

Des océans tombés

De nouvelles observations relancent le débat sur l'origine de l'eau présente sur Terre : comètes, astéroïdes ou autres corps célestes ?

David Jewitt et Edward Young

L'ESSENTIEL

■ Pendant que les planètes se formaient, la chaleur du Soleil a expulsé l'eau vers les régions externes du Système solaire.

■ Dans les régions internes, les planètes – dont la Terre – sont relativement sèches.

■ L'eau serait arrivée à un stade tardif de la formation de la Terre par le biais soit d'astéroïdes, soit de comètes.

■ Les mesures récentes ne tranchent pas entre ces deux pistes. La source n'est peut-être pas unique ou pourrait être assez différente.

Ron Miller



du ciel

Debout sur la grève, les yeux rivés sur les vagues qui déferlent de l'horizon, il est facile de s'imaginer que l'océan a toujours été là, éternel. Nos lointains ancêtres le pensaient certainement : dans de nombreux mythes de la création, un abîme océanique existait avant l'émergence de la Terre et de la lumière. Aujourd'hui, nous savons que les océans de notre planète n'ont pas toujours été présents. L'eau des mers, celle de toutes les gouttes de pluie, de votre corps et de toutes les gorgées de votre tasse de café sont les restes d'événements anciens, qui ont vu les océans littéralement tomber du ciel.

D'où provient l'eau du Système solaire ? La question nous renvoie au nuage primordial géant, composé de gaz et de poussière, qui s'est effondré pour former le Soleil et les planètes il y a plus de 4,5 milliards d'années. Ce nuage était riche en hydrogène et en oxygène, respectivement premier et troisième éléments les plus abondants de l'Univers (le deuxième est l'hélium, chimiquement inerte). L'essentiel du gaz a été absorbé par le Soleil et les planètes gazeuses géantes formées avant les planètes rocheuses. Une partie de l'oxygène encore libre s'est liée avec d'autres atomes, tels que le carbone et le magnésium, puis le reste s'est associé à l'hydrogène pour produire une masse d'eau (H_2O) plusieurs fois supérieure à celle des roches dans le Système solaire.

Et pourtant, les planètes les plus proches du Soleil – Mercure, Vénus, la Terre et Mars – sont principalement rocheuses et pauvres en eau. Cela résulte des conditions de leur naissance. Le nuage qui allait devenir le Système solaire s'est d'abord effondré en formant un disque tourbillonnant, où toutes les planètes se sont constituées. La formation de planètes rocheuses a été un processus progressif. Les petits objets du disque sont entrés en collision et se sont agrégés, formant petit à petit des objets plus gros : les grains microscopiques sont devenus des gravillons, puis des rochers qui ont donné des briques planétaires de taille kilométrique nommées planétésimaux. Beaucoup des planétésimaux résiduels de la formation planétaire sont devenus les objets que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de comètes et astéroïdes.

Et l'eau dans tout ça ? Dans les régions internes du disque, proches du Soleil, l'intense échauffement du gaz par friction et l'ensoleillement plus important ont

probablement fait évaporer l'hydrogène et les autres éléments légers vers les régions externes du Système solaire, ne laissant aux planètes en formation dans cette région que des matériaux relativement secs.

Tandis que des corps rocheux sans eau se développaient à proximité du Soleil, un peu plus loin, dans la région de l'actuelle ceinture d'astéroïdes et de Jupiter, les températures du disque étaient suffisamment basses pour que l'eau et d'autres éléments volatils forment de la glace. Les astronomes nomment « ligne de neige » (ou de glace, ou de gel) la zone de transition.

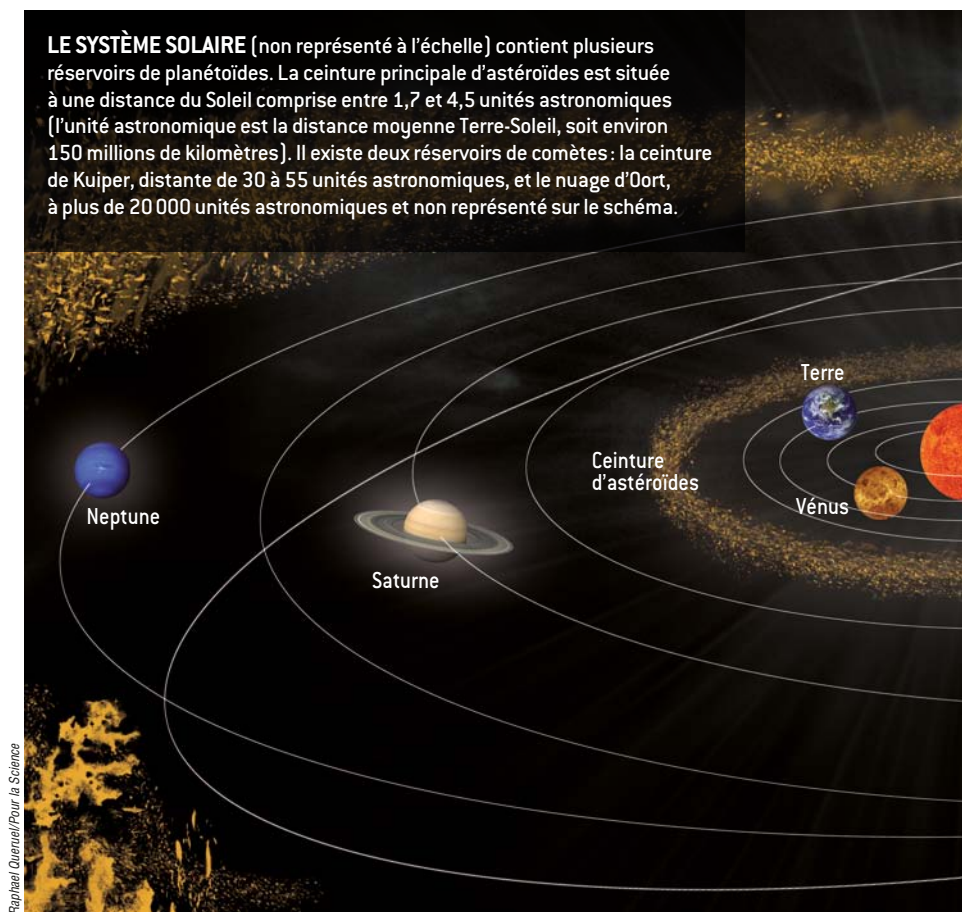
Récemment, les astronomes ont observé des lignes de neige et des collisions de planétésimaux autour d'étoiles dont le disque est en pleine formation planétaire. Nous voyons ailleurs les processus primordiaux qui se sont certainement déroulés dans le Système solaire. Si le mécanisme semble universel, de nombreux aspects de la formation de l'océan terrestre restent à comprendre et font l'objet de recherches actives. En particulier, si l'eau a été transportée

■ LES AUTEURS

David JEWITT est membre de l'Académie américaine des sciences et professeur à l'université de Californie à Los Angeles (UCLA).

Edward YOUNG est professeur de géochimie et cosmochimie, et membre de l'Institut des planètes et exoplanètes à l'université de Californie à Los Angeles.

LE SYSTÈME SOLAIRE (non représenté à l'échelle) contient plusieurs réservoirs de planétésimaux. La ceinture principale d'astéroïdes est située à une distance du Soleil comprise entre 1,7 et 4,5 unités astronomiques (l'unité astronomique est la distance moyenne Terre-Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres). Il existe deux réservoirs de comètes : la ceinture de Kuiper, distante de 30 à 55 unités astronomiques, et le nuage d'Oort, à plus de 20 000 unités astronomiques et non représenté sur le schéma.



Raphaël Querrel/Pour la Science

jusqu'à notre planète initialement sèche, d'où vient-elle exactement et quand est-elle arrivée ?

Le consensus veut que l'essentiel de l'eau de la Terre provienne de la région située au-delà de la ligne de neige. Les astéroïdes et les comètes sont les candidats les plus évidents. Ils auraient été catapultés vers la partie interne du Système solaire dans les derniers soubresauts de la formation planétaire. Ils auraient apporté l'eau sur Terre lors de bombardements successifs de la planète. De nouvelles mesures permettent d'affiner ce scénario, mais elles soulèvent aussi des interrogations et pourraient pointer vers un mécanisme bien différent.

Vue de l'espace, la planète Terre mériterait plutôt de s'appeler la « planète Océan ». L'eau recouvre plus des deux tiers de la surface et les organismes vivants en sont généralement tout aussi riches. Les océans, d'une profondeur moyenne de 4 kilomètres, contiennent assez d'eau pour remplir une sphère de plus de 1 300 kilomètres de diamètre. Et pourtant, beaucoup de gens sont

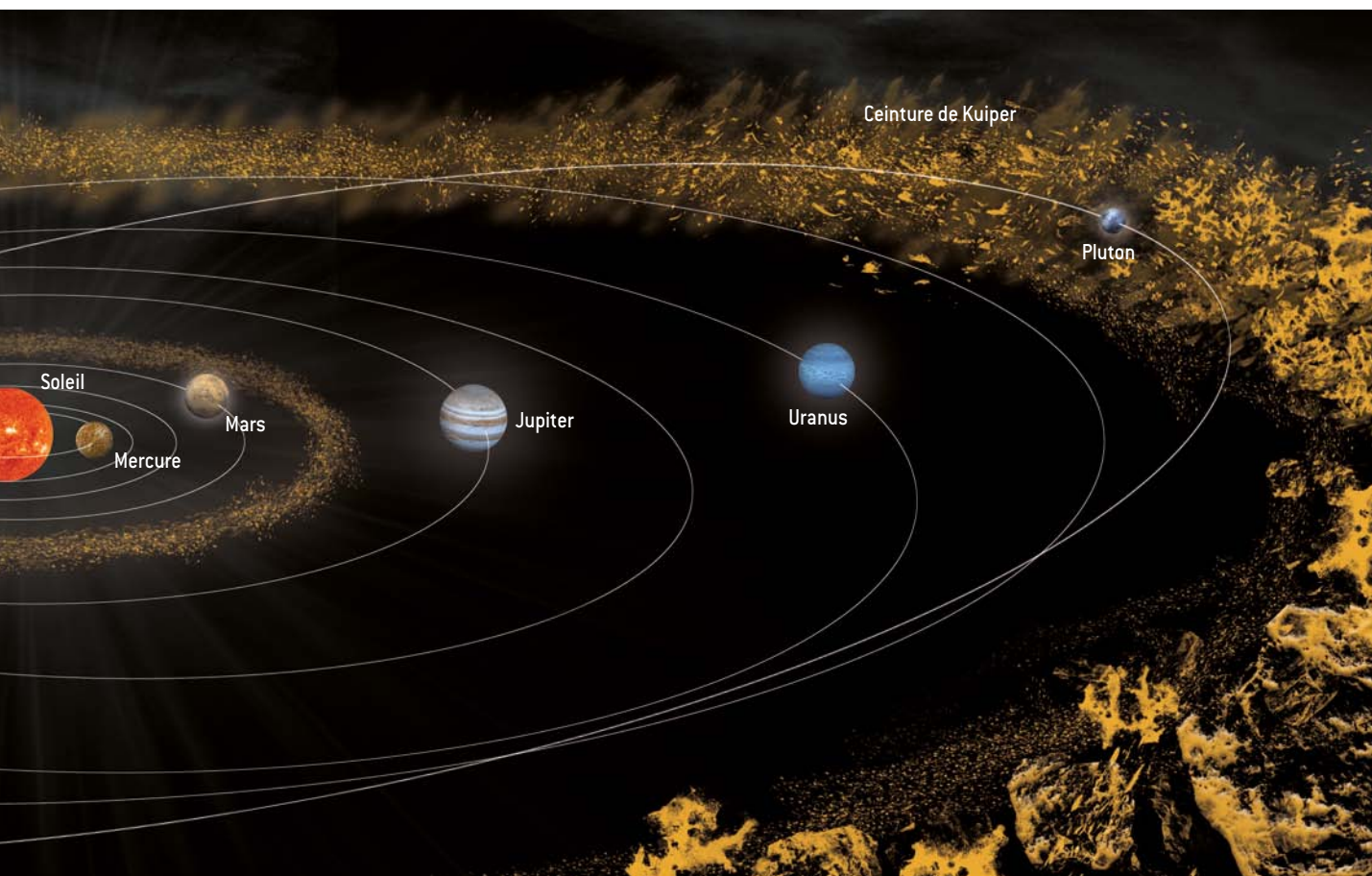
étonnés d'apprendre que toute cette eau ne représente que 0,02 % de la masse de la Terre. Dit autrement, si notre planète avait la masse d'un Boeing 777, soit 300 tonnes, toute l'eau des océans ne représenterait qu'un passager. L'eau douce contenue dans les calottes glaciaires des pôles, les nuages, les rivières, les lacs, le sol et l'ensemble des organismes vivants ne représente qu'une minuscule fraction de ce total.

De l'eau dans le manteau et le noyau

Davantage d'eau serait profondément enfouie sous nos pieds, dans le manteau rocheux de la planète, qui s'étend sur une épaisseur de plus de 3 000 kilomètres sous la croûte. L'eau ne s'y trouve cependant pas sous forme liquide. Elle fait partie intégrante de la structure moléculaire des roches et minéraux « hydratés », qui ont été entraînés sous la croûte par les processus tectoniques. Une certaine quantité de cette humidité piégée dans la roche

peut s'échapper du manteau et refaire surface par l'intermédiaire des volcans, mais la majeure partie reste enfouie. Plus en profondeur encore se trouve l'imposant noyau planétaire composé de fer et de nickel. Représentant à lui seul environ 30 % de la masse de la Terre, il contient potentiellement encore plus d'eau que le manteau, sous forme d'hydrogène qui se lierait avec de l'oxygène si la chaleur et la pression n'étaient pas aussi importantes.

Personne ne sait quelle quantité exacte d'eau contient l'intérieur de la planète. Cette incertitude résulte du manque d'échantillons de ces régions, ainsi que d'une piètre compréhension de l'efficacité du transport d'eau depuis et vers la surface. On peut raisonnablement estimer que le manteau à lui seul contient au moins autant d'eau que les océans, doublant de fait l'inventaire aquatique total de la Terre. Mais même ainsi, en ajoutant cette eau à celle de la surface, on atteint 0,04 % de la masse de la planète : deux passagers d'un Boeing 777 à pleine charge. Néanmoins, la question reste

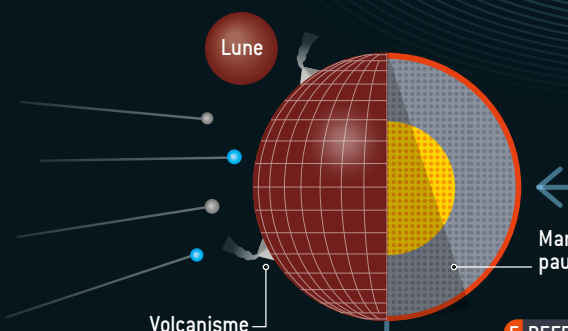
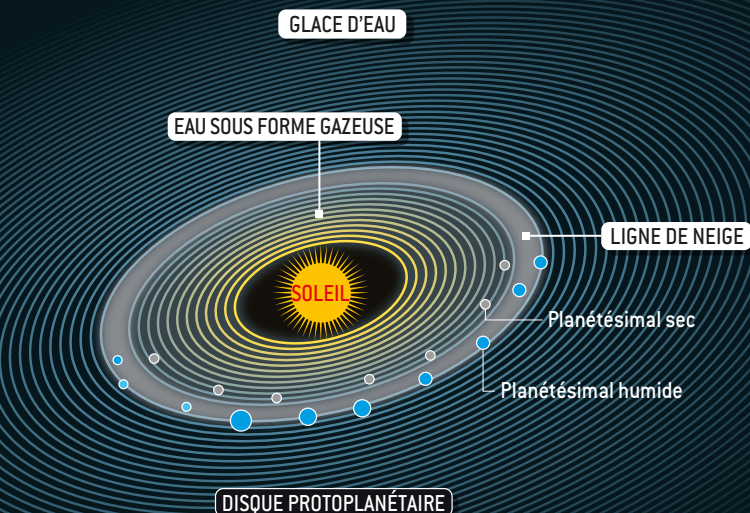


L'HISTOIRE TUMULTUEUSE DE L'EAU SUR TERRE

La Terre n'a pas toujours été une planète bleue. Elle est née il y a environ 4,5 milliards d'années en accréant de la matière dans un disque de gaz et de poussière en rotation autour du jeune Soleil. Ce disque était riche en hydrogène et en oxygène, les éléments de l'eau (H_2O). De l'eau s'est formée mais elle était, pour l'essentiel, reléguée aux régions froides du disque externe, au-delà de la « ligne de neige », où elle se trouvait sous forme de glace.

Au sein du disque, la Terre a subi des collisions violentes avec des briques planétaires nommées planétésimaux. Certains, provenant du voisinage du Soleil, étaient secs, mais d'autres, issus de l'extérieur de la ligne de neige, étaient humides, constituant pour notre jeune planète un premier apport d'eau.

Pour en arriver aux océans d'aujourd'hui, de nombreuses étapes ont été nécessaires. Les chercheurs s'accordent sur les grandes lignes du scénario, mais ils débattent encore des détails – par exemple, de savoir si ce sont les comètes ou les astéroïdes qui ont livré le plus d'eau à la Terre.



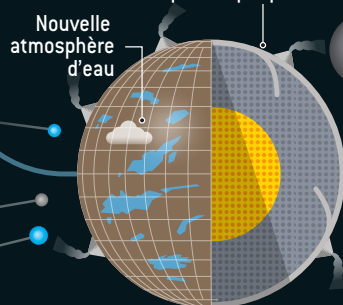
4 CONSÉQUENCES

La Terre est maintenant sèche et se remet lentement de l'impact qui a formé la Lune. Les volcans et des impacteurs (corps heurtant la Terre) reconstituent peu à peu l'atmosphère.

5 REFROIDISSEMENT

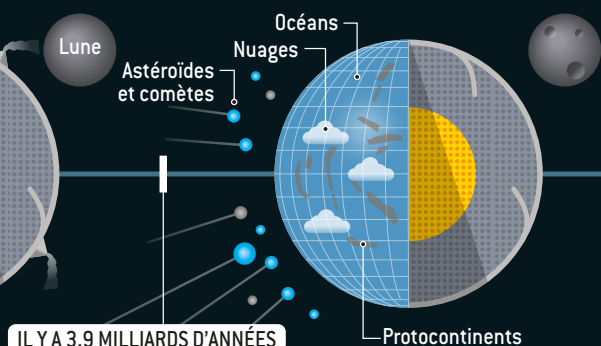
L'eau des impacteurs et du dégazage des volcans forme de petites mers à la surface de la Terre qui se refroidit.

La tectonique des plaques s'amorce



6 LIVRAISON TARDIVE

Une giboulée de planétésimaux résiduels (mélange d'astéroïdes et de comètes) s'abat sur la planète en provenance du Système solaire externe, riche en eau. Le ciel, rempli de vapeur d'eau, donne naissance aux océans.



IL Y A 3,9 MILLIARDS D'ANNÉES

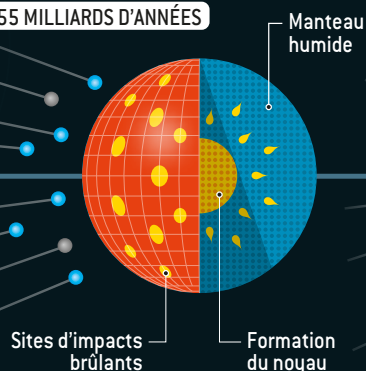
1 DÉMARRAGE À CHAUD

La Terre est à l'état fondu en raison de la chaleur libérée lors de sa formation, mais elle conserve une part d'eau dans le manteau.

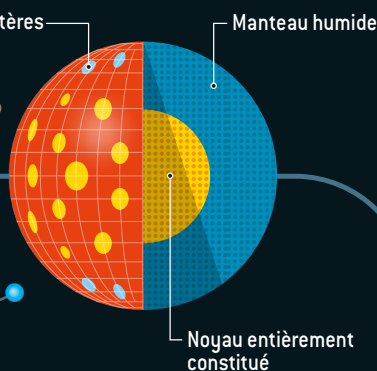
2 PROTO-TERRE

La planète grossit au fil des bombardements par les planétésimaux et son noyau se forme à partir des éléments lourds qui s'accumulent vers le centre. La majeure partie de l'eau se trouve dans le manteau sous forme de minéraux hydratés, bien qu'il en subsiste une partie à la surface quand la planète se refroidit.

IL Y A 4,55 MILLIARDS D'ANNÉES

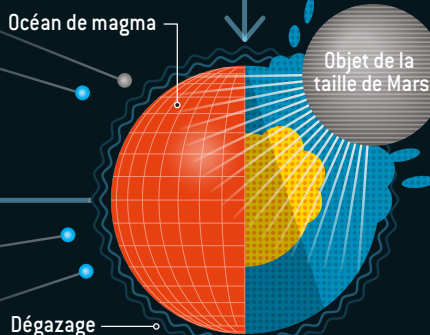


IL Y A 4,47 MILLIARDS D'ANNÉES



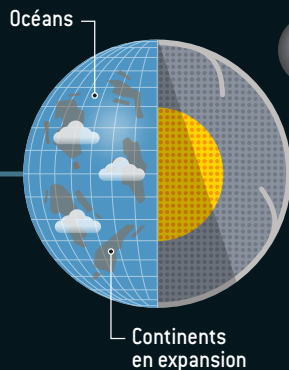
3 NAISSANCE DE LA LUNE

Un impact géant secoue la planète jusqu'au noyau, soufflant son atmosphère, perturbant le manteau et expédiant une grande partie de l'eau de la Terre dans l'espace. La Lune se forme à partir des débris rocheux.



7 DE LA PLANÈTE OCÉAN...

Le bombardement terminé, la planète se refroidit. Les continents continuent à s'étendre, nourris par le matériau que déversent les volcans sous-marins.



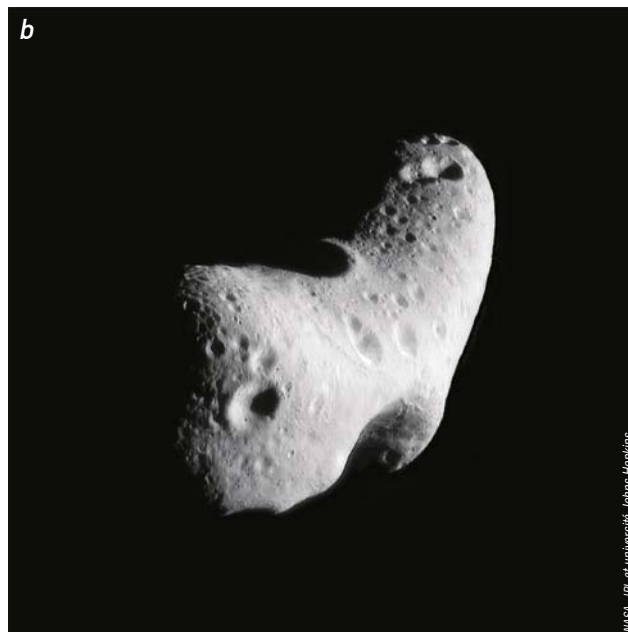
8 ... À LA PLANÈTE TERRE

Les continents et océans, parvenus à maturité, confèrent désormais à la Terre l'aspect qui nous est familier.

AUJOURD'HUI



NASA



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

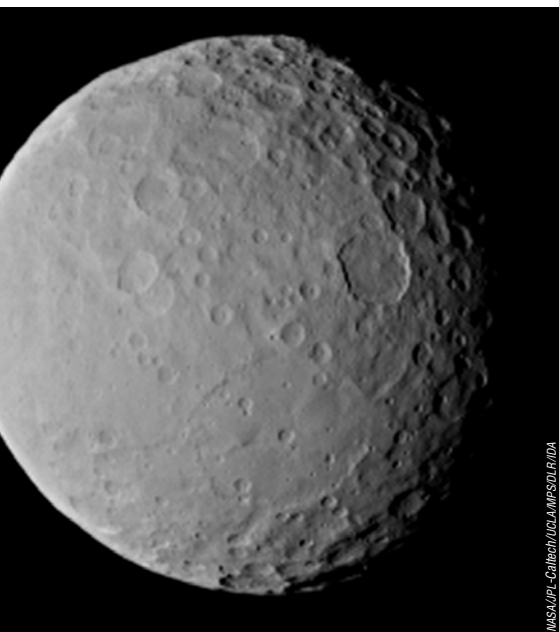
Les chercheurs étudient donc d'où l'eau est venue après la formation du système Terre-Lune et son refroidissement. On sait depuis les années 1950 que les comètes sont riches en glace d'eau, et qu'elles pénètrent dans le Système solaire interne en provenance de deux vastes réservoirs situés dans le Système 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 désintégrait 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. ■

Offre DÉCOUVERTE



POUR LA
SCIENCE

Le magazine mensuel
Pour la Science (12 n°s/an)

4,90 €/mois
seulement
ou 59€ pour 1 an

VOS AVANTAGES ABONNÉ

- ✓ 24 % d'économie et plus par rapport au prix en kiosque
- ✓ L'envoi des magazines en avant-première
- ✓ La garantie de ne manquer aucun numéro

BULLETIN D'OFFRE DÉCOUVERTE

À compléter et à retourner, accompagné de votre règlement, dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science Service abonnements – Libre réponse 90 382-75 281 Paris cedex 06

POUR LA
SCIENCE

1. MA FORMULE

- ☐ **OUI, je m'abonne à l'Offre Découverte à 4,90 € par mois** ou 59 € pour 1 an. Je reçois le magazine *Pour la Science* (12 n°s/an) et bénéficie des versions numériques offertes sur www.pourlascience.fr !

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules)

À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

- ☐ Je règle par prélèvement **4,90 € par mois***. Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

*Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger (pays de la zone SEPA) : 5,90 €/mois. Abonnement renouvelable tacitement à échéance et dénonçable à tout moment avec un préavis de 3 mois.

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT PAR MANDAT SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

1. COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom _____

Adresse _____

Numéro et nom de la rue

Code postal _____ Ville _____ Pays _____

2. COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN _____

Numéro d'identification international du compte bancaire – IBAN (International Bank Account Number)

BIC _____

Code international d'identification de votre banque – BIC (Bank Identifier Code)

Type de paiement Paiement récurrent/répétitif

3. DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRES

À _____

Date _____

Signature : _____

NOM DU CRÉANCIER ICS N° FR92ZZZ426900

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

N° de référence unique de mandat (RUM)

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

- ☐ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 59 €****.

**Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12 € – autres pays 25 €.

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science* ☐ Par carte bancaire N° _____

Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe *Pour la Science*. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐.