

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).

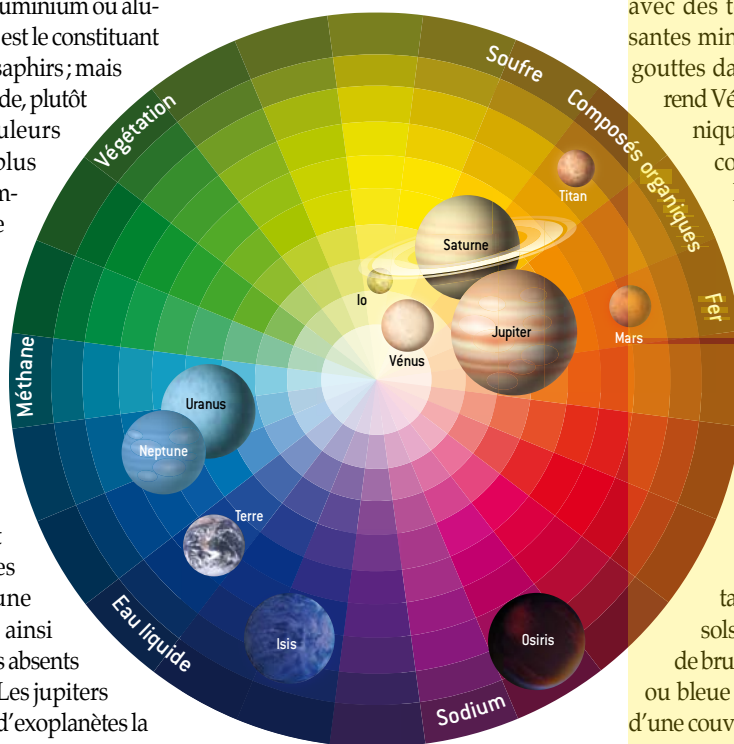
Nous n'avons observé aucune trace d'oxyde de titane dans les spectres des planètes de notre échantillon. Mais nous mesurons l'effet de nuages, dont la signature spectrale pourrait s'expliquer par un autre composé qui résiste bien aux hautes températures, l'oxyde d'aluminium ou alumine (Al_2O_3). Ce composé 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

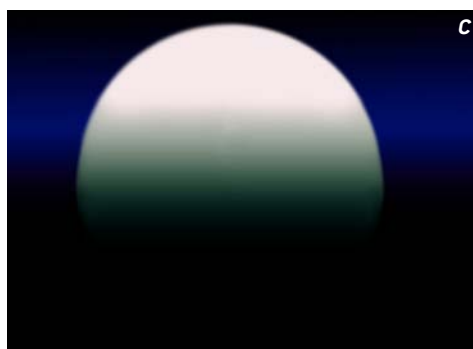
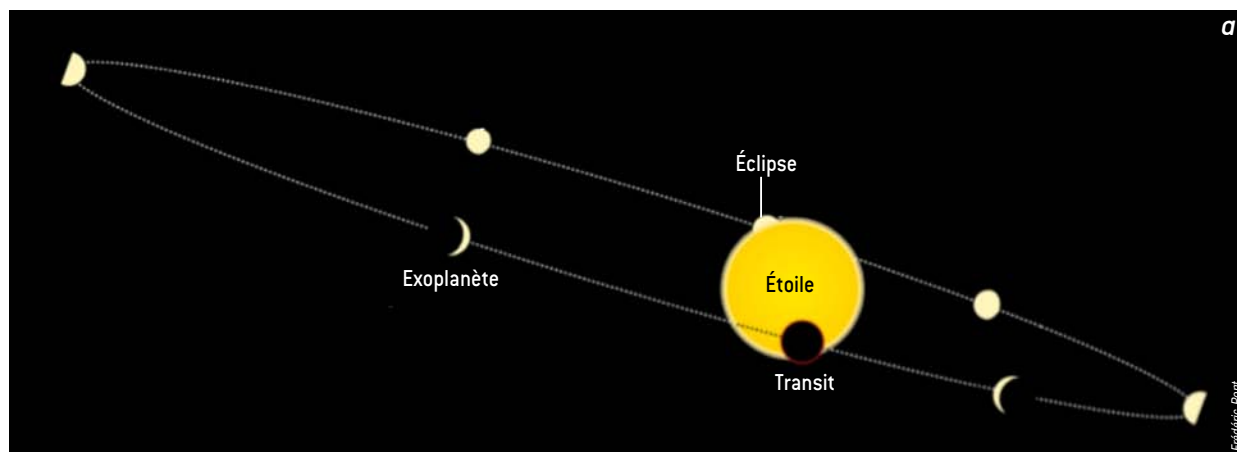
étoile dans un plan que l'on voit de la Terre presque sur la tranche. Ainsi, lors d'un transit, la planète passe devant son étoile et bloque une partie de sa lumière. La détection des transits est une des techniques utilisées par les astrophysiciens pour découvrir les exoplanètes. Une baisse faible,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