

permettra de mieux comprendre la relation entre la proto-Terre, Théia et leur collision.

Ainsi, les observations semblent converger vers le scénario de la collision. Les planétologues savent expliquer la composition similaire de la Terre et de la Lune et le moment cinétique du système même si certains détails restent à clarifier. Cependant, l'étape suivante de l'histoire lunaire soulève ses propres questions.

En s'accrétant, les débris de la collision ont libéré de grandes quantités d'énergie, par conversion de l'énergie potentielle gravitationnelle en chaleur. Une partie du matériau lunaire a fondu en un océan de magma global de profondeur certaines de kilomètres de profondeur qui a recouvert toute la surface du satellite. En se refroidissant, le magma a rapidement cristallisé en une croûte, composée principalement d'anorthosite (une roche magmatique riche en feldspaths, dont sont constituées les zones les plus claires de la surface lunaire).

Le modèle le plus simple décrivant ce processus consiste à supposer que la cristallisation est homogène sur toute la surface du globe. Les propriétés de la croûte devraient alors être partout les mêmes. Il n'en est rien : les planétologues notent une grande disparité de ces propriétés, avec une

répartition asymétrique entre la face visible et la face cachée. Par exemple, les éléments dits incompatibles – qui ont tendance à rester dans la partie liquide du magma lors de la cristallisation et donc à s'accumuler sous la croûte – sont présents en plus grande concentration sur la face visible.

## Une face cachée très différente

Les observations effectuées par la mission japonaise *Kaguya* (aussi nommée *Selene*) confirment cette tendance. Elles montrent en particulier que le rapport de concentration du magnésium et du fer est plus élevé sur la face cachée que sur la face visible. Le fer, étant un élément incompatible, aura eu tendance à être moins présent dans les premières roches à cristalliser de l'océan de magma. Cette observation suggère, par exemple, que la croûte de la face cachée a cristallisé plus tôt que la face visible. Le magma résiduel aurait alors migré vers l'hémisphère de la face visible (voir la figure page 31), où il se serait davantage enrichi en éléments radioactifs que sur la face cachée. Ce n'est pas la seule façon d'expliquer ce phénomène, mais il est certain que le modèle simple de formation de la croûte doit être révisé.

### ■ SUR LE WEB

La mission LRO, *Lunar Reconnaissance Orbiter*, de la Nasa, a effectué une cartographie précise de certaines régions de la surface lunaire. Les membres de l'équipe ont réalisé une vidéo qui résume l'histoire de la Lune : [http://bit.ly/pls466\\_Lune1](http://bit.ly/pls466_Lune1) et une visite guidée de la surface du satellite : [http://bit.ly/pls466\\_Lune2](http://bit.ly/pls466_Lune2)

## De l'eau sur la Lune

**L**ongtemps jugée appauvrie en éléments volatils, la Lune semble en fait contenir une quantité non négligeable d'eau dans son manteau. Son étude permettrait de mieux comprendre comment l'eau est arrivée sur Terre.

En 2008, Alberto Saal, de l'université Brown, aux États-Unis, et ses collègues ont montré grâce à de nouvelles techniques d'analyse que de l'eau était présente dans des échantillons lunaires que l'on pensait déshydratés. Il est possible de relier ces observations à la quantité d'eau présente dans le manteau et dans le magma initial qui aurait contenu de l'eau à des concentrations de l'ordre de 100 parties par million.

Par ailleurs, l'eau est aussi présente à la surface du satellite. Des observations de la surface lunaire montrent que de la glace

est stable sur des temps géologiques dans les zones d'ombre permanente près des pôles. La stabilité de ces glaces a permis de préciser certains points de l'histoire lunaire, comme l'évolution de son orbite et le basculement de son axe de rotation.

La présence d'eau dans le manteau a une forte influence sur la dynamique des roches mantelliques et donc sur les scénarios qui décrivent les phénomènes de champ magnétique primordial et de volcanisme découverts récemment sur la Lune. En effet, l'eau réduit la viscosité des roches et

rend la convection, et donc le refroidissement, plus efficaces. En présence d'eau, il est ainsi difficile d'expliquer comment la Lune a maintenu une activité volcanique et magnétique pendant de longues périodes. L'étude de ces conséquences sur la Lune est encore récente et les modèles futurs devront intégrer cette nouvelle donnée.

L'importance de l'eau s'étend au scénario de formation de la Lune. Les modèles actuels montrent que la formation de la Lune par accrétion à partir d'un disque de débris créé par un impact géant aura tendance à produire une Lune appauvrie en éléments volatils, tel l'hydrogène dont l'eau est composée. Les observations récentes permettront donc de poser des contraintes plus fortes sur le

processus de formation, et donc potentiellement sur l'état initial de la Terre.

Ainsi, la question de l'origine de l'eau lunaire (présente dès la formation ou issue d'un apport externe après l'accrétion) est encore ouverte. Elle est cruciale, car elle permet aussi de comprendre l'origine de l'eau terrestre. En effet, cette eau est-elle le fruit d'un processus rare (où l'apport de la majorité de l'eau se serait fait lors de la collision de quelques corps riches en eau pendant la formation de la Terre), ou la présence d'eau est-elle très commune ? Et peut-on s'attendre à en voir fréquemment dans la composition d'exoplanètes, ces planètes en orbite autour d'autres étoiles et que l'on étudie de plus en plus ?

Une autre explication suppose que la cristallisation est symétrique, mais qu'une réorganisation de la structure interne de la Lune a enrichi la face visible en éléments incompatibles. Ceux-ci auraient d'abord formé, de façon globale, une couche dense entre la croûte et le manteau. Sous l'effet d'instabilités hydrodynamiques, cette couche aurait coulé dans le manteau en direction du noyau. Les éléments radioactifs qu'elle contenait l'auraient alors réchauffée, donc dilatée, sa densité aurait diminué et elle serait remontée vers la surface. Des simulations numériques montrent que la migration n'est pas forcément symétrique et que la couche d'éléments incompatibles remonte surtout vers la face visible. Nous verrons plus loin que ce mécanisme joue aussi un rôle dans le volcanisme tardif de la Lune.

L'asymétrie de la croûte pourrait aussi avoir une origine externe. Elle pourrait être le résultat, par exemple, d'un impact géant qui aurait changé la composition du manteau d'un hémisphère, mais pas de l'autre. Pour répondre à la question de l'origine de l'asymétrie, les planétologues attendent beaucoup d'une mission lunaire où un module se poserait sur la face cachée et en ramènerait des échantillons.

## Basculements de l'axe

Après la formation de la croûte, il y a environ 4,3 milliards d'années, la Lune ne ressemblait pas encore à l'image que nous en avons aujourd'hui. En effet, depuis, notre satellite a été continuellement bombardé par des météorites qui ont constellé sa surface de cratères. Un événement remarquable est la collision avec une météorite qui a formé le bassin Pôle-Sud-Aitken (c'est le plus grand cratère d'impact connu du Système solaire). À la suite de cette collision, l'axe de rotation de la Lune aurait basculé de 15 degrés.

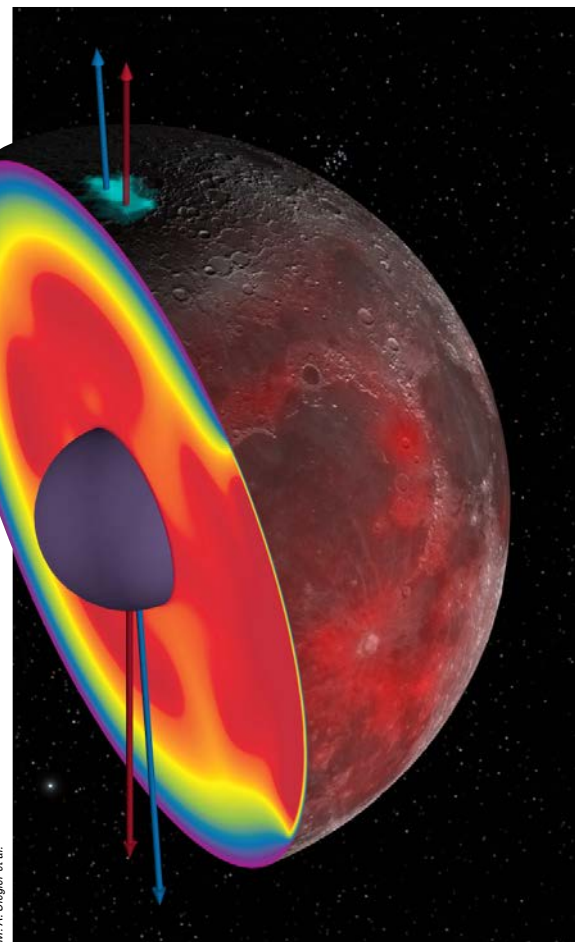
Ensuite, il y a entre 4,1 milliards et 3,9 milliards d'années, les planètes telluriques du Système solaire ont probablement connu une période de bombardement particulièrement intense. Cet épisode pourrait être dû à la perturbation d'un réservoir d'astéroïdes qui a envoyé les petits corps vers la partie interne du Système solaire. Selon les modèles récents de formation du Système solaire (« modèle de Nice » et « hypothèse du Grand Tack »), une modification de l'orbite des planètes Jupiter et Saturne serait à l'origine de ce « grand bombardement tardif ». La

Lune n'aurait pas échappé au phénomène et des météorites ont creusé de vastes bassins dans la croûte lunaire. Ces bassins se sont ensuite remplis de lave basaltique qui, en refroidissant, a formé une partie des zones sombres de la Lune, nommées aujourd'hui mers lunaires ou *maria*.

En 2016, avec plusieurs collègues, nous avons montré que l'axe de rotation de la Lune s'est aussi déplacé à cause de son évolution interne (voir la figure ci-contre). Nous avons constaté l'existence de deux régions riches en hydrogène, indicatif de la présence de glace d'eau, aux antipodes l'une de l'autre, mais à 5 degrés des pôles actuels. Ces régions ont donc probablement été les pôles il y a plusieurs milliards d'années. La réorganisation de la structure interne de la Lune à l'origine de la formation de la région Procellarum, une mer de basalte, et le changement associé de la répartition des masses aurait conduit au basculement de l'axe de rotation lunaire.

À ce stade de son histoire, la Lune ressemble au satellite que nous connaissons. Pourtant, si les planétologues commencent à avoir une bonne vision des grandes étapes géologiques de la Lune, ce satellite continue de nous surprendre, notamment avec la découverte qu'il était doté, dans le passé, d'un puissant champ magnétique. Ce n'est plus le cas aujourd'hui et seul un champ rémanent, figé dans certaines roches, subsiste. Il a été mesuré en 1998 par la sonde *Lunar Prospector* puis, plus récemment, par *Kaguya*. Mais ce champ résiduel est un indice en faveur d'un champ global actif par le passé. Cette idée est renforcée par l'analyse récente d'échantillons par des techniques de haute précision.

La présence ou non d'un champ magnétique important sur une planète ou un satellite nous renseigne sur son fonctionnement interne et, par conséquent, sur son histoire géologique. Les champs magnétiques planétaires résultent du mouvement d'un liquide conducteur, généralement du fer dans le noyau – induisant un « effet dynamo ». Ce mouvement peut être dû aux processus de refroidissement : de manière directe, il s'agit de convection dite thermique, ou indirecte, grâce à des forces de poussée liées à la cristallisation du noyau interne solide. Une autre possibilité est une activation mécanique du mouvement, due à un brusque changement de la direction de l'axe de rotation du manteau par rapport à



**LA LUNE A BASCULÉ** plusieurs fois au cours de son histoire. Lors de la formation de la mer de basalte Procellarum, l'axe de rotation a basculé de 5 degrés entre l'axe initial (en bleu) et l'axe actuel (en rouge).