

L'origine de l'eau sur Terre






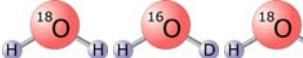
Cécile Ferrari, astrophysicienne au CEA, professeur à Paris 7 et présidente du CLEA

Une minutieuse enquête d'investigation pour retrouver l'origine de l'eau sur Terre à partir des rapports D/H mesurés dans les comètes et les chondrites carbonées. Une méthode apparemment simple qui se révèle délicate de fait des mouvements migratoires des planètes géantes.

La Terre est recouverte d'océans, dont la masse reste pourtant négligeable en proportion de celle des roches. La question de l'origine de l'eau qu'ils contiennent n'en est pas pour autant facile à résoudre. En effet, la quantité d'eau disponible dans la zone des planètes telluriques au moment de leur formation est faible. D'abord du fait de la température qui y règne, ensuite parce que la température d'un embryon planétaire, en fusion à ce stade, va causer l'évaporation de l'eau éventuellement présente dans les roches agglomérées. Il faut donc envisager un apport tardif de planétésimaux riches en eau, un apport conséquent tout de même. D'où vient cette eau si elle n'a pas été apportée par les roches agglomérées pour former l'embryon terrestre ? Une réponse difficile à donner qui repose sur de nombreuses inconnues que les astrophysiciens tentent de cerner. La mission Rosetta vient apporter sa pierre à l'édifice.

Marquer l'eau : le rapport D/H

L'eau de nos océans est « marquée ». Cette marque signe-t-elle son origine ? Cette marque, c'est la substitution dans la molécule d'eau d'un atome d'hydrogène (H) par un atome de deutérium (D), isotope de l'hydrogène, pour former HDO. Il faut bien noter que d'autres isotopes de l'eau existent puisque l'oxygène possède trois isotopes stables dont les deux principaux, ^{16}O et ^{18}O , permettent de former H_2^{16}O , H_2^{18}O , HD^{16}O et HD^{18}O . L'eau nous présente donc des facettes bien diverses.

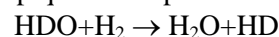
^1H ou H	Hydrogène léger (le plus courant) : 1 proton (+ 1 e)	
^2H ou D	Hydrogène « lourd » ou deutérium : 1 proton + 1 neutron (+ 1 e)	
^{16}O	Oxygène le plus abondant : 8 protons + 8 neutrons (+ 8 e)	
^{18}O	Isotope de l'oxygène : 8 protons + 10 neutrons (+ 8 e)	
H_2O	Eau. Forme la plus courante H_2^{16}O : 2 atomes de ^1H + 1 atome de ^{16}O .	
	Autres formes :	

Le compte de l'abondance relative de ces isotopes dans l'eau de nos océans permet d'établir un standard, le VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), l'eau des océans moyenne et standard, pour lequel $\text{D}/\text{H} = 155,8 \times 10^{-6}$. L'eau a évidemment été purifiée préalablement de tous les sels et des micro-organismes.

Le rapport isotopique standard RSTD pour l'eau est défini comme le rapport d'abondance entre l'isotope le plus lourd, donc HDO ici, et le plus léger, H_2O :

$$R_{\text{STD}} = \frac{[\text{HDO}]}{[\text{H}_2\text{O}]}$$

Le principal réservoir de deutérium (D) dans la nébuleuse solaire est l'hydrogène moléculaire (HD et H_2). Dans leur phase vapeur, les molécules plus massives (dont l'eau qui est la plus présente) vont interagir avec cet hydrogène et opérer un échange isotopique. Dans l'eau protosolaire, on s'attend à un rapport D/H de $1\,000 \times 10^{-6}$ entre HDO et H_2O . Il est donc nécessaire, pour expliquer les rapports D/H plus faibles observés aujourd'hui dans le Système solaire que l'échange isotopique entre HDO et H_2 ait réduit le rapport initial dans l'eau protosolaire. Les conditions de cet échange vont varier avec la distance au Soleil, la turbulence dans la nébuleuse protosolaire, la densité du gaz, etc... L'efficacité de l'échange isotopique décrit par la réaction :



est corrélée avec la température et la densité du gaz. On s'attend donc à ce qu'il augmente avec la distance au Soleil.

La provenance de l'eau : vaste question

D'où vient l'eau ? Les sources sont des objets formés plus loin, sans doute au-delà de la ligne des glaces d'un Soleil jeune, là où l'eau peut se condenser et s'agglomérer avec des grains de roche. Les chondrites carbonées qui forment un sous-ensemble des météorites de roches primitives, contiennent beaucoup d'eau par exemple. Les comètes encore plus, puisque l'eau en est le composant essentiel.

Dès que l'eau condense sous forme de glace, celle-ci enregistre le rapport isotopique de la vapeur d'eau, D/H, à cet instant et à cet endroit. Évidemment tout ceci se passe dans une nébuleuse chauffée et turbulente où la convection favorise le mélange... La turbulence du gaz va transporter et mélanger les petits grains condensés jusqu'à ce qu'ils soient assez gros pour avoir un mouvement indépendant du gaz turbulent. Cette étape de modélisation de l'histoire dynamique est peu connue. Les modèles proposés couplant ces effets complexes montrent tous que l'enrichissement de l'eau en deutérium augmente avec la distance. Sans prendre en compte la turbulence, on peut faire apparaître déjà avec certains modèles un ordre de grandeur en enrichissement entre 5 et 50 ua (unités astronomiques). On perçoit ici la difficulté à fixer la provenance, le site de condensation d'une molécule de glace. La turbulence ne semble cependant pas capable de modifier cette tendance profonde à une augmentation de D/H dans l'eau avec la distance. On peut donc espérer que tous les corps sans atmosphère primitive aient une marque de D/H qui témoigne du lieu où les grains qui les constituent ont été formés.

Les grains de glace se découplent ensuite de la dynamique du gaz et vont former des corps plus gros, comme les comètes ou intégrer des corps en proportion plus rocheux. Les grains sédimentent et s'agglomèrent dans le plan du disque protoplanétaire en moins d'un million d'années et forment des embryons planétaires, les planétésimaux. Les planètes géantes se forment très vite, en moins de dix millions d'années, assez vite pour agglomérer le gaz primordial de la nébuleuse avant qu'elle ne s'évapore. Une difficulté supplémentaire apparaît alors si l'on considère l'histoire dynamique des planètes. Elles entrent en résonance mutuelle et génèrent alors un grand chaos, celui du grand bombardement tardif, entre 700 et 800 millions d'années, un chaos qui va disperser les planétésimaux résiduels de la zone des planètes géantes dans tous les coins du Système solaire. De telle manière qu'il est difficile de savoir à quel endroit effectivement un corps a été formé, car il n'y est vraisemblablement pas toujours resté. Ainsi la carte initiale du rapport D/H en fonction de la distance, « gelée » dans les grains de glace, est-elle peut-être aujourd'hui complètement brouillée et effacée. Le décodage de la carte actuelle s'annonce ardu...

Les rapports D/H dans le Système solaire

Le rapport isotopique D/H du gaz primordial de la nébuleuse proto-solaire est mesuré dans la molécule

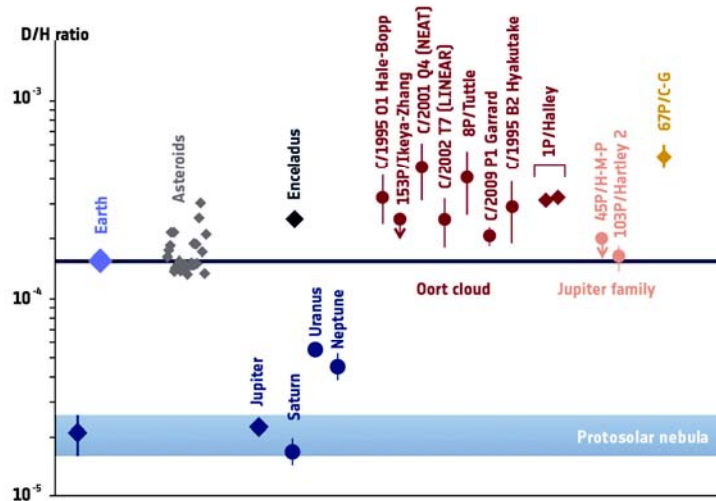
H₂, sous l'effet de l'échange isotopique HD-H₂. Celui des atmosphères des planètes géantes Jupiter et Saturne définit le rapport D/H de la nébuleuse protosolaire. Il vaut 25×10^{-6} . Les rapports D/H légèrement plus élevés d'Uranus et de Neptune peuvent s'expliquer par le fait qu'elles ont été formées de planétésimaux agglomérés plus loin, de grains de glace à D/H plus important (voir figure 1). Le rapport D/H mesuré à partir de l'eau présente dans les chondrites carbonées s'avère être en moyenne très proche de celui de la Terre, aux alentours de $(140 \pm 10) \times 10^{-6}$ à comparer à $(156 \pm 1) \times 10^{-6}$. Les poussières interplanétaires montrent une plus grande diversité dans ce rapport, avec un pic proche de celui des chondrites carbonées mais très large, s'étendant vers les valeurs des comètes. Ce réservoir de poussières est donc sans doute alimenté par tous ces petits corps.

Notre Système solaire semble être nanti de deux réservoirs de comètes situés à des distances bien différentes, l'un dans la ceinture de Kuiper entre 30 et 50 ua, l'autre dans le nuage de Oort au-delà de 5 000 ua du Soleil. Vu la théorie avancée jusqu'ici, on devrait donc s'attendre à des rapports D/H bien distincts pour ces deux familles. Il faut cependant tenir compte de l'évolution de notre système planétaire décrite plus haut. Le désormais célèbre modèle de Nice, qui prédit ce coup de balai monumental des planètes géantes, nettoyant tout leur environnement des planétésimaux qui les entourent, suggère que les comètes de Oort ont été formées dans la zone originelle de Jupiter et Saturne, certains pensent qu'elles sont nées plutôt dans le voisinage d'Uranus et de Neptune. Les objets de la ceinture de Kuiper, qui sont actuellement plus proches de nous que les comètes de Oort, auraient été formés en fait plus loin, au-delà de l'orbite de Neptune à l'époque, c'est-à-dire entre 15 et 30 ua. Ceux d'entre eux qui sont plus excités dynamiquement, et suivent des orbites très excentriques car ils ont subi une influence gravitationnelle importante de Neptune dans leur histoire, constituent le Disque Diffusé. Les comètes qui voyagent dans le Système solaire intérieur, à courte période, désignées sous le nom de famille de Jupiter, viendraient de cette région-ci.

Vu ces pronostics, on peut donc s'attendre à ce que les rapports isotopiques des comètes de la famille de Jupiter aient un rapport D/H plus fort, car formées plus loin que celles du nuage de Oort. Il faut aussi s'attendre, vu l'incertitude sur l'origine des comètes de Oort, que leur D/H soit assez varié et donc que la distinction soit de fait assez difficile à faire. Déjà, parmi ces comètes, Halley, Hale-Bopp et Hyakutake, présentent des D/H mesurés dans l'eau très

similaires : $[310 \pm 40, 290 \pm 80, 330 \pm 80] \times 10^{-6}$ respectivement. Est-ce fortuit ou se sont-elles effectivement formées au même endroit ? Les mesures de D/H dans le domaine radio faites pour établir ces rapports sont difficiles. L'échantillon est statistiquement trop réduit pour conclure à ce stade.

Avec quelques autres mesures, la valeur moyenne du rapport D/H dans les comètes du nuage de Oort est estimé, en 2011, à $(295 \pm 25) \times 10^{-6}$, un facteur 2 donc au-dessus du VSMOW. À ce stade, il semble acquis que le réservoir d'eau terrestre se trouve dans la ceinture des astéroïdes.



Rapport D/H mesuré dans le Système Solaire dans les différents groupes identifiés : planètes géantes (bleu nuit), comètes de Oort (rouge), comètes joviennes (rose), chondrites carbonées (gris), Terre (bleu clair) et Tchourioumov-Guérassimenko (jaune). (d'après 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio, K. Altwegg et al., Science express reports, 11 Dec 2014 / Page 1 / 10.1126/science.1261952)

Les dernières nouvelles du front D/H

De nouvelles mesures ont pu être faites récemment dans les deux réservoirs cométaires grâce au satellite Herschel et à l'exploration in situ de la sonde Rosetta.

Le satellite Herschel, grâce à sa couverture du domaine infrarouge et sub-millimétrique a observé la comète à courte période 103P/Hartley 2 de la famille de Jupiter. Les mesures ont été faites à partir de la vapeur d'eau libérée dans la coma, spécifiquement avec les molécules $H_2^{18}O$ et HDO. À défaut d'interprétation fiable des raies de rotation de la molécule $H_2^{16}O$, $H_2^{18}O$ permet une détermination, difficile certes mais plus fiable dans ce cas, du rapport D/H. Les fréquences des raies de rotation des molécules d'eau HDO et $H_2^{18}O$ sont évidemment différentes puisqu'elles dépendent des masses des atomes présents : pour HDO, elle se trouve à 509,292 GHz (589 μ m) et pour $H_2^{18}O$ à 547,676 GHz (548 μ m). Le calcul du rapport D/H nécessite un modèle pour traduire l'intensité des raies émises en taux de production des molécules et en densité présente ainsi que la mesure de $^{18}O/^{16}O$ dans la vapeur d'eau. Le rapport D/H déterminé par cette méthode est de $(161 \pm 25) \times 10^{-6}$, donc pleinement compatible avec la valeur mesurée sur

Terre ! Ce rapport est clairement plus faible que celui des comètes de Oort, censées être formées plus près du Soleil et donc avoir un D/H plus faible. Ceci pose donc la question de savoir si c'est l'hypothèse de lieu de formation de cette comète qui n'est pas le bon ou si c'est la dépendance effective à la distance héliocentrique qui n'est pas conforme à l'attendu du modèle. Peut-être cette comète a-t-elle été formée plus près, du côté des astéroïdes troyens qui ont peu bougé de leur proche voisinage de Jupiter. Ou bien encore, est-ce le modèle dynamique de turbulence dans le nuage de gaz protosolaire qui n'est pas le bon, minimisant l'effet de la turbulence qui aurait en réalité opéré un mélange bien plus conséquent des grains proto-cométaires... Ou bien la région où le D/H est comparable à celui de la Terre est plus étendue qu'attendue ! Le réservoir d'eau potentiel de la Terre s'étendrait alors plus loin que la ceinture des astéroïdes et pourrait être d'origine cométaire aussi... mais dans quelle proportion ?

Une mesure plus récente sur une comète du nuage de Oort, C/2009 P1 (Garrad), avec le même instrument et plusieurs raies d'émissions dont celle de H_2O à 556,936 GHz cette fois-ci, a produit un rapport D/H de $(206 \pm 22) \times 10^{-6}$, donc bien plus faible et significativement différent du rapport attendu de 295×10^{-6} . Au sein d'un même réservoir, la diversité serait-elle donc de rigueur ? De plus la

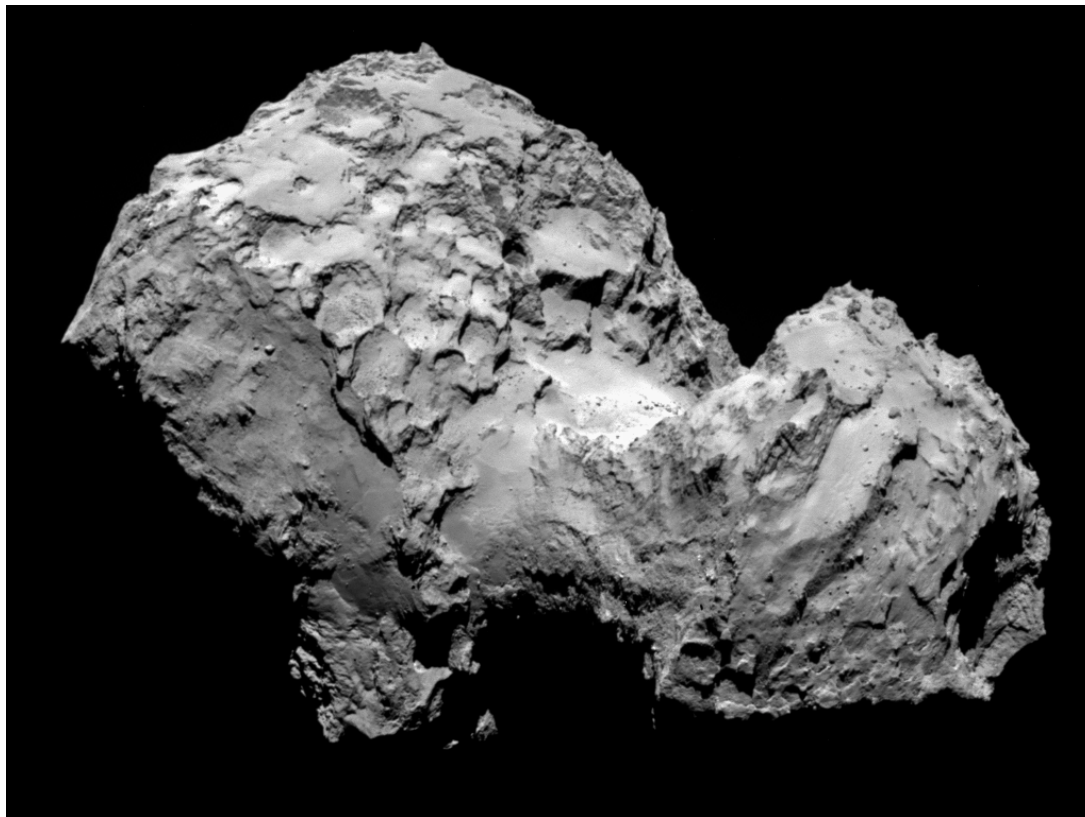
dichotomie du rapport D/H entre les deux réservoirs semble s'effacer... Ce rapport reste cependant significativement différent du rapport isotopique terrestre. Pour aller dans ce sens-là encore, l'estimation du rapport D/H pour la comète de Halley a été réévaluée depuis à 210×10^{-6} au lieu de 310×10^{-6} .

Reste à savoir si le rapport D/H mesuré dans la coma par cette méthode est le même que sur le noyau de la même comète ! En effet, on pourrait penser que le rapport D/H dans la vapeur est différent de celui mesuré dans la glace, in situ, l'éjection favorisant peut-être les molécules les plus légères et donc moins riches en deutérium, par ce qu'on appelle un fractionnement cinétique. D'où l'intérêt de mesurer le rapport D/H in situ de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, alias « Tchouri ».

Le rapport D/H de « Tchouri »

La mesure faite pour la comète de Halley de la sonde Giotto était certes in situ, réalisée non plus en spectroscopie de raies d'émission mais avec un spectromètre de masse. Le rapport D/H de l'eau dépendait cependant d'une hypothèse sur le rapport isotopique de l'oxygène. Le spectromètre de masse ROSINA de la sonde Rosetta a pu mesurer direc-

tement le rapport D/H dans l'eau à partir des molécules $\text{HD}^{16}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ et $\text{HD}^{18}\text{O}/\text{H}_2^{18}\text{O}$ en août dernier, à seulement 60 km de distance du noyau de « Tchouri ». Il a détecté dans la coma, autour de la masse 19 uma (unité de masse atomique), de nouvelles émissions au-dessus du bruit. En effet, à cette masse, on trouve le fluor de la fluorine (la graisse embarquée, de masse atomique 18,99 uma), les molécules H^{18}O , H_2^{17}O qui vont gêner la mesure de HD^{16}O si son émission n'est pas assez puissante. À cette altitude, elle l'est et le rapport D/H pour H_2^{16}O donne $(530 \pm 70) \times 10^{-6}$!!! Une valeur donc bien au-dessus des mesures obtenues pour les comètes de la même famille de Jupiter, telle Hartley 2, et un facteur presque deux au dessus de celui des comètes de Oort. Cette mesure est donc cohérente avec un modèle qui propose une variation croissante de D/H en fonction du lieu de formation et un scénario d'évolution dynamique tel que proposé par le modèle de Nice. Cependant ce résultat implique que le réservoir des comètes joviennes suit aussi le principe de diversité ?! Finalement le réservoir de l'eau terrestre serait-il essentiellement niché dans les astéroïdes ? Contrairement aux apparences, nous progressons sur la question !!



La comète 67P/Churyumov-Gerasimenko photographiée le 3 août dernier par l'instrument OSIRIS de la sonde Rosetta à une distance de 285 km. La résolution de l'image est de 5,3 mètres par pixel (Crédit photo ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/ IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA. ■