

Les boues d'épuration

Les eaux usées sont aujourd'hui trop polluées pour qu'on puisse les rejeter dans les cours d'eau ou les épandre sur des sols agricoles. Les stations d'épuration ont pris le relais : les substances polluantes sont extraites par plusieurs traitements. Les boues récupérées après décantation contiennent des particules solides, des substances organiques et minérales obtenues lors des traitements chimiques d'épuration et une biomasse, dite excédentaire, constituée de micro-organismes qui se sont nourris des substances dissoutes.

En France, ces boues représentent, chaque année, plusieurs dizaines de millions de mètres cubes, ramenées à environ 10 millions de tonnes de boues brutes après divers traitements. On estime que cette production croîtra de 50 pour cent (en masse de matière sèche) dans les années à venir si la France respecte les objectifs négociés avec ses partenaires européens. L'enjeu n'est autre que la qualité des milieux aquatiques, qui exige une amélioration constante de l'épuration des rejets.

Traditionnellement, ces boues sont utilisées en agriculture où elles fertilisent la terre. Toutefois, des alertes sanitaires récentes (la maladie de la vache folle, la dioxine...) qui étaient toutes liées à la gestion des déchets et à la contamination de la chaîne alimentaire, ont soulevé la question des risques liés à cette pratique. En 1999, un comité technique national a été mandaté pour élaborer un dossier d'information sur les tenants et les aboutissants de l'épandage agricole des boues d'épuration. Après un rappel des conditions d'obtention de ces boues et des conditions de leur épandage, une analyse des risques a été faite ; on a différencié, d'une part, les risques immédiats dus à la présence d'agents pathogènes dans les eaux usées, et, d'autre part, les risques différés dus à une dégradation de la qualité des sols et des cultures, à cause de l'accumulation de substances chimiques présentes en infimes quantités (cadmium, mercure, plomb...).

Une réglementation, qui tient compte des connaissances acquises dans de nombreux domaines, précise la qualité des boues à respecter, la quantité de contaminants tolérée (même pour les substances présentes à l'état de trace), la restriction des épandages pour certaines productions (les légumes et les fourrages notamment).

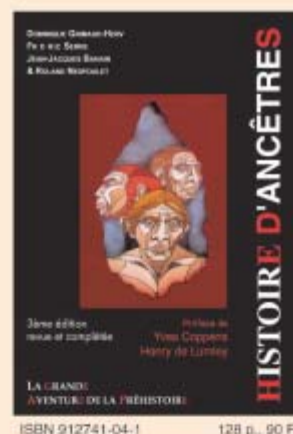
Destiné à la population, le dossier montre aussi que tout ne se résoudra pas par des approches curatives, celles qui consistent à éliminer les polluants des différents rejets anthropiques. Inéluctablement, une approche préventive devra prendre le relais : les boues ne seront pas contaminées, ou, mieux encore, elles ne seront pas produites !

Curieusement, on connaît mieux les cycles biologiques, géologiques et chimiques qui ont lieu dans la nature que les activités humaines qui produisent les contaminants. Quand on étudie les impacts, même potentiels, d'une pratique industrielle, on peut en conclure ce qu'il ne faut pas faire, mais pas nécessairement quelles seraient les solutions plus performantes. Or, dans une logique de prévention des pollutions et de développement durable, ce sont bien les pratiques humaines qui devront évoluer.

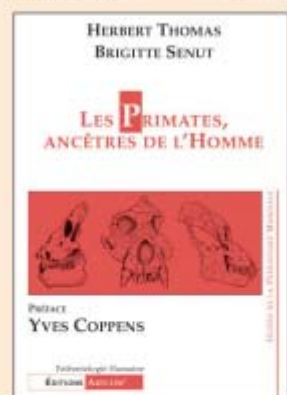
La démarche préventive est d'une tout autre nature que la démarche curative : elle doit évaluer les conséquences d'un processus industriel, mais aussi envisager les effets des autres procédés possibles. La chaîne des responsabilités s'en trouvera modifiée.

Le recours au principe de précaution requiert d'épuiser les vertus de la prévention. Sa prise en compte est indispensable et les débats autour de l'épandage des boues illustrent les difficultés que cela pose.

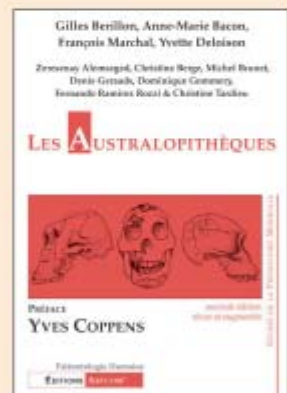
Jean-Marc MÉRILLOT, ADEME



ISBN 912741-04-1 128 p., 90 F



ISBN 912741-22-X 184 p., 90 F



ISBN 912741-21-1 256 p., 90 F



ISBN 912741-07-6 344 p., 230 F

ÉDITIONS ARTCOM®
53, rue Boissière 75116 - Paris



L'eau dans le Système solaire

THÉRÈSE ENCRENAZ

L'eau est omniprésente dans le système solaire, rare ou abondante, liquide ou solide. D'innombrables corps célestes en contiennent : les planètes, les anneaux, les comètes. Sur Terre, l'eau a été la source de la vie. Les récentes découvertes ravivent le débat de la vie, présente ou passée, en d'autres lieux que sur la Terre.

«**L**es Martiens étaient là - dans le canal - réfléchis dans l'eau. Les Martiens leur retournèrent leurs regards durant un long, long moment de silence dans les rides de l'eau...»

Dans ses poétiques *Chroniques Martiennes*, Ray Bradbury décrit une planète rouge où abonde l'eau. Les astrophysiciens, eux, subodoraient depuis longtemps la présence d'eau sur Mars. En 1877, Giovanni Schiaparelli, directeur de l'Observatoire de Milan, observa des lignes droites à la surface de Mars. Il les appela *canali*, terme qui fut traduit en anglais par *canals* (canaux artificiels) au lieu de *channels* (canaux naturels). Cette maladresse linguistique contribua à lancer un mythe tenace : des êtres intelligents avaient construit des canaux pour acheminer l'eau des pôles vers les régions équatoriales de la Planète rouge... « S'il n'avait été construit, le système d'irrigation, n'exhiberait pas d'aussi merveilleuses configurations mathématiques... », argumenta l'astronome américain Percival Lowell, au début du XX^e siècle. Il fallut attendre 1965 pour que la mission *Mariner 4* révèle que, photographiées à quelques milliers de kilomètres de distance, les « lignes droites » de Schiaparelli n'étaient que des chaînes de petits cratères...

Pour autant, loin de s'arrêter, la quête de l'eau extra-terrestre s'est intensifiée. Les astronomes ont scruté les moindres recoins du système solaire et décelé la présence du liquide de la vie en divers endroits. Ils en ont trouvé dans les atmosphères de Mars, de Vénus, dans celles des planètes géantes, telle que Jupiter. Les astronomes pensent aussi que de l'eau liquide se trouverait sous la surface de certains objets du système solaire, notamment

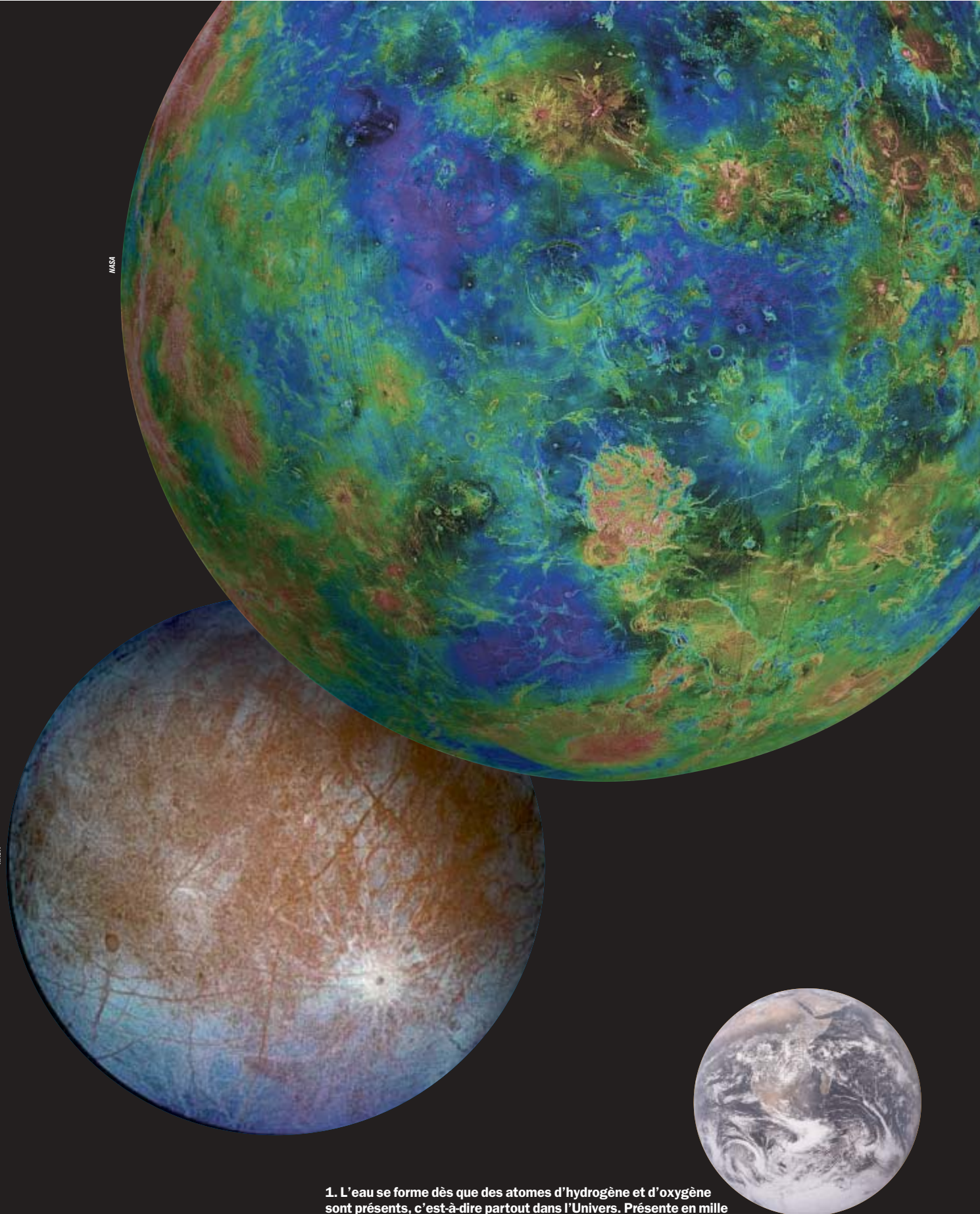
sous celle du satellite de Jupiter, Europe, ou sous celle de la planète Mars. La glace est, quant à elle, présente dans les petits corps du système solaire extérieur, telles les comètes, ainsi que dans les satellites et les anneaux des planètes géantes. Que ce soit en grande ou en petite quantité, l'eau semble omniprésente dans le Système solaire.

Comment explique-t-on cette ubiquité de l'eau ? Celle-ci n'est pas surprenante si l'on réalise à quel point les atomes constitutifs sont abondants dans l'Univers. Selon le modèle standard du Big Bang, l'explosion originelle a créé des atomes d'hydrogène et des atomes d'hélium (trois atomes d'hydrogène pour un atome d'hélium). Puis, les atomes de carbone, d'azote, d'oxygène et de tous les autres éléments se sont formés lors des réactions nucléaires, au cœur des étoiles : c'est la nucléosynthèse. Le carbone et l'oxygène sont, après l'hydrogène et l'hélium, les deux éléments les plus abondants de l'Univers. Dans le Soleil, l'oxygène est plus commun que le carbone, mais ce n'est pas le cas dans toutes les étoiles.

Les atomes d'oxygène et d'hydrogène ont une forte affinité, de sorte que les molécules d'eau sont très stables : on doit les chauffer jusqu'à 3 000 kelvins pour qu'elles commencent à se dissocier. Rien d'étonnant à ce qu'elles soient présentes dans tous les objets du Système solaire. Ces derniers ont des caractéristiques variées : leur taille s'échelonne entre quelques micromètres, pour les poussières interplanétaires, et des dizaines de milliers de kilomètres, dans le cas des planètes géantes ; leur densité varie de 0,7 gramme par centimètre cube pour Saturne, à 5,4 gramme par centimètre cube pour Mercure ; quant

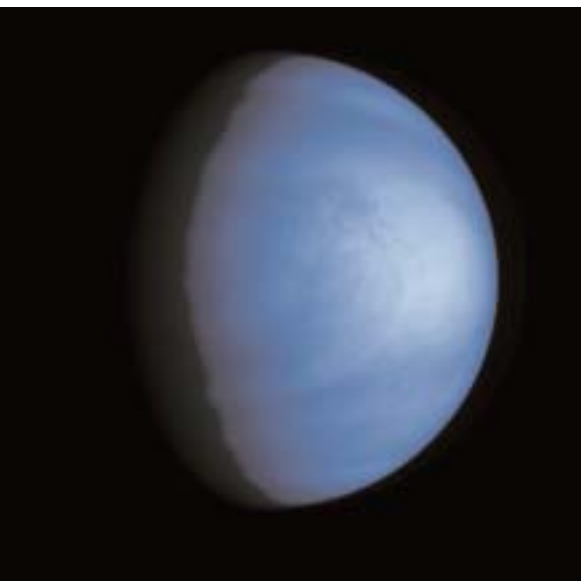
NASA

NASA



1. L'eau se forme dès que des atomes d'hydrogène et d'oxygène sont présents, c'est-à-dire partout dans l'Univers. Présente en mille endroits du système solaire, elle se concentre surtout sur les planètes ou leurs satellites. Ainsi, la Terre (*ci-dessus*) porte la vie parce qu'elle est recouverte d'eau. Mars (*page ci-contre*) et Vénus (*en haut à droite*) ont probablement porté des quantités d'eau importantes dans le passé. L'une des lunes de Jupiter, Europe (*à gauche ci-dessus*), est une boule de glace sillonnée de cicatrices et creusée de cratères. Un océan agite-t-il Europe sous la glace? Renferme-t-il une forme de vie ?

aux pressions qui règnent à leur surface, elles varient de 100 fois la pression terrestre (sur Vénus), jusqu'au centième de cette valeur, à la surface de Mars. Selon les conditions qui règnent sur chacun de ces corps célestes, l'eau y adopte des comportements différents.



NASA

2. L'ATMOSPHÈRE DE VÉNUS est constituée de dioxyde de carbone, d'azote et de traces d'eau et de dioxyde de soufre. Minoritaires, ces deux constituants jouent pourtant un rôle essentiel, puisqu'ils sont à l'origine de la formation des nuages de vapeurs d'acide sulfurique qui empêchent d'observer directement la planète depuis l'espace.



Philippe James Steve Lee, Mike Wolf/NASA

3. MARS RENFERME-T-ELLE DE L'EAU dans son sous-sol? La planète semble avoir porté un océan dans le passé. La forme de certains de ses cratères donne l'impression que les météorites qui les ont formés ont percuté un matériau imbibé d'eau. La planète porte aussi deux calottes de glace qui recouvrent aujourd'hui les pôles.

Les planètes telluriques

Le cas le plus intéressant est sans aucun doute celui des planètes telluriques (rocheuses), c'est-à-dire Mercure, Vénus, la Terre et Mars (de la plus proche à la plus éloignée du Soleil). L'eau y est présente dans l'atmosphère ou dans le sol. *A priori*, elle devrait y prendre des formes comparables, puisque ces planètes sont relativement proches les unes des autres. Ainsi, la densité, la taille et la gravité de Mars sont «seulement» deux à trois fois inférieures à celles qui règnent sur la Terre ; celles de Vénus en sont proches, à tel point que l'étoile du Berger est souvent surnommée la «jumelle de la Terre». Malgré cela, tout change d'une planète à l'autre, tellement la composition des atmosphères et les conditions atmosphériques y varient. Mercure n'est pas assez massive, et trop proche du Soleil pour retenir une atmosphère stable. La Terre, Mars et Vénus ont des atmosphères qui diffèrent soit par leur composition chimique, soit par les conditions qui y règnent : le comportement de l'eau sur chacune des trois grandes planètes telluriques diffère.

Fait remarquable, sur Terre l'eau existe sous ses trois états, solide, liquide et vapeur. Partout ailleurs dans le Système solaire, l'eau est seulement sous forme de glace ou de vapeur. Le point est essentiel pour l'homme : c'est l'eau liquide, et elle seule, qui impose l'évolution du climat terrestre, par le jeu des précipitations, des systèmes de nuages, et des courants marins. L'eau liquide est sans doute présente sur Terre en abondance depuis sa formation, il y a 4,5 milliards d'années. L'atmosphère était alors constituée surtout de dioxyde de carbone, rapidement piégé par les océans sous forme de carbonate de calcium (de calcaire).

La composition chimique de l'atmosphère originelle de la Terre ressemble à celle des atmosphères des autres planètes telluriques. Ces dernières sont surtout constituées de dioxyde de carbone (environ 95 pour cent en volume sur Vénus et sur Mars) et d'azote, avec des traces de monoxyde de carbone (CO), d'oxygène (O₂) et d'eau. L'atmosphère terrestre ne présenterait pas la même composition globale si le dioxyde de carbone n'était piégé dans les océans, et si l'apparition de la vie n'avait provoqué l'accumulation d'oxygène et d'ozone. La relative constance de la température de la

Terre garantie, d'une part, par la présence d'une atmosphère permanente et, d'autre part, par la stabilité de l'axe de rotation (stabilité due à la présence de la Lune), a favorisé la présence constante d'océans liquides, et le développement de la vie sur Terre. Au contraire, les axes de rotation de Vénus et de Mars ont subi, sans doute, de grandes fluctuations, ce qui a notablement modifié leur climat.

Omniprésente sur la Terre, l'eau est minoritaire dans les atmosphères de Vénus et de Mars, sans doute en raison des conditions très différentes qui règnent à la surface des deux autres grandes planètes telluriques. Ainsi, la température sur le sol de Vénus est égale à 460 °C, tandis qu'elle ne dépasse pas -60 °C en moyenne à la surface de Mars.

L'eau est-elle présente sur Vénus, à sa surface, ou dans son sol? L'observation à distance de la Vénus est difficile en raison de l'épaisse couche de nuages, localisés à environ une cinquantaine de kilomètres de la surface de la planète et qui masquent la surface. La composition atmosphérique de Vénus et ses conditions de température et de pression en surface nous ont été révélées par les sondes spatiales *Venera* et *Pioneer Venus*. Si les pressions partielles du dioxyde de carbone et d'azote moléculaire constituent respectivement 96,5 pour cent et 3,5 pour cent de la pression totale, l'atmosphère vénusienne contient aussi du dioxyde de soufre SO₂ et de la vapeur d'eau en quantités infimes (moins de un dix millièmes). Pourtant, ces constituants jouent un rôle important, car ils sont responsables de la formation de la couche nuageuse, constituée d'acide sulfurique (H₂SO₄). Dotée d'une pression et d'une température extrêmes, et soumise à des pluies acides, la basse atmosphère de Vénus nous apparaît comme un milieu fort peu hospitalier...

Rien de tel sur Mars. Sa surface, directement observable dans le domaine visible, a été abondamment cartographiée par les caméras des sondes planétaires (*Viking*, 1975 et *Mars Global Surveyor*, 1996) et par le télescope Hubble. Sur Mars, la composition atmosphérique ressemble à celle de Vénus : 95 pour cent de dioxyde de carbone, 3 pour cent d'azote et environ 2 pour cent d'argon. En revanche, l'eau est présente à la fois sous forme solide et sous forme gazeuse ; les conditions de pression et de température, à la sur-

face de Mars, ne permettent pas la présence d'eau liquide. L'eau y est surtout présente sous forme de glace dans les calottes polaires, qui se condensent et se subliment au pôle Nord et au pôle Sud, selon un rythme saisonnier. Parfois, on observe de petites formations nuageuses d'eau, notamment à proximité des volcans. Si l'eau des calottes était répartie sur toute la planète sous forme liquide, elle formerait un océan global de l'ordre d'une vingtaine ou d'une trentaine de mètres d'épaisseur : sur Terre, un tel océan global aurait une profondeur de 2,7 kilomètres. Quant à la pression partielle de la vapeur d'eau martienne, elle n'excède pas quelques dix millièmes de la pression atmosphérique totale ; elle présente de fortes fluctuations liées au cycle saisonnier de condensation et de sublimation des calottes polaires.

Puisqu'elles sont parties de conditions initiales quasi semblables, pourquoi les trois grandes planètes telluriques ont-elles eu des destins aussi divergents ? La réponse tient à l'histoire de l'eau sur Mars et sur Vénus. L'eau semble avoir été plus abondante sur ces sœurs de la Terre. La valeur du rapport de l'abondance de l'eau lourde (HDO) et de l'eau (H₂O) indique, par exemple, qu'il y avait à l'origine beaucoup plus de vapeur d'eau dans les atmosphères vénusienne et martienne. Rappelons que, dans la molécule d'eau lourde, l'un des atomes d'hydrogène est remplacé par un atome de deutérium ; celui-ci est identique à l'atome d'hydrogène, à ceci près qu'il est deux fois plus lourd, puisque son noyau contient un neutron supplémentaire. Dans les océans et dans l'atmosphère terrestre, le rapport HDO/H₂O vaut environ $1,5 \cdot 10^{-4}$, valeur dont les planétologues pensent qu'elle n'a jamais changé depuis que la Terre s'est formée. Partant du principe que cette valeur caractérisait toutes les planètes telluriques à leur début, ils ont mesuré le rapport HDO/H₂O dans les atmosphères de Vénus et de Mars ; la mesure se fait depuis la Terre, par spectroscopie infrarouge en phase gazeuse. Leurs résultats révèlent un fort enrichissement en deutérium des atmosphères martienne et vénusienne. La vapeur d'eau qui se mêle à l'atmosphère martienne contiendrait cinq fois plus de deutérium que celle de la Terre. Celle de l'atmosphère vénusienne en contiendrait près de 120 fois plus ! Les planétologues déduisent de ces constata-

tions que la vapeur d'eau atmosphérique a été présente en quantité bien supérieure sur Mars et surtout sur Vénus, dans le passé. Comment a-t-elle disparu ? L'enrichissement atmosphérique en deutérium s'explique par le mécanisme de l'échappement gravitationnel, qui privilégie l'échappement dans l'espace des molécules les plus légères. C'est pourquoi il favorise l'éjection de l'eau ordinaire par rapport à celle de l'eau lourde, ce qui explique que cette dernière se soit concentrée dans les atmosphères de Mars et de Vénus.

Vallées martiennes

Si l'eau a été nettement plus abondante dans les atmosphères de Mars et de Vénus, l'a-t-elle aussi été sur leur sol ? Dans le cas de Mars, nous avons des indices de la présence en surface de grandes quantités d'eau (peut-être liquide) au début de l'histoire de la planète. Le premier est l'existence de vallées ramifiées qui sillonnent les terrains anciens de l'hémisphère Sud de Mars, et qui datent de plus de trois mil-

liards d'années ; elles donnent l'impression que de l'eau liquide s'est écoulée en quantité sur la planète, ce qui indique qu'à cette époque existait une atmosphère dense et chaude. Le deuxième indice est la présence probable d'un vaste océan qui aurait recouvert les grandes plaines du Nord il y a deux à trois milliards d'années. Les récentes mesures radar de la mission *Mars Global Surveyor* ont renforcé cette hypothèse, émise lors des premières mesures de la sonde *Viking*. Elles ont révélé la présence de lignes longues de plusieurs milliers de kilomètres et dont l'altitude est constante. S'agit-il de rives ? Si un tel océan a existé, l'eau qu'il contenait aurait formé un « océan global » d'une centaine de mètres d'épaisseur.

Ainsi, Vénus et Mars semblent avoir porté d'importantes masses d'eau, peut-être autant que la Terre. Pourquoi a-t-elle disparu ? Comment les conditions de température et de pression à la surface des deux planètes ont-elles peu à peu divergé ? De petits écarts de température peuvent avoir des conséquences notables. Étant



4. S'AGIT-IL D'UN RÉSEAU FLUVIAL ASSÉCHÉ AUJOURD'HUI ? Cette immense cicatrice à la surface de Mars est flanquée d'un important réseau de ravins, qui se ramifient en vallées secondaires et autres canyons. Quel est le fluide qui a érodé ainsi la surface ? Pourquoi a-t-il disparu ? Les planétologues pensent qu'il s'agit d'eau, et qu'elle est probablement encore présente sous la surface. Plusieurs observations récentes ailleurs sur la planète vont dans ce sens.

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.

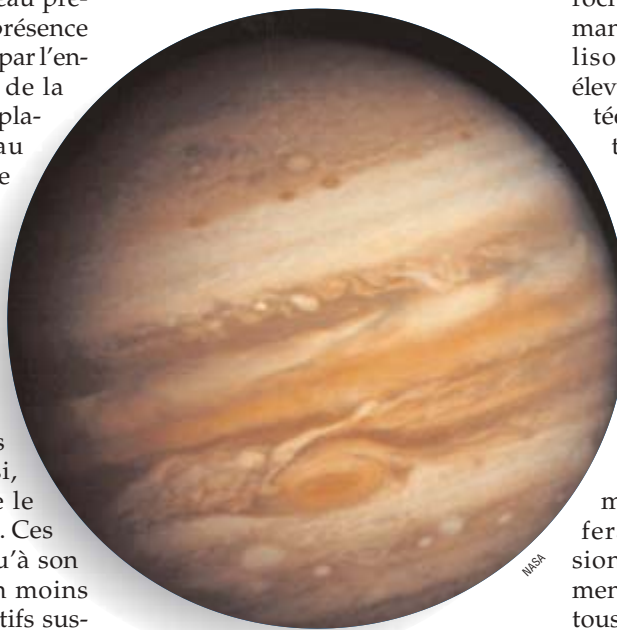
Au début de l'histoire de Mars, la pression à la surface de la planète était sans doute inférieure à celles qui régnaient à la surface de la Terre et de Vénus ; toutefois, l'atmosphère primitive de la planète rouge était plus dense que celle qui règne aujourd'hui. La présence probable d'eau sous forme 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.

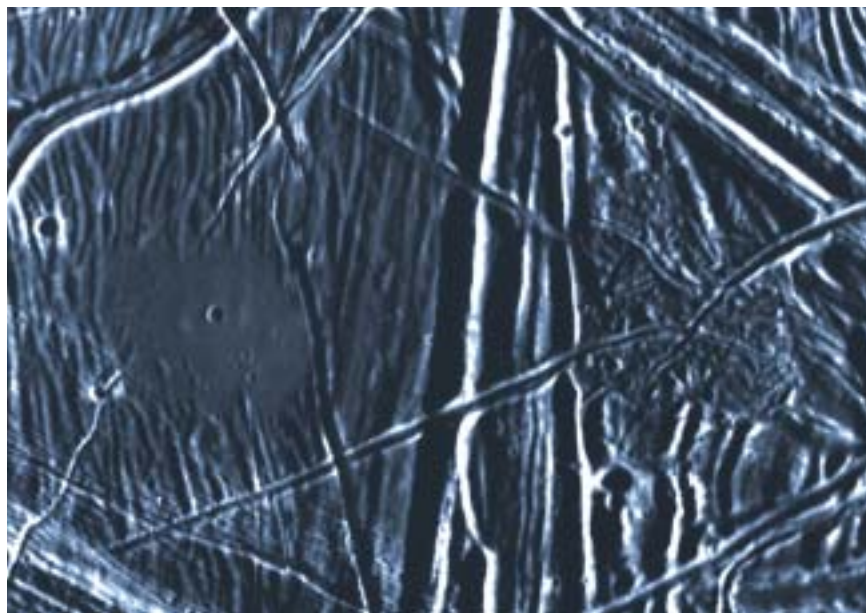


ISO

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

