

L'eau

sur la Terre, dans le Système Solaire, dans l'Univers

Guy Moreels, Observatoire de Besançon

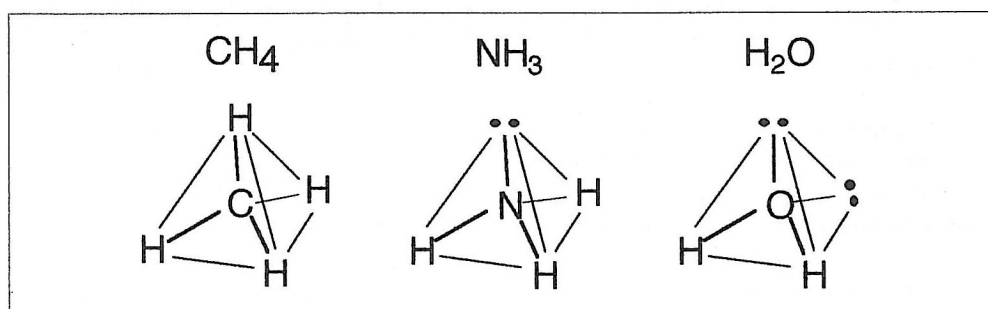
Cet article, qui s'ouvre sur une utile mise au point à propos des propriétés physiques de l'eau, passe ensuite en revue sa place sur la Terre, la Lune, Mars, les satellites galiléens, les comètes, le milieu interstellaire. Neuf pages à consommer sans modération. Ajoutons, cela coule de source, puisque l'eau est un des thèmes des TPE en première S, que nous pourrons en abreuver nos élèves.

L'eau : un corps aux multiples propriétés

L'eau est pour l'Homme le corps pur qui, de loin, est le plus important. Cette importance est liée à la biologie et la biochimie des êtres vivants dont les tissus sont constitués d'eau en proportion de 60 à 70 %. Elle est liée à son activité car l'eau est à la fois une matière première essentielle et un agent employé dans de multiples applications : lavage, réfrigération, fluide liquide ou gazeux. L'importance de l'eau tient à son abondance sur Terre et à ses nombreuses propriétés chimiques, physiques et mécaniques.

Structure de la molécule d'eau

Pour comprendre la structure de la molécule d'eau, formée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, il convient d'analyser les liaisons entre ces atomes ou, si l'on préfère, les forces (interactions). On peut pour cela comparer la molécule d'eau à celles de méthane, CH_4 , et d'ammoniac NH_3 . Ces molécules hydrogénées sont organisées autour d'un atome de C, N et O, trois éléments consécutifs de la classification périodique. Le carbone C, de masse atomique 12, a 4 électrons sur la couche de valence. L'azote, de masse atomique 14, en a 5 et l'oxygène O, de masse atomique 16, en a 6.

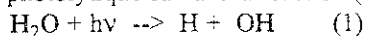


- Dans la molécule de méthane, le carbone est lié à 4 atomes H par 4 liaisons covalentes, la molécule ayant la forme d'un tétraèdre dont le centre est l'atome C.

- Dans la molécule d'ammoniac, l'azote est lié à 3 atomes H par 3 liaisons covalentes. Il reste donc un doublet d'électrons célibataires de la couche externe de N. La structure de tétraèdre avec l'atome N à l'intérieur est donc respectée.

- Dans le cas de la molécule d'eau, la structure de tétraèdre se retrouve avec les deux liaisons covalentes O-H et les deux doublets d'électrons célibataires. On peut également considérer que la molécule a la forme d'un V, qu'elle est pliée et qu'elle sera susceptible de vibrer selon plusieurs modes.

La réaction de formation de l'eau est exothermique : il suffit de faire brûler de l'hydrogène en présence d'oxygène. La réaction inverse est donc endothermique. Elle peut avoir lieu par voie photolytique suivant la réaction (1) :



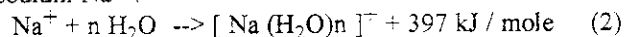
Pour que cette réaction ait lieu, il faut qu'une liaison O-H soit rompue, ce qui nécessite un apport d'énergie supérieur ou égal à l'énergie de la liaison O-H soit 464 kJ / mole. Au niveau de la molécule, il suffit qu'un photon d'énergie au moins égale à 4,81 eV rencontre la molécule d'eau, ce qui correspond à un rayonnement de longueur d'onde $\lambda \leq 258$ nm. Lorsqu'il arrive sur les couches supérieures de l'atmosphère d'une planète, le rayonnement solaire dissocie par conséquent la vapeur d'eau et ceci jusqu'aux altitudes où il est absorbé par l'ozone et l'oxygène. L'atome d'hydrogène libéré peut réagir avec un autre composé atmosphérique, comme le dioxygène ou l'ozone, mais il est soumis à une diffusion vers le haut et peut ainsi s'échapper vers l'espace si sa vitesse thermodynamique est supérieure à la vitesse d'échappement. Une question s'impose donc immédiatement : comment est-il possible que l'eau ait été conservée sur la planète Terre, alors que, sous forme vapeur, elle est un gaz léger (masse 18) si on la compare au dioxygène (masse 32) ou au diazote (masse 28) ? L'eau est donc susceptible d'atteindre les couches supérieures de l'atmosphère, de se dissocier et, finalement, d'échapper à l'attraction gravitationnelle terrestre.

La molécule d'eau est neutre ; elle ne possède pas de charge électrique. Toutefois, la molécule n'étant pas symétrique, si on l'examine en détail au plan électrique, on constate que les doublets d'électrons des liaisons covalentes se trouvent plus près du noyau de l'oxygène que des protons qui constituent les noyaux des atomes d'hydrogène. Une partie de la molécule est donc un peu plus négative, du côté de l'oxygène que l'autre partie, du côté des atomes d'hydrogène. Bien que la neutralité électrique soit respectée pour la molécule, cette dissymétrie crée un dipôle électrique caractérisé par un moment dipolaire. On dit encore que la molécule est polaire, ce que l'on indique en associant les symboles $2\delta^-$ à l'oxygène et δ^+ à chaque hydrogène.

L'existence d'un moment dipolaire permet d'expliquer de nombreuses propriétés de l'eau liquide et de la glace. Contrairement aux gaz, où les forces d'interaction entre les molécules se développent principalement lors des collisions, la cohésion d'un liquide ou d'un solide résulte de forces qui existent entre les molécules.

- Dans le cas de l'eau liquide, ces forces sont des forces du type dipôle-dipôle : les dipôles s'attirent comme des aimants, le pôle + par le pôle - et ainsi de suite. D'autres types d'interactions peuvent également se produire avec l'eau.

- Les forces ion-dipôle existent lorsque des ions se trouvent en solution dans l'eau. Considérons par exemple l'ion sodium Na^+ :



L'ion se combine avec un certain nombre de molécules d'eau ($n = 6$ probablement) pour donner un ion sodium hydraté. La solution laisse évidemment passer le courant électrique.

Les forces de dipôle induit se produisent lorsque la substance introduite dans l'eau n'est pas polaire, comme O_2 , ou CO_2 qui sont des molécules symétriques linéaires. Dans ce cas, au voisinage d'une molécule d'eau, le champ électrique près de cette molécule induit un dipôle dans la molécule O_2 ou CO_2 . Il en résulte une certaine solubilité dans l'eau.

Dans la catégorie des forces dipôle-dipôle, il existe un type de forces que l'on rencontre fréquemment : il s'agit des liaisons hydrogène. Considérons par exemple l'alcool éthylique de formule $\text{C}_2\text{H}_5\text{-O-H}$. En présence d'eau, une liaison hydrogène s'établit entre l'hydrogène du groupement OH et l'oxygène de H_2O qui porte une charge délocalisée $2\delta^-$. Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs du coefficient de solubilité de quelques gaz dans l'eau.

Gaz	Masse molaire	Solubilité (moles / m ³)	
		0° C	20° C
He	4	0,36	0,31
Ar	39,9	1,7	1,0
N ₂	28	0,80	0,54
O ₂	32	1,9	1,1
CO ₂	44	65	32

Coefficient de solubilité de quelques gaz dans l'eau de mer

On constate que la solubilité du dioxyde de carbone diminue fortement lorsque la température augmente. Compte tenu de l'importance des échanges entre les océans (hydrosphère) et l'atmosphère, cette variation de solubilité aura des conséquences importantes en ce qui concerne l'évolution du climat terrestre.

L'existence de liaisons hydrogène dans le liquide et la glace a d'autres conséquences au niveau de leurs propriétés physiques car ces liaisons sont assez difficiles à briser, par chauffage notamment. Elles confèrent donc une grande stabilité physique à ces deux phases de l'eau. La molécule d'eau a la forme d'un tétraèdre dont deux sommets sont occupés par un hydrogène et les deux autres par un doublet d'électrons. Chacun de ces sommets est susceptible de participer à une liaison hydrogène. Dans le cas de la glace, le solide est ordonné de façon très régulière en un réseau caractérisé par une liaison O-H de dimension 177 pm. Dans l'eau, la longueur de cette liaison est presque deux fois plus petite et vaut

99 pm. Lorsque la glace se transforme en eau liquide, la structure régulière se brise et le matériau devient moins lâche. Il existe à la fois des groupements de molécules et des molécules seules.

Les phases de l'eau et leurs transformations respectives.

La remarque précédente met en évidence un comportement très particulier de l'eau : la phase solide est moins dense que la phase liquide. La glace flotte sur l'eau. Parmi les milliers de substances dont les paramètres physiques ont été mesurés, seules trois substances présentent cette caractéristique : l'eau, le bismuth et l'antimoine. Le diagramme des phases de l'eau (figure ci-dessous) montre que le point triple correspond à une température de 0,01° C et une pression de 6,1 hectopascals (1 bar = 10⁵ pascals). En dessous du point triple, l'eau ne peut pas exister sous forme liquide. La courbe de changement de phase liquide-vapeur s'arrête en un point appelé point critique pour lequel p_c = 221,2 bars et T_c = 374,1° C. Au delà de ce point, l'eau devient un fluide supercritique qui possède la propriété de dissoudre des substances insolubles dans l'eau en dessous du point critique.

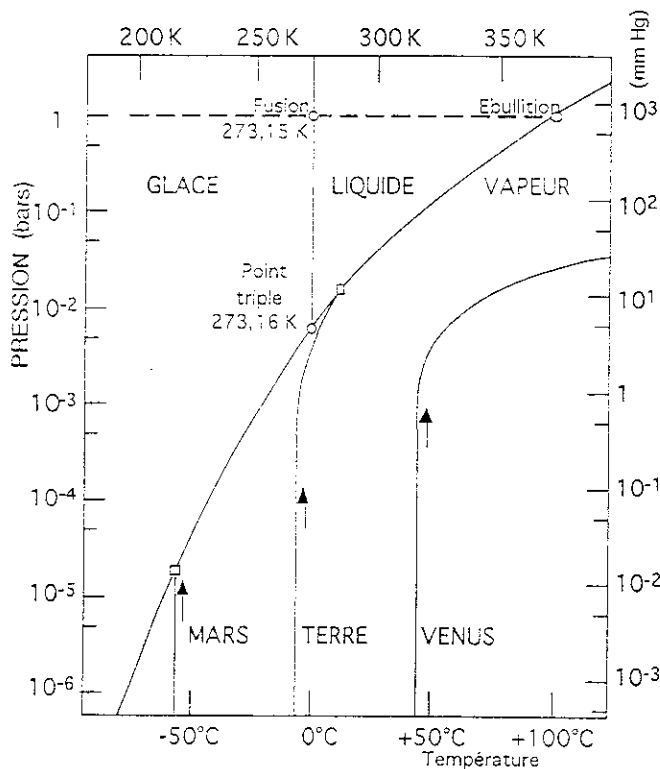


Diagramme pression-température des phases de l'eau et évolution des températures des atmosphères des planètes telluriques.

Cette figure présente également les courbes d'évolution des températures des atmosphères de Mars, la Terre et Vénus (d'après S. I. Rasool et C. De Bergh, 1970). Lorsque ces planètes ne sont pas encore entourées d'une atmosphère, leurs

températures respectives sont égales à environ -57° C, -7° C et 43° C selon leur degré d'éloignement du Soleil. Peu à peu, sous l'effet du dégazage, une atmosphère se constitue, ce qui entraîne une augmentation de la pression atmosphérique. Dans le cas de Mars, lorsque la pression atteint la courbe de changement de phase, on constate que la transition de phase s'effectue en produisant de la glace. La température n'est pas suffisante pour produire de l'eau liquide. Dans le cas de la Terre, les conditions de température et de pression permettent à l'eau de se condenser sous forme liquide. Par contre, dans le cas de Vénus, l'augmentation de pression s'accompagne d'une élévation de température à cause de l'effet de serre. L'eau ne peut plus se condenser.

Un changement de phase s'effectue avec un transfert de chaleur. Le tableau ci-dessous donne les valeurs des chaleurs spécifiques et des chaleurs latentes de l'eau sous forme liquide ou solide.

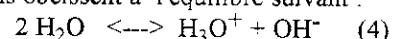
Chaleur spécifique de la glace	2,09 J / g.K
Chaleur latente de fusion	6,01 kJ / Mole
Chaleur spécifique de l'eau	4,18 J / g.K
Chaleur latente de vaporisation	40,7 kJ / Mole

L'eau et les notions d'acide et de base.

Les notions d'acide et de base sont très importantes dans notre environnement à cause, précisément, de l'abondance de l'eau sur Terre. Il est bien connu que de nombreux sols ne permettent pas certains types de végétations : les rhododendrons demandent impérativement un sol acide. Un sol calcaire ne pourra pas être acide.

La définition d'un acide est la suivante : un acide est une substance qui peut céder un proton H⁺ à un autre élément. Le pH est défini par le cologarithme de la concentration en ions H⁺. Le degré d'acidité est mesuré par le pH : pH < 7, le milieu est acide ; pH = 7, le milieu est neutre ; pH > 7, le milieu est basique. A cause de la présence de CO₂ dans l'atmosphère, et compte tenu du fait que ce gaz est un peu soluble dans l'eau, l'eau naturelle comportant uniquement du CO₂ comme substance dissoute est légèrement acide à cause de la présence de l'ion HCO₃⁻ produit par la réaction (3) dissolution de CO₂ → H₂CO₃ ↔ HCO₃⁻ + H⁺ (3) D'une manière générale, l'ion H⁺, qui est un proton dont le volume est pratiquement négligeable, n'existe pas sous cette forme dans un milieu aqueux. Grâce aux liaisons hydrogène, cet ion s'hydrate sous la forme de H₃O⁺ ou H₅O₂⁺ ou encore H₇O₃⁺.

Même lorsqu'aucune substance n'est ajoutée à l'eau, un certain nombre d'ions H⁺ et OH⁻ existent dans le liquide. Les concentrations obéissent à l'équilibre suivant :



Dans l'eau idéalement pure, le produit des concentrations [H₃O⁺] . [OH⁻] = 10⁻¹⁴. Par conséquent [H₃O⁺] = [OH⁻] = 10⁻⁷. On constate que le cologarithme de [H₃O⁺] est égal à 7, qui est le pH d'un milieu neutre. Ceci explique la définition du pH d'une solution.

L'eau sur la Terre. Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau.

Le processus le plus important dans le cycle de l'eau est l'évaporation qui se produit au niveau de la surface des océans.

Les caractéristiques de l'eau sur Terre.

L'eau est un élément remarquable à tous points de vue.

- Elle est fluide et coule facilement, ce qui lui permet d'être présente sur les surfaces continentales.

- L'eau est un excellent solvant pour un grand nombre de composés.

- L'eau est transparente dans le domaine visible, ce qui permet au rayonnement de pénétrer jusqu'à des profondeurs assez importantes. Cette propriété est essentielle pour le développement du phytoplancton.

- Sa capacité calorifique est importante, notamment si on la compare à celle des substances d'usage courant (métaux par exemple). Cette capacité calorifique agit comme un régulateur de température dans les régions maritimes.

- Les chaleurs latentes de vaporisation et de fusion de l'eau sont importantes. Il est donc nécessaire de fournir des quantités d'énergie importantes pour vaporiser de l'eau liquide ou faire fondre de la glace. L'eau se déplace facilement et peut absorber ou relâcher de grandes quantités d'énergie en changeant de phase. Elle permet donc de disposer d'un moyen efficace de transport de l'énergie.

- La masse volumique de l'eau est maximum à la température de 4°C.

Inventaire de l'eau sur Terre.

La surface de la Terre est constituée par des continents et des océans dans des proportions de 29% et 71%. La hauteur moyenne des continents est de 800 mètres, mais la profondeur moyenne des océans est de 4000 mètres. Les deux principaux réservoirs d'eau sont les océans et les calottes polaires.

La répartition globale de l'eau est la suivante :
océans : 97,2 % ; calottes polaires et glaciers : 2,15 % ;
continents : 0,6 %

On constate que les lacs, les fleuves, les rivières et la vapeur d'eau de l'atmosphère ne constituent qu'une fraction faible du contenu terrestre en eau. La glace des calottes polaires occupe un volume important. Si toute cette glace fondait, le niveau de la mer s'élèverait de 60 mètres.

	Proportion	Vol en km ³
Glace polaire et glaciers	75 %	29,0 × 10 ⁶
Eau dans le sol à z ≤ 750 m	11 %	4,2 × 10 ⁶
Eau dans le sol à z ≥ 750 m	13,6 %	5,3 × 10 ⁶
Lacs	0,3 %	120 × 10 ³
Rivières	0,03%	12 × 10 ³
Humidité du sol	0,06%	24 × 10 ³
Atmosphère	0,035%	13 × 10 ³
Total eau non océanique	100 %	39 × 10⁶
Eau dans les océans		1350 × 10⁶

Processus	kg par an (x 10 ¹⁷)
Evaporation à la surface des océans	3,83
Précipitations sur l'océan	3,47
Evaporation sur des continents	0,63
Précipitations sur les continents	0,99
Ecoulement de la terre vers la mer	0,36

**Valeurs des flux
intervenant dans le cycle de l'eau.**

L'eau de mer est salée

La salinité de l'eau de mer, c'est-à-dire la masse de sels par kg d'eau salée est en moyenne de 3,5 %. Cette proportion varie entre 3,2 et 3,8%.

Composé	Ion	Grammes par kg
Chlorure	Cl ⁻	19,35
Sodium	Na ⁺	10,76
Sulfate	SO ₄ ²⁻	2,71
Magnésium	Mg ²⁺	1,29
Calcium	Ca ²⁺	0,41
Potassium	K ⁺	0,39
Bicarbonate	HCO ⁻	0,14
Bromure	Br ⁻	0,01
Strontium	Sr ⁺	0,01
Bore	B ²⁺	0,004
Fluor	F ⁻	0,001

Composition de l'eau de mer

Constante de temps de résidence de l'eau océanique.

Le débit en volume de l'écoulement d'eau de la terre vers la mer est de 36 × 10³ km³ par année. On peut donc définir une constante de temps de résidence de l'eau océanique en effectuant la division suivante :

$$\tau = \text{volume de l'océan} / \text{débit de l'écoulement terre-mer} \quad (5)$$

$$\tau = (1350 \times 10^6 \text{ km}^3) / (36 \times 10^3 \text{ km}^3 \text{ par année})$$

$$\tau = 37\,500 \text{ ans} \quad (6)$$

On peut également évaluer le temps de résidence d'une molécule d'eau dans une calotte glaciaire. On obtient une valeur comparable au temps de résidence dans le réservoir océanique. Le processus de perte est lié principalement à la

fusion des glaciers et à la formation d'icebergs à l'endroit où la banquise rencontre la mer. Dans le passé, des périodes de glaciation ont existé à plusieurs reprises au cours desquelles l'étendue de la calotte glaciaire a été beaucoup plus grande qu'à présent. Le maximum de la période glaciaire la plus récente s'est produit il y a 18 000 ans. La couverture de glace recouvrait les îles britanniques, la péninsule scandinave, une bonne partie de la Sibérie, tout le Canada et une partie des Etats-Unis actuels. Le volume total de glace n'était pas de $29 \times 10^6 \text{ km}^3$ comme actuellement, mais de $73 \times 10^6 \text{ km}^3$, soit plus du double. Le niveau des océans était situé environ 100 mètres plus bas que le niveau actuel. Ce fait a été confirmé par la découverte de grottes sous-marines qui ont été occupées par des hommes au paléolithique.

De la glace dans le régolite lunaire

La présence de glace sur la Lune a été suggérée dès 1961 par trois planétologues de Caltech (Watson, Murray et Brown) car il existe sur ce satellite des régions qui ne sont jamais éclairées par le soleil. L'inclinaison des rayons solaires varie peu car le Soleil fait toujours avec le plan équatorial lunaire un angle inférieur à $1,6^\circ$. En d'autres termes, il n'y a pas de saisons sur la Lune. Dans ces conditions, la vitesse de sublimation de la glace peut être extrêmement faible, surtout si la glace se trouve mélangée au régolite lunaire. Il est donc possible qu'il en existe encore une certaine quantité, si de la glace a existé un jour sur notre satellite.

L'annonce de la découverte probable de glace près du pôle Sud par la sonde Clémentine lancée en 1994 a donc suscité un extrême intérêt dans la communauté. Le paramètre caractéristique est le taux de polarisation du rayonnement électromagnétique émis par l'émetteur de la sonde tourné vers la surface de la lune, réfléchi par la surface et reçu par un radiotélescope terrestre. La comparaison avec les échos obtenus en d'autres endroits de la Lune ne présente pas la même augmentation du taux de polarisation.

Une tentative de confirmation de cette détection a eu lieu en 1998 avec le spectromètre à neutrons de la sonde Lunar Prospector. Cet instrument détecte les neutrons éjectés de la surface lunaire sous l'effet de l'impact de rayons cosmiques. L'instrument ne permet pas de détecter de la glace d'une manière directe, mais il a permis de confirmer les résultats obtenus par Clémentine, à savoir la présence probable de glace dans le sol de certains cratères situés dans les régions polaires.

Il a été possible de donner une estimation de la quantité de glace pouvant se trouver dans ces régions : de 10×10^6 à 300×10^6 tonnes. Les surfaces couvertes seraient comprises entre 1000 et 50 000 km^2 au pôle Nord et 5000 et 20000 km^2 au pôle Sud. Si la présence de glace était confirmée, elle permettrait d'envisager la construction d'une base scientifique

sur la Lune. Certains experts ont déjà estimé que, grâce à cette quantité de glace, 2000 personnes pourraient séjourner sur notre satellite naturel pendant un siècle. On peut aussi imaginer que la glace permettrait de fabriquer par électrolyse de l'hydrogène et de l'oxygène pour servir de carburant et envoyer des sondes dans le système solaire.

Le problème de l'eau sur Mars

Les calottes polaires.

Les calottes polaires de Mars ont une étendue qui varie en fonction des saisons martiennes. Rappelons que les saisons sur Mars sont plus accentuées que sur la Terre car elles résultent à la fois de l'inclinaison du plan équatorial de la planète par rapport à l'écliptique (24° pour Mars et $23,5^\circ$ pour la Terre) et de l'excentricité de son orbite (0,093 pour Mars et 0,017 pour la Terre). La calotte polaire boréale a un diamètre d'environ 650 km et une épaisseur d'environ 1 km. Elle est constituée d'un mélange de glace d'eau et de glace carbonique. La calotte polaire australe est moins étendue, son diamètre étant de 450 km, mais plus épaisse (3 km). Elle serait formée uniquement de glace carbonique. Les volumes de glace des calottes polaires sont évalués respectivement à $1,2 \times 10^6 \text{ km}^3$ et $0,2 \times 10^6 \text{ km}^3$. L'étude détaillée des photographies transmises par la sonde Mars Global Surveyor montre que la glace martienne subit les mêmes mouvements de glissement que la glace sur Terre.

Le problème de l'eau.

Grâce à quatre sondes qui ont été placées en orbite autour de Mars : Mariner 9 en 1971-72, Viking 1 et 2 en 1976-77 et Mars Global Surveyor en 1997-99, nous disposons maintenant d'une couverture photographique complète de cette planète. La résolution de ces photographies atteint 1,5 m. Les structures martiennes les plus impressionnantes sont constituées par les volcans de la région de Tharsis : les trois volcans alignés Arsia, Pavonis et Ascraeus Mons et, au Nord-Ouest, Olympus Mons qui est le volcan le plus grand du système solaire (27 km d'altitude et 600 km de diamètre).

Une autre structure exceptionnelle de Mars est constituée par l'immense canyon appelé Valles Marineris et ses ramifications. Cette dépression s'étend d'ouest en est dans la partie équatoriale de la planète sur plus de 5000 km avec une largeur de 200 km et une profondeur de 6 km. De nombreux clichés montrent des réseaux de chenaux parfois enchevêtrés. Certains chenaux prennent naissance dans des dépressions. Parfois, ces dépressions ont une forme circulaire et seraient dues à un processus de dégazage au niveau de la croûte.

Les images de Mars Global Surveyor, dont la résolution est supérieure à celles de Mariner 9 et Viking apportent des

éléments supplémentaires en faveur de la présence d'eau dans le passé géologique de la planète rouge. Ces éléments sont de trois types :

- Les images montrent des traces de suintement sur les parois de certaines falaises et peut-être l'existence de mares asséchées.
- Elles mettent en évidence la présence d'écoulements fluides ayant duré pendant un certain temps.
- Elles montrent la stratification de la croûte supérieure de Mars, à un degré plus important que celui qui est généralement admis.

Les clichés de Noachis Terra montrent un cratère de 60 km de diamètre environ au fond duquel une mare a probablement existé. De plus, sur les flancs des falaises, apparaissent des traces de suintement. Un autre exemple est fourni par le canyon de Nanedi Vallis, dans la région de Xanthe Terra. Ici, le fond du canyon est plat, mais il contient un chenal beaucoup moins large qui serpente dans sa partie centrale, exactement comme on peut l'observer sur Terre.

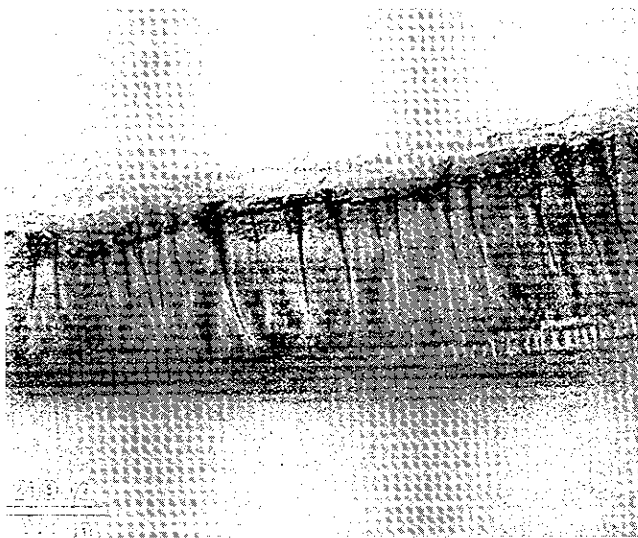


Image montrant le bord du cratère de Noachis Terra, les terrains stratifiés du plateau supérieur, une corniche au niveau du rebord et un réseau de rigoles pouvant avoir été creusées par des écoulements d'eau sur le flanc de la paroi.

(cliché Mars Orbiter Camera, Mars Global Surveyor, Nasa)

Les images de Viking avaient déjà montré une stratification des couches qui apparaissent sur les parois de Valles Marineris. Les clichés à haute résolution montrent des vallées ressemblant aux vallées de montagne. La région de Coloe Fossae comportant des vallées à fond plat remplies de débris d'érosion pourrait être une ancienne vallée glaciaire. Certains planétologues pensent détecter l'existence d'un littoral, ce qui impliquerait la présence dans le passé d'un océan.

Plus la résolution des images s'affine, plus l'existence dans le passé d'eau s'écoulant à la surface de la planète semble s'imposer.

Europe et les satellites de Jupiter

Lorsqu'il pointa sa lunette astronomique vers Jupiter, en 1610, Galilée nota immédiatement la présence, de part et d'autre de la planète, de quatre points brillants. A l'aide de croquis, il nota les positions respectives de ces points brillants et observa leur évolution au fil des nuits. Ceci lui permit d'établir une comparaison entre le mouvement de ces objets autour de Jupiter et le mouvement des planètes autour du Soleil. Il avait compris que le mécanisme était identique dans les deux cas. Depuis, on associe généralement le qualificatif de "galiléens" aux quatre satellites les plus proches de Jupiter : Io, Europe, Ganymède et Callisto. Parmi ces satellites, il est maintenant presque certain qu'Europe contient une importante quantité d'eau liquide surmontée d'une couche de glace constituant une banquise. Ganymède et Callisto possèdent également de la glace, mais sont peut-être dépourvus d'eau liquide. Ils sont également moins soumis aux contraintes gravitationnelles qu'Europe et que le plus proche satellite de Jupiter, Io, qui est le siège d'une intense activité volcanique.

Europe.

Europe est un satellite d'une taille assez importante, de diamètre 3138 km. Elle est un peu moins grande que la Lune et, par sa taille, se situe au 6ème rang parmi les satellites de notre système planétaire. L'hypothèse de la présence d'un océan sur les satellites galiléens avait été émise par Fanale en 1977. Deux années plus tard, les photographies des sondes Voyager montrèrent que la surface d'Europe ressemblait à celle de la glace, qu'elle était relativement plate et qu'elle était parcourue de grands sillons. Le fait le plus surprenant était qu'elle ne présentait pratiquement aucun cratère. Les photographies de Galileo montrent de longs traits qui peuvent être des fractures, des failles ou des crevasses, des blocs qui semblent s'être encastrés les uns dans les autres. On observe également quelques disques circulaires qui ne présentent pas de bords relevés comme les cratères d'impact. Il s'agirait de trous dans la glace correspondant à d'éventuelles éruptions sous-marines. Deux faits ont amené les planétologues à émettre l'hypothèse de l'existence d'un océan sous la banquise superficielle. D'une part, l'aspect de la surface montre qu'elle est soumise à des mouvements analogues à ceux d'une banquise. Ces mouvements sont liés au fait que la glace peut glisser facilement sur l'eau sous-jacente. D'autre part, étant donné qu'Europe se trouve près de Jupiter, elle subit des forces de gravitation différentielle (forces de marée) qui produisent de l'énergie et permettent à l'eau d'exister sous forme liquide.

L'éventualité de la présence d'eau liquide sur Europe a immédiatement amené les scientifiques pluridisciplinaires qui s'intéressent aux planètes à s'interroger sur l'éventualité d'une forme de vie sous-marine dans cet océan. Deux obstacles semblent s'opposer à cette hypothèse :

i) la faiblesse de la température

ii) l'absence de rayonnement solaire, à cause de l'éloignement de l'objet et de la présence d'une couche de glace.

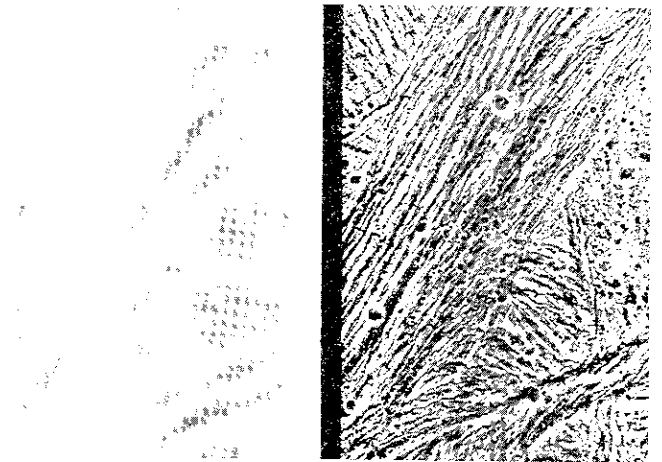
Or, un fait nouveau est apparu lorsque, à partir de 1978, des petits sous-marins ont permis d'explorer la dorsale mid-atlantique. Les images recueillies ont montré la présence, près des geysers sous-marins, de différentes espèces animales : poissons, crabes albinos et bactéries vivant à l'intérieur même de ces sources chaudes. Ces espèces constituent une biomasse fonctionnant d'une manière différente de celle que nous connaissons dans le monde terrestre environnant. Depuis, des biologistes s'intéressent à certaines formes de vie qui existent dans des étangs en milieu dépourvu d'oxygène. Ces découvertes, qui ont modifié les vues traditionnelles sur les conditions indispensables au développement de la vie, ont renforcé sérieusement l'hypothèse concernant l'existence d'une certaine forme de vie dans l'océan d'Europe. Dans un tel contexte scientifique, la mission Galileo a été prolongée afin de poursuivre l'observation en détail d'Europe. De nombreuses idées de missions ont été proposées pour percer cette banquise et rechercher la présence d'organismes dans l'eau qui existe peut-être sous cette glace.



Photographie de la surface d'Europe prise par la sonde Galileo
(cliché JPL-Nasa)

Ganymède et Callisto.

Les satellites Ganymède et Callisto présentent également une surface recouverte de glace. Le dégagement d'énergie à l'intérieur de ces satellites par les forces gravitationnelles est beaucoup plus faible que dans le cas d'Europe et de Io. Callisto, qui se situe à la plus grande distance de Jupiter, est constellé de cratères d'impact. De nombreux cratères présentent les structures radiales caractéristiques, comme ceux de Tycho et Kepler sur la Lune. Ganymède présente une surface intermédiaire entre celles d'Europe et de Callisto. De nombreux sillons sont visibles, mais il y a également un certain nombre de cratères d'impact).



Photographies de la surface de Ganymède prises par la sonde Voyager (à gauche) et par la sonde Galileo (à droite). On note l'amélioration considérable de la résolution des images entre les deux missions.
(cliché JPL-Nasa)

Io.

Io est le satellite le plus proche de Jupiter. Les premières photographies à haute résolution obtenues par la sonde Voyager 1 en 1979 ont révélé un objet très coloré, allant du jaune au rouge avec des zones noires. Une preuve évidente de volcanisme a été fournie par un cliché où l'on voit le panache d'un volcan situé au limbe par rapport à la sonde spatiale se détacher sur le fond noir du ciel. Les photographies prises par Voyager montrent la présence d'une cinquantaine de caldées volcaniques dont certaines sont entourées d'un anneau noir ou rouge (Pele Patera). Les images fournies par la sonde Galileo ont une résolution qui est encore meilleure et, surtout, le suivi de Io sur plusieurs mois a permis de photographier une éruption volcanique (Pillan Patera) entre avril et septembre 1997. Dans le cas des planètes telluriques, la source d'énergie à l'origine de l'activité volcanique est due à la radioactivité de certains éléments du noyau (uranium, plutonium). Dans le cas du satellite Io, la

source d'énergie est due aux forces de gravitation différentielle créées par le champ énorme de Jupiter. A cause de l'intense activité volcanique, les matériaux de la surface subissent un recyclage permanent, ce qui explique l'absence totale de cratères d'impact. Ces matériaux sont principalement du dioxyde de soufre et du soufre. Cet élément possède la propriété, suivant les conditions de refroidissement après sa fusion, de se présenter sous différentes formes qui ont les couleurs variées que l'on voit à la surface de Io.

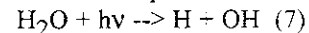
Les comètes

Les comètes sont constituées par un noyau solide dont les dimensions sont de l'ordre de quelques km à quelques dizaines de km et dont la forme est passablement éloignée de celle d'une sphère. Nous ne disposons, pour l'instant, que d'une seule série de photographies d'un noyau, celui de la comète de Halley. Ce noyau a une forme allongée et peut être inscrit dans un ellipsoïde de révolution de grand axe 16 km et de petit axe 8 km. La surface présente plusieurs cratères d'impact et des zones actives d'où s'échappent de la poussière et des gaz. Pendant la majeure partie de leur période de révolution autour du Soleil, les comètes sont inactives et leur noyau a le même mouvement que celui des astéroïdes. Une différence importante pourtant tient au fait que la trajectoire des comètes peut être nettement plus excentrée que celle des astéroïdes, confinés dans une zone située entre les orbites de Mars et de Jupiter. C'est ainsi que de nombreuses comètes ont une période tellement longue qu'elles semblent apparaître dans le ciel pour la première fois. On parle de nouvelle comète et son (ou ses) découvreur peut alors lui donner son propre nom.

Plus la comète se rapproche du soleil, plus sa vitesse linéaire, qui varie sensiblement en $1/r$ où r est la distance au Soleil, devient importante. Lorsqu'elle se trouve à moins de 3 unités astronomiques (c'est à dire 3 fois 150×10^6 km), la comète devient active. Un environnement de poussière et de gaz provenant du noyau enveloppe cet objet. Sous l'effet du rayonnement solaire, la poussière est repoussée dans la direction opposée au Soleil, créant une queue de poussière incurvée et blanche et certaines molécules s'ionisent en créant une queue ionique, rectiligne et torsadée, de teinte bleutée.

L'existence d'eau sous forme de glace dans le noyau des comètes a été suggérée en 1950 par F. Whipple, qui a proposé le concept de "boule de neige sale" pour désigner en fait un mélange de glace et de poussière. Par spectroscopie, on ne peut pas avoir directement accès à la composition du noyau, trop petit pour pouvoir être étudié depuis la Terre, mais on peut connaître un certain nombre de composés de l'environnement proche du noyau appelé coma. Ces composés sont les suivants : OH, NH, CN, C₃, CH, C₂, NH₂ et des métaux comme le sodium. La présence du radical hydroxyle dans la coma constitue une preuve indirecte de la présence

d'eau dans les comètes car ce radical peut être produit par photolyse de l'eau suivant le processus :



Cette preuve indirecte a été renforcée en 1970 par la détection d'un immense nuage d'hydrogène atomique dans les comètes Tago-Sato-Kosaka et Bennett. Enfin, l'eau a été détectée directement par ses raies d'émission infrarouges dans la comète de Halley.

La dernière décennie a été particulièrement bénéfique pour l'étude des comètes car trois événements importants se sont produits :

- l'impact du noyau de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter en 1994.

- le passage de la comète Hyakutake au printemps 1996.

- le passage de la comète Hale-Bopp en 1996-97.

L'étude de ces comètes a confirmé le fait que leur noyau est constitué pour 90% de glace d'eau. Il prend une quantité variable de monoxyde de carbone pouvant atteindre 20%, ainsi que du CO₂, du méthanol, du formaldéhyde et d'autres composés en moindres proportions comme des hydrocarbures polycycliques aromatiques.

La glace peut exister sous plusieurs formes, suivant la température. Lorsque celle-ci est inférieure à -163°C, elle n'est plus cristallisée et a une structure amorphe. Entre -163 et -123°C, la glace a une structure cristalline cubique. Au dessus, entre -123 et 0°C, la glace existe sous la forme que l'on connaît sur Terre : cristalline avec une structure hexagonale, l'atome d'oxygène se trouvant au centre d'un tétraèdre. Au sein des noyaux de comète, la glace existe sous l'une des deux formes : amorphe ou cristalline cubique. Les changements de phase qui accompagnent l'augmentation de température lorsque la comète se rapproche du Soleil peuvent se traduire par un dégagement d'énergie et l'apparition d'une activité cométaire.

L'intérêt que présente l'étude des comètes résulte des caractéristiques de leurs orbites. En effet, elles obéissent à la loi des aires et se déplacent d'autant plus lentement qu'elles se trouvent loin du soleil. Par conséquent, la période où elles passent près du soleil est comparativement très brève et le reste du temps, elles sont inactives. De plus, leur gravité est faible et elles ne sont pas, sauf cas particulier comme S-L 9, soumises à l'attraction de grosses planètes comme Jupiter. Il en résulte que les noyaux de comètes ont subi peu de modifications depuis la formation du système solaire. Il s'agit donc d'objets de choix pour obtenir des indications sur la composition de la nébuleuse proto-solaire et les conditions de formation du système solaire.

Comètes et mini-comètes comme apport d'eau pour la Terre ?

On considère maintenant que les comètes ont apporté un certaine partie, évaluée à environ 10%, de l'eau qui est présente sur Terre. Cet apport d'eau a certainement été plus important par le passé qu'il ne l'est actuellement. Un scientifique américain, L. Franck, mène actuellement un programme de détection de mini-comètes. Ces objets, en rencontrant l'atmosphère terrestre, fourniraient un apport permanent

d'eau à la planète bleue. Cet apport serait compensé par l'échappement des atomes d'hydrogène et d'oxygène provenant de la photolyse de la vapeur d'eau.

Le milieu interstellaire

Environ 90% de la matière de la Galaxie (la Voie Lactée) se trouve dans les étoiles. Le reste, environ 10%, se situe dans l'espace interstellaire, la distance moyenne entre les étoiles étant de 2 à 3 parsecs (environ 8×10^{13} km). La densité moyenne de l'espace interstellaire est inférieure à 0,1 particule par cm^3 . La matière interstellaire se concentre dans des nuages qui sont classés comme "diffus" (environ 1 particule/ cm^3) ou comme "denses" (environ 1000 particules/ cm^3). On distingue généralement quatre types de nébulosités :

- les régions HII constituées d'ions comme HII (H^+), OII (O^+), OIII (O^{2+}), NII (N^+). L'ionisation de ces éléments est due à l'action du rayonnement riche en ultraviolet d'étoiles jeunes du type O.

- les nébuleuses par réflexion, qui comportent une quantité importante de particules de poussière qui diffusent le rayonnement (il serait en fait plus approprié de parler de nébuleuses par diffusion).

- les nébuleuse planétaires
- les restes de supernovae.

La composition du milieu interstellaire

L'étude de ces milieux astrophysiques s'effectue dans le visible (série de Balmer de l'hydrogène, $\text{H}\alpha$ à 656,3 nm, $\text{H}\beta$ à 486,1 nm), dans l'infrarouge (satellites IRAS et ISO) et dans le domaine radio.

L'eau dans le milieu interstellaire

La détection de l'eau, comme celle de l'oxygène nécessite généralement de s'affranchir de l'atmosphère terrestre. Dans le cas de l'eau, il est au moins indispensable de se trouver au dessus de la troposphère qui contient la plus grande partie de l'eau terrestre. Un seul cas permet de tenter de détecter de l'eau à partir de sites au sol : il s'agit des objets pour lequel le décalage Doppler est suffisant. Ceci se produit lorsque le mouvement propre de l'objet est important (comètes) ou lorsque le décalage vers le rouge déplace suffisamment le spectre de la source par rapport aux raies telluriques (source lointaine).

Il est très difficile d'effectuer une détection de l'eau par absorption dans le spectre d'une étoile ou d'un objet situé au-delà du nuage moléculaire étudié. Il convient donc d'essayer de détecter les raies en émission. Il s'agit de raies de rotation, ou vibration-rotation qui se situent dans l'infrarouge. Deux satellites, IRAS, puis ISO, ont été construits pour effectuer

des mesures spécifiquement dans l'infrarouge. Pour éliminer le rayonnement infrarouge émis par les instruments eux-mêmes, les télescopes à bord étaient maintenus à une température proche de 0 K grâce à une enveloppe contenant de l'hélium liquide.

Le satellite ISO a détecté de la vapeur d'eau dans la nébuleuse d'Orion, ainsi que dans la plupart des régions de la Galaxie où la température est suffisamment faible pour que l'eau existe sous forme gazeuse ou solide. La présence d'eau avait été révélée par la radioastronomie, mais il s'agissait de mesures limitées à certains nuages moléculaires. Maintenant, il apparaît que l'eau est omniprésente dans la Galaxie, partout où se trouve du gaz à basse température.

L'eau dans les sources extragalactiques

L'eau a été détectée pour la première fois récemment dans des sources lointaines en radioastronomie (Combes et Wiklind, 1998). La raie fondamentale de l'eau à 557 GHz, décalée vers le rouge à 331 GHz, a été détectée devant le quasar B0218+357. L'oxygène moléculaire a également été détecté alors que, jusqu'à ce jour, il n'avait pas pu être mis en évidence dans le milieu interstellaire.

Conclusion

L'eau, qui nous est si familière, est un corps extrêmement précieux. Il est remarquable de constater peu à peu, au fur et à mesure que les moyens d'observation et de détection se perfectionnent, que l'eau existe pratiquement partout où l'on veut bien la chercher dans l'Univers. Un des grands thèmes qui motivera les scientifiques dans les années à venir est la recherche de formes de vie dans des milieux autres que la Terre. Le fait d'avoir détecté de l'eau dans des objets comme le satellite Europe constitue l'encouragement le plus efficace pour continuer dans cette voie.

Références :

- Audouze J. et Israël G. 1983. Le grand atlas de l'astronomie, Encyclopædia Universalis, pp. 452.
- Combes F. et Wiklind T., 1998. Molécules et formation d'étoiles au début de l'Univers, L'Astronomie, 112, pp. 206-211.
- Rasool S.I. et De Bergh C., 1970. The runaway greenhouse and the accumulation of CO_2 in the Venus atmosphere, Nature, 226, pp. 1037-1039.
- Watson K., Murray B. and Brown H., 1961. On the possible presence of ice on the Moon. J. Geophys. Res., 66, (5), pp. 1598-1600.
- Whipple F. L., 1950. A comet model I: the acceleration of comet Encke, Astrophys. J., 111, pp. 375-394.

■