.

La mesure des transits et des éclipses à différentes longueurs d'onde permet de



1. L'EXOPLANÈTE HD 189733B

est un jupiter chaud, une géante gazeuse proche de son étoile *(ici dans une vue d'artiste)*.

De nouvelles techniques permettent de mesurer la vitesse des vents dans son atmosphère et de cartographier la température de sa surface.



NASA

2. LE TÉLESCOPE SPATIAL HUBBLE (ci-dessus), ainsi que les observatoires *Spitzer* et *Kepler*, sont les principaux outils dans l'étude des exoplanètes. Ils permettent d'étudier les propriétés de l'atmosphère de ces planètes (composition chimique, température et vitesse des vents).

construire un spectre de l'atmosphère exoplanétaire. Certaines longueurs d'onde étant absorbées par ses constituants, l'analyse spectrale livre la composition de l'atmosphère et les abondances des éléments qu'elle contient.

Cartographier la luminosité d'une exoplanète

Dans certains cas, les astronomes ont réussi à enregistrer les variations de la luminosité de l'exoplanète au fil de sa révolution autour de l'étoile, variations qui constituent sa « courbe de phase ». À partir de cette dernière, Nick Cowan, de l'Université *Northwestern*, et Eric Agol, de l'Université de Washington, ont développé une « carte de brillance », qui décrit la luminosité de l'exoplanète en fonction de la longitude, mais moyennée sur la latitude. Et des travaux récents des mêmes chercheurs ont livré des informations sur la brillance de l'exoplanète HD 189733b dans les deux dimensions, c'est-à-dire en fonction de la longitude aussi bien que de la latitude. La brillance étant liée à la température de l'atmosphère, cela signifie l'avènement d'une cartographie climatique des exoplanètes !

Les astronomes ne sont pas limités à la méthode des transits. Ils utilisent aussi la méthode des vitesses radiales, qui consiste à mesurer les mouvements de l'étoile autour du centre de masse du système formé par l'étoile et ses planètes.

La combinaison des deux techniques permet de détecter une exoplanète et de déterminer son rayon et sa masse. La catégorie de planètes la plus simple à détecter par ces méthodes est celle des jupiters chauds, qui sont des géantes gazeuses, comme Jupiter dans le Système solaire, mais beaucoup plus proches de leur étoile. Leur température de surface est comprise entre 1000 et 3000 kelvins.

Leur distance à l'étoile est si petite, de l'ordre d'un dixième ou moins d'unité astronomique (la distance moyenne de la Terre au Soleil), que la découverte des jupiters chauds a surpris la communauté astronomique. En effet, d'après les théories de formation des planètes, il ne devrait pas y avoir assez de matière, à de si faibles distances, pour former une géante gazeuse. Il est probable que les jupiters chauds se sont formés plus loin et ont migré à proximité de leur étoile par des mécanismes encore mal connus.

Les jupiters chauds sont un laboratoire privilégié pour l'étude des atmosphères extrasolaires. Leur densité, de l'ordre de un gramme par centimètre cube, suggère que leur enveloppe gazeuse est constituée principalement d'hydrogène moléculaire. Il pourrait s'agir d'atmosphères primaires, qui reflètent la composition de la nébuleuse primordiale à partir de laquelle se sont formées les planètes.

Plusieurs millions d'années après la formation de l'exoplanète, les forces de marée exercées par l'étoile sur la planète ont conduit cette dernière à un état de rotation synchronisée, où un hémisphère fait

toujours face à l'étoile, tandis que l'autre est plongé dans une perpétuelle obscurité. Un exemple plus familier est celui de la Lune, qui est dans un état de rotation synchronisée par rapport à la Terre (si l'on néglige de minuscules corrections nommées libérations).

Un jour sans fin

Cette configuration inhabituelle, avec un hémisphère où le jour est perpétuel et l'autre où la nuit est permanente, ouvre à l'exploration un régime de circulation atmosphérique inexistant dans le Système solaire, et offre aux théoriciens l'occasion de tester leurs outils en territoire inconnu.

Pour comprendre ces atmosphères joviennes chaudes, il faut clarifier les interactions complexes entre le rayonnement stellaire, la dynamique et la chimie atmosphériques, et des champs magnétiques éventuels. Les jupiters les plus chauds présentent un net contraste entre leur moitié chaude et brillante et leur moitié froide et sombre. La courbe de phase, qui, rappelons-le, donne la luminosité de la planète, est une fonction sinusoïdale ; elle atteint son maximum lors de l'éclipse secondaire et son minimum durant le transit. Tout décalage du maximum de la courbe par rapport à son point de référence (l'instant central de l'éclipse secondaire) peut être interprété comme étant dû à la présence de vents atmosphériques horizontaux, qui transportent la chaleur du côté jour vers le côté nuit (voir l'encadré page ci-contre). Ce décalage a été mesuré pour la première fois pour l'exoplanète HD 189733b par Heather Knutson, de l'Institut de technologie de Californie, et ses collègues : ils ont rapporté un décalage du pic d'environ 30 degrés dans la direction de la rotation. Le décalage angulaire a également été mesuré pour les jupiters chauds *Upsilon Andromedae b* et *WASP-12b*.

L'équipe de Ignas Snellen, de l'Université de Leyde, a mis à contribution le VLT (*Very Large Telescope* ou Très grand télescope), au Chili, et a utilisé la technique de spectroscopie d'absorption pour mesurer la vitesse des vents horizontaux sur le jupiter chaud HD 209458b. Ces astronomes se sont intéressés à une raie d'absorption du monoxyde de carbone, qui subit un décalage de longueur d'onde par effet Doppler à cause des mouvements de l'atmosphère. L'équipe a déterminé que les vents soufflent sur

HD 209458b à environ deux kilomètres par seconde, soit une centaine de fois plus vite que les vents terrestres.

Ces découvertes marquent l'aube de la météorologie exoplanétaire. L'intérêt pour ce nouveau domaine commence à s'étendre à des champs apparentés : les sciences de l'atmosphère et la climatologie, la géophysique et la planétologie. Des chercheurs d'horizons divers se voient confrontés à des conceptions et pratiques scientifiques différentes, en particulier pour la modélisation des phénomènes. C'est particulièrement saillant lors des conférences interdisciplinaires où nous avons du mal à comprendre nos jargons respectifs. Les spécialistes de l'atmosphère et du climat, comme les géophysiciens, travaillent sur des bases de données riches et fiables, car ils vivent au sein de leur système d'étude. Cependant, les observations sont si fines qu'aucun modèle ne peut rendre compte de tous les phénomènes observés. Il est nécessaire d'utiliser plusieurs échelles de modélisation, chacune isolant certains aspects clefs de la physique.

Une dynamique différente de celle de la Terre

L'étude des exoplanètes se limite essentiellement à scruter des sources ponctuelles dans le ciel nocturne. Bien que nous sachions obtenir des informations spectrales et temporelles détaillées sur ces sources ponctuelles, l'obtention d'informations spatiales reste un défi. Les planétologues du Système solaire ont la chance de disposer de clichés de la surface de Mars ou des motifs météorologiques de Jupiter. Ce n'est pas le cas pour les exoplanètes, et les astrophysiciens doivent travailler à partir de données limitées, qui s'accompagnent d'une multitude de restrictions pour les exploiter et construire des modèles.

Les connaissances accumulées sur la Terre et les planètes du Système solaire sont un guide précieux pour aborder le climat des exoplanètes, mais elles ne s'appliquent pas nécessairement aux autres planètes. Un exemple concret est donné par les atmosphères des jupiters chauds : certaines longueurs caractéristiques (tailles des courants ou des tourbillons) sont inférieures au rayon des planètes dans le Système solaire, mais elles sont comparables au rayon pour les jupiters chauds.

Cela implique que les propriétés de l'atmosphère des jupiters chauds ont une étendue globale, sur l'ensemble de la planète. Les atmosphères des exoplanètes proches de leur étoile présentent alors un régime de circulation qui est inconnu dans le Système solaire. Les simulations des flux atmosphériques doivent donc être globales et non locales.

Dans le cas du Système solaire, les chercheurs se sont rendu compte que les atmosphères planétaires sont des entités

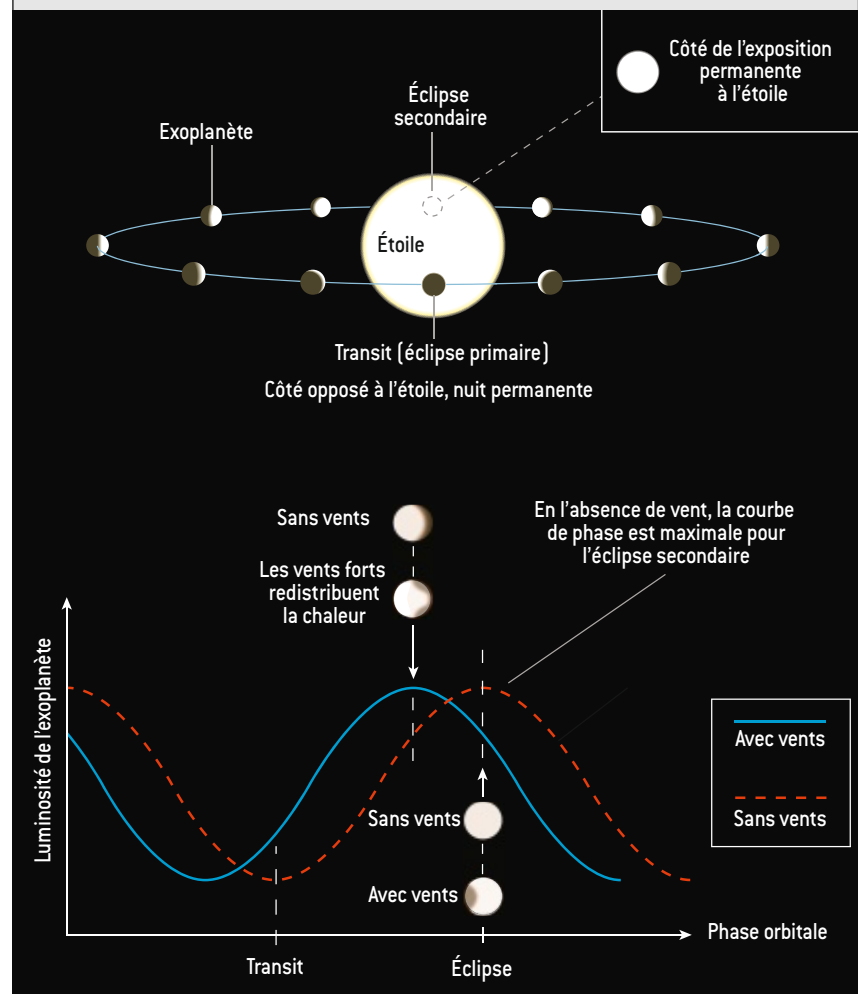
complexes, soumises à diverses interactions présentant des signatures chimiques, dynamiques et radiatives sur des échelles de temps très diverses. Isaac Held, du Laboratoire de dynamique des fluides géophysiques de Princeton, dans le New Jersey, a affirmé que, pour bien comprendre ces systèmes complexes, il faut construire une hiérarchie de modèles théoriques.

Ces simulations vont des modèles analytiques unidimensionnels qui isolent un élément physique clef aux modèles

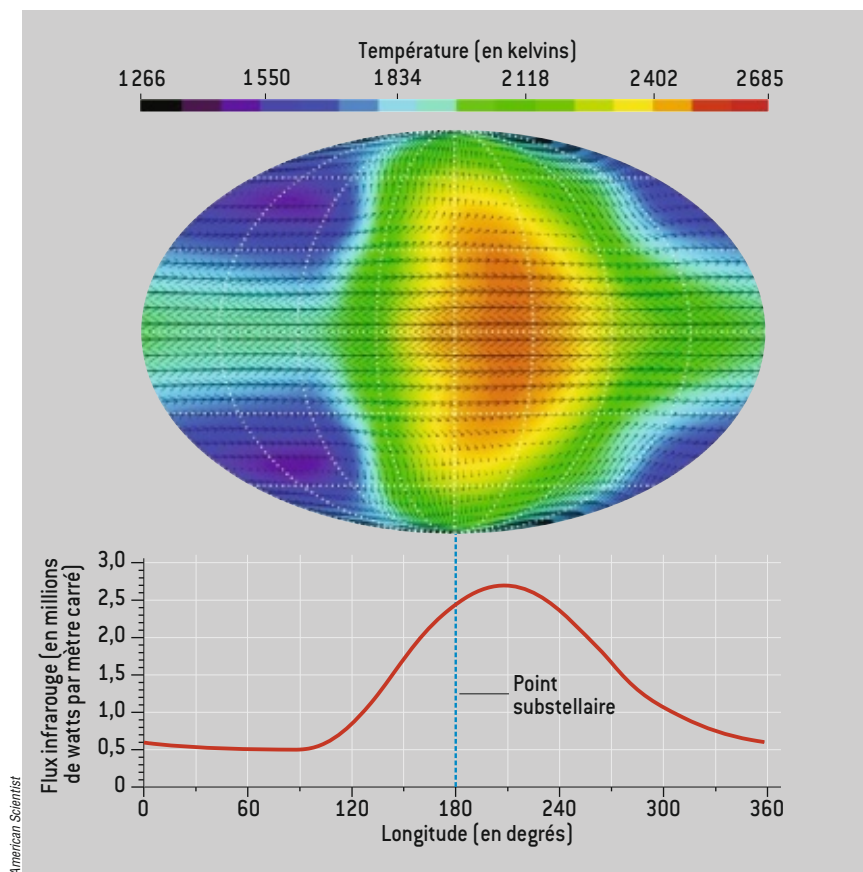
TRANSIT ET COURBE DE PHASE

Les atmosphères planétaires absorbent et réémettent le rayonnement de leur étoile. Quand une exoplanète dont on voit l'orbite de profil passe devant son étoile, elle entraîne une éclipse primaire ou *transit*, associée à une légère baisse de luminosité. L'éclipse secondaire correspond au passage de la planète derrière l'étoile.

La plupart des exoplanètes détectées seraient en rotation synchronisée, avec un côté jour permanent faisant face à l'étoile, et un côté nuit permanent. L'étude de l'émission lumineuse de la planète permet d'obtenir la courbe de phase, une courbe de luminosité en fonction des phases de l'orbite. Sans vents, la courbe de phase est, en principe, à son maximum pendant l'éclipse secondaire (mais masquée par l'étoile), mais s'il y a des vents qui redistribuent la chaleur (et donc le rayonnement infrarouge) autour de l'atmosphère exoplanétaire, ce pic sera décalé (*en bas*).



American Scientist



3. UN MODÈLE DE CIRCULATION GÉNÉRALE de l'atmosphère, initialement conçu pour la Terre, a été adapté pour simuler une carte de la température et de la vitesse des vents pour une atmosphère jovienne chaude (*en haut*). La couleur traduit la température, tandis que les flèches indiquent la vitesse du vent (de l'ordre du kilomètre par seconde). La carte de luminosité en fonction de la longitude, moyennée sur la latitude (*en bas*), montre un décalage angulaire du maximum par rapport au point substellaire (longitude pour laquelle l'étoile est au zénith). Cela indique la présence de vents atmosphériques qui redistribuent la chaleur du côté jour au côté nuit.

tridimensionnels complets de circulation générale utilisés pour les prévisions climatiques et météorologiques, qui intègrent de nombreux phénomènes pour restituer les interactions de l'atmosphère, des continents et des océans sur la Terre. Ces modèles de circulation générale résolvent simultanément un ensemble d'équations qui traitent l'atmosphère comme un fluide ainsi qu'une équation thermodynamique, et tiennent compte de divers facteurs tels que le relief et le couvert végétal. Beaucoup de ces paramètres ne sont pas pris en compte dans les analyses théoriques des atmosphères exoplanétaires, et l'un des principaux défis est donc de déterminer comment et quand simplifier un modèle conçu initialement pour la Terre.

Délibérément ou non, les astrophysiciens se sont inspirés de cette approche et ont développé une hiérarchie de modèles théoriques allant de une à trois dimensions. Comme les traitements des jupiters

chauds et des naines brunes (des astres trop peu massifs par rapport aux étoiles pour permettre à leur noyau de développer et entretenir une fusion nucléaire) partagent plusieurs caractéristiques, beaucoup des modèles pionniers développés pour les naines brunes ont été transposés aux jupiters chauds.

Les premiers modèles se concentraient sur le spectre des jupiters chauds, et les traitements les plus élaborés s'inspiraient des techniques utilisées en climatologie et en sciences de l'atmosphère. À partir du spectre d'une exoplanète, les astrophysiciens déterminent la composition chimique de l'atmosphère et le profil pression-température compatible avec les données. Par exemple, Nikku Madhusudan, de l'Université Yale, et ses collègues ont étudié le spectre de l'exoplanète WASP-12b. Ils en ont déduit un rapport carbone/oxygène élevé, double de celui de l'étoile. De nouvelles études indiquent que

le spectre pourrait être altéré par la présence d'une étoile proche. Le résultat reste à confirmer. Néanmoins, l'étude spectrale des exoplanètes est cruciale, car elle permet d'en déduire la composition, voire de fournir des indices précieux sur l'histoire de la formation de l'exoplanète.

Les astrophysiciens n'ont pas tardé à remarquer que la chimie atmosphérique et la dynamique se combinent de façon non triviale pour produire les caractéristiques d'un jupiter chaud que l'on observe. Adam Showman, à l'Université d'Arizona, a été l'un des premiers astrophysiciens à mettre à contribution la puissance des modèles de circulation générale pour étudier l'atmosphère des jupiters chauds.

À l'épreuve des jupiters chauds

Nous avons fait partie des chercheurs qui ont exploré cette voie. Ainsi, nous avons généralisé aux jupiters chauds l'étude climatique d'une (exo)planète. Le transport de chaleur de l'hémisphère diurne à l'hémisphère nocturne d'une exoplanète en rotation synchronisée peut être réduit à un problème bidimensionnel. Mais pour bien prendre en compte les échelles de temps et les perturbations radiatives, une analyse tridimensionnelle est nécessaire, ce qui impose l'utilisation des modèles de circulation générale. Nous avons résolu les équations de ces modèles par diverses techniques, puis comparé les résultats pour nous assurer de l'accord entre les méthodes.

Plusieurs équipes ont maintenant adapté avec succès les modèles de circulation générale à la modélisation des atmosphères exoplanétaires et obtiennent des résultats compatibles avec les observations. Les modèles de circulation générale seront encore plus pertinents avec l'étude d'exoplanètes ressemblant à la Terre par la taille et leur température.

Nous ne faisons que commencer à comprendre les propriétés essentielles des jupiters chauds, par exemple pourquoi certains semblent plus dilatés que d'autres et pourquoi certains paraissent redistribuer la chaleur plus efficacement de leur hémisphère diurne à leur hémisphère nocturne. Dans le cas de HD 189733b et HD 209458b, les spectres et courbes de phase calculés au moyen des modèles de circulation générale sont conformes aux observations. Tant que la

prochaine génération de télescopes spatiaux ne sera pas en service, ces exoplanètes resteront les références en matière d'atmosphères exoplanétaires. Elles illustrent déjà la richesse des informations qu'il est possible d'obtenir.

Ainsi, Frédéric Pont et David Sing, de l'Université d'Exeter, et leurs collègues ont étudié le spectre optique de HD 189733b au moyen du télescope spatial *Hubble*. Selon leurs résultats, l'atmosphère de cette exoplanète présenterait de la diffusion Rayleigh (le processus de diffusion de la lumière qui donne sa couleur au ciel terrestre, vu depuis le sol).

Quant au jupiter chaud HD 209458b, il apparaît nettement plus gros que ne le prévoient les calculs d'évolution d'une exoplanète qui se refroidit après sa formation. Selon l'une des idées avancées pour expliquer l'inflation du rayon, les atmosphères de jupiters chauds partiellement ionisées se comporteraient comme des circuits électriques géants qui, en présence d'un champ magnétique, obéissent à la loi de Lenz (le système réagit de façon à s'opposer aux variations du flux magnétique). Des courants électriques et des forces opposées seraient alors induits par les vents horizontaux, d'où la dissipation d'énergie

■ L'AUTEUR



Kevin HENG est astrophysicien à l'Institut d'astronomie de l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse.

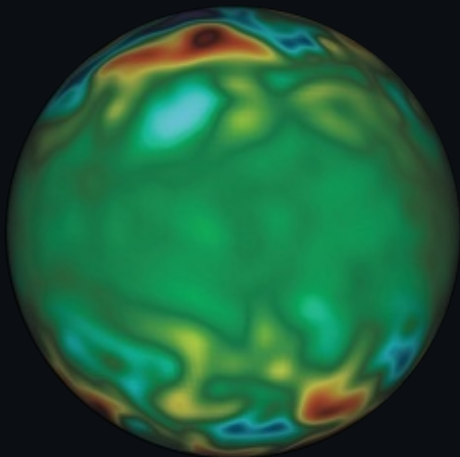
Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

DES DYNAMIQUES ATMOSPHÉRIQUES DIFFÉRENTES

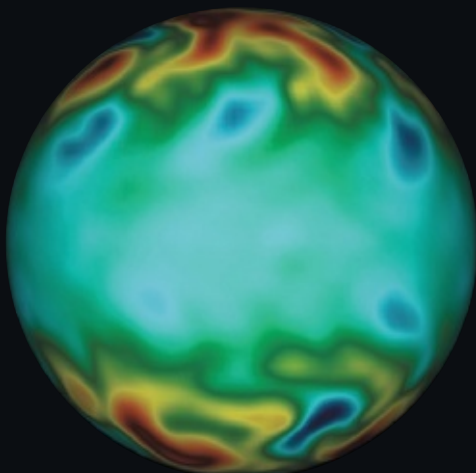
Des simulations numériques reproduisent la dynamique de l'atmosphère des exoplanètes. Adaptées des modèles terrestres, elles sont modifiées en fonction de la configuration spécifique de l'exoplanète, de sa distance à son étoile, de sa période de révolution et des vents à sa surface. Une planète de type Terre (a et b), avec une température de l'ordre de 300 kelvins (27 °C), présente de nombreuses fluctuations locales de température. Un jupiter chaud est une planète géante gazeuse très proche de son étoile. Les effets de marée ont conduit à une synchronisation de

sa rotation avec un hémisphère toujours orienté vers l'étoile (c), dont la température est de l'ordre de 3 000 kelvins, et une face orientée vers l'espace (d) où la température est voisine de 1 000 kelvins. L'atmosphère a un régime stable, traversé par des vents forts de l'ordre de un kilomètre par seconde, qui transfèrent une partie de la chaleur de la face éclairée vers la face sombre. Les simulations mettent en évidence ces phénomènes de transfert de chaleur (les couleurs des échelles de températures sont différentes entre les figures de la planète de type Terre et le jupiter chaud).

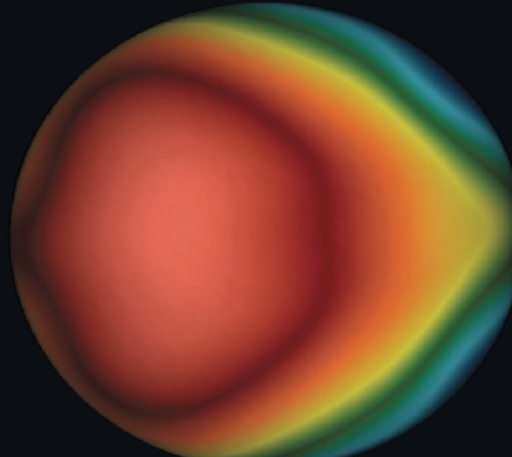
a



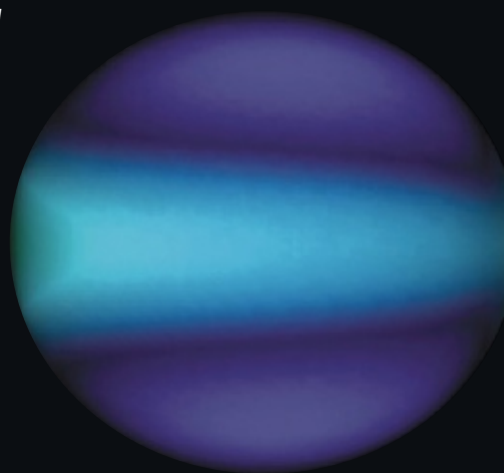
b



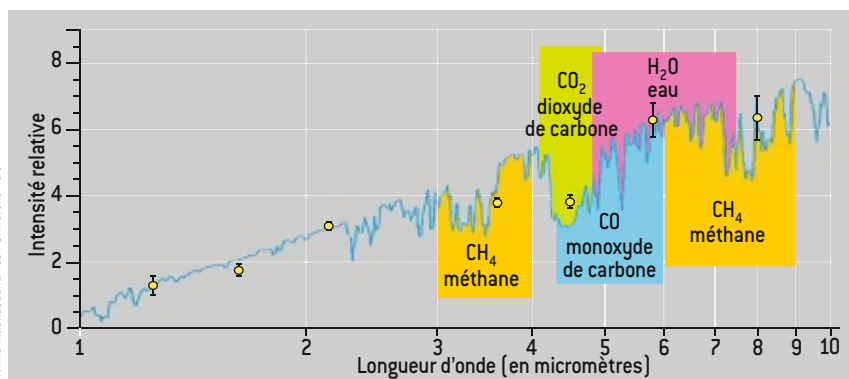
c



d



Kevin Heng



4. LE SPECTRE D'UNE EXOPLANÈTE, ici le cas d'un jupiter chaud, WASP-12b, permet d'étudier la composition chimique de son atmosphère. Certaines raies sont caractéristiques de composés tels que le méthane, le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone ou l'eau. Les données (points jaunes) sont compatibles avec un modèle de spectre d'émission (courbe bleue).

mécanique en chaleur, et cette dernière dilaterait certains jupiters chauds. Il reste toutefois à montrer que les jupiters chauds présentent un champ magnétique, à l'instar de la Terre et de certaines des planètes du Système solaire.

L'étude des jupiters chauds est importante parce que nous avons assez de données pour tester nos hypothèses et nos modèles d'atmosphères, ce qui permet d'affûter nos outils théoriques avant de les appliquer à des exoplanètes comparables à Neptune ou même à la Terre, pour lesquelles les données sont actuellement rares, voire inexistantes.

Pour de nombreux chercheurs, l'objectif est de détecter le spectre d'une exoplanète de type terrestre en orbite autour d'une étoile ressemblant au Soleil, où régneraient des conditions favorables au développement de la vie. Pour l'heure, une telle quête reste hors d'atteinte, et ne devrait même pas être à la portée de la prochaine génération de télescopes spatiaux.

En attendant, pour des astronomes tels que David Charbonneau, de l'Université Harvard, et Jill Tarter, de l'Institut SETI, une voie prometteuse pour détecter des superterres potentiellement habitables (des exoplanètes de type tellurique ayant une masse et un rayon un peu supérieurs à ceux de la Terre) consisterait à les traquer autour de naines rouges (ou étoiles de type M).

Ces minuscules cousines de notre Soleil, deux à dix fois moins massives, représentent environ les trois quarts de la population stellaire de notre voisinage galactique. Il y a plusieurs avantages à les scruter. Leur température est inférieure à celle des étoiles de type solaire, ce qui implique que même 10 à 100 fois plus proches de l'étoile, leurs éventuelles exopla-

nètes pourraient conserver de l'eau liquide à leur surface. Et la proximité de l'étoile facilite la détection de ces planètes par les techniques astronomiques actuellement disponibles, à savoir la méthode du transit et celle des vitesses radiales.

Mais il y a un prix à payer : on s'attend à ce que les planètes soient en rotation synchronisée et qu'elles présentent des hémisphères où règne en permanence le jour ou la nuit, un peu comme leurs homologues joviens chauds. Les théoriciens craignent en conséquence que leur atmosphère ne disparaisse à cause de la condensation des molécules du côté nocturne et froid.

Du point de vue expérimental, la prochaine étape consiste à construire des télescopes spatiaux spécialement dévolus à la mesure des spectres d'exoplanètes sur de longues périodes et avec une résolution élevée. Plusieurs projets sont à l'étude, tels ECHO (*Exoplanet Characterization Observatory*) et FINESSE (*Fast Infrared Exoplanet Spectroscopy Survey Explorer*), proposés respectivement aux agences spatiales européenne et américaine. Si de telles missions se concrétisent, dans une décennie ou deux, elles nous livreront une mine d'informations spectrales et temporelles sur des centaines d'exoplanètes, à partir desquelles nous pourrions mieux connaître leurs atmosphères.

Des cycles de température

Nous pourrions ainsi discerner des variations de températures correspondant à des phénomènes périodiques. Une telle étude a été réalisée pour l'atmosphère terrestre, couvrant des échelles de temps allant de moins d'une journée (variations diurnes) à plusieurs millénaires (les cycles de Milankovitch, correspondant aux variations de l'orbite terrestre qui modifient la quantité de lumière reçue par la planète). Étant donné les nombreuses contraintes à satisfaire, il est vraisemblable que les missions spatiales ne pourront pas construire des spectres de puissance sur plus de quelques mois. Mais, de toute façon, il est probable que la partie intéressante de ces spectres est, pour les exoplanètes en orbite serrée comme les jupiters chauds ou les super-terres, concentrée sur des périodes plus courtes. Quoi qu'il en soit, ces mesures seront une étape supplémentaire dans la connaissance du climat des exoplanètes. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. K. Heng *et al.*, Atmospheric circulation of tidally locked exoplanets: A suite of benchmark tests for dynamical solvers, *MNRAS*, vol. 413, pp. 2380-2402, 2011.

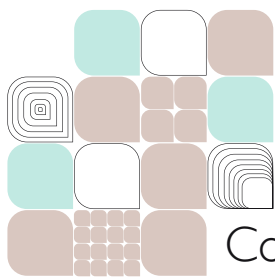
I. A. G. Snellen *et al.*, The orbital motion, absolute mass and high-altitude winds of exoplanet HD 209458b, *Nature*, vol. 465, pp. 1049-1051, 2010.

D. Charbonneau *et al.*, A super-Earth transiting a nearby low-mass star, *Nature*, vol. 462, pp. 891-894, 2009.

Exoplanètes, des centaines de nouveaux mondes à explorer, *Dossier Pour la Science*, n° 64, juillet-septembre 2009.

H. A. Knutson *et al.*, A map of the day-night contrast of the exoplanet HD 189733b, *Nature*, vol. 447, pp. 183-186, 2007.

I. M. Held, The gap between simulation and understanding in climate modeling, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, pp. 1609-1614, 2005.



Compte rendu du 12^e symposium LVMH Recherche

Épuisement des ressources naturelles et matières premières cosmétiques : quelles stratégies d'avenir ?

12 septembre 2012, Paris

Aujourd'hui, plus personne n'ignore le fait que les ressources naturelles s'épuisent. Les impacts générés par les activités humaines deviennent de plus en plus préoccupants pour la planète et notre environnement. Les conséquences sur l'économie de demain seront importantes car, sur les marchés mondiaux, nous nous trouvons toujours au cœur d'un choc des ressources énergétiques et des métaux précieux, indispensables à notre mode de vie très technologique.

Les demandes de matières premières, d'eau et d'énergie (pétrole) explosent sous la pression démographique (neuf milliards d'individus en 2050), les besoins de consommation et les bouleversements technologiques nouveaux. Les faibles diversifications des pays producteurs, les risques géopolitiques, la diminution des surfaces agricoles, la dégradation des forêts, l'acidification des océans, l'accumulation des déchets, les recyclages insuffisants renforcent les craintes d'une issue irréversible pour l'espèce humaine.

La gestion des ressources des matières premières cosmétiques, leurs origines, leurs synthèses, l'essor des biotechnologies, les extractions des végétaux, l'amélioration « éco » des chaînes de conception des produits du marketing à la production constituent une préoccupation majeure de nos marques comme l'a précisé Monsieur Claude Martinez, Président de Parfums Christian Dior, représentant l'ensemble des marques de LVMH Recherche, en ouverture de ce symposium.

Aujourd'hui, analyses et projections les plus fines n'indiquent pas les solutions à mettre en place. C'est pour cette raison que LVMH Recherche a décidé de réunir au Collège des Bernardins à Paris, plus de 160 spécialistes issus d'horizons divers avec les acteurs majeurs du secteur cosmétique, afin de réfléchir collectivement aux stratégies et aux chantiers d'avenir. Imaginer de nouvelles matières premières, d'autres composites, de nouveaux polymères biosourcés, des matières novatrices totalement recyclables, peu énergivores... sont quelques-uns des thèmes qui ont été abordés.