

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

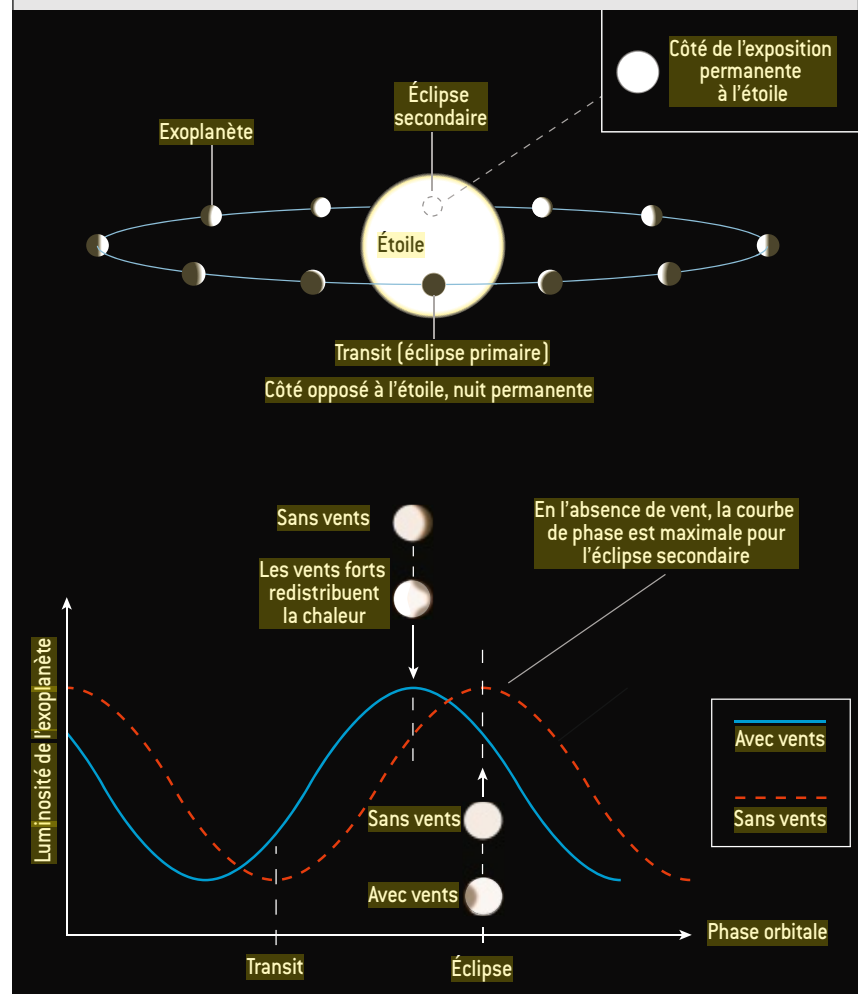
complexes, soumises à diverses interactions présentant des signatures chimiques, dynamiques et radiatives sur des échelles de temps très diverses. Isaac Held, du Laboratoire de dynamique des fluides géophysiques de Princeton, dans le New Jersey, a affirmé que, pour bien comprendre ces systèmes complexes,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

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

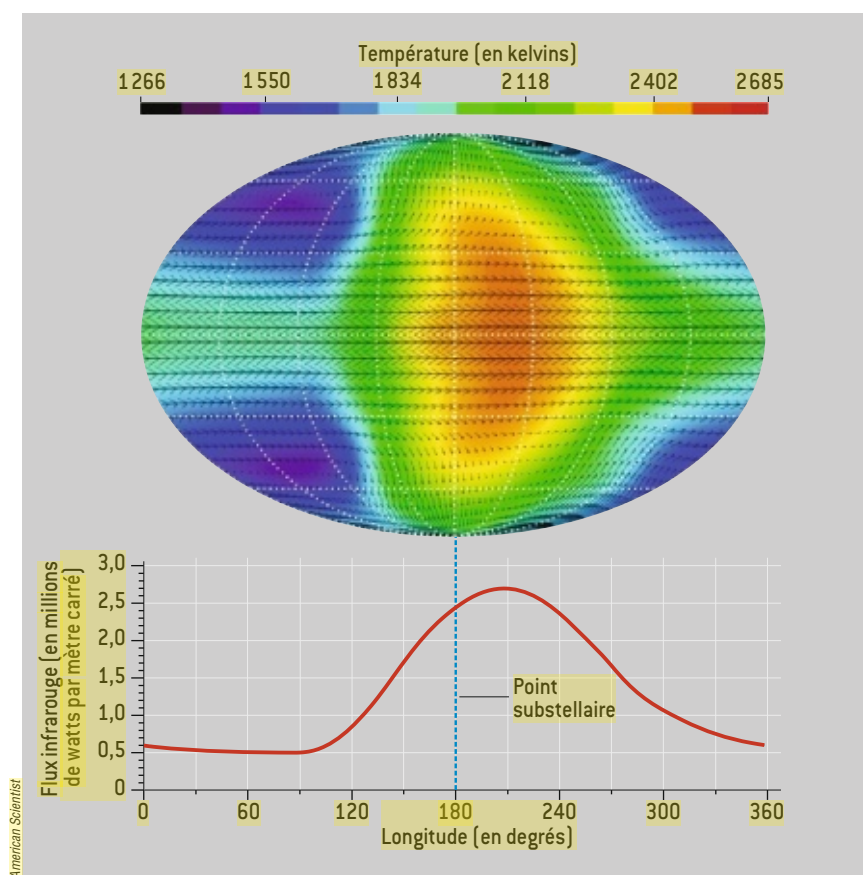
TRANSIT ET COURBE DE PHASE

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