

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 Ganimède).

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

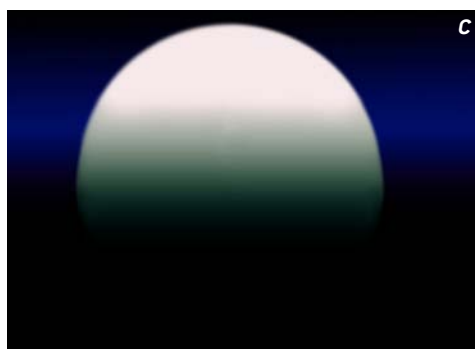
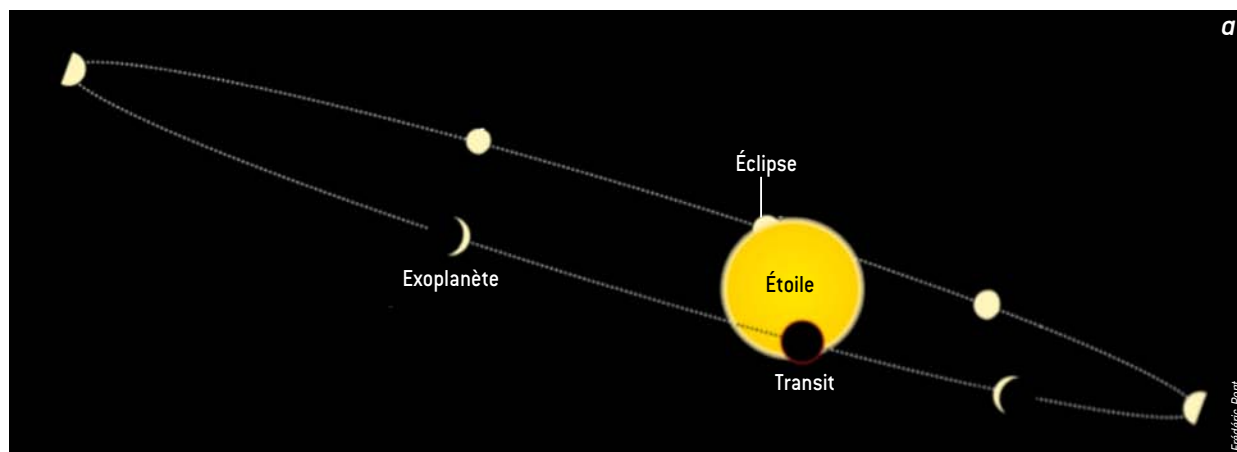
étoile dans un plan que l'on voit de la Terre presque sur la tranche. Ainsi, lors d'un transit, la planète passe devant son étoile et bloque une partie de sa lumière. La détection des transits est une des techniques utilisées par les astrophysiciens pour découvrir les exoplanètes. Une baisse faible,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

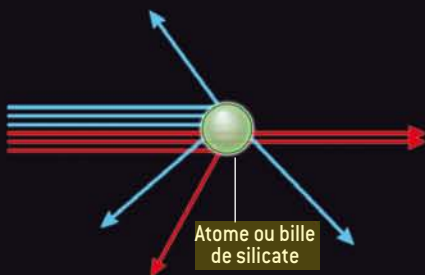


LORS DU PASSAGE de la planète devant son étoile, pendant un transit (a), la lumière stellaire est plus ou moins diffusée selon la longueur d'onde et l'épaisseur d'atmosphère traversée. On observe un « coucher de soleil ». Le phénomène a été simulé pour plusieurs jupiters chauds, ici pour Osiris (b) et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

Les principaux processus qui déterminent la couleur d'une exoplanète

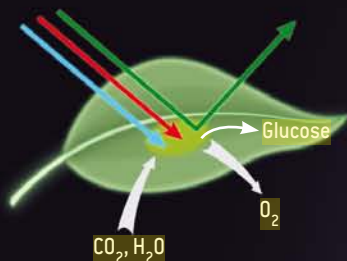
1. La diffusion Rayleigh

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.



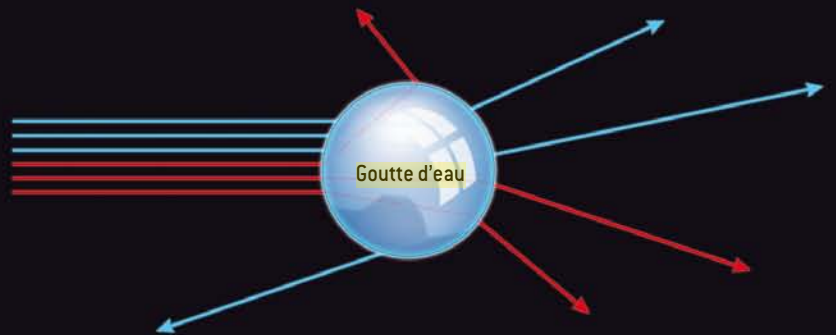
3. La photosynthèse

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.

