

ter, elle est trop basse pour que l'eau puisse exister sous forme de vapeur. On peut en conclure que l'eau présente à l'intérieur des planètes géantes ne peut remonter vers l'extérieur et passer de la troposphère à la stratosphère, car la tropopause joue le rôle de «piège froid». D'où provient alors la vapeur d'eau de la troposphère? Elle est nécessairement d'origine externe. Deux hypothèses ont été avancées : la première est que l'eau stratosphérique proviendrait d'un flux ininterrompu de poussières météoritiques ou micro-météoritiques qui balaierait en permanence le système solaire extérieur ; selon la seconde, elle proviendrait des anneaux et des satellites glacés. La question reste, aujourd'hui, ouverte. De nouvelles observations, notamment celles du satellite européen *FIRST*

(prévu pour 2007) devraient apporter des réponses.

Nous connaissons une autre circonstance où de l'eau a été apportée à la stratosphère de Jupiter. En juillet 1994, la comète Shoemaker-Levy 9 est entrée en collision avec la planète géante. Nous le verrons, l'eau est un composant important des comètes. Une vingtaine de fragments cométaires se sont enfoncés dans l'atmosphère ; ils ont tous provoqué une énorme explosion, et éjecté de la matière jusqu'à une altitude de plus de 3 000 kilomètres. Après volatilisation, l'oxygène de la comète s'est recombinaison avec les gaz de l'atmosphère jovienne pour former de l'eau et du monoxyde de carbone dans la stratosphère. Dans ce milieu, la durée de vie de la molécule d'eau est assez courte, de sorte que la vapeur d'eau n'a été

observée qu'au moment des impacts. En revanche, les molécules de monoxyde de carbone ont une très longue durée de vie, et elles sont restées observables dans la stratosphère jovienne pendant plus d'un an. De tels événements sont rares ; on estime qu'il s'en produit un à deux par millénaire. Selon les archives de l'Observatoire de Paris, la précédente collision d'une comète avec Jupiter aurait été observée par Cassini, au XVII^e siècle.

La glace des anneaux et des satellites extérieurs

Le voisinage des planètes géantes, lui aussi, renferme de l'eau. À l'exception de Io, les satellites galiléens (ainsi nommés parce qu'ils ont été découverts par Galilée) présentent dans leurs

La détection de l'eau dans les astres

Pour détecter et analyser l'eau des astres, les astrophysiciens font appel à la spectroscopie dans un domaine de longueurs d'onde qui va de l'infrarouge au domaine radio (dont les longueurs d'onde sont supérieures à celles de l'infrarouge). Des mouvements de rotation et de vibration agitent les molécules d'eau, par exemple celles qui constituent la vapeur d'eau atmosphérique. Ainsi, une molécule d'eau a trois modes fondamentaux de vibration. Quand la molécule est dans l'un de ces trois modes, elle peut émettre et absorber des rayonnements dont les longueurs d'onde, dans l'infrarouge proche, sont comprises entre 2,6 et de 6,2 millimètres. C'est pourquoi le rayonnement provenant d'un astre dont l'atmosphère contient de l'eau présente une «signature spectroscopique» (une raie d'absorption) caractéristique de l'eau. Quand la molécule d'eau tourne sur elle-même, elle absorbe des rayonnements dont les longueurs d'onde s'étendent de l'infrarouge lointain (au-delà de 20 micromètres) jusqu'au domaine radio.

La glace d'eau a aussi des signatures spectroscopiques caractéristiques dans l'infrarouge proche (autour de 1,5, 2 et 3 micromètres) et plus loin dans le domaine infrarouge (autour de 44 micromètres). Notons que les signatures de la glace sont différentes suivant que celle-ci est cristalline (organisée en réseau d'atomes) ou amorphe (sans organisation). La glace que l'on trouve sur les objets du système solaire est souvent cristalline, ce qui indique que la température et la pression étaient relativement élevées au moment de sa formation ; celle du milieu interstellaire est, en revanche, plutôt amorphe.

La spectroscopie aux longueurs d'onde infrarouge et radio sert à étudier l'eau dans les planètes et dans les comètes, ou au-delà du système solaire. L'atmosphère terrestre est suffisamment transparente aux infrarouges proches pour que l'étude des signatures de la glace soit possible. En revanche, celle des signatures de la vapeur d'eau est délicate, car l'atmosphère terrestre contient elle aussi beaucoup de vapeur d'eau, et elle modifie le rayonnement

provenant des astres. Autre difficulté, le dioxyde de carbone absorbe le rayonnement infrarouge, notamment vers 4 et vers 15 micromètres. Ces phénomènes parasites rendent l'atmosphère terrestre opaque dans la quasi-totalité du domaine infrarouge moyen et lointain. Cette contrainte a longtemps empêché les astronomes de rechercher la vapeur d'eau dans les astres lointains, mais cela change depuis que des instruments sont placés en orbite.

Le 17 novembre 1995, l'Agence spatiale européenne a lancé le satellite ISO (de l'anglais *Infrared Space Observatory*). Afin de rendre les détecteurs d'ISO assez sensibles, les ingénieurs ont dû trouver un moyen de les maintenir en permanence à une température proche du zéro absolu (à environ 2 kelvins, soit -271 °C). L'ensemble du satellite, y compris le télescope, doit être lui aussi refroidi à une dizaine de kelvins, afin que les signaux parasites du rayonnement infrarouge ambiant, beaucoup plus intenses que celui des sources que l'on cherche à mesurer, ne viennent parasiter les résultats.

ISO a très bien fonctionné pendant plus de deux ans, jusqu'à évaporation complète de l'hélium liquide qui le refroidissait. Plusieurs découvertes spectaculaires ont été faites grâce au satellite. La présence de vapeur d'eau partout dans l'Univers est sans aucun doute la plus importante. Ainsi, les instruments d'ISO ont décelé dans les régions lointaines, où se forment les étoiles, dans les étoiles évoluées et dans les galaxies lointaines. ISO a aussi recherché de l'eau dans de nombreux endroits du système solaire et en a découvert dans les planètes géantes, et dans les comètes. Les informations recueillies complètent les observations des planètes géantes faites à bord des sondes spatiales planétaires, telles que *Voyager* pour les planètes géantes, *Galileo* et *Cassini* pour Jupiter, *Giotto* et *Vega* pour la comète de Halley. Elles complètent aussi les observations des planètes telluriques faites par les sondes *Martiner 9*, *Viking*, *Phobos* et *Mars Global Surveyor* pour Mars, et *Pioneer Venus*, *Venera* et *Galileo* pour Vénus.

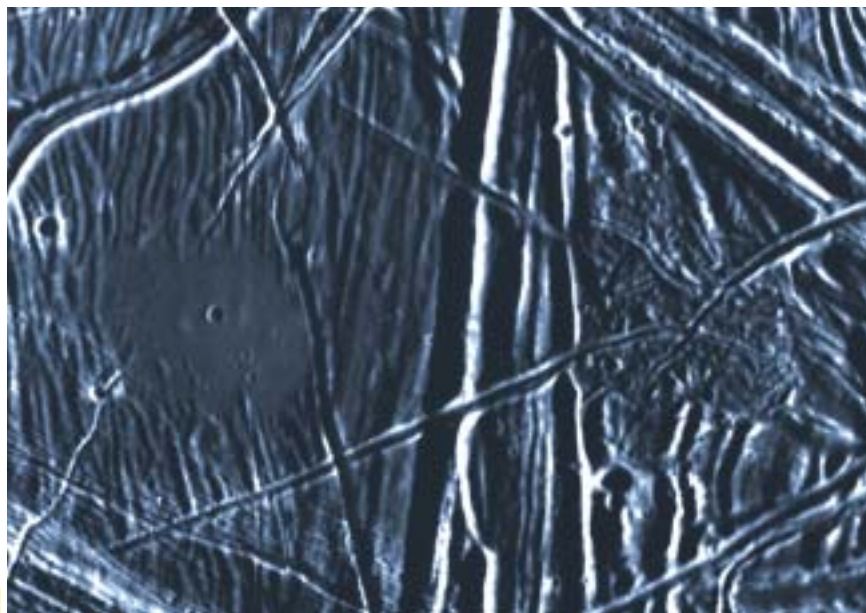


ISO

spectres infrarouges les signatures spectrales de la glace d'eau ; ils ont également un albédo élevé, c'est-à-dire que, comme la neige ou la glace, ils réfléchissent ou diffusent la plus grande partie du rayonnement visible qu'ils reçoivent. Il en est de même pour les petits satellites et les anneaux de Saturne. À plus grandes distances du Soleil, l'albédo des petits corps est inférieur. Les satellites d'Uranus, et les anneaux d'Uranus et de Neptune sont sans doute constitués d'un mélange de glace d'eau, de clathrates (des hydrates cristallins) et de silicates ; de plus, leur surface semble contaminée par un constituant carboné, dû sans doute au bombardement de la surface par le rayonnement ultraviolet solaire ou par des particules énergétiques.

Le cas d'Europe, l'un des satellites de Jupiter, est remarquable. Les images prises par les sondes *Voyager*, puis *Galileo*, ont mis en évidence non seulement une surface de glace, mais des jeux de fractures linéaires : elles résulteraient de la présence, sous la surface de glace, d'un élément visqueux, voire liquide. Du fait de la proximité de Jupiter, et de la présence des autres satellites galiléens (Io et Ganymède), Europe est soumise à de forts effets de marée, c'est-à-dire à des forces différentielles qui s'appliquent en différents points du globe. Ces «marées» engendrent une énergie interne importante, qui suffit peut-être à maintenir liquide une partie de l'eau d'Europe. Y a-t-il un océan sous la surface d'Europe? Si oui, la vie pourrait-elle s'y être développée sous une forme primitive? La question passionne aujourd'hui les exobiologistes, ce qui a conduit la NASA à inscrire l'exploration spatiale d'Europe parmi les priorités de la prochaine décennie.

Présente partout à l'intérieur du système solaire, l'eau se trouve aussi dans le système solaire extérieur (c'est-à-dire au delà de Neptune). Dans ces régions éloignées se trouve la ceinture de Oort, un vaste réservoir de comètes situé à quelque 40 000 unités astronomiques du Soleil. Exceptionnellement, le jeu des perturbations gravitationnelles liées aux étoiles voisines et au milieu interstellaire local modifie la trajectoire d'une de ces comètes pour la faire pénétrer dans le système solaire. Là, une autre perturbation gravitationnelle, liée cette fois à la présence des planètes géantes, peut



7. EUROPE EST UN SATELLITE DE JUPITER couvert d'une couche de glace dont les structures irrégulières rappellent celles de la banquise. Toute sa surface est striée de fractures linéaires récentes (moins de 10 millions d'années), qui semblent résulter des mouvements d'une couche liquide ou visqueuse présente en sous-sol. Cette image a été prise par la sonde *Galileo* le 20 décembre 1996. Elle montre une surface de 13 kilomètres sur 18. Sur la gauche, le sol apparaît moins rugueux que sur la droite. L'eau semble avoir jailli d'une fracture, puis avoir gelé, créant une surface d'aspect lisse.

modifier à nouveau l'orbite de la comète pour en faire une comète périodique. Certaines d'entre elles sont célèbres : c'est le cas de la comète de Halley, connue depuis l'Antiquité et observée depuis le sol et l'espace, lors de sa dernière apparition, en 1986. Deux nouvelles comètes, inattendues cette fois, sont apparues plus récemment, Hyakutake, en 1996, et Hale-Bopp, en 1997.

Les comètes : des boules de neige sale...

Les comètes sont des objets de très petites dimensions (moins de dix kilomètres), constituées essentiellement de glaces et de poussières, qui évoluent sur des orbites héliocentriques, c'est-à-dire dont l'un des foyers est le Soleil. Elles passent la plupart de leur existence à grande distance du Soleil. Lorsque leurs trajectoires les rapprochent du Soleil, leurs surfaces s'échauffent : les glaces subissent un dégazage, et les poussières dont elles sont constituées s'échappent. C'est ainsi que se forme la queue des comètes, la «coma».

Dès le début des années 1950, l'astronome américain Fred Whipple avait prédit que les comètes étaient surtout constituées de glace d'eau. Il fallut cependant attendre l'apparition de la

comète de Halley, en 1986, pour avoir la confirmation expérimentale du modèle de la «boule de neige sale» : la bande de fluorescence de l'eau fut détectée dans le domaine infrarouge du spectre de la comète (2,7 micromètres). Plus récemment, cette observation a été renouvelée sur plusieurs autres comètes, notamment sur la comète Hale-Bopp, grâce au satellite ISO.

L'observation de l'eau dans les comètes est importante, car elle fournit des informations sur les conditions de formation de ces corps d'origine lointaine. Rappelons que en fonction de la valeur du spin des atomes d'hydrogène, la molécule d'eau prend deux formes différentes, la forme ortho et la forme para, dont les caractéristiques spectrales sont légèrement différentes. Or, l'eau possède une proportion ortho/para précise à chaque température. Les astrophysiciens déduisent donc de la proportion ortho/para cométaire, la valeur d'une certaine «température de spin», qui serait une indication de la température qui régnait à l'époque de la formation de la comète, voire de celle des embryons de comète qui lui ont donné naissance. ISO a ainsi mesuré la «température de spin» de deux comètes : Hale-Bopp et Hartley 2.

De grandes dimensions, puisqu'elle était visible à l'œil durant le