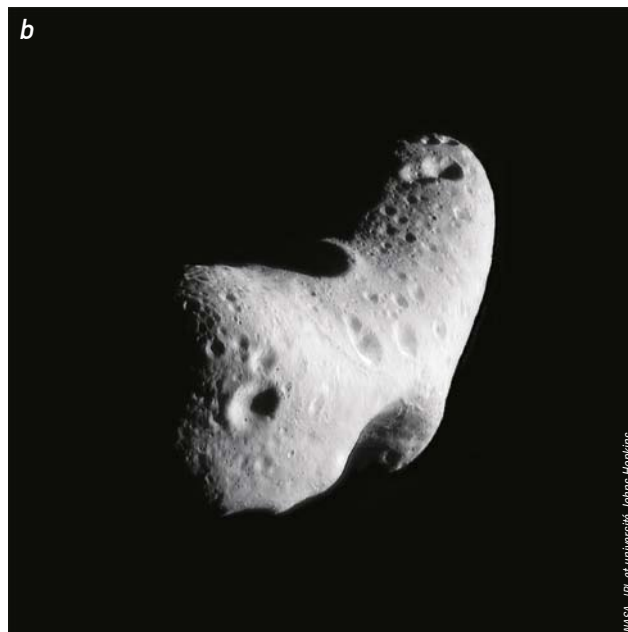




entière: comment l'eau qui nous entoure est-elle arrivée sur Terre?

Au début de sa formation, la Terre, comme les autres planètes rocheuses, a présenté une surface au moins partiellement fondue pendant quelques dizaines de millions d'années. Cette fusion est le résultat de l'importante énergie insufflée à la planète par les nuées de planétésimaux grands comme des montagnes qui s'abattaient sur elle. Il existe des preuves géochimiques que l'océan de magma de la Terre contenait de l'eau; mais la roche brûlante en fusion ne conserve pas bien celle-ci, et une grande partie de l'humidité de la proto-Terre et des planétésimaux a été libérée sous forme de gaz ionisé et de vapeur. Une partie de l'eau se serait perdue dans l'espace, tandis qu'une certaine quantité serait retombée sur la Terre lors de son refroidissement et aurait été à nouveau emprisonnée dans la roche avant d'être entraînée en profondeur dans le manteau.

Par la suite, d'autres impacts gigantesques auraient encore modifié la teneur en eau de la surface et à faible profondeur. En particulier, la Terre semble être entrée en collision avec un objet (que les astrophysiciens ont nommé Théia) de la taille de Mars il y a environ 4,5 milliards d'années, éjectant un panache de matériau qui s'est refroidi puis aggloméré pour former la Lune. L'énergie de cet impact aurait soufflé une grande partie de l'atmosphère, vaporisé en un instant les éventuels océans d'eau et produit un

océan de magma de plusieurs kilomètres de profondeur. Que la Terre ait été pourvue d'eau ou non, le formidable choc de cet impact aurait vidé la planète de pratiquement toute son eau primordiale.

Des comètes riches en glace d'eau

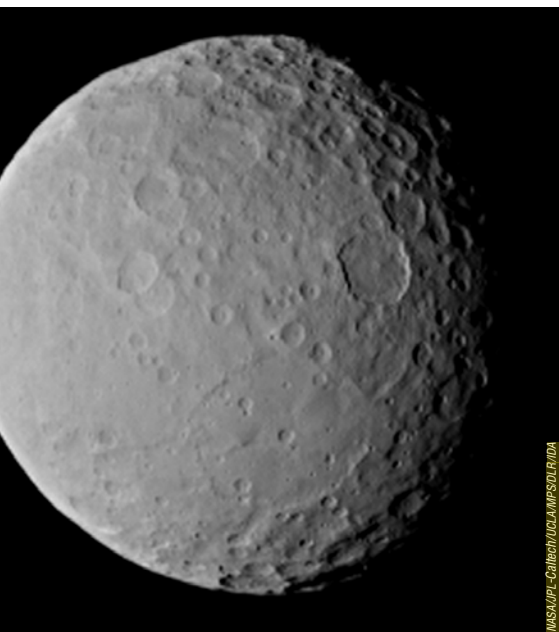
Les chercheurs étudient donc d'où l'eau est venue après la formation du système Terre-Lune et son refroidissement. On sait depuis les années 1950 que les comètes sont riches en glace d'eau, et qu'elles pénètrent dans le Système solaire interne en provenance de deux vastes réservoirs situés dans le Système solaire externe: la ceinture de Kuiper (qui commence autour de l'orbite de Pluton, voir la figure pages 30-31) et le nuage d'Oort (beaucoup plus lointain que la ceinture de Kuiper et qui s'étend peut-être jusqu'à mi-chemin de l'étoile la plus proche). Beaucoup de chercheurs ont donc supposé que les comètes étaient la principale source de l'eau terrestre.

Toutefois, cette idée a été mise en difficulté à partir des années 1980, quand des astronomes ont effectué les premières mesures du rapport deutérium/hydrogène (D/H) sur les comètes du nuage d'Oort. Le deutérium est un isotope de l'hydrogène (son noyau contient un proton et un neutron), et sa prévalence rapportée à celle de l'hydrogène normal (noyau à un proton) est un marqueur utile pour déterminer l'histoire d'un objet. Si l'océan de la

Terre était constitué de l'eau de comètes, son rapport D/H devrait correspondre environ à celui des comètes que nous observons aujourd'hui. Or les comètes du nuage d'Oort présentent des rapports D/H deux fois supérieurs à ceux de l'eau de mer ordinaire. L'essentiel de l'eau terrestre doit avoir une autre provenance.

Ces dernières années, des mesures sur des comètes de la ceinture de Kuiper ont fait état de rapports D/H comparables à ceux de l'océan, ce qui a relancé la théorie des comètes comme source d'eau de la Terre. Mais aujourd'hui, de nouvelles mesures contredisent ce résultat. En effet, les instruments de la sonde *Rosetta* de l'Agence spatiale européenne ont mesuré en 2014 pour la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko (« Tchouri ») un rapport D/H trois fois supérieur à celui des océans. Ce résultat, couplé à des arguments s'appuyant sur la dynamique orbitale des corps nous arrivant des régions riches en comètes, suggère que même si des impacts cométaires ont pu, à l'occasion, apporter de l'eau sur Terre, ils n'en sont probablement pas la source principale.

Les astéroïdes sont l'autre possibilité qui vient aussitôt à l'esprit. Comme les comètes, ces planétésimaux ont participé à la formation des planètes. Les astéroïdes de la « ceinture principale » sont en orbite entre Mars et Jupiter, bien plus près de la Terre que la ceinture de Kuiper. De ce fait, une fois délogés de cette région, ils ont beaucoup plus de chances que les comètes



LE SYSTÈME SOLAIRE

regorge de corps riches en eau, qui auraient pu pourvoir aux océans terrestres : les comètes, telle 67P/Tchourioumov-Guérassimov [a], les astéroïdes, à l'image d'Éros [b] ou encore les planètes naines, telle Cérès [c].

de venir heurter la Terre. La Lune est criblée de cratères qui trahissent un passé riche en bombardements d'astéroïdes. En outre, les nombreux fragments rocheux d'astéroïdes à la surface de la Terre, que l'on nomme dans ce cas météorites, nous rappellent que la Terre est encore bombardée régulièrement par des débris interplanétaires. En étudiant ces morceaux d'astéroïdes, nous pouvons entrevoir leur histoire plus intime et déterminer s'ils ont pu alimenter les océans terrestres. Des chercheurs ont effectivement montré que certaines familles de météorites ont des rapports D/H compatibles avec celui de l'eau de mer.

Le deutérium désigne les météorites

Cependant, les météorites, comme les astéroïdes dont elles sont issues, présentent un éventail de compositions et de contenus en eau. Les astéroïdes du bord interne de la ceinture principale, située environ à deux fois la distance Soleil-Terre, engendrent beaucoup de météorites rocheuses pauvres en eau. En revanche, les astéroïdes de régions plus lointaines sont relativement humides. Ils ont tendance à produire des météorites nommées chondrites carbonées, des conglomerats de minéraux hydratés et de carbonates, dans lesquels l'eau peut représenter plusieurs pour cent de la masse de la roche. L'un de nous (Edward Young) a étudié l'histoire de ces roches en s'inspirant des observations de l'eau s'écoulant à

travers les roches sur Terre. La formation des minéraux riches en eau contenus dans les chondrites carbonées s'est déroulée lors de réactions entre la roche et de l'eau sous forme soit liquide, soit gazeuse à des températures relativement basses, de l'ordre de quelques centaines de degrés Celsius. Sur Terre, ces minéraux se forment lorsque de l'eau percole à travers des roches poreuses. Au sein des météorites, ils témoignent d'une époque où de la glace d'eau a fondu et a coulé à travers la matrice rocheuse de l'astéroïde.

La source de chaleur qui a fait fondre cette glace d'eau était probablement l'aluminium 26, un élément radioactif qui existait en abondance dans le Système solaire jeune. Cet isotope de l'aluminium a libéré des quantités importantes d'énergie pendant quelques millions d'années, tandis qu'il se désintérait en magnésium 26. Aux confins du jeune Système solaire, au-delà de la ligne de neige, la chaleur émise par l'aluminium 26 a été pendant une courte période une puissante force qui a façonné la géologie et l'hydrologie des astéroïdes riches en éléments volatils.

Pendant quelques millions d'années après la formation du Soleil, de nombreux astéroïdes auraient contenu de l'eau liquide, entretenant des systèmes de circulation hydrothermale tels que ceux présents aujourd'hui au niveau des événements volcaniques le long des dorsales océaniques de la Terre. Les carbonates et minéraux hydratés se seraient formés tandis que des eaux saumâtres chaudes percolaient à travers les fentes et fissures au sein de l'astéroïde chauffé par la radioactivité. Puis, dans les toutes dernières étapes de la formation planétaire, la gravité des planètes géantes externes aurait perturbé la ceinture d'astéroïdes, propulsant des corps humides vers l'intérieur du Système solaire, sur des trajectoires les faisant entrer en collision avec la Terre et les autres planètes rocheuses.

Le scénario de l'apport d'eau tardif par les astéroïdes est étayé par certaines analyses chimiques sur Terre. Par exemple, des éléments tels que le platine sont sidérophiles, c'est-à-dire qu'ils ont une grande affinité chimique pour le fer et d'autres métaux. Sur la toute jeune Terre pas encore refroidie, ces éléments se seraient associés au fer et auraient été entraînés avec lui dans les profondeurs de la planète pour former le noyau. Il ne devrait donc rester

BIBLIOGRAPHIE

T. Encrenaz et J. Lequeux, **À la rencontre des comètes**, Belin-Pour la Science, 2015.

K. Altwegg et al., **67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio**, *Science*, en ligne le 10 décembre 2014.

A. Rubin, **Le secret des météorites primitives**, *Pour la Science*, n° 425, mars 2013.

A. Doressoundiram, **Au-delà de Neptune : la ceinture de Kuiper**, *Dossier Pour la Science*, n° 64, juillet-septembre 2009.

D. Lin et D. Dixon, **La naissance des planètes : tohu-bohu dans les nuages**, *Dossier Pour la Science*, n° 64, juillet-septembre 2009.

H. H. Hsieh et D. Jewitt, **A population of comets in the main asteroid belt**, *Science*, vol. 312, pp. 561-563, 2006.

que très peu d'éléments sidérophiles dans le manteau et la croûte. Comme ce n'est pas le cas, il y a eu un apport ultérieur de ces éléments. L'abondance du platine dans la croûte et le manteau terrestres serait alors due à un bombardement de chondrites, en quantité équivalente à environ 1 % de la masse de la Terre.

L'eau de ces chondrites pourrait avoir rempli les océans. Selon toute vraisemblance, toutes les planètes internes rocheuses, et pas seulement la Terre, ont été pilonnées par cette salve d'astéroïdes dans les étapes finales de la formation planétaire.

Des difficultés surgissent cependant dans ce scénario quand on étudie la teneur de l'eau des océans et des météorites en xénon et argon, éléments chimiquement inertes (ils ne prêtent pratiquement pas à des réactions chimiques). Du fait de cette propriété, ces éléments servent de marqueurs de divers processus physiques. Si les planètes rocheuses et les astéroïdes sont étroitement apparentés, leurs éléments inertes devraient être présents en proportions similaires. Mais les astrochimistes ont constaté que la proportion de xénon est bien plus faible dans les matériaux planétaires de la Terre et de Mars que dans les météorites.

Diverses réponses au problème du xénon manquant ont été avancées ces dernières années. Certaines remettraient les comètes sur le devant de la scène en tant que pourvoyeuses d'eau et d'autres éléments volatils. À l'heure où nous écrivons ces lignes, les chercheurs attendent avec impatience les premières mesures sur les gaz inertes de la comète Tchouri effectuées grâce à la sonde *Rosetta*. Ces mesures nous aideront peut-être à répondre de façon définitive à la question de l'origine des océans. Mais comme souvent en science planétaire, elles ont aussi de bonnes chances de soulever des questions plus difficiles qui continueront à alimenter le débat pendant plusieurs décennies.

Dans la quête pour déterminer qui des astéroïdes ou des comètes a rempli les océans de la Terre, il semble qu'il n'y ait pas de solution simple. Il se peut que le problème ne soit pas dans la nature,

mais dans les questions que nous posons. La dichotomie entre astéroïdes et comètes n'est peut-être pas aussi nette qu'on le croyait. L'un d'entre nous (David Jewitt), avec Henry Hsieh de l'Institut d'astronomie et astrophysique de l'Academia sinica de Taïwan, a récemment découvert des comètes dans la ceinture principale d'astéroïdes. Ces objets suivent des trajectoires comparables aux astéroïdes, mais ils éjectent de la poussière périodiquement au cours de leur révolution autour du Soleil, comme les comètes ordinaires. Ces objets sont riches en glace. Les notions de comètes et d'astéroïdes ne sont donc pas aussi claires et distinctes qu'on le pensait, ce qui pose des questions sur

Si la Terre
avait la masse
d'un Boeing 777,
toute l'eau de la planète
pèserait autant que
deux passagers.

l'homogénéité de chaque réservoir de planétésimaux.

De plus, comme nous l'avons montré, la véritable question n'est sans doute pas tant de savoir pourquoi la Terre a autant d'eau, mais pourquoi elle en a si peu. Cette quantité somme toute limitée d'eau a pu être apportée par de multiples voies, qui dépendent étroitement de l'histoire exacte de la planète, des corps qui l'ont heurtée et des conditions initiales de leur formation.

Toutes ces ambiguïtés laissent une place considérable à d'autres scénarios plus exotiques pour l'apport de l'eau, scénarios peut-être improbables, mais qui ne peuvent pour autant être écartés.

En théorie, par exemple, il est possible que l'essentiel de l'eau de la Terre ait été présent dès les débuts de la planète. De nouvelles recherches suggèrent que des ions hydrogène du vent solaire auraient pu s'accumuler pour former des minéraux hydratés à la surface des particules de poussière interplanétaire. Ces poussières auraient alors transporté ce matériau aqueux jusqu'aux planétésimaux et aux planètes à un stade précoce de leur formation. Mais même ainsi, il est difficile de concevoir comment un réservoir aussi ancien se serait maintenu dans les profondeurs du manteau pour ne remonter qu'après les ravages des grands impacts qui ont marqué la fin de la formation de notre planète et la naissance de la Lune.

Des corps plus imposants que la plupart des comètes et astéroïdes ont également attiré l'attention récemment.

Considérons la « planète naine » Cérès, qui, avec 900 kilomètres de diamètre, est le plus grand astéroïde du Système solaire. En 2014, les chercheurs ont observé ce qui semblait être de la vapeur s'échappant de Cérès au rythme de 20 tonnes par heure, étayant l'idée que Cérès est riche en eau. La Terre est à peu près 6 000 fois plus massive que Cérès. Si, comme beaucoup le soupçonnent, Cérès est constituée pour moitié d'eau, alors l'inventaire total en eau (souterraine et de surface) de la Terre correspond à l'eau que contiendraient environ cinq corps semblables à Cérès.

Ce type d'objets était beaucoup plus répandu dans le Système solaire chaotique des débuts qu'ils ne le sont aujourd'hui, et il est facile d'imaginer que plusieurs corps du même type que Cérès aient pénétré jusque dans le Système solaire interne et frappé la Terre. Une poignée seulement de ces objets aurait suffi à doter notre planète d'un océan, sans même la contribution ultérieure de pluies de petits astéroïdes et de comètes.

La sonde *Dawn* de la Nasa est en orbite autour de Cérès depuis février 2015. Elle devrait permettre d'apercevoir de près sa glace et ses émissions gazeuses. Ses observations nous réservent, à n'en pas douter, de nouvelles surprises concernant l'histoire de l'eau sur notre planète et ailleurs. ■