

L'origine de la Lune

Pierre Thomas, Laboratoire de géologie de Lyon, Terre, Planète, Environnement - UMR 5276
École normale supérieure de Lyon

Pierre Thomas revient ici sur les différents scénarii de formation de la Lune et détaille les arguments en faveur de l'hypothèse de l'impact

La Lune tient une place particulière pour l'humanité. Chantée par les poètes, parfois divinisée, souvent à la base de calendriers, elle a été le premier objet céleste observé à la lunette par Galilée et elle a de ce fait participé à l'effondrement du système du monde mis en place dans l'Antiquité grecque. Du XVII^e siècle jusqu'en 1969, les astronomes l'ont étudiée sous toutes les coutures et ont montré que la Lune, seul satellite naturel de la Terre, avait des caractéristiques uniques dans le système solaire. Citons en trois :

(1) Tous les satellites majeurs des planètes orbitent dans le plan équatorial de leur planète, sauf Triton (satellite de Neptune), et la Lune. L'orbite de la Lune est presque située dans le plan de l'écliptique (inclinaison de 5,145°), c'est-à-dire qu'elle fait un angle variant de 18° à 28° par rapport à l'équateur terrestre.

(2) Les satellites majeurs des planètes sont extrêmement petits par rapport à leur planète. Par exemple, le rapport des diamètres entre Jupiter et Ganymède (son plus gros satellite) est de 26. Celui des diamètres Terre/Lune n'est que de 3,66. Le rapport des masses Jupiter/Ganymède est voisin de 12 000. Le rapport des masses Terre/Lune n'est que de 81. À l'opposé, le moment cinétique de la Lune est important par rapport à celui de rotation de la Terre.

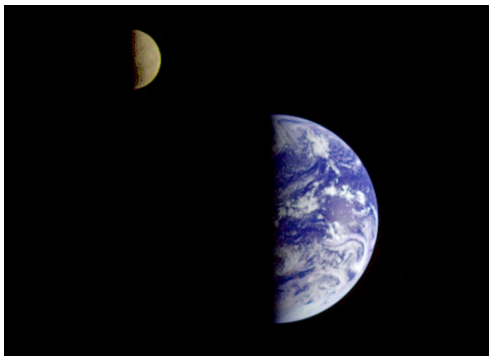


Fig.1. : la Lune et la Terre photographiées par la sonde Galileo (alors en route pour Jupiter) le 16 décembre 1992. Cette image, prise depuis 6 200 000 km du système Terre-Lune met particulièrement en évidence les tailles relativement voisines de la Terre et de la Lune, un cas unique dans le système solaire si l'on excepte le couple Pluton-Charon

Source : <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia00134>

(3) Les corps telluriques du système solaire interne ont une masse volumique $\rho > 3900 \text{ kg/m}^3$, preuve qu'ils sont constitués d'un mélange de silicates ($2700 < \rho < 3300$ à pression et température standards) et d'un métal plus dense comme le fer ($\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ à P et T standards). La masse volumique de la Lune n'est que de $3346,4 \text{ kg/m}^3$, preuve qu'elle ne contient que très peu de fer, moins que les autres corps telluriques.

La Lune était donc un cas « à part » dans le système solaire, ce qui posait de fait la question de son origine.

Trois familles d'hypothèses ont alors été émises durant le XIX^e et la première moitié du XX^e siècle pour expliquer notre Lune, unique dans le système solaire.

Première famille d'hypothèses

Appelée « origine par fusion », elle est basée sur deux observations indépendantes.

(1) On sait depuis Newton que la Lune est à l'origine des marées sur Terre. Ces marées, sources de frictions (et d'un couple de rappel), doivent ralentir la rotation de la Terre sur elle-même. Le moment cinétique du système Terre/Lune devant rester constant, ce ralentissement de la rotation terrestre doit s'accompagner d'un éloignement de la Lune (éloignement bien réel que l'on a mesuré voisin de 3 cm/an à la fin du XX^e siècle). Si l'on remonte le temps, la Lune devait donc tourner très près de la Terre. Tout cela était connu de manière qualitative (mais non quantitative) au XIX^e siècle.

(2) La masse volumique de la Lune, faible, est voisine de celle des roches silicatées qu'on trouve à la surface de la Terre ($2700 < \rho < 3300$), et bien inférieure à celle du noyau dense que l'on savait exister au centre de la Terre.

Avec d'autres astronomes, George Darwin (1845 - 1912), un des fils du célèbre Charles Darwin, proposa donc que la Lune soit un morceau de la Terre. En rotation très rapide en ces temps anciens, la force centrifuge aurait arraché un morceau de la surface terrestre, morceau qui se mit en orbite autour de la Terre. George Darwin proposa même que

l'océan Pacifique (dont on ignorait tout de l'âge et de la nature) soit la « cicatrice » de cet arrachement.

Si elle explique bien la faible masse volumique de la Lune, cette hypothèse n'explique pas que l'orbite de la Lune ne soit pas dans le plan de l'équateur terrestre, ni le très fort moment cinétique de la Lune par rapport à celui de la Terre.

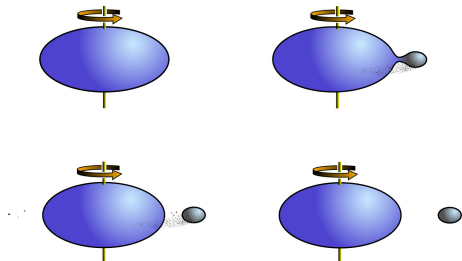


Fig.2. L'origine de la Lune selon la théorie de la fission.

Deuxième famille d'hypothèses

C'est celle de la formation simultanée. Lors de l'accrétion à l'origine des planètes telluriques, une grosse masse de poussières s'aggloméra pour former la Terre alors qu'une plus petite s'accréta dans son voisinage, les deux masses orbitant autour de leur centre de gravité commun. Cette hypothèse ne pose pas de problème quant au rapport des masses et des moments cinétiques. Elle explique moins bien la révolution de la Lune hors du plan équatorial de la Terre. Mais elle n'explique pas du tout la différence de masses volumiques. En effet, formées dans le même secteur du système solaire à partir des mêmes poussières, Terre et Lune auraient dû avoir la même masse volumique, et la Lune aurait dû avoir une notable proportion de fer, ce qui n'est pas le cas.

Troisième hypothèse

Puisque la Lune n'est pas un fragment arraché de la Terre ni un corps né en même temps en son voisinage, on proposa alors une autre hypothèse : celle de la capture. Un corps formé dans une autre région du système solaire (ce qui expliquerait la différence de composition chimique et la rareté du fer) serait passé par là et, capturé par la gravité terrestre, il se serait mis en orbite autour d'elle. Des calculs de mécanique céleste montrent que, pour que cette capture soit possible, il faudrait que les deux orbites soient très voisines (rayons orbitaux et excentricités voisins). Orbites voisines, cela signifie que le corps capturé se serait accréta à la même distance du Soleil que la Terre. Une même distance du Soleil implique que les poussières à l'origine de la Terre et de la Lune devaient s'être condensées à la même température, donc avoir la même

composition chimique, et en particulier la même teneur en fer, ce qui n'est pas le cas.

Juste avant le retour des premiers échantillons par les missions Apollo entre 1969 et 1972, aucune théorie n'expliquait donc correctement la formation de la Lune.

Quelles données nouvelles ont apporté les missions Apollo ?

- La sismique a confirmé la très petite taille du noyau lunaire

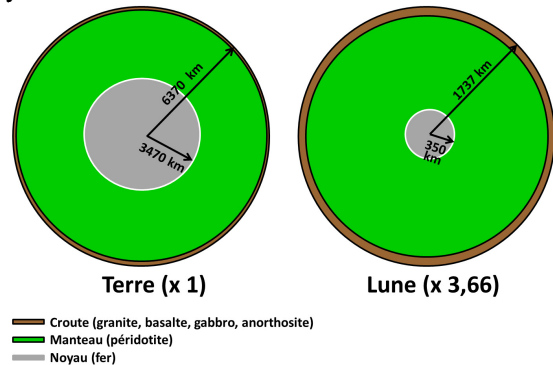


Fig.3. Structures internes comparées de la Terre et de la Lune. Les deux corps ont été représentés avec la même taille pour faciliter les comparaisons (la taille de la Lune a été multipliée par 3,66). Seules ont été représentées les limites chimiques et minéralogiques, sans figurer les limites physiques (température, viscosité...). Ces deux corps possèdent une croûte constituée principalement de silicates légers, surtout des feldspaths. La croûte lunaire est plus épaisse (60 à 100 km) que la croûte terrestre (6 à 35 km). Les croûtes surmontent un manteau riche en minéraux ferro-magnésiens (olivine et pyroxène). Au centre, il y a le noyau, principalement composé de fer. Densité globale, moment d'inertie, sismique..., tout montre que le noyau de la Lune est relativement beaucoup plus petit (20 % du rayon, 0,8 % du volume) que celui de la Terre (54 % du rayon, 15 % du volume). Par rapport à la Terre, la Lune est très appauvrie en fer (Schéma Pierre Thomas).

- La datation radiochronologique des échantillons lunaires les plus âgés et l'extrapolation de leur âge suggèrent que la Lune est plus jeune que la Terre de quelques dizaines de millions d'années.

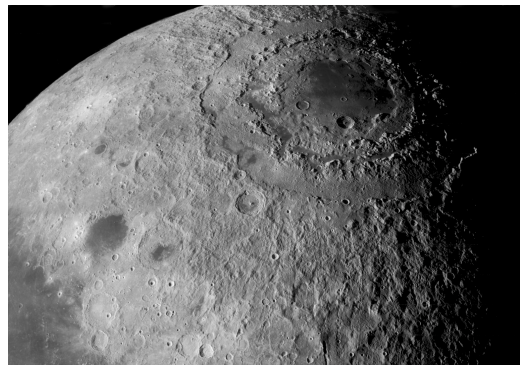


Fig.4. Le bassin Orientale sur la Lune (diamètre de 950 km), un des plus récents témoins des 600 millions d'années du gymkhana cosmique qui a accompagné la formation du système solaire. Crédit : NASA / Lunar Orbiter 4.

- La datation d'autres échantillons montre que les très nombreux cratères d'impact, cratères connus depuis Galilée, sont très anciens (âge $\geq 3,9$ Ga). Le système solaire précoce a été parcouru de très nombreux corps de plusieurs dizaines voire centaines de km de diamètre. Terre et Lune sont nées au sein d'un véritable gymkhana cosmique.

- L'analyse isotopique des échantillons lunaires, en particulier des isotopes de l'oxygène et du titane, montre que la Lune et la Terre sont étrangement similaires, alors que d'autres corps (Mars, la majorité des météorites...) sont isotopiquement différents.

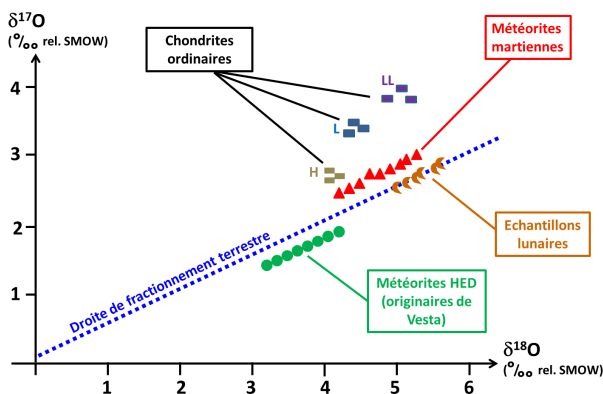


Fig.5. Diagramme comparant les compositions isotopiques de l'oxygène entre la Terre, la Lune, Mars, et divers météorites. La composition isotopique se mesure en unité δ qui représente le rapport isotope lourd/isotope léger normé à un standard. Les processus physiques et chimiques fractionnent les isotopes proportionnellement à leur différence de masse, deux fois plus le ^{18}O que le ^{17}O par rapport au ^{16}O . Dans un tel diagramme, tous les échantillons issus d'un même « réservoir » se situent sur une droite de pente 1/2. La droite bleue représente la totalité des échantillons naturels terrestres. Sur ce même diagramme, on a reporté les analyses des météorites martiennes, des météorites issues de Vesta (HED) et de certaines chondrites « ordinaires ». Ces échantillons ne se placent pas sur la droite de fractionnement terrestre, car ils proviennent d'un autre réservoir (autre secteur de la nébuleuse pré-solaire). Par contre, tous les échantillons lunaires sont situés sur la droite de fractionnement terrestre, ce qui suggère qu'ils proviennent soit d'un réservoir isotopiquement semblable à la Terre, soit plus probablement de la Terre elle-même (compilation bibliographique dessinée par Pierre Thomas).

- Les analyses chimiques élémentaires des roches magmatiques lunaires montrent que les silicates de la Lune ont une composition chimique voisine de celle du manteau terrestre, à une différence notable près : par rapport au manteau terrestre, la Lune est considérablement appauvrie en éléments ou composés volatils (à basse température de vaporisation), en particulier en H_2O et en potassium. À l'opposé, la Lune est enrichie en éléments réfractaires (à haute température de vaporisation), en particulier l'uranium et le thorium.

- Les analyses des terres rares (en particulier l'euprium) dans les échantillons de la croûte anorthositique et dans les basaltes (issus du manteau) montrent que la quasi-totalité de la Lune fut fondue (théorie de l'océan magmatique). La croûte anorthositique provient de la ségrégation (par flottaison) des plus légers des silicates, les feldspaths, qui cristallisaient lors du refroidissement de cet océan ; le manteau tire son origine de l'accumulation par gravité des minéraux ferro-magnésiens plus denses.

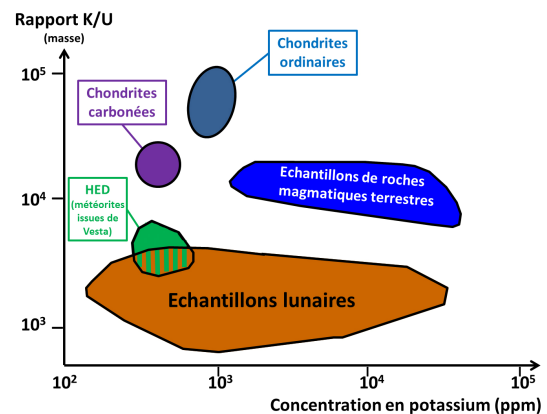


Fig.6. Les rapports potassium/uranium dans différentes roches du système solaire. Dans les processus magmatiques (fusion, cristallisation...), le potassium et l'uranium ont le même comportement ; ils sont enrichis ou appauvris de la même façon. Les processus magmatiques qui enrichissent (ou appauvrissent) en potassium font la même chose pour l'uranium, et le rapport K/U reste constant (environ $1,5 \cdot 10^4$ pour la Terre).

Sur la Lune, les roches magmatiques présentent aussi une grande variété de teneur en potassium, et leur rapport K/U reste constant. Mais les roches lunaires ont un rapport K/U plus faible ($2 \cdot 10^3$) que la Terre. Comme ce ne sont pas des processus magmatiques qui ont « trié » le potassium par rapport à l'uranium, c'est que la Lune a un rapport K/U 10 fois supérieur à celui du manteau terrestre. Quelle que soit l'origine de la Lune, elle devra expliquer cette déficience en potassium. Ce résultat fut confirmé grâce aux mesures des rayons γ issus de la surface effectuées par la sonde en orbite Lunar Prospector (compilation bibliographique dessinée par Pierre Thomas).

L'hypothèse de l'impact

Face aux impossibilités des trois hypothèses classiques et aux données nouvelles venues des missions Apollo, deux équipes (William K. Hartmann et Donald R. Davis d'une part, et Alistair G. W. Cameron et William R. Ward d'autre part) proposèrent à la fin des années 1970 que la Lune soit le résultat d'un choc tangentiel entre deux planètes déjà différenciées (fer concentré dans le noyau, surmonté d'un manteau silicaté) : la Terre et Théia (du nom de la Titanide qui aurait engendré la Lune selon la mythologie grecque), gros corps qui orbitait aussi dans le plan de l'écliptique.

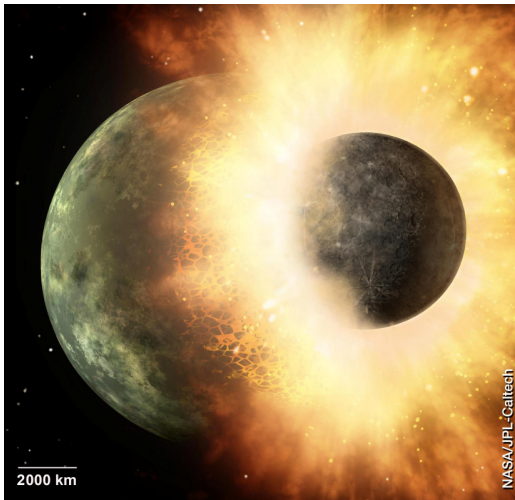


Fig.7. Dessin d'artiste montrant le début de la collision tangentielle entre la Terre (à gauche) et Théia (à droite)

Crédit : <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA14850>

Ce choc aurait presque complètement fragmenté Théia et aurait arraché de gros fragments de manteau terrestre. Le noyau de Théia serait « parti » (au loin dans le système solaire ou aurait chuté sur la Terre et s'y serait incorporé). Des fragments des manteaux de Théia et de la Terre, portés à très haute température par le choc, auraient perdu leurs éléments volatils et se seraient enrichis en éléments réfractaires.

Ils se seraient mis en orbite autour de la Terre (dans le plan de l'écliptique), se seraient accrétés et auraient formé la Lune.

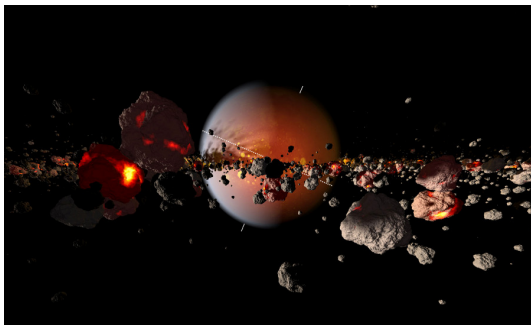


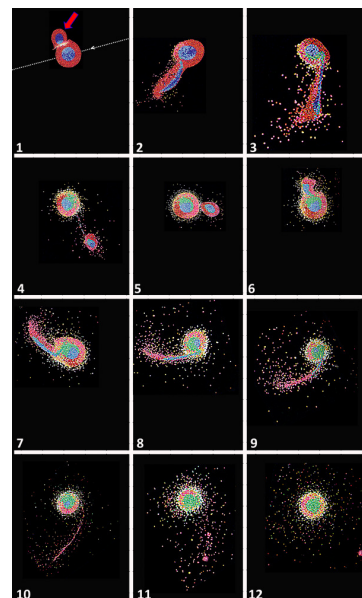
Fig.8. Image d'artiste montrant les fragments de Théia et du manteau terrestre en orbite autour de la Terre en train de se ré-accréter pour former la Lune. L'artiste a figuré des nuages sur la face de la Terre éclairée par le soleil (à gauche). Il a voulu figurer par-là que l'impact de Théia a complètement vaporisé les éventuels océans qui, peut-être, recouvraient déjà la Terre. Il a figuré la face nocturne (à droite) en rouge, indiquant par la même que les nuages sont éclairés par en dessous par la surface terrestre rendue incandescente par l'énergie apportée par l'impact. L'artiste a également figuré l'incandescence des fragments qui vont se rassembler dans l'année qui vient pour constituer la Lune. Par rapport au dessin original, j'ai rajouté l'axe des pôles et l'équateur de la Terre, indiquant par-là que les fragments à l'origine de la Lune sont situés dans le plan de l'écliptique, et non dans celui de l'équateur de la Terre

Crédit : <http://airandspace.si.edu/imageDetail.cfm?imageID=1064> modifié

Ce scénario qualitatif fut testé par des simulations informatiques qui en montrèrent la possibilité et la réalité potentielle.

Ces simulations détaillèrent les caractéristiques (masse, vitesse, orbite...) à donner à Théia pour former le système Terre-Lune tel qu'il est. Elles précisèrent les « destins » relatifs des fragments de manteau de Théia et de la Terre et du noyau de Théia.

Par exemple, les premières simulations indiquaient que la masse de Théia devait être comprise entre 0,12 et 0,17 masse terrestre. Sa vitesse relative avec la Terre devait être inférieure à 4 km/s, et l'angle entre les deux orbites devait être voisin de 45°. Ces premières simulations, ainsi que celles plus élaborées qui suivirent montrent toutes que le noyau de Théia retomba sur Terre et s'y incorpora. Toutes montrent que la Lune est constituée d'une part significative du manteau de Théia. Toutes montrent que la ré-accrétion fut un phénomène très rapide, qui se chiffre en années et non en milliers ou millions d'années et que cette ré-accrétion engendra une Lune très majoritairement fondue. Bref, on arrivait à coup de simulations informatiques à « refaire » un système Terre-Lune compatible avec tous les observables actuellement à notre disposition.



La 1^{ère} image montre l'instant 0 de l'impact, la taille relative des deux corps et l'angle entre le mouvement de Théia et l'orbite de la Terre.

Sur la dernière figure, la Lune est déjà presque constituée.

Une année à peine s'est écoulée entre la première et la dernière images.

Fig.9. Exemple d'une simulation informatique (celle d'Alastair Cameron, de l'Université d'Harvard, Astronomy Septembre 1998, modifiée et redessinée) montrant les différents stades de l'impact, de la fragmentation de Théia, de l'éjection des fragments du manteau terrestre, de la chute d'un Théia amputé d'une bonne partie de son manteau sur la Terre, de la nouvelle éjection de fragments terrestres, de l'accrétion de ces fragments...

Les inconnues qu'il reste à résoudre

La Lune montre de grandes similitudes chimiques et isotopiques avec le manteau terrestre. Or, toutes les simulations incorporent une part notable du manteau de Théia dans la Lune, ce qui oblige à supposer que Terre et Théia étaient chimiquement et isotopiquement très voisines, ce qui est pour le moins « étrange ». Pour expliquer cette similitude, certains n'hésitent pas à proposer que Terre et Théia étaient initialement des planètes co-orbitales. Théia aurait été située sur un des points de Lagrange L4 ou L5 de la Terre et en aurait été « délogée » par des perturbations dues aux autres corps du système solaire. Par ailleurs, cette similarité isotopique n'est pas totale, par exemple en ce qui concerne les isotopes du tungstène. Alors ?

Autre inconnue : l'âge de ce choc. Les premières datations des échantillons des anorthosites lunaires donnaient un âge très proche de 4,568 Ga (âge des météorites les plus anciennes, pris conventionnellement comme âge du système solaire). Des simulations de la durée de cristallisation d'un océan magmatique montre qu'il s'agit d'un phénomène géologiquement très bref (≈ 1 Ma). L'âge des anorthosites donnerait donc l'âge de la Lune à un million d'années près. D'autres datations très récentes (2011) donnent un âge de cristallisation des anorthosites (ou du moins de certaines d'entre elles) de 4,4 Ga, donc 150 Ma après la formation du système solaire. Le problème reste entier.

L'hypothèse de l'impact est donc la seule qui, en 2012, explique la majorité des données à notre disposition. Mais il reste des questions. Ces questions posent le problème de l'échantillonnage. Les échantillons Apollo ont été prélevés en surface, et leur composition isotopique a pu être perturbée par le bombardement des micro-météorites et par le

rayonnement cosmique. D'autre part, tous ces échantillons ont été prélevés dans un secteur assez limité de la Lune (relativement près du centre de la face visible), et ne sont peut-être pas parfaitement représentatifs.

La conclusion est évidente : il faut organiser de nouvelles campagnes de prélèvements d'échantillons lunaires, avec des prélèvements et sous la surface, et sur la face cachée. Affaire à suivre !

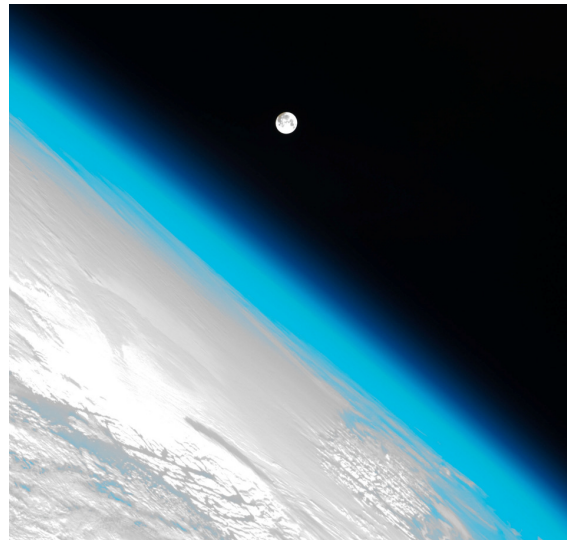


Fig.10. La Lune au-dessus de l'atmosphère terrestre photographiée depuis l'ISS le 8 janvier 2012. Outre son côté esthétique certain, cette photo pose le problème de l'atmosphère de la Terre. Traditionnellement, on proposait que l'atmosphère terrestre soit issue d'un dégazage de la Terre lors de sa différenciation. Selon cette hypothèse, l'atmosphère de la Terre existait donc déjà lors du choc avec Théia. Or, un tel choc a dû éjecter dans l'espace la quasi-totalité de l'atmosphère (et des océans) terrestres de l'époque. La résolution de la question de l'origine de la Lune pose donc une autre question : l'origine de l'atmosphère et de l'eau terrestre. Ce sera peut-être l'occasion d'un nouvel article dans les CC.

Crédit

<http://spaceflight1.nasa.gov/gallery/images/station/crew-30/inflight/ndxpage17.html>