

THÈME : L'EAU

ARTICLE DE FOND

L'origine de l'eau

Une interview de **Pierre Thomas** recueillie par Charles-Henri Eyraud

On trouve de l'eau partout, sur Terre, dans le système solaire ou dans les nuages interstellaires. Il nous a semblé intéressant d'essayer de retracer son origine depuis le Big Bang. Nous avons pour cela interrogé Pierre Thomas, professeur à l'ENS de Lyon et spécialiste de planétologie.

CLEA. Une molécule d'eau est constituée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène. D'où provient l'hydrogène que l'on trouve dans la molécule d'eau ?

Pierre Thomas

L'hydrogène, à part peut-être celui qui est fait dans quelques réacteurs nucléaires, ne vient que du Big Bang. Le noyau d'hydrogène 1 (^1H) c'est un proton, l'hydrogène 2 (^2H) deutérium, c'est 1 proton et 1 neutron, l'hydrogène 3 (^3H) tritium, 1 proton et 2 neutrons. L'origine du proton et du neutron, c'est le Big Bang. La nucléosynthèse qui a lieu lors du Big Bang ne donne que de l'hydrogène 1 et 2, de l'hélium ^3He et ^4He , et un chouia de lithium ^7Li ; d'après les théoriciens, rien de plus lourd que ^7Li .

CLEA. Et pour l'oxygène ?

Pierre Thomas

L'oxygène, c'est autre chose. Avec sa masse atomique de 16, 17 ou 18, il est arrivé plus tard. Les astronomes savent très bien comment se fait l'oxygène, il suffit de prendre 4 noyaux d'atomes d'hélium, de les fusionner, et ça donne de l'oxygène ; 4×4 , ça fait de l'oxygène 16 (^{16}O). Cela ne se crée pas directement, c'est d'abord la fusion de deux atomes d'hélium 4 et 4, qui donne du béryllium 8 (^8Be), ça se passe dans les étoiles. ^8Be est un corps radioactif qui a une période d'une fraction de seconde ; si, pendant cette fraction de seconde, il rencontre un troisième hélium avant de se désintégrer, on obtient du carbone (8 et 4, ça fait 12) ; et s'il en rencontre un quatrième, ça fait de l'oxygène. Cela se passe à une température d'à peu près 100 millions de degrés, donc ça ne se rencontre pas dans une étoile comme le Soleil qui est beaucoup trop froide (le cœur du Soleil, c'est 15 millions de degrés), ça se fait dans les étoiles beaucoup plus chaudes qu'on appelle des géantes rouges où la température plus élevée permet de fusionner l'hélium pour faire du carbone et de l'oxygène.

Et quand cette étoile continue sa petite vie, quand il n'y a plus d'hélium, grosso modo, le cœur se contracte

parce qu'il n'y a plus assez d'énergie pour contenir la gravité ; si le cœur se contracte, il se réchauffe ; s'il se réchauffe, la température va atteindre plusieurs centaines de millions de degrés, et là d'autres réactions nucléaires sont possibles, par exemple deux atomes de carbone peuvent fusionner pour faire un atome de magnésium 24 (^{24}Mg) ; un atome de carbone et un d'oxygène font un atome de silicium 28 (^{28}Si), deux atomes d'oxygène peuvent fusionner pour donner un atome de soufre 32 (^{32}S) et ainsi de suite. Le cœur d'une étoile, c'est un ascenseur à Mendeleïev, un giga réacteur à fusion nucléaire.

En résumé, une étoile comme le Soleil ne fait dans son cœur que de l'hélium (à 15 millions de degrés). L'étape d'après (100 millions de degrés), l'hélium donne du carbone et de l'oxygène, et l'étape suivante se passe uniquement dans les supergéantes rouges, mais cela ne concerne pas l'eau.

On peut s'amuser à chercher l'origine d'un verre d'eau, ou d'un verre de beaujolais. Le verre, pour simplifier, c'est du silicium et de l'oxygène, le beaujolais, c'est de l'eau et de l'alcool, donc de l'oxygène du carbone et de l'hydrogène ; d'où proviennent silicium, oxygène, carbone, hydrogène ? L'hydrogène vient du Big Bang, l'oxygène et le carbone viennent des géantes rouges, et le silicium vient des supergéantes rouges. Un verre de beaujolais, c'est un beau résumé de l'histoire de l'Univers (à consommer avec modération).

CLEA. En cours de chimie, on apprend à fabriquer de l'eau en faisant exploser un mélange de dihydrogène et de dioxygène. Mais comment l'eau s'est-elle formée dans les nuages interstellaires ?

Pierre Thomas

On n'a pas besoin de faire exploser un mélange de dioxygène et de dihydrogène pour faire de l'eau. Moi, par exemple, quand je mange du sucre, je l'oxyde par respiration cellulaire et cela produit du dioxyde de carbone et de l'eau que l'on évacue par les poumons. Quand on brûle du glucose, on fait de l'eau. Avec n'importe quel corps riche en hydrogène (réducteur)

mis en contact avec un corps riche en oxygène (oxydant), on fait des réactions d'oxydoréduction qui produisent de l'eau. Donc il n'y a pas qu'une façon de faire de l'eau. Et ceci à une température assez basse. Mais à partir de quelques milliers de degrés, l'eau se décompose. Un chimiste sait qu'il y a un équilibre entre H_2O , H_2 et O_2 et que plus la température est élevée, plus on décompose de l'eau. Mais il faut chauffer très fort.

Dans une étoile c'est tout à fait autre chose. Dans la première génération d'étoiles post Big Bang, il n'y avait que de l'hydrogène et de l'hélium donc pas d'oxygène. Mais quand la première étoile a fabriqué de l'oxygène, cet oxygène s'est dispersé quand l'étoile est morte et a expulsé ses parties périphériques, soit gentiment (supergéante rouge, nébuleuse planétaire), soit violemment (supernova) et donc tout ce qu'avait fabriqué l'étoile a pollué l'environnement.

Et dans les déchets nucléaires qui ont pollué l'environnement, il y a l'oxygène, le carbone, le magnésium, etc. Donc au bout de la 2^e ou 3^e génération d'étoiles, les nébuleuses qui n'étaient pas encore devenues étoiles ont été polluées ; elles contenaient alors de l'oxygène et de l'hydrogène qui ont réagi assez facilement : l'oxygène est tellement avide de tous les réducteurs qu'il s'associe avec tout ce qui est avide d'oxygène. L'hydrogène est de loin le corps le plus abondant de l'Univers (90 % en nombre de noyaux) et en particulier des nébuleuses ; et l'oxygène est le 3^e corps de l'Univers en abondance ; le 2^e c'est l'hélium (9,9 % des noyaux) mais comme il ne réagit pas, on n'en parle pas), le 4^e c'est le carbone, le 5^e c'est l'azote, ensuite viennent le fer et le magnésium.

L'oxygène, c'est donc le deuxième corps réactif et il n'est jamais tout seul. O_2 libre, c'est une monstruosité (dans l'Univers, il n'y a vraiment pas beaucoup d'endroits où il y a de l' O_2 libre). Donc l'oxygène se répartit en oxydant le magnésium, le silicium, le carbone, l'azote et l'hydrogène. C'est de la chimie. L'oxygène est avide de silicium et magnésium et les oxyde à 100 %. Mais il reste encore de l'oxygène. Alors il se partage entre le fer (dont il est moyennement avide), l'hydrogène (qu'il aime beaucoup), le carbone qu'il aime assez et l'azote qu'il aime beaucoup moins. C'est une histoire de chimie et ces préférences dépendent de la température. S'il y a de l'oxygène, de l'hydrogène et du carbone (avec de l'hydrogène en excès) l'oxygène se partagera entre H_2O , CO , CO_2 ... Le carbone se partagera entre CO , CO_2 ... L'azote préfère de loin soit être tout seul (N_2) soit se combiner avec l'hydrogène pour faire de l'ammoniac, les oxydes d'azote sont rarissimes dans l'Univers. Pour le fer, quelques pourcents seulement sont oxydés en FeO principalement. Ce qui reste est sous forme Fe ; ce FeO va s'associer à MgO et SiO_2

pour former $Si(Fe,Mg)_2O$ c'est-à-dire l'olivine, principal composant de la Terre et des météorites, ...

CLEA *Et comment cette eau est arrivée jusqu'à nos océans ?*

Pierre Thomas

Il y a 30 ou 40 ans, j'aurais dit que la Terre s'est formée par accumulation de chondrites¹ qui sont tombées les unes sur les autres. Les chondrites ordinaires contiennent peu d'eau (1/1 000 à 1/10 000 en masse), sauf une classe particulière de chondrites qu'on appelle les chondrites carbonées, qu'on devrait plutôt appeler les chondrites hydratées, parce qu'elles peuvent contenir jusqu'à 10 % d'eau. Le pourcentage d'eau dans les chondrites varie donc de 0,01 % à 10 %. Une chondrite de base contient à peu près 1 pour 1 000 d'eau, or la Terre contient à peu près 1 pour 1 000 d'eau. Beaucoup de gens s'imaginent que la Terre, c'est la planète océan ; c'est vrai, l'eau couvre les 5/7 de la surface, mais sur une épaisseur si faible ! Et le manteau contient à peu près autant d'eau mais diluée dans les minéraux sur 3 000 km d'épaisseur. Grosso modo, la masse de la Terre, c'est 10^{24} kg et la masse d'eau c'est 10^{21} kg. Donc la Terre c'est 1 pour 1 000 d'eau, à peu près comme les chondrites, en ordre de grandeur. On disait : « c'est très simple, la Terre s'est créée par rassemblement de chondrites comme la chaleur d'accrétion a tout fait fondre, il y a eu différenciation et une grande partie des corps volatils dont l'eau sont sortis et restés à la surface ».

Mais cela ne peut pas marcher parce que ce processus donne une surface très chaude, et l'eau part dans l'espace. Il faut donc imaginer un autre processus : l'eau que contenaient les briques qui ont fait la Terre a dû partir, la surface s'est refroidie, et il est donc arrivé de la « nouvelle eau » après.

Cette eau est arrivée pendant le premier milliard d'années et surtout au tout début de ce premier milliard d'années. La Terre a reçu plein de chondrites et plein de comètes. Le système solaire n'était pas stable et de nombreux événements se sont passés : par exemple Neptune, qui était situé entre Uranus et Saturne s'est baladé pour aller là où il est maintenant ; il est rentré dans la ceinture de Kuiper – la ceinture de Kuiper, ce sont des blocs de glace – et ça a créé un « bazar » pas possible et de très nombreux blocs de glace ont bombardé le système solaire interne.

Pendant environ 500 millions d'années, la Terre en a reçu plein la figure, en particulier des chondrites carbonées et des comètes c'est-à-dire des silicates hydratés venus du système solaire interne et des comètes qui sont venues du système solaire externe. On pense vraiment que l'eau est venue de ce bom-

¹ Il s'agit des météorites les plus fréquentes constituées de $\frac{3}{4}$ de silicates, $\frac{1}{4}$ de fer natif et d'un peu d'eau.

bardement tardif (appelé le « vernis tardif »).

Il y a d'autres indices de ce bombardement tardif. Prenons un métal assez rare, le nickel par exemple. Il est extrait actuellement de roches du manteau, les péridotites, qui contiennent entre 0,1 et 0,01 % de nickel. Celui-ci est très avide de fer. Si on prend une terre de chimie chondritique, et qu'on la fond pour faire le noyau, le fer tombant pour former ce noyau va emmener tout le nickel avec lui. Donc le manteau aujourd'hui devrait être dépourvu de nickel. Or il en contient 0,1 % ce qui est beaucoup. Donc le nickel contenu aujourd'hui dans le manteau de la Terre a dû arriver après que la Terre a fondu et s'est différenciée. Là encore, on fait appel à ce qu'on appelle le vernis tardif. Et le vernis tardif aurait amené beaucoup d'éléments : l'or, le platine, tous les éléments sidérophiles (aimant le fer) qu'on extrait, et l'eau. Et une partie des molécules organiques aussi d'ailleurs. Le grand débat, c'est : est-ce que cela vient du système solaire interne (astéroïdes) ou du système solaire externe (comètes) ?

Pour trancher, il faut mesurer les rapports isotopiques. L'eau de la Terre a un rapport D/H (deutérium/hydrogène) de l'ordre de $1,56 \times 10^{-4}$. On s'est aperçu que les météorites avaient un rapport D/H assez semblable. Jusqu'à il y a 5 ou 6 ans, on avait analysé 8 comètes qui venaient du nuage de Oort par des méthodes spectrales ou directes (comète de Halley, Giotto 1986) et le rapport était plus grand.

Donc les astéroïdes ont un rapport D/H comme celui de la Terre et les comètes dont le rapport était connu à l'époque avaient un rapport plus grand que celui de la Terre ; on disait donc : « c'est très simple l'eau de la Terre est venue des astéroïdes »

Il y a quelques années, on a analysé deux nouvelles comètes, qui provenaient de la ceinture de Kuiper et, qui avaient un rapport D/H voisin de celui de la Terre en particulier Hartley 2. On avait donc deux comètes à rapport D/H voisin de celui de la Terre et 8 à rapport élevé.

On généralisait abusivement en pensant que les comètes à rapport élevé, de l'ordre de 3×10^{-4} , devaient provenir du nuage de Oort et que pour celles à rapport de l'ordre de $1,5 \times 10^{-4}$ c'était la ceinture de Kuiper.

C'était très bien jusqu'à il y a quelques semaines parce qu'on vient de mesurer le rapport D/H de la comète Tchourioumov-Guérassimenko, qui est une comète de la famille de Jupiter donc provenant de la ceinture de Kuiper, et qui a un rapport encore plus élevé, donc qui contient plus de deutérium que les comètes provenant du nuage de Oort. Ça montre que le deutérium dans les comètes est mal compris.

Il y a donc maintenant 11 comètes dont on connaît le rapport D/H : 8 dont le rapport est 3×10^{-4} , 2 dont le rapport est $1,5 \times 10^{-4}$ et 1 dont le rapport est $5,3 \times 10^{-4} \pm 0,7$.

Le doute subsiste. D'ailleurs ce n'est pas forcément l'un ou l'autre, ça peut être l'un et l'autre surtout que beaucoup de gens pensent que certaines chondrites carbonées seraient des noyaux de comètes presque totalement déshydratés.

CLEA. *Pourquoi ce rapport D/H n'est-il pas toujours le même ?*

Pierre Thomas

Pourquoi serait-il le même ? La nature sépare les isotopes. Ce n'est qu'en simplifiant abusivement que l'on peut dire que les isotopes ont les mêmes propriétés chimiques. Parce que ça n'est évidemment pas vrai. Sinon, on ne saurait pas faire de l'eau lourde. Comment les Allemands fabriquaient-ils l'eau lourde (HDO) pour essayer de faire leur bombe atomique ? Il y a un film sur le sujet, « la bataille de l'eau lourde » qui se passe en Norvège. Pourquoi là-bas ? Parce qu'ils avaient beaucoup d'électricité pas chère à cause des centrales électriques et que, pour faire de l'eau lourde, on fait bêtement l'électrolyse de l'eau.

Les ions D^+ bougent un tout petit peu moins vite que les ions H^+ et quand on prend un million de litres d'eau et qu'on électrolyse, le dernier litre qui reste quand on a presque tout électrolysé, ça n'est quasiment que de l'eau lourde. Il n'y a plus qu'à électrolyser ce dernier litre pour avoir du deutérium pur. À chaque fois que l'on fait de l'évaporation de l'eau, l'eau légère part plus vite que l'eau lourde. Dans le système solaire, l'hydrogène de Mars est plus lourd que l'hydrogène de la Terre (il contient plus d'isotope D) parce que Mars a perdu beaucoup plus d'hydrogène 1H que la Terre du fait de sa gravité plus faible donc comme elle perd plus d'hydrogène 1H , il y a un tri et ce qui reste est plus lourd D. Quand on voit un tableau périodique des éléments avec un rapport isotopique, on oublie de dire où il est mesuré. Par exemple, pour le carbone, la vie sépare les isotopes légers des isotopes lourds et il y a quelques fractions pour mille de plus d'isotopes de carbone 12 que de carbone 13 dans le monde vivant que dans le monde inerte.

Les géologues prennent toujours des standards. Pour l'eau c'est l'eau de mer, pour le carbone, c'est une espèce de roche étalon qu'on appelle le standard : c'est un fossile de bélemnite aux États-Unis...

Vous trouverez des compléments sur le site Planet-terre (en particulier le rapport D/H de différents objets sur la figure 9).

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/Rosetta-Chury-Science-janvier-2015.xml>