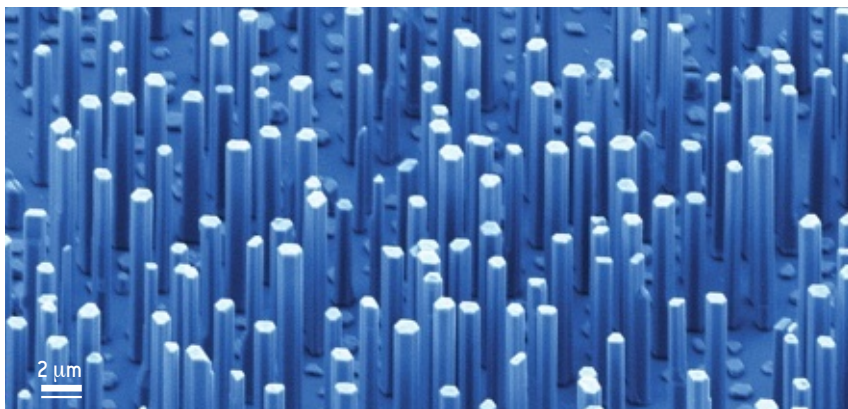




© J. Embury, CEA/INAC

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 !: 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. ■

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 1 000 et 3 000 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, rappelez-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

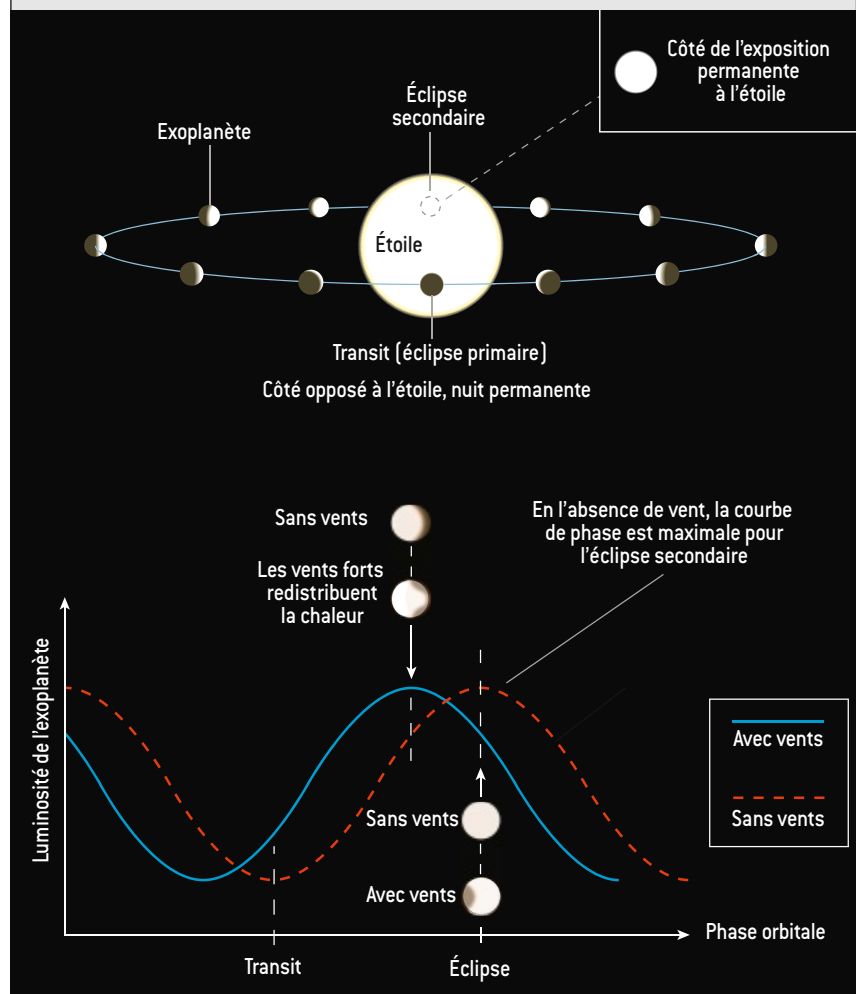
complexes, soumises à diverses interactions présentant des signatures chimiques, dynamiques et radiatives sur des échelles de temps très diverses. Isaac Held, du Laboratoire de dynamique des fluides géophysiques de Princeton, dans le New Jersey, a affirmé que, pour bien comprendre ces systèmes complexes,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