

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 constan-

tations 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.

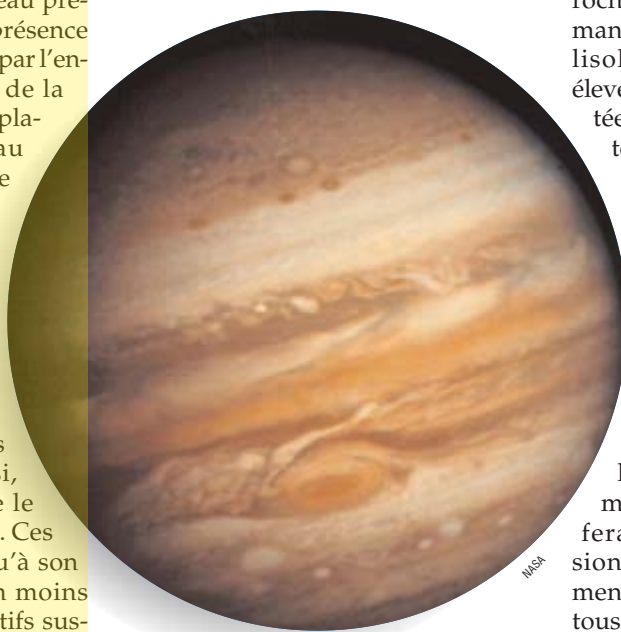
Au début de l'histoire de Mars, la pression à la surface de la planète était sans doute inférieure à celles qui régnaient à la surface de la Terre et de Vénus ; toutefois, l'atmosphère primitive de la planète rouge était plus dense que celle qui règne aujourd'hui. La présence probable d'eau sous forme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