

inconnues dans le Système solaire. Les chercheurs s'attendent à observer une grande variété de couleurs, reflet de cette diversité. Ainsi, certaines planètes seraient noires ou presque, d'autres mauves, d'autres encore bleues, etc. Or la couleur des exoplanètes commence à être accessible aux astrophysiciens, lesquels peuvent alors exploiter cette information pour mieux connaître ces corps célestes.

La couleur d'une exoplanète est une sorte d'empreinte digitale de l'atmosphère planétaire, puisqu'elle résulte de l'interaction de cette atmosphère avec la lumière de l'étoile. Comme nous l'expliquerons, la teinte d'une planète permet de déterminer la composition de son atmosphère et trahit la présence ou l'absence de nuages. Et les astrophysiciens espèrent améliorer les capacités de leurs instruments pour en tirer encore plus d'informations : détecter la présence d'une activité tectonique, d'eau liquide et même de vie, par exemple sous la forme d'une végétation capable de photosynthèse. Nous présenterons aussi les techniques mises en œuvre pour mesurer la couleur d'une exoplanète et les premiers résultats obtenus sur un type particulier de planètes, comparables à Isis. Nous évoquerons enfin les pistes de recherche pour les années à venir.

Le principe du lien entre la couleur d'une planète et sa composition n'est pas récent. Par une nuit dégagée, on peut facilement observer la couleur de Mars, la « planète rouge ». Les Grecs et les Romains ont associé cette couleur au feu et au sang, d'où l'attribution de la planète au dieu de la guerre. Nous savons aujourd'hui que cette couleur est due à la réflexion de la lumière solaire sur des roches « rouillées », riches en fer oxydé (Fe_2O_3), à la surface de Mars. Si le feu n'a rien à voir avec Mars, qui est une planète froide, le parallèle avec le sang est plus approprié : dans le sang oxygéné, l'hémoglobine qui contient du fer se transforme en oxyhémoglobine qui confère au sang sa couleur rouge intense.

De même, l'éclat blanc de Vénus, l'« étoile du Berger », juste après le coucher du Soleil, provient des épais nuages d'acide sulfurique qui la recouvrent entièrement. Ces nuages renvoient la lumière solaire, dans tout le spectre du domaine visible, vers l'espace.

Enfin, nous vivons sur la « planète bleue », un point bleu pâle sur la photographie prise en 1990 par la sonde *Voyager 1* depuis les confins du Système solaire, à une distance de 6,4 milliards de kilomètres. Ce bleu pâle de la Terre est dû à la combinaison de deux effets : le bleu profond des océans, qui absorbent

plus efficacement les composantes verte et rouge de la lumière, et le blanc brillant des nuages, qui réfléchissent la lumière solaire blanche vers l'espace. L'analyse d'un spectre électromagnétique détaillé de la Terre révèle aussi la présence d'ozone, d'oxygène, de vapeur d'eau et de végétation.

De telles analyses s'appliquent à toutes les planètes et satellites du Système solaire, car il est possible de les observer directement et d'en mesurer le spectre. Ce n'est hélas pas le cas des exoplanètes. En effet, celles-ci sont pour la plupart très proches de leur étoile. La lumière réfléchie par la planète est alors noyée dans l'éclat intense de l'étoile. Cependant, les chercheurs ont développé des techniques pour observer de façon indirecte les exoplanètes et déterminer leur couleur.

L'exoplanète Isis est bien connue des spécialistes, et les observations que nous avons effectuées s'inscrivent dans une longue série qui a commencé en 2005 avec la découverte de cette planète, à l'Observatoire de Haute-Provence. Les mesures permettent d'en dresser un portrait de plus en plus détaillé. Lors de l'éclipse de l'exoplanète observée par *Hubble* en 2012, nous avons utilisé le spectrographe STIS, l'un des instruments embarqués, pour analyser le spectre d'émission lumineuse du système stellaire (étoile-planète). Le télescope spatial a fixé l'étoile pendant six heures, tandis que la planète s'éclipsait derrière elle et réémergeait de l'autre côté. La période orbitale d'Isis, son « année », est de deux jours et cinq heures seulement, et son éclipse dure une heure et demie.

Notre équipe a observé une variation faible, mais mesurable, de l'intensité lumineuse durant l'éclipse. En effet, la lumière émise par le système stellaire est dominée par le rayonnement de l'étoile, mais une petite partie provient de la planète qui réfléchit celle reçue de son soleil. Durant l'éclipse, cette contribution disparaît, d'où la baisse de luminosité mesurée. Mais la diminution n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde : alors que la luminosité du système ne change pratiquement pas dans le vert et le rouge, un déficit dans le bleu a été constaté. Cela signifie que la planète émet principalement de la lumière bleue, ce qui correspond à sa couleur.

Nos mesures récentes avec le télescope *Hubble* suggèrent que la couleur d'Isis est similaire à celle des océans profonds sur Terre. La similarité s'arrête là : la présence d'eau liquide à la surface d'Isis est exclue. Il s'agit d'une planète géante gazeuse, dont l'atmosphère

L'ESSENTIEL

■ Les télescopes spatiaux permettent de mesurer la couleur d'une exoplanète par des méthodes indirectes.

■ Cette couleur fournit des renseignements sur la composition de l'atmosphère de la planète.

■ Les planètes gazeuses de type jupiter chaud sont les plus simples à étudier, en raison de la proximité de leur étoile.

■ Les astrophysiciens ont montré que la planète Isis est bleue, et que cela est dû à la présence de nuages de gouttelettes de verre dans son atmosphère.

© ESO/L. Calçada/P. Delorme/R. Saito/VV Consortium



ISIS (HD 189733B)

MASSE : 1,16 fois la masse de Jupiter
DISTANCE À L'ÉTOILE : 0,031 unité astronomique
TEMPÉRATURE : 1 190 kelvins
COULEUR : bleue
ORIGINE DE LA COULEUR : diffusion Rayleigh

NASA, ESA, M. Kornmesser



OSIRIS (HD 209458B)

MASSE : 0,69 fois la masse de Jupiter
DISTANCE À L'ÉTOILE : 0,045 unité astronomique
TEMPÉRATURE : 1 440 kelvins
COULEUR : mauve très sombre
ORIGINE DE LA COULEUR : absorption par le sodium

MASA/CPL-Caltech



TRES-2B

MASSE : 1,2 fois la masse de Jupiter
DISTANCE À L'ÉTOILE : 0,035 unité astronomique
TEMPÉRATURE : 1 500 kelvins
COULEUR : noire (albédo inférieur à 1 %)
ORIGINE DE LA COULEUR : inexpliquée

David A. Aguilar (CfA)

est composée surtout d'hydrogène, comme Jupiter. Mais Isis est en orbite autour de son étoile à une distance presque 100 fois plus courte, ce qui porte son atmosphère à près de 1000 °C. À cette température, l'eau n'existerait dans l'atmosphère que sous forme de vapeur transparente, tout comme les autres molécules telles que le méthane, l'ammoniac ou l'acide sulfurique, qui composent les nuages des planètes du Système solaire.

Nous pensons que la couleur d'Isis s'explique par l'effet de deux composantes de son atmosphère, les vapeurs de sodium et un brouillard de silicates.

Des planètes sombres et mauves

Le sodium est le sixième élément le plus répandu sur Terre : il représente 2,6 pour cent de la croûte terrestre sous différentes formes, dont le sel de mer (le chlorure de sodium, NaCl). Dans la fournaise de l'atmosphère d'Isis, le sodium est à l'état gazeux. C'est le seul élément, dans les atmosphères planétaires, capable d'absorber la lumière visible (la plupart des autres atomes absorbent plutôt dans l'ultraviolet). En fait, dès les premières études sur l'atmosphère des jupiters chauds – le nom donné aux planètes géantes gazeuses chaudes –, les modèles théoriques prévoyaient que ces planètes seraient très sombres dans le visible, car elles absorberaient, à cause du sodium, plus de 90 pour cent de la lumière stellaire incidente. Cet élément absorbe, en

■ LES AUTEURS



Frédéric PONT est professeur de sciences planétaires à l'Université d'Exeter, au Royaume-Uni.

Thomas EVANS est doctorant à l'Université d'Oxford, au Royaume-Uni.

■ BIBLIOGRAPHIE

F. Pont, *Alien skies - planetary atmospheres from Earth to exoplanets*, Springer, 2014.

T. Evans et al., *The deep blue color of HD 189733b : albedo measurements with Hubble space Telescope*, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 772, L16, 2013.

K. Heng, *Le climat des exoplanètes*, *Pour la Science*, n° 421, novembre 2012.

F. Pont et al., *Detection of atmospheric haze on an extrasolar planet*, *MNRAS*, vol. 385, pp. 109-118, 2008.

conditions de laboratoire, dans l'orange (à deux longueurs d'onde bien définies). Mais, sur un jupiter chaud, la pression, *via* les collisions et interactions des molécules, élargit les pics d'absorption, qui recouvrent alors une grande partie du spectre visible (voir l'encadré page 26). Ces planètes sont donc sombres avec une teinte mauve.

Le télescope spatial américain *Kepler*, conçu pour rechercher des exoplanètes et en particulier des planètes du type de la Terre, a mesuré la lumière réfléchie d'une dizaine de jupiters chauds, et montré que ces planètes absorbent beaucoup plus de lumière qu'elles n'en réfléchissent. Ces observations confirment l'hypothèse des jupiters chauds sombres, probablement à cause du sodium. Cependant, la caméra de *Kepler* ne distingue pas les longueurs d'onde, et ne peut donc pas déterminer les couleurs et ainsi confirmer la teinte mauve de ces planètes géantes gazeuses chaudes. Un cas remarquable de jupiter chaud est l'exoplanète TrES-2b, qui renvoie moins d'un pour cent de la lumière de son soleil ; cela la rend beaucoup plus sombre qu'aucune autre planète connue et même que les pigments les plus noirs utilisés en peinture. Le sodium seul ne permettant pas d'obtenir une planète aussi sombre, d'autres facteurs interviennent sans doute, mais on ignore lesquels.

Encore à partir des observations de *Kepler*, les astrophysiciens ont aussi trouvé une exception à la règle des jupiters chauds sombres. *Kepler-7b* est plutôt brillant avec un facteur de réflexion, ou albédo, d'environ 35 pour cent. Cette anomalie est