

donné les pressions qui régnaient à la surface des trois planètes au début de leur histoire, l'eau a sans doute existé plutôt sous forme gazeuse sur Vénus, sous forme liquide sur la Terre et sous forme solide sur Mars.

Sur Vénus, la présence en grande quantité de dioxyde de carbone et d'eau sous forme de vapeur a provoqué un effet de serre qui s'est rapidement amplifié. Le rayonnement solaire est absorbé en partie par la surface de la planète, qui s'échauffe et rayonne dans le domaine infrarouge, que l'eau et le dioxyde de carbone absorbent. Soumise à un intense rayonnement infrarouge, la basse atmosphère de Vénus s'est échauffée, puis, à son tour, elle a réchauffé la surface. L'enchaînement de ces phénomènes produit un effet d'emballlement, qui n'a été atténué par aucun effet modérateur, de sorte que la température de surface de Vénus s'est peu à peu élevée jusqu'aux 730 kelvins enregistrés aujourd'hui. En l'absence d'effet de serre, compte tenu de la distance de Vénus au Soleil, sa température de surface devrait plutôt être de l'ordre de 300 kelvins. La pression du dioxyde de carbone à la surface de Vénus étant probablement restée constante, comment peut-on expliquer la disparition de l'eau présente à l'origine, et dont la présence dans l'atmosphère est attestée par l'enrichissement en deutérium de la vapeur résiduelle? Selon les planétologues, la vapeur d'eau aurait été dissociée par le rayonnement solaire, puis se serait échappée dans l'espace.

La planète Mars a deux caractéristiques : d'une part, elle est plus éloignée du Soleil, par conséquent plus froide que les autres planètes telluriques ; d'autre part, elle est notablement plus petite et moins dense. Ainsi, sa masse ne représente que le dixième de la masse terrestre. Ces caractéristiques signifient qu'à son origine Mars contenait bien moins d'éléments lourds et radioactifs susceptibles de contribuer à son énergie interne (l'énergie interne d'une planète provient des désintégrations d'isotopes radioactifs). Or, l'énergie interne d'une planète conditionne, notamment, l'intensité de l'activité volcanique et l'importance du dégazage qui a alimenté l'atmosphère primitive des planètes telluriques.

Au début de l'histoire de Mars, la pression à la surface de la planète était sans doute inférieure à celles qui régnaient à la surface de la Terre et de Vénus ; toutefois, l'atmosphère primitive de la planète rouge était plus dense que celle qui règne aujourd'hui. La présence probable d'eau sous forme liquide – que nous avons déjà mentionnée – est un indice. Diverses découvertes récentes en ont fourni d'autres. Ainsi, le magnétomètre de la sonde *Mars Global Surveyor* a récemment détecté un champ magnétique fossile dans les terrains anciens de l'hémisphère Sud de la planète. Ce champ serait l'empreinte laissée par un ancien champ magnétique dipolaire, qui aurait existé au cours des premières centaines de millions d'années de la planète. Un tel champ était produit par la «dynamo» planétaire, c'est-à-dire par des mouvements de matière au sein d'un noyau fluide. Ainsi, Mars aurait eu une énergie interne supérieure à celle d'aujourd'hui, et par conséquent un noyau plus fluide à l'origine d'un champ magnétique planétaire conséquent. L'énergie interne de Mars, supérieure à celle d'aujourd'hui, aurait accru l'activité volcanique et ainsi facilité la formation d'une

atmosphère par dégazage. Les planétologues ont estimé la densité de cette atmosphère grâce à la mesure des rapports isotopiques de l'azote et des gaz rares, qui sont de bons indicateurs de l'échappement atmosphérique. Le rapport de l'azote 15 et de l'azote 14, notamment, est supérieur (d'un facteur 1,7) à celui de l'atmosphère terrestre ; une telle valeur indique que l'atmosphère primitive de Mars avait une pression proche du dixième de la pression de l'atmosphère terrestre. Cependant, le champ magnétique de Mars semble s'être éteint au bout d'un milliard d'années, sans doute en raison de la faible masse de la planète. L'atmosphère martienne se serait ensuite plus facilement «échappée» en l'absence de champ magnétique. En effet, un tel champ s'oppose à l'échappement gravitationnel en agissant sur les couches ionisées qui constituent les strates supérieures de l'atmosphère.

L'eau disparue de Mars

Qu'est devenue l'eau de Mars au cours de cette évolution? Une partie a sans doute été piégée sous la surface de la planète, sous forme de «pergélisol», c'est-à-dire d'un mélange de glace, de roches et de poussières gelé en permanence ; on trouve aussi du pergélisol sur Terre sous les latitudes élevées. Sa présence sur Mars est attestée par la forme des matériaux éjectés de certains cratères d'impact, lesquels témoignent de la présence d'un élément fluide ou liquide dans le sous-sol martien. En d'autres termes, lors de la chute de certaines météorites, tout semble s'être déroulé comme s'ils avaient frappé une surface boueuse plutôt que dure. Il n'est pas exclu que de l'eau liquide soit présente sous le pergélisol, à plusieurs kilomètres de profondeur. Sa recherche fera partie des objectifs des missions spatiales futures. Simultanément, les planétologues recherchent tous les indices d'une éventuelle vie fossile, reste de la vie qui a pu apparaître quand l'eau liquide était présente. L'exploration spatiale de Mars ne fait que commencer...

Les planètes géantes contiennent aussi de l'eau. Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune (de la plus proche à la plus éloignée du Soleil) sont des objets célestes très différents des planètes tel-



5. LES PLANÈTES GÉANTES sont d'immenses sphères d'hydrogène et d'hélium qui se sont formées à partir de la nébuleuse solaire. Elles contiennent toutefois des traces d'eau et de constituants plus lourds, qui leur sont notamment apportés par des comètes (voir page de droite). Toutes les planètes géantes ont des anneaux composés de particules de glace de toutes tailles. Certains de leurs satellites sont aussi couverts de glace.



6. LA COMÈTE SHOEMAKER-LEVY est entrée en collision, en juillet 1994, avec la planète Jupiter. Auparavant, elle avait éclaté en 21 fragments dont environ la moitié est visible ci-dessus. Ceux-ci sont tombés les uns après les autres sur la surface jovienne. Ils ont tous provoqué une explosion et l'élévation de panaches jusqu'à 3 000 kilomètres au-dessus de la surface. À droite, on distingue le cratère d'impact (de couleur noire) et son halo, dus à l'un des fragments ; le halo, observé quelque dix minutes après l'explosion, résulte de la retombée des matières éjectées dans l'atmosphère. L'astronome Cassini aurait aussi observé une telle collision au XVII^e siècle.

luriques, car leur diamètre est supérieur à 10 000 kilomètres. Elles sont surtout constituées d'hydrogène et d'hélium, mais des constituants plus lourds (CH_4 , NH_3 ,...) et de l'eau sont aussi présents à l'état de traces.

À des distances par rapport au Soleil supérieures à cinq unités astronomiques (une unité astronomique est égale au rayon moyen de l'orbite terrestre, soit près de 150 millions de kilomètres), la température était suffisamment basse pour que la plupart des molécules présentes dans la nébuleuse protosolaire (celle qui a donné naissance au Soleil) n'existent que sous forme de glace.

Présentes à l'état solide, ces molécules ont participé à la constitution des noyaux des planètes géantes, qui auraient atteint une dizaine de masses terrestres. Ces noyaux ont été suffisamment massifs pour piéger par gravité le gaz de la nébuleuse protosolaire, composée en majorité d'hydrogène et d'hélium. C'est pourquoi les planètes géantes sont devenues des objets de grand volume et de faible densité. Toutefois, étant donné la valeur relativement élevée du rapport de l'abondance cosmique de l'oxygène sur celle de l'hydrogène, l'eau était aussi présente dans la nébuleuse protosolaire. Elle fut donc partie prenante dans la formation des planètes géantes. Notons que les mécanismes en jeu lors de la formation des planètes telluriques furent très différents : dans l'environnement plus proche du Soleil et, par conséquent, plus chaud de ces planètes, seuls les silicates et les métaux existaient sous forme solide. Or, les abondances cosmiques des atomes qui

constituent ces matériaux sont plus faibles que celles des éléments plus légers (C, N, O...) qui forment les glaces. La masse des noyaux initiaux des planètes telluriques n'a pu excéder une masse terrestre, ce qui était loin d'être suffisant pour piéger par gravité l'hydrogène et l'hélium du gaz protosolaire.

L'eau des planètes géantes

Ce mécanisme de formation explique que de l'eau soit présente sur les planètes géantes. Sa présence sous forme de vapeur a été détectée dans la troposphère profonde (la zone la plus basse de l'atmosphère) de Jupiter et de Saturne, grâce à des observations infrarouges. En décembre 1995, les astronomes ont aussi détecté de l'eau sur Jupiter grâce au spectromètre de masse de la sonde *Galileo*, qui pénétra dans l'atmosphère jovienne. Ils espéraient pouvoir mesurer le rapport de l'oxygène et de l'hydrogène pour le comparer avec les autres rapports d'abondances dans Jupiter, et obtenir ainsi des informations sur la formation de la planète. Cela n'a malheureusement pas été possible, car l'abondance de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de Jupiter varie notablement en raison de phénomènes météorologiques complexes.

Si l'on pensait bien que les planètes géantes contiennent de l'eau, personne, en revanche, ne soupçonnait son existence dans leur stratosphère (au-dessus de la troposphère). C'est pourtant ce qu'a découvert, en 1997, le satellite *ISO*, à la surprise générale. Des raies infrarouges correspondant à de la

Heidi Hammel/NASA

vapeur d'eau ont été observées dans les spectres des quatre planètes géantes, ainsi que dans celui de Titan, le plus gros des satellites de Saturne, et le seul à être doté d'une atmosphère stable. Fait remarquable, on a mesuré un flux incident de molécules d'eau quasi constant sur les cinq objets, en dépit de la grande variété de leurs distances par rapport au Soleil (de 5 à 30 unités astronomiques) et de leurs masses (de 0,02 à 300 masses terrestres).

D'où vient cette eau ? Le profil des températures des planètes géantes présente un minimum lorsque la pression atteint 0,1 bar (soit 10^4 pascals) ; une telle pression correspond à la tropopause, c'est-à-dire à la limite entre la troposphère et la stratosphère, qui, toutes deux, contiennent de l'eau. La température est égale à 110 kelvins sur Jupiter, à 90 kelvins sur Saturne, et à environ 50 kelvins sur Uranus et sur Neptune. Même dans le cas de Jupi-

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