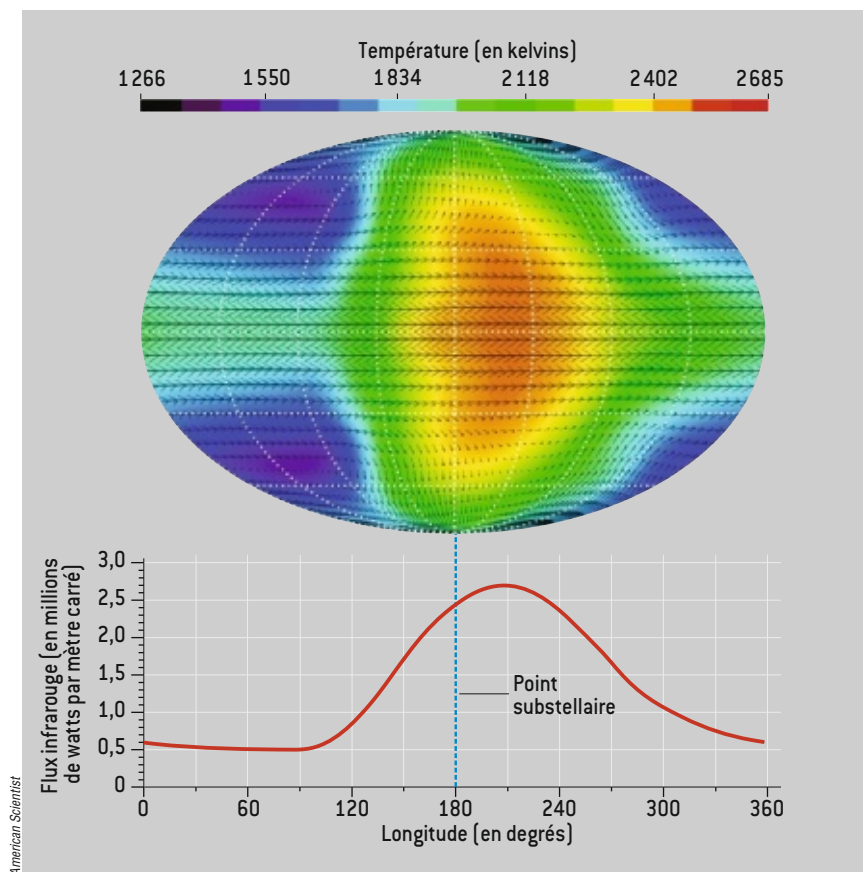




3. UN MODÈLE DE CIRCULATION GÉNÉRALE de l'atmosphère, initialement conçu pour la Terre, a été adapté pour simuler une carte de la température et de la vitesse des vents pour une atmosphère jovienne chaude (*en haut*). La couleur traduit la température, tandis que les flèches indiquent la vitesse du vent (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'inspirent 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.

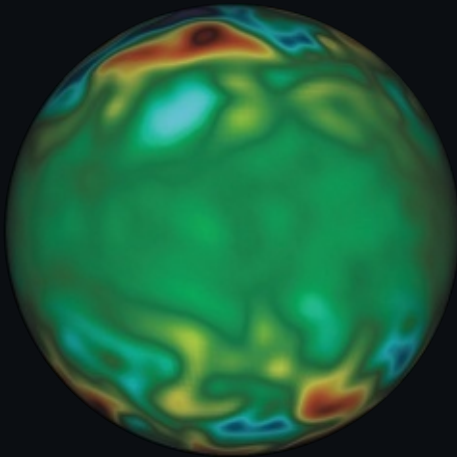
Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

DES DYNAMIQUES ATMOSPHÉRIQUES DIFFÉRENTES

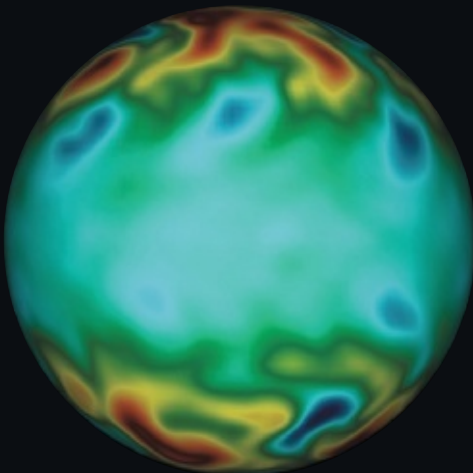
Des simulations numériques reproduisent la dynamique de l'atmosphère des exoplanètes. Adaptées des modèles terrestres, elles sont modifiées en fonction de la configuration spécifique de l'exoplanète, de sa distance à son étoile, de sa période de révolution et des vents à sa surface. Une planète de type 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).

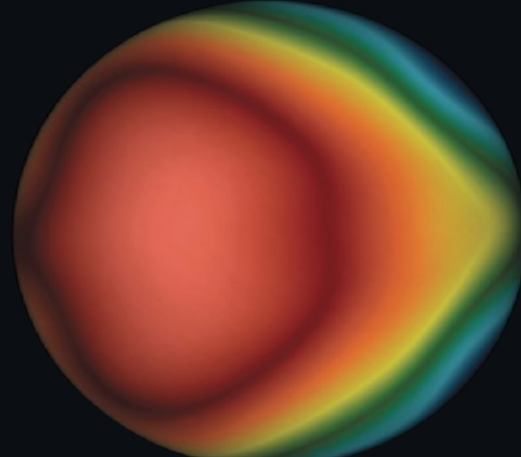
a



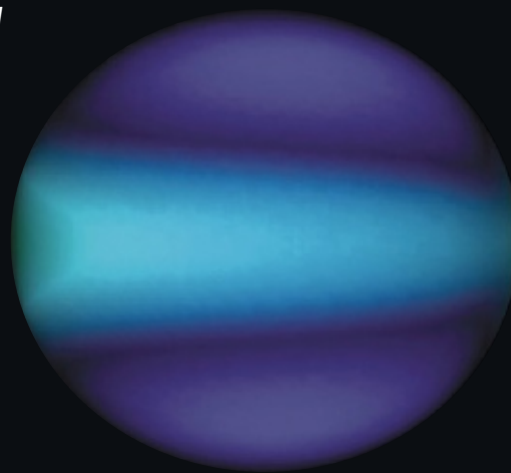
b



c



d



Kevin Heng