

VRAI OU FAUX

Peut-on avoir une acuité visuelle supérieure à 10/10 ?

Oui : 10/10 est une norme et non un maximum. Les jeunes atteignent souvent 16/10, et les rapaces plus de 30/10.

Laurent et Julia Laloum



Lors d'un examen de la vision, l'ophtalmologiste attribue une note d'acuité visuelle en dixièmes. Que signifie cette note ? La valeur de dix dixièmes est-elle un maximum, comme on pourrait le croire ?

L'acuité visuelle caractérise la capacité à distinguer un petit objet. En pratique, on utilise deux types de tests. Ceux du premier type évaluent la reconnaissance des formes, ceux du second quantifient le pouvoir séparateur de l'œil (la capacité à voir que deux points plus ou moins distants sont séparés).

Dans l'œil, les rayons lumineux issus d'un point extérieur sont focalisés par la cornée et le cristallin. Quand ce système optique est sans défaut, ils convergent sur la rétine, où se trouvent les cellules photoréceptrices. Pour que l'on distingue deux points lumineux, il faut que leurs images se forment sur deux photorécepteurs non contigus, c'est-à-dire séparés par au moins un photorécepteur non stimulé. Dans le cas contraire, on ne perçoit qu'une tache indifférenciée.

Dans le système de notation français, l'acuité visuelle est l'inverse de l'angle minimal formé avec l'œil par deux points séparables. Cet angle est mesuré en minutes d'arc (une minute est égale à un soixantième de degré). La notation en dixièmes est une convention, qui varie selon les pays. Une acuité de 1/1 (ou 10/10) correspond à la capacité de distinguer deux points séparés de une minute d'arc. Cette échelle n'est donc pas linéaire : il y a bien moins d'écart

entre 10/10 et 9/10 (soit environ 1/1,11, c'est-à-dire que deux points doivent être séparés d'au moins 1,1 minute d'arc pour être distingués) qu'entre 1/10 (points séparés d'au moins 10 minutes d'arc) et 2/10 (soit 1/5, donc des points séparés d'au moins 5 minutes d'arc).

Une méthode pour diagnostiquer les maladies visuelles

L'acuité visuelle de 10/10, souvent comprise comme un maximum, est en fait juste une norme médicale : au-dessous, on considère qu'il y a un risque non négligeable pour que le sujet souffre d'une pathologie et qu'il faut la rechercher.

Les causes de mauvaise vision se comptent par centaines. Ce peut être juste une anomalie du système optique de l'œil, telle une myopie, corrigée par des lunettes, ou une « vraie » maladie, qui peut toucher la rétine, le nerf optique, le cerveau... Dans ce dernier cas, la vision reste mauvaise quelles que soient les lunettes. Quand un sujet est myope, par exemple, son acuité visuelle doit être mesurée avec correction pour diagnostiquer s'il souffre en plus d'une telle pathologie.

Notons qu'une note supérieure ou égale à 10/10 ne signifie pas forcément une absence de maladie. En effet, les tests d'acuité ne concernent que le champ visuel central, car on oriente automatiquement son œil pour y placer ce qu'on veut voir.

Cela permet de mieux distinguer les objets, l'acuité étant très faible dans le champ visuel périphérique : elle permet juste de compter le nombre de doigts à une distance de un mètre. Une différence notable entre un œil et un appareil photo est d'ailleurs que l'« acuité visuelle » de ce dernier reste souvent très bonne en périphérie.

Dès lors, les tests d'acuité ne détectent pas les maladies touchant les zones du système visuel responsables de la vision périphérique. Ainsi, un glaucome (une dégénérescence du nerf optique) ne perturbe la vision centrale qu'à un stade très avancé, où la cécité est proche. Avant ce stade, il est indétectable par les tests d'acuité.

Une acuité supérieure à 10/10 correspond donc simplement à une meilleure capacité à distinguer de petits objets que celle considérée comme la valeur standard d'un système visuel sain. Dans le test, les points peuvent être choisis aussi proches que l'on veut, et les distinguer correspondrait à une acuité visuelle de plus en plus grande. En pratique, il existe une limite physiologique liée à la taille et à la densité des photorécepteurs de l'œil. À partir de l'analyse de ces paramètres, on estime que de nombreux rapaces ont une acuité supérieure à 30/10. Chez l'homme, l'acuité visuelle des jeunes atteint souvent 12/10, et assez régulièrement 16/10. ■

Laurent LALOUM est neuro-ophtalmologiste et strabologue à Paris.
Julia LALOUM est ingénieure en électronique.
www.strabisme.fr

Les couleurs des exoplanètes

Frédéric Pont et Thomas Evans

La Terre est bleue, Mars est rouge... Et les planètes extrasolaires ? Isis est la première d'entre elles à avoir révélé sa couleur, livrant ainsi de précieux indices sur la composition de son atmosphère.

Le 20 décembre 2012, comme à chacune de ses révolutions, la planète Isis (surnom que nous avons donné à la planète HD 189733B) disparaît brièvement derrière son étoile, un soleil orange. Mais ce jour-là, elle le fait sous l'œil attentif du télescope spatial *Hubble*. Des astrophysiciens ont profité de cette éclipse pour déterminer la couleur de la planète : l'astre serait bleu profond, « bleu océan ». Cette teinte plus souvent associée à la Terre aurait une origine bien différente. Isis est une planète géante gazeuse, à l'image de Jupiter, et ne contient donc pas d'eau liquide. Et si l'or bleu n'est pas responsable de la couleur d'Isis, d'autres composés le sont. Une couche nuageuse à haute altitude composée de gouttes de verre serait la cause du bleu océan de cette planète. Plus généralement, les astrophysiciens espèrent exploiter la teinte des exoplanètes – les planètes situées hors du Système solaire – pour déterminer la composition de leur atmosphère et de leur surface.

Depuis une vingtaine d'années, grâce à différents télescopes, les chercheurs ont découvert plus de 1000 exoplanètes ; et plus de 3500 candidates sont en attente de confirmation. Ces corps sont nombreux dans la Voie lactée. Mais au-delà de leur simple recensement, les astrophysiciens veulent établir leurs caractéristiques (taille, densité, température, composition, climat) et comprendre leur formation. L'une des premières conclusions qu'il est possible de tirer de ces travaux est que les exoplanètes existent sous de nombreuses formes, dont certaines sont

1. CETTE EXOPLANÈTE BLEUE (vue d'artiste) pourrait ressembler à Isis, une géante gazeuse chaude dont la couleur est probablement due à des nuages de minuscules gouttes de verre.

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. Sato/VVV 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

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



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

dans le visible. Mais dans ces conditions, les modèles prévoient que les planètes sont sombres et grises, en raison de l'importante absorption de la lumière visible par les vapeurs d'oxyde de titane (qui précipitent en grains solides à température plus faible, d'où leur absence dans la haute atmosphère d'Isis et d'Osiris par exemple).

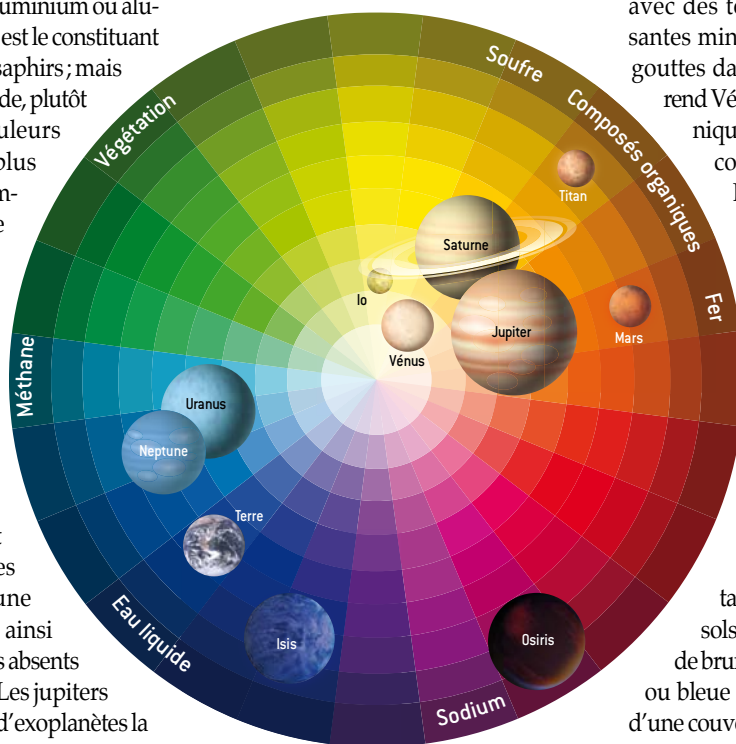
Nous n'avons observé aucune trace d'oxyde de titane dans les spectres des planètes de notre échantillon. Mais nous mesurons l'effet de nuages, dont la signature spectrale pourrait s'expliquer par un autre composé qui résiste bien aux hautes températures, l'oxyde d'aluminium ou alumine (Al_2O_3). Ce composé est le constituant principal des rubis et des saphirs ; mais dans une atmosphère chaude, plutôt que des cristaux aux couleurs pures, on s'attend à de plus prosaïques globules ressemblant à des microbilles de verre sale. À ce stade de nos observations, toutes ces hypothèses restent préliminaires et pourraient être modifiées à la lumière de nouvelles observations et de nouveaux modèles.

Deux décennies de découvertes nous ont appris que les exoplanètes sont nombreuses, et d'une grande diversité. Il existe ainsi plusieurs types de planètes absents de notre Système solaire. Les jupiters chauds forment la famille d'exoplanètes la plus connue, mais on cherche activement des superterres (des planètes telluriques plus grandes que la Terre). Quelques planètes cinq à dix fois plus massives que la Terre en sont peut-être, mais la composition de leur atmosphère et de leur surface reste à déterminer. Des arguments théoriques suggèrent qu'il existe aussi des planètes océan (recouvertes d'eau), ou des planètes de lave (planètes rocheuses trop chaudes pour que le magma se solidifie).

Le travail minutieux de caractérisation de chacune des exoplanètes découvertes prend du temps. L'une des conclusions les plus remarquables de la moisson d'observa-

tions de ces dernières années est que toutes les combinaisons plausibles de tailles et d'orbites de planètes semblent réalisées à travers la galaxie. Pour les planétologues, qui, pendant longtemps, ont dû se contenter des planètes du Système solaire, les mondes extrasolaires constituent un immense continent à explorer.

Les jupiters chauds sont les planètes les plus connues et les mieux étudiées, car ce sont les plus faciles à observer. Les méthodes de détection par transit et par mesure de la vitesse radiale favorisent en



effet la découverte de planètes massives, de grande taille et proches de leur étoile.

Dans la méthode du transit, les astrophysiciens recherchent une baisse périodique de la luminosité d'une étoile, qui correspond au passage régulier de la planète devant l'étoile. La méthode de la vitesse radiale consiste à détecter un léger déplacement de l'étoile sous l'effet de la force gravitationnelle liant le soleil et la planète. Ces méthodes de détection favorisent les jupiters chauds et, dans une moindre mesure, les superterres. Mais les astrophysiciens gardent comme objectif plus lointain de découvrir des planètes comparables à la Terre en taille et en composition. Ils ne disposent encore d'aucune observation pertinente de ce type. Les

planétologues ont néanmoins imaginé les conditions atmosphériques de ces hypothétiques exoplanètes à partir de modèles théoriques et des enseignements tirés du Système solaire.

Traquer des superterres et des exoterres

Il est probable que les nuages soient le facteur déterminant dans la couleur des exoterres, des planètes similaires en taille à la Terre. En simplifiant, ces astres dotés de nuages seront brillants et plutôt blancs, avec des teintes dépendant de composantes mineures qui peuvent colorer les gouttes dans les nuages : ainsi, le soufre rend Vénus jaunâtre, les molécules organiques teintent en rouge les nuages, comme sur Jupiter par exemple. En l'absence de nuages, une exoterre serait plus sombre à cause des roches volcaniques, des océans ou d'une éventuelle végétation.

Mais il n'est pas garanti que les couleurs de la surface ou des océans d'une exoterre soient aussi clairement visibles de l'espace que pour la Terre. L'atmosphère sera d'autant moins transparente que son épaisseur sera importante. En outre, la présence d'aérosols pourrait recouvrir une exoterre de brume et lui donner une teinte jaune ou bleue qui serait difficile à distinguer d'une couverture nuageuse. C'est ainsi que Titan, un satellite de Saturne, apparaît comme une boule orangée à cause du brouillard d'hydrocarbures qui voile son atmosphère.

Certains spécialistes pensent d'ailleurs que la transparence actuelle de notre atmosphère est liée à la présence abondante d'oxygène. Cet élément oxyderait et détruirait les aérosols, nettoyant ainsi l'atmosphère. Comme l'oxygène est associé à la photosynthèse et est une composante récente (à l'échelle de l'âge du Système solaire) de l'atmosphère terrestre, il est possible que la planète n'ait pas été bleue dans le passé, mais peut-être jaune, malgré la présence d'océans étendus.

Par ailleurs, sur Terre, la présence de plantes réalisant la photosynthèse influe sur la couleur globale de la planète. L'abondance des végétaux sur les continents donne à notre planète une petite

2. CETTE PALETTE DE COULEURS

illustre la variété des couleurs que revêtent les planètes, en fonction de leur composition et des conditions atmosphériques.

touche de vert. L'effet le plus détectable sur le spectre global est l'atténuation de la lumière rouge, absorbée par les molécules de chlorophylle.

Certains chercheurs ont suggéré de détecter la présence de vie sur une éventuelle exoterre par l'effet de la végétation sur le spectre lumineux. Toutefois, cette empreinte est minime même pour la Terre. De plus, rien ne garantit que la photosynthèse opérée par les plantes terrestres soit universelle. Par exemple, la nature de l'étoile pourrait influencer sur la partie du spectre la plus intéressante à exploiter par les organismes vivants. Et,

même sur Terre, certains micro-organismes ont développé des métabolismes qui ne font pas appel au rayonnement solaire.

La présence de glace pourrait aussi déterminer en partie l'aspect des exoterres. On sait aujourd'hui que la Terre elle-même a passé de longues périodes dans un état de glaciation globale (des époques nommées « Terre boule de neige »). Notre planète aurait été beaucoup plus blanche et claire (ce n'est cependant pas une certitude, car la glace et la neige peuvent être salées par des poussières volcaniques, comme la surface des lunes glacées Europe et Ganymède).

Pour étudier les couleurs d'une exoterre, une approche différente de celles que nous avons mentionnées serait de mesurer les changements de luminosité et de couleur pendant que la planète tourne sur elle-même. On pourrait ainsi reconstruire grossièrement la carte des couleurs de la planète en fonction de la longitude.

En 2009, une équipe d'astrophysiciens américains a utilisé la sonde spatiale EPOXI (*Extrasolar Planet Observation and Deep Impact Extended Investigation*) pour mesurer la couleur de la Terre depuis un point très éloigné. La planète apparaît comme un simple

COMMENT OBSERVER LA COULEUR DES EXOPLANÈTES ?

L'étude de la planète Isis illustre parfaitement les techniques mises en œuvre pour déterminer la couleur d'une exoplanète et la composition de son atmosphère.

En 2007, des premiers indices sur son atmosphère ont été obtenus pendant le transit de la planète devant son étoile. Cinq ans plus tard, la couleur a été déterminée à l'occasion de l'éclipse de la planète, lors de son passage derrière l'étoile (a). La planète est en orbite autour de son

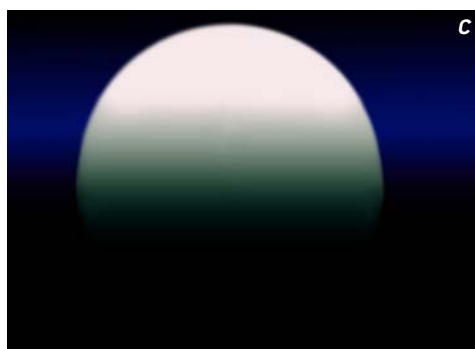
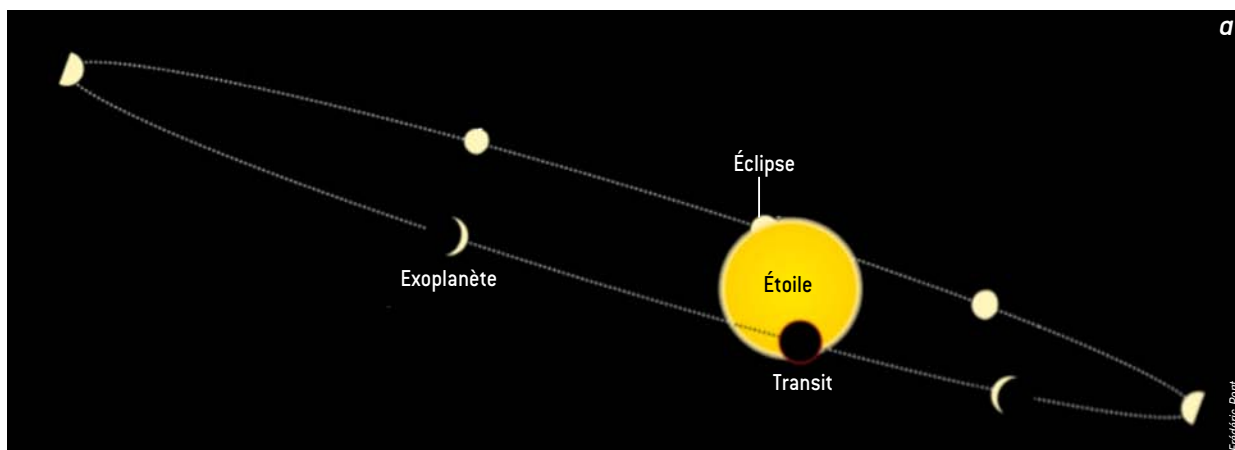
étoile dans un plan que l'on voit de la Terre presque sur la tranche. Ainsi, lors d'un transit, la planète passe devant son étoile et bloque une partie de sa lumière. La détection des transits est une des techniques utilisées par les astrophysiciens pour découvrir les exoplanètes. Une baisse faible, mais périodique, de l'intensité lumineuse de l'étoile indique le passage d'une planète en orbite.

Lors du transit, une petite fraction de la lumière de l'étoile traverse l'at-

mosphère de la planète. Le spectre de ces rayons lumineux est alors modifié, de la même façon que sur Terre la lumière solaire devient rouge lors d'un coucher de soleil, par diffusion Rayleigh de la lumière par les molécules atmosphériques. Les chercheurs ont ainsi déduit que la diffusion Rayleigh était à l'œuvre dans l'atmosphère d'Isis. Cela livre des indices sur la composition atmosphérique. Cette technique a été utilisée sur d'autres jupiters chauds, tels Osiris et WASP-12b,

dont les couchers de « soleil » sont simulés sur les figures b et c.

Lors d'une éclipse, la lumière réfléchie par la planète est occultée. Ainsi, en comparant le spectre de l'étoile avec ou sans la composante réfléchie par la planète, on peut déduire quelles longueurs d'onde émergent de la planète, ce qui correspond à sa couleur. Les mesures sont difficiles, car la lumière réfléchie par la planète correspond à environ 1/10 000^e de la luminosité totale.

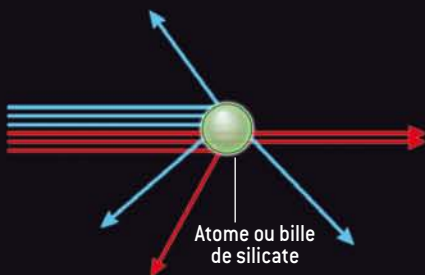


LORS DU PASSAGE de la planète devant son étoile, pendant un transit (a), la lumière stellaire est plus ou moins diffusée selon la longueur d'onde et l'épaisseur d'atmosphère traversée. On observe un « coucher de soleil ». Le phénomène a été simulé pour plusieurs jupiters chauds, ici pour Osiris (b) et WASP-12b (c).

Les principaux processus qui déterminent la couleur d'une exoplanète

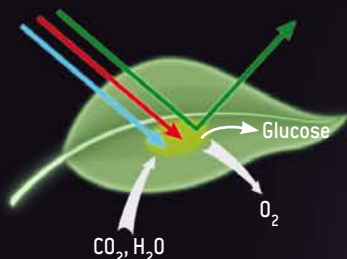
1. La diffusion Rayleigh

Ce phénomène explique la couleur bleue du ciel terrestre. Les molécules de gaz sont de taille inférieure aux longueurs d'onde de la lumière visible et diffusent ce rayonnement, en raison des interactions du champ électromagnétique de la lumière avec les nuages électroniques des molécules. La probabilité de diffusion est inversement proportionnelle à la puissance 4 de la longueur d'onde. Ainsi, la composante bleue de la lumière est 16 fois plus diffusée que la partie rouge. Sur les jupiters chauds, des brouillards de silicates (des billes de 100 nanomètres de diamètre) produisent une diffusion Rayleigh et donnent une teinte bleue à la planète.



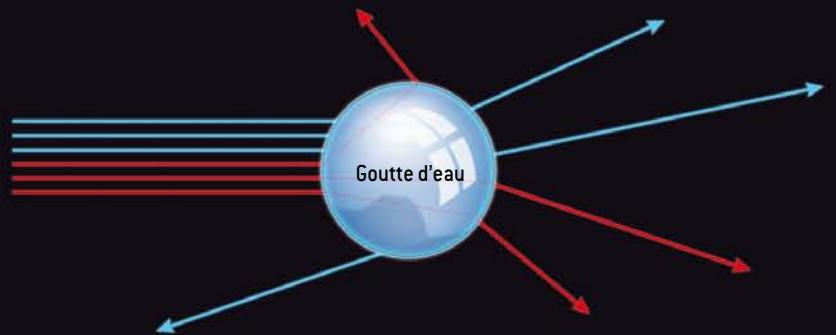
3. La photosynthèse

Sur Terre, de nombreux végétaux utilisent la lumière du Soleil pour leur métabolisme. Le processus est celui de la photosynthèse pour lequel la chlorophylle, un pigment, joue un rôle crucial. Cette molécule absorbe essentiellement le rayonnement bleu et rouge, d'où la couleur verte caractéristique des plantes. L'énergie lumineuse participe à des processus chimiques d'oxydation et d'hydrolyse de l'eau, puis les produits de la réaction sont utilisés pour produire du glucose. La végétation verte contribue (de façon limitée) à la couleur de la Terre. Elle est surtout notable par l'absorption du rouge. La présence éventuelle de photosynthèse sur une exoplanète influencerait ainsi sur sa couleur.



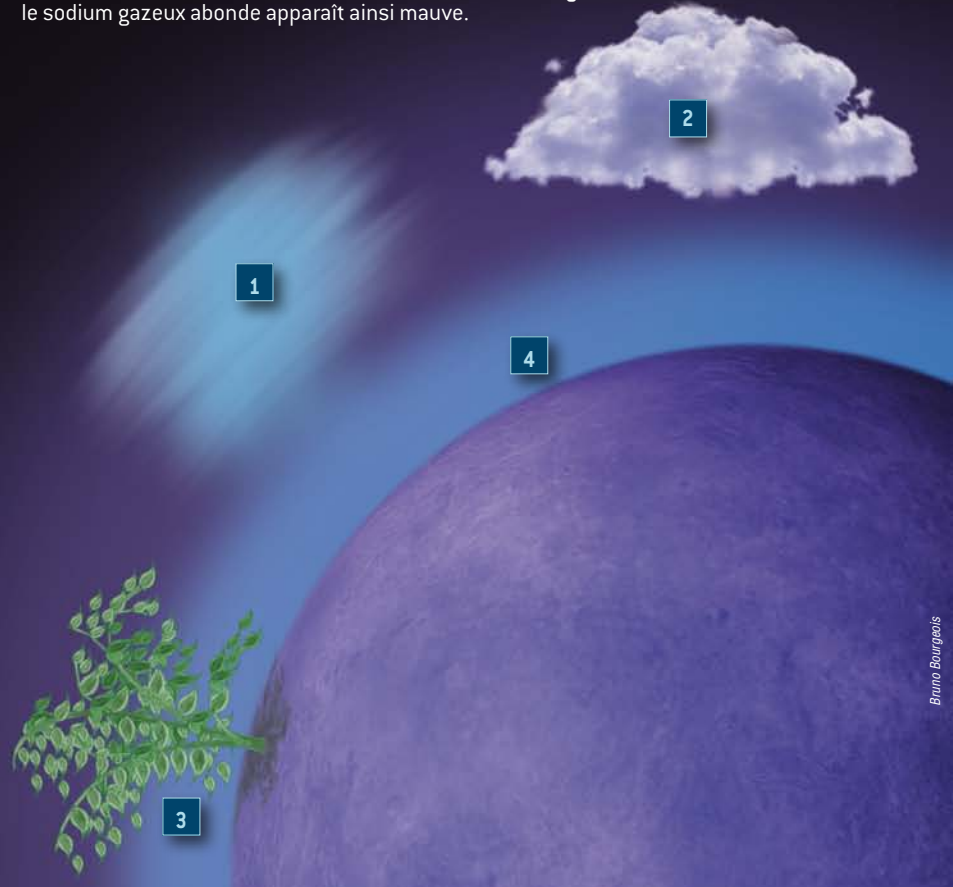
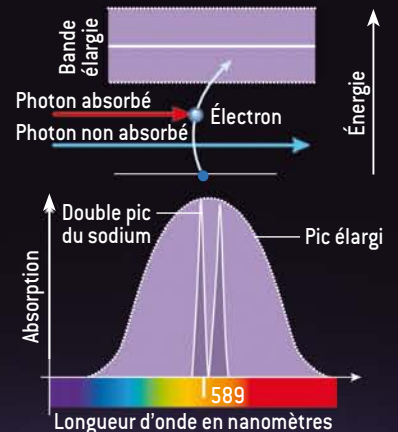
2. La diffusion de Mie

Ce processus est similaire à la diffusion Rayleigh, mais correspond à la diffusion de la lumière incidente sur des particules sphériques de taille supérieure à la longueur d'onde lumineuse. Le rayonnement est diffusé surtout dans la direction de propagation de l'onde incidente et l'effet dépend peu de la longueur d'onde. La diffusion de Mie explique par exemple pourquoi les nuages terrestres sont blancs. La présence de nuages sur une exoplanète pourrait donner lieu à la diffusion de Mie. Son albédo (ou facteur de réflexion, le rapport de l'énergie stellaire réfléchie sur l'énergie stellaire reçue) serait alors supérieur à celui d'une planète dépourvue de nuages. De tels nuages pourraient expliquer pourquoi certains jupiters chauds sont plus lumineux que d'autres.



4. L'absorption

Les photons, les particules de lumière, peuvent être absorbés par un électron de l'atome. L'électron passe alors d'un niveau d'énergie à un autre plus élevé. L'énergie du photon doit correspondre exactement à l'écart d'énergie entre les deux niveaux pour assurer la transition de l'électron. Par exemple, le sodium gazeux a deux transitions possibles dans le visible. Il absorbe de la lumière orange. Mais dans l'atmosphère à haute pression d'un jupiter chaud, les pics d'absorption s'élargissent. Le sodium absorbe alors une large bande de la lumière visible. Une planète où le sodium gazeux abonde apparaît ainsi mauve.



point dans l'espace, et on se retrouve dans une situation similaire à l'observation des exoplanètes. Or les mesures de luminosité d'EPOXI permettent de reconstruire dans les grandes lignes la distribution des océans et des continents sur Terre en fonction de la longitude, ainsi que l'évolution de la couverture nuageuse globale.

Cette expérience pourrait être appliquée aux exotérres. Les chercheurs mesureraient la distribution globale et longitudinale des océans, des continents et de la couverture nuageuse, simplement à partir des variations de couleur accumulées au fil du temps. Dans le Système solaire, la Terre est unique non seulement par sa couleur bleue, mais aussi par les fortes variations de ses couleurs, entre les différentes parties du globe et en fonction des mouvements rapides des nuages. Toutes les autres planètes ont une couverture homogène, à l'instar de Vénus et Neptune, ou la répartition des couleurs est stable, comme sur Mars et Jupiter.

Les deux facteurs d'évolution des couleurs (les variations en longitude et les changements rapides au cours du temps) sont des indicateurs intéressants pour la recherche

de vie à la surface d'une planète. Les variations en longitude pourraient révéler une alternance d'océans et de continents, donc le signe d'une activité tectonique, qui participe au cycle du carbone avec des échanges entre le dioxyde de carbone atmosphérique et les roches riches en carbonates. Certains chercheurs avancent qu'un tel cycle peut participer au développement de la vie, mais cela reste très débattu. Enfin, la variation rapide des couleurs signe la présence de nuages et du cycle potentiel de l'eau avec la présence d'eau liquide, essentielle à la vie telle que nous la connaissons.

Observer une exoterre ?

Mesurer les couleurs d'une exoterre avec la méthode des éclipses et des transits sera très ardu. Une planète de cette taille est bien plus petite qu'un jupiter chaud (elle projette un disque 100 fois plus petit), et ces méthodes atteignent alors leur limite. À cette échelle de précision, les étoiles varient constamment en couleur et en intensité, de par l'activité magnétique sur leur surface bouillonnante. Ce signal

complexe risque de cacher la contribution d'une planète de petite taille.

L'autre option est de tenter d'observer la planète directement. Une exoterre sera plus distante de son soleil qu'un jupiter chaud, mais le problème subsiste, comment distinguer... le ver luisant à côté du phare ? Ces dernières années pourtant, les techniques nécessaires à ce type d'observations ont connu de nets progrès. Plusieurs planètes géantes ont été observées directement, mais seulement dans l'infrarouge. Seule l'émission thermique de la planète est observée, et pas du tout la lumière réfléchie. Ainsi, on est encore loin de pouvoir mesurer de cette façon la couleur d'une exoterre, mais, en théorie, l'approche est prometteuse.

La mesure de la couleur de la planète Isis nous permet de mieux comprendre les jupiters chauds, ce qui aide à nous les représenter et à nous les rendre plus proches. Ce résultat constitue un pas de plus vers l'objectif captivant qu'est l'exploration des atmosphères d'exoplanètes de divers types – l'exploration de nouveaux mondes, dont certains abritent peut-être la vie. ■



LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

{ Partagez les savoirs }

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "Les rendez-vous du Muséum"

PROGRAMMATION AUDIOVISUELLE

Samedi 5 avril — 15h30

L'étrange créature du lac noir

Réal. : J. Arnold, États-Unis, 1954, 79 min., VOSTF - Séance jeune public, à partir de 8 ans

MÉTIERS DU MUSÉUM

Dimanche 27 avril — 15h

Vétérinaire à la Ménagerie

N. Chaï, vétérinaire en chef

UNE EXPO / DES DÉBATS

Lundi 28 avril — 18h

Exposition Nuit : A-t-on tous peur de la nuit ?

Trois exemples amérindiens

A.-G. Bilhaut, anthropologue, Centre Enseignement et Recherche en Ethnologie Amérindienne

G. Bordin, ethnographe, Centre de Recherche sur l'Oralité

J. Galinier, ethnologue, CNRS

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire

La reconnaissance visuelle chez les insectes

Elizabeth Tibbetts et Adrian Dyer

Reconnaître les traits faciaux de ses congénères ne requiert pas un cerveau complexe. Certains insectes sont étonnamment doués pour cette tâche.

L'«intelligence» des guêpes et des abeilles paraît sans commune mesure avec celle des hommes. Elles construisent des nids, fouillent les environs à la recherche de nectar, élèvent leur progéniture, puis meurent, leur vie ne durant en général qu'une année tout au plus. Toutefois, certaines de ces espèces présentent au moins une capacité cognitive rivalisant avec celle des hommes et d'autres primates : elles reconnaissent la tête de leurs congénères.

Les membres d'une espèce de guêpes sont capables de percevoir et de mémoriser les marques spécifiques de la tête d'une congénère et d'utiliser ces informations pour distinguer les individus lors d'interactions ultérieures, tout comme les êtres humains naviguent dans leur environnement social en apprenant à reconnaître les visages de leurs proches, amis et collègues. De plus, certains insectes, qui d'ordinaire ne mémorisent pas visuellement leurs congénères dans la nature, peuvent être entraînés à le faire, et parfois même apprendre à distinguer des visages humains.

On entend souvent dire que c'est la croissance du cerveau au fil de l'évolution qui a permis aux individus des sociétés complexes d'acquérir la capacité d'apprentissage et de mémorisation. Dès lors, comment est-il possible que des animaux dotés d'un cerveau un million de fois moins volumineux que le nôtre aient aussi

1. UNE TÊTE DE GUÊPE, telle que pourrait la voir une autre guêpe, dont les yeux sont composés de nombreux éléments indépendants.