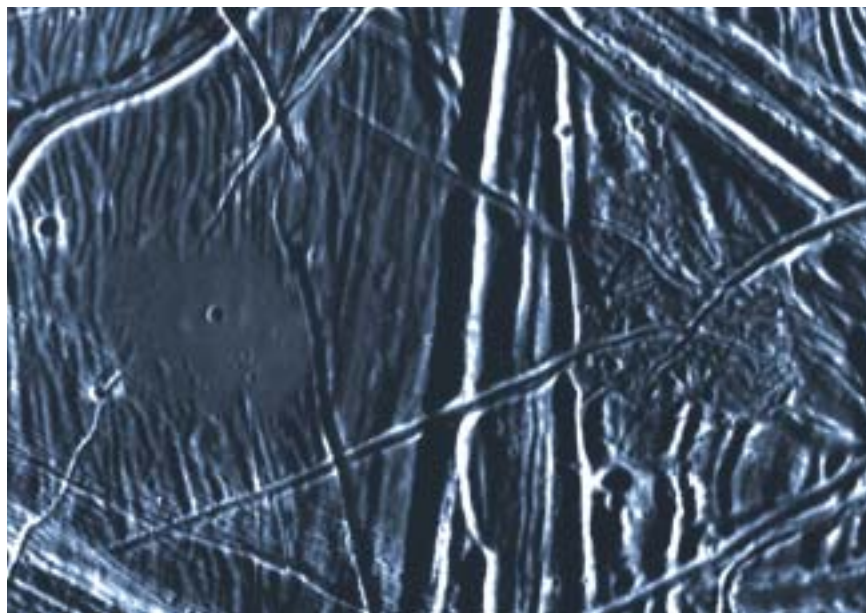


spectres infrarouges les signatures spectrales de la glace d'eau ; ils ont également un albédo élevé, c'est-à-dire que, comme la neige ou la glace, ils réfléchissent ou diffusent la plus grande partie du rayonnement visible qu'ils reçoivent. Il en est de même pour les petits satellites et les anneaux 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



8. LE NOYAU DE LA COMÈTE DE HALLEY, tel que la caméra de la sonde *Giotto* permit de l'observer en mars 1986. Bien que cette comète soit surtout composée de glace, elle réfléchit peu la lumière, car sa surface est recouverte d'un matériau carboné. Les observations dans l'infrarouge réalisées lors du passage de 1986 ont confirmé que la molécule d'eau y est bien la plus abondante.

printemps 1997, Hale-Bopp est une nouvelle venue dans notre ciel ; elle est particulièrement massive et brillante. Sa température de spin est égale à 25 kelvins. Hartley-2 est une comète périodique de dimensions plus ordinaires, dont la température de spin a été évaluée à 35 kelvins. Ces faibles valeurs sont un indice des conditions de température dans lesquelles se seraient formées ces comètes à grande distance du Soleil.

La mesure du rapport du deutérium et de l'hydrogène dans les comètes fournit une autre information sur la façon dont les objets du système solaire se sont formés. Les astrophysiciens cherchent notamment à découvrir l'origine des matières dont sont constituées les comètes. Proviennent-elles du milieu interstellaire ? De la nébuleuse protosolaire ? Le deutérium a été formé aux premiers âges de l'Univers par nucléosynthèse primordiale, en même temps que l'hydrogène et l'hélium ; depuis, il est en permanence détruit dans les étoiles, où la nucléosynthèse stellaire le convertit en hélium 3 (qui contient trois nucléons au lieu de deux, comme l'hélium ordinaire). Des mesures dans

les météorites ou dans le vent solaire nous livrent la valeur du rapport du deutérium et de l'hydrogène dans la nébuleuse solaire primitive : environ $2,5 \times 10^{-5}$. Les astrophysiciens ont aussi mesuré ce rapport dans le milieu interstellaire local (entre le Soleil et les étoiles voisines) à partir des transitions ultraviolettes du deutérium et de l'hydrogène, et ont trouvé une valeur comparable légèrement inférieure : $1,5 \times 10^{-5}$.

En revanche, ils ont observé que cette valeur était plus élevée dans le milieu interstellaire éloigné : certains types de molécules, HCN et H_2O notamment, y « concentrent » le deutérium ; le phénomène est dû à des réactions chimiques à basse température.

Les astrophysiciens ont voulu comparer ces valeurs à celles que l'on mesure sur une comète. Pour évaluer le rapport du deutérium et de l'hydrogène dans la comète de Halley, les astrophysiciens ont utilisé le spectromètre de masse de la sonde *Giotto* ; plus récemment, ils ont réalisé des mesures de la transition submillimétrique de la molécule HDO depuis la Terre pour les comètes Hyakutake et Hale-Bopp. Dans tous les cas, ils ont obtenu un rapport de quelque 3×10^{-4} , égal à environ dix fois la valeur protosolaire, et 20 fois celle du milieu interstellaire local. Cette valeur élevée indique que la composition chimique des comètes est proche de celle des glaces et des poussières du milieu interstellaire éloigné.

Ce résultat soulève une nouvelle question : comment peut-on expliquer l'écart entre les valeurs du rapport entre le deutérium et l'hydrogène dans les comètes et dans les océans terrestres ($1,5 \times 10^{-4}$) ? Cet écart nous apporte de nouveaux indices sur l'origine de l'atmosphère terrestre. En effet, si celle-ci provenait entièrement d'impacts météoritiques cométaires, comme l'hypothèse en a été avancée, son rapport deutérium sur hydrogène devrait être au moins égal à celui des comètes. En effet, on ne connaît aucun

mécanisme susceptible de diminuer ce rapport, tandis qu'il est possible, comme nous l'avons vu dans le cas de Mars et de Vénus, de l'augmenter par effet d'échappement gravitationnel. Cette observation indique que l'eau de l'atmosphère terrestre ne provient pas entièrement des comètes, mais résulte, au moins en partie, d'un dégazage du globe.

Du système solaire aux exoplanètes

La découverte récente de nombreuses planètes extérieures au système solaire ouvre une nouvelle dimension à l'étude de l'eau dans l'Univers. Nous l'avons vu, l'eau liquide a joué un rôle majeur dans le développement de la vie sur la Terre. Il est donc naturel de rechercher des formes de vie extraterrestres en priorité aux endroits où l'eau liquide peut exister (le satellite Europe, par exemple) ou a pu exister dans le passé (la planète Mars). Il en va de même avec les exoplanètes que nous découvrirons dans le futur : les astrophysiciens s'intéresseront en priorité à celles qui, *a priori*, peuvent porter de l'eau liquide. Cette possibilité n'existe que si l'orbite d'une exoplanète n'est pas trop proche de son étoile sinon, le rayonnement étant trop fort, l'eau s'échappe. Jusqu'à présent, les moyens de détection disponibles ont limité la chasse aux exoplanètes aux seules planètes géantes ; nous ne sommes pas encore en mesure de détecter les « exoterras ». Peut-être cette découverte sera-t-elle faite dans le cadre de la mission COROT, qui sera lancée par le Centre national d'études spatiales, en 2004 ; à moins qu'il ne faille attendre les missions suivantes, plus ambitieuses, que l'agence spatiale européenne et la NASA préparent pour la fin de la décennie. Si l'on découvre de l'eau liquide sur les planètes extérieures au système solaire, la biologie aura là un nouveau champ de recherche sur la vie en conditions extrêmes.

Thérèse ENCRENAZ est astrophysicienne au Département de recherche spatiale, DESPA, à l'Observatoire de Paris, à Meudon.

F. COSTARD, *La planète Mars*, collection Que sais-je, Presses Universitaires de France, 2000.

Les terres célestes, dossier hors-série *Pour la Science*, avril 1999.

Th. ENCRENAZ et P. COX, *L'eau dans l'Univers*, compte-rendu de l'Académie des Sciences, Paris, tome I, série IV, pp. 981-993, 2000.

www.sat-net.com/spnews/syssol.html