

d'un nuage moléculaire géant, qui a donné naissance au Soleil et aux planètes. Mais certaines analyses indiquent que la Lune se serait constituée 100 millions d'années plus tard. Comment expliquer ce décalage?

Le scénario privilégié est celui d'une collision entre la Terre et une planète hypothétique nommée Théia, la mère de Séléné dans la mythologie grecque. Néanmoins, les spécialistes continuent de débattre sur les différents aspects de ce modèle, et ces discussions se sont multipliées à la lumière des observations les plus récentes. Comment expliquer que la composition de la Lune et celle de la Terre soient si proches? Quels sont les processus qui ont conféré à la Lune un champ magnétique intense pendant plus de 1 milliard d'années après sa naissance? Et comment expliquer que la Lune présente un volcanisme relativement récent? Grâce à des données nouvelles ou plus précises, les chercheurs commencent à esquisser des réponses aux énigmes de l'histoire lunaire.

Le premier épisode de cette histoire est celui de l'événement qui a donné naissance à la Lune. La collision catastrophique Terre-Théia n'est pas le seul scénario ayant été envisagé. Par exemple, en 1879, George Darwin (l'un des fils de Charles Darwin) avait suggéré que le satellite s'était formé par fission de la Terre à une époque où elle tournait très vite sur elle-même, la force centrifuge ayant provoqué une éjection d'une partie du manteau dans l'espace.

La Lune exerce des forces de marée sur la Terre, qui ont tendance à ralentir le mouvement de rotation de la planète. Cela implique que par le passé, lors de la formation de la Lune, la Terre tournait beaucoup plus rapidement sur elle-même. Pour déterminer cette vitesse, il faut prendre en compte la conservation du moment cinétique, ou moment angulaire, du système Terre-Lune. Cette grandeur physique décrit l'état général de rotation d'un système et est conservée – en l'absence de perturbation extérieure, elle garde la même valeur au cours du temps. Le ralentissement de la rotation de la Terre dû aux forces de marée tendrait à diminuer le moment cinétique du système Terre-Lune, mais il est compensé par l'éloignement de la Lune.

De ce fait, la Lune aurait été plus de dix fois plus proche de la Terre à l'époque

■ L'AUTEUR



Matthieu LANEUVILLE est professeur assistant à l'Institut des sciences de la Terre et de la vie, rattaché à l'Institut de technologie de Tokyo, au Japon.

de sa formation, très probablement à une distance de l'ordre de quelques rayons terrestres, contre 60 actuellement. On en déduit que la durée d'une journée sur la Terre était d'environ cinq heures, valeur trop élevée pour que le modèle de George Darwin soit plausible.

Parmi les autres idées proposées pour expliquer la formation de la Lune, figure celle de la capture par le champ gravitationnel terrestre d'un corps formé ailleurs dans le Système solaire. Ce scénario a été en vogue jusque dans les années 1980. Cependant, les premières analyses des échantillons ramenés par les missions *Apollo* et les missions soviétiques *Luna* ont montré que la Terre et la Lune présentent une composition très proche, ce qui est difficile à expliquer si la Lune s'était formée dans une autre région du Système solaire (la composition des planètes semble très hétérogène, ne serait-ce que si l'on compare celles de la Terre et de Mars, par exemple).

Une autre possibilité serait un scénario de coaccrétion: la Terre et la Lune se seraient formées au même endroit et en même temps. Mais plusieurs arguments contredisent cette hypothèse. Même si les compositions des manteaux terrestre et lunaire sont très proches, elles présentent quelques différences, portant en particulier sur la concentration du fer. Lors de l'accrétion des débris qui ont formé un corps tel que la Terre ou la Lune, la structure interne s'est différenciée en un noyau de fer liquide et un manteau. La quantité totale de fer du corps contrôle la taille de son noyau. Or, du fait de sa faible densité, la Lune aurait un noyau plus petit, en proportion, que la Terre. Pour un modèle de coaccrétion, la taille relative des noyaux devrait être comparable. Et dans ce scénario, le moment cinétique du système Terre-Lune devrait être plus élevé qu'il ne l'est.

Le scénario de la collision Terre-Théia semble donc le plus prometteur. L'idée a été proposée en 1974 par les Américains William Hartmann et Donald Davis. Ils ont suggéré que la Lune était née de la collision de la Terre en formation avec une planète de taille comprise entre celle de la Lune et celle de Mars. Cette collision aurait vaporisé en partie les deux corps, homogénéisant leur composition. Les débris

**Le
scénario
privilégié de la
formation lunaire
par une collision
n'est pas exempt
de défauts**

ont alors formé un disque protolunaire autour de la Terre, puis ils se sont agglomérés pour former la Lune. C'est, depuis quelques décennies, le scénario privilégié par les chercheurs, car il permet d'expliquer une partie des observations que les autres scénarios échouent à expliquer. Il s'agit cependant du scénario le « moins pire » : il n'est pas exempt de défauts.

À partir des années 1980, des planétologues ont simulé numériquement des collisions et ont confirmé que la Lune a pu se former ainsi. Les contraintes de ces modèles étaient principalement l'obtention du bon moment cinétique et de la bonne masse finale pour la Terre et la Lune. Ces exigences étaient satisfaites en considérant une collision oblique avec une masse pour Théia de l'ordre de celle de la planète Mars. Cependant, selon ces simulations, Théia contribuait pour 10 % à la masse de la Terre et pour 70 à 90 % à la masse de la Lune. Ces conditions ne permettaient pas aux matériaux des deux corps de bien se mélanger et il n'était donc pas possible d'expliquer l'extraordinaire similitude de composition de la Terre et de la Lune.

Les premières analyses comparées du manteau terrestre et du manteau lunaire, en particulier de l'oxygène et de ses différents isotopes, laissaient malgré tout planer le doute. Elles indiquaient une composition proche, mais les incertitudes étaient assez importantes. Or, depuis une dizaine d'années, les mesures ont gagné en précision et ont été effectuées sur des éléments de plus en plus nombreux. Elles ont confirmé cette similitude de composition, d'où une « crise isotopique ».

Comment résoudre cette crise ? Plusieurs hypothèses ont été esquissées pour concilier les observations et les simulations. Si l'hétérogénéité du Système solaire est plus limitée que prévu, l'impacteur pourrait avoir une composition assez proche de celle de la Terre. En outre, des simulations montrent qu'un objet de composition légèrement différente peut intervenir dans la formation de la Lune sans toutefois entraîner de variations détectables dans les concentrations isotopiques finales. Dans les années à venir, les chercheurs espèrent obtenir des données supplémentaires sur la composition de divers corps du Système solaire (comètes, astéroïdes, Vénus, Mercure...) qui amélioreront la vision de l'histoire des éléments et de leur répartition.

Pour résoudre la « crise isotopique », une autre possibilité serait que la Lune



CET ÉCHANTILLON DE ROCHE LUNAIRE, rapporté par la mission *Apollo 17* en 1972, a permis de montrer que la Lune présentait un champ magnétique intense il y a 4,2 milliards d'années. Par ailleurs, les roches lunaires indiquent que la Lune et la Terre présentent des compositions très similaires.

se soit formée principalement à partir du manteau terrestre et non de l'impacteur. Cela implique de réviser les conditions dans lesquelles se déroule le scénario d'impact.

Un impact plus violent que prévu

Une piste prometteuse a été proposée en 2012 : Matija Cuk, de l'institut SETI, et Sarah Stewart, alors à l'université Harvard, ont proposé un mécanisme qui provoque une diminution progressive du moment cinétique du système Terre-Lune par des effets de résonance gravitationnels entre l'orbite de la Terre autour du Soleil et celle de la Lune autour de la Terre. Grâce à ce mécanisme, la contrainte de la conservation du moment cinétique dans les simulations est moins sévère et autorise des impacts plus violents, dont il résulte un moment cinétique initial plus important. Une nouvelle génération de modèles a donc été proposée. Ces modèles incluent la possibilité d'un impact frontal par un objet de la taille de la Terre ou d'un impact oblique entre un corps de petite taille et la Terre qui tournait très vite sur elle-même.

La conséquence de ces nouveaux modèles est que le nuage de débris à partir duquel la Lune se forme provient désormais surtout du manteau terrestre, ce qui expliquerait la similitude de composition des deux corps tout en justifiant la quantité relativement faible de fer dans l'intérieur de la Lune. En effet, le fer du

noyau terrestre serait trop profond pour se mélanger lors de la collision.

Pour être complet, certains modèles proposent que la composition du disque de débris de la collision, le disque protolunaire, diffère de celle de la Terre, mais certains processus d'interaction du disque avec l'océan de magma terrestre, formé à la suite de l'impact, tendent à homogénéiser la composition des deux corps, en particulier celle des isotopes d'oxygène. Dans ce cas, l'homogénéisation se fait *a posteriori*, après la collision avec Théia.

L'analyse isotopique ne se limite pas à l'oxygène. Par exemple, le couple d'éléments hafnium-tungstène donne des informations sur la date de la collision. L'hafnium 182, instable, se désintègre en tungstène 182 avec une demi-vie de 8,9 millions d'années. L'affinité de ces éléments avec le fer permet de les utiliser comme traceurs de la formation des noyaux terrestre et lunaire. Comme il est peu probable que la composition isotopique des deux manteaux évolue de façon indépendante vers la même valeur, leur comparaison donne des informations sur l'origine des matériaux qui composent les deux corps.

Or, en 2015, Mathieu Touboul, alors à l'université du Maryland, et ses collègues ont montré que, contrairement à ce que l'on pensait jusque-là, la Lune et la Terre présentent une différence en composition isotopique. Sa faible valeur suggère que cette différence provient de processus postérieurs à la formation de la Lune. Une étude approfondie

La Lune se serait formée à la suite d'une collision entre la Terre, couverte d'un océan de magma, et un corps d'une taille comprise entre celle de la Lune et de Mars.

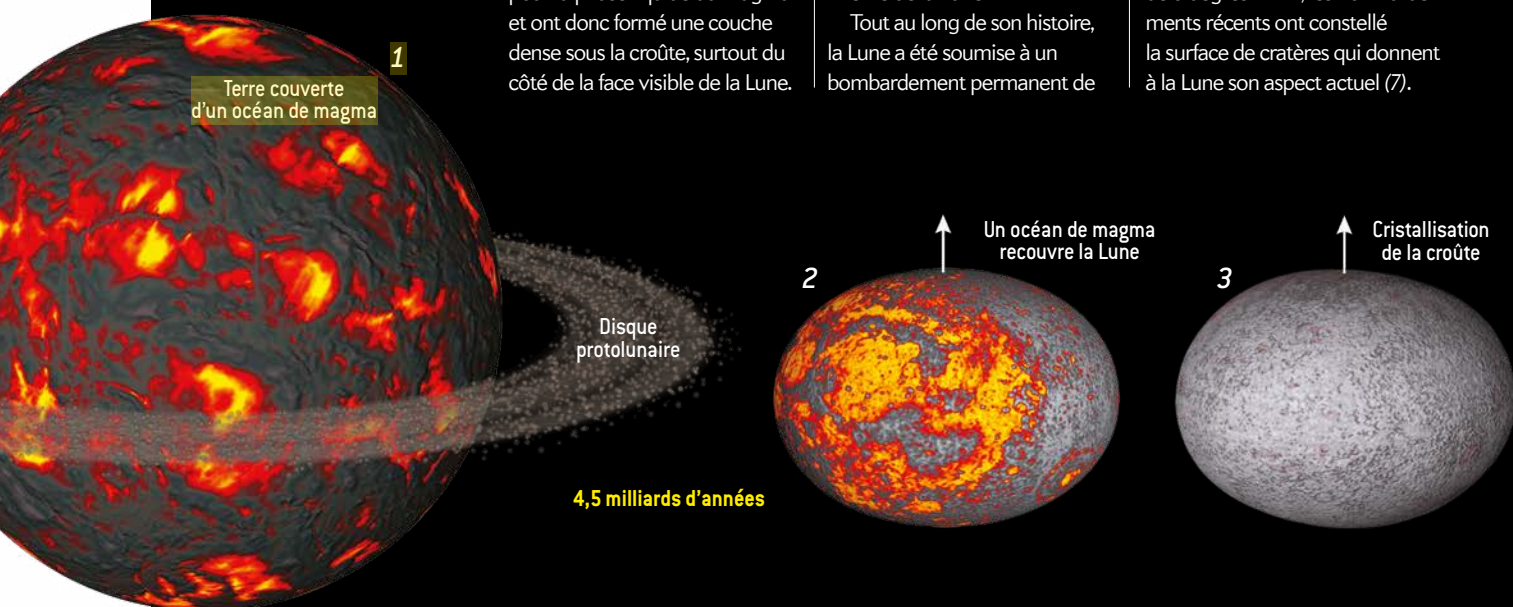
Les débris auraient formé un disque autour de la Terre (1), puis se seraient agglomérés pour constituer la Lune à une distance de 3 à 5 fois le rayon de la Terre. Les effets de marée ont ralenti la rotation de la Terre sur elle-même et ont conduit la Lune à s'éloigner progressivement

jusqu'à atteindre aujourd'hui une distance de 60 rayons terrestres. Quand la Lune s'est formée, sa surface était couverte d'un océan de magma de quelques centaines de kilomètres de profondeur (2). Celui-ci s'est refroidi et a cristallisé (3). Divers éléments, dont des éléments radioactifs tels que le potassium, ont une préférence pour la phase liquide du magma et ont donc formé une couche dense sous la croûte, surtout du côté de la face visible de la Lune.

Divers mécanismes ont été proposés pour expliquer cette distribution asymétrique (voir ci-contre). Cette couche riche en éléments radioactifs serait aussi liée à un volcanisme tardif (voir ci-dessous, à gauche). En outre, divers indices suggèrent que la Lune présentait un champ magnétique intense lors de sa formation (voir ci-dessous, à droite). Tous ces phénomènes appellent à une meilleure compréhension de la structure interne de la Lune.

Tout au long de son histoire, la Lune a été soumise à un bombardement permanent de

météorites, avec certains événements notables comme la formation des bassins, de vastes dépressions dans la croûte. L'impact qui a donné naissance au bassin Pôle-Sud-Aitken (4) a aussi fait basculer l'axe de rotation de la Lune de 15 degrés (5). Le manteau sous les bassins a fondu et les a remplis de basalte, créant les mers lunaires sombres (6). La formation de la mer Procellarum a également provoqué un basculement de l'axe de rotation de 5 degrés. Enfin, les bombardements récents ont constellé la surface de cratères qui donnent à la Lune son aspect actuel (7).



LE VOLCANISME LUNAIRE RÉCENT

LES observations de la surface de la Lune montrent des traces d'effusion magmatique de moins de 100 millions d'années. Pour expliquer une activité volcanique aussi tardive, plusieurs scénarios ont été proposés. Lors de la cristallisation de la croûte (en gris), une couche riche en éléments radioactifs (en marron) s'est formée sous la croûte. Cette couche, plus dense que le manteau (en beige) aurait pu ainsi s'enfoncer dans le manteau (a) jusqu'au noyau. En se réchauffant grâce aux éléments radioactifs, la couche s'est dilatée et est devenue moins dense. En remontant, elle a fondu du fait de la baisse de pression. Dans un autre scénario (b), la couche riche en éléments radioactifs a simplement chauffé la partie supérieure du manteau jusqu'à obtenir un magma, qui est remonté en surface.

