



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

NASA/JPL-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 1 000 °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



Alderson

attribuée à des nuages, mais leur nature est encore inconnue.

Le prototype des jupiters chauds est la planète Osiris, découverte en 1999 et abondamment observée depuis. Le rayon de son orbite est de sept millions de kilomètres, l'équivalent du septième de la distance entre Mercure et le Soleil. Sa révolution dure 3,5 jours, et sa température de surface est d'environ 1 440 kelvins (1 167 °C).

Des vapeurs de sodium sur Osiris et sur Isis

La signature spectrale du sodium dans l'atmosphère de cette planète a été détectée en 2002 avec le télescope *Hubble* (il s'agissait alors de la première observation de l'atmosphère d'une exoplanète). Le satellite canadien MOST a ensuite mesuré que la planète renvoyait moins de neuf pour cent de la lumière incidente. Ces deux éléments semblent confirmer qu'Osiris est une planète « mauve très sombre ».

Pourquoi détectons-nous alors du bleu vif pour Isis ? Comme pour Kepler-7b, la réponse est, selon nous, liée à la présence de nuages ou de brouillards. L'idée est que des nuages, présents dans la haute atmosphère, renvoient la composante bleue de la lumière de l'étoile, avant qu'elle ne pénètre dans la couche riche en sodium. Si les nuages sont composés de particules très fines, ils vont réfléchir très efficacement la lumière bleue, par le phénomène de « diffusion Rayleigh », qui est aussi à l'origine de la couleur bleue du ciel de la Terre (voir l'encadré page 26).

En quoi consiste la diffusion Rayleigh ?
 Lorsqu'on a des molécules ou des particules de taille inférieure à la longueur d'onde de la lumière incidente, la probabilité de diffusion dépend de la longueur d'onde : elle est inversement proportionnelle à la puissance 4 de la longueur d'onde. Ainsi, la lumière bleue (longueur d'onde d'environ 400 nanomètres) est environ 16 fois plus diffusée que la lumière rouge (environ 800 nanomètres).

Sur Terre, la diffusion des rayons solaires par les molécules d'azote et d'oxygène est ainsi responsable du bleu du ciel (le bleu de ces rayons se diffusant dans l'atmosphère). Lors d'un coucher de soleil, les rayons traversent une épaisseur d'atmosphère plus importante ; le bleu de ces rayons est alors diffusé, ce qui laisse une teinte à dominante rouge.

Dans l'atmosphère d'un jupiter chaud, les nuages en mesure de se former sont très différents de ceux des planètes du Système solaire. En raison de la haute température, ils sont composés de gouttes ou billes microscopiques de matériaux très résistants à la chaleur. La liste des composés susceptibles de former des nuages dans des atmosphères très chaudes inclut les silicates (oxydes de silicium, la composante principale des roches sur notre planète), le fer, l'oxyde d'aluminium et l'oxyde de titane. Ces composés sont solides dans la croûte terrestre ; selon leur structure cristalline, ils forment du verre, du quartz, du saphir ou du rubis. Dans l'atmosphère d'un jupiter chaud, ces composés peuvent s'évaporer et se recondenser, probablement sous forme de globules liquides ou solides amorphes que l'on pourrait décrire comme des « gouttes de lave » ou une « pluie de verre ».

Avant de mesurer en 2012 la couleur d'Isis, nous avions déjà des indices de la présence de telles particules de verre dans l'atmosphère de cette planète. En 2007, avec le télescope *Hubble*, nous avions observé le passage de la planète devant son étoile – un « transit ». Or il existe une technique permettant de mesurer le spectre de la lumière de l'étoile filtrée par l'atmosphère de la planète (voir l'encadré page 25). Nous avons ainsi détecté la signature caractéristique de la diffusion Rayleigh, comme pour un coucher de soleil sur Terre. Nous pouvions donc conclure qu'il existe sur Isis des molécules ou de petites particules capables de diffuser la lumière.

D'après nos mesures de température, l'hypothèse la plus naturelle est la présence sur Isis d'un brouillard de petites particules (moins de 100 nanomètres de diamètre) constituées principalement de silicates sous forme de verre.

Cette observation ne permettait cependant pas de déterminer la couleur d'Isis. Les deux mesures portant sur l'émission lumineuse de l'atmosphère de cette planète, durant le transit et pendant l'éclipse, ont permis d'établir la présence d'un brouillard de particules de silicates, une « pluie de verre », dans la haute atmosphère.

Un brouillard de silicates sur Isis

Ce brouillard se formerait du côté sombre de la planète, c'est-à-dire la face qui n'est pas exposée et chauffée par l'étoile. Cet hémisphère serait toujours le même, en raison du phénomène de rotation synchrone : les forces de marée exercées par l'étoile finissent par faire coïncider les périodes orbitales annuelle et journalière (de la même façon que la Lune présente toujours le même côté à la Terre). La différence de température entre l'hémisphère éclairé et celui qui reste dans l'ombre est alors élevée : plusieurs centaines de degrés. Il en résulte des courants atmosphériques puissants – les modèles suggèrent que l'atmosphère d'Isis est le siège de vents soufflant à plus de 7 000 kilomètres par heure. Ces courants redistribuent la chaleur de la face éclairée vers l'autre côté et, par la même occasion, dispersent le brouillard de verre sur l'ensemble de la planète, d'où sa couleur bleu profond.

Isis est à ce jour la seule planète dont on a déterminé la couleur dans le visible. À la suite d'une grande campagne d'observations avec *Hubble*, dirigée par David Sing de l'Université d'Exeter, nous avons mesuré le « spectre du soleil couchant » pour dix jupiters chauds. Cela nous a permis d'avancer quelques hypothèses sur la diversité des atmosphères de ces planètes.

Il semble que le mauve sombre d'Osiris et le bleu profond d'Isis définissent les deux classes principales de jupiters chauds où règnent des températures d'environ 1 000 °C. La différence est liée à la présence ou l'absence d'un brouillard de silicates.

D'autres jupiters chauds ont des températures plus élevées, 2 000 °C et plus. À ces températures, les particules de silicate se vaporisent et le gaz résultant est transparent