



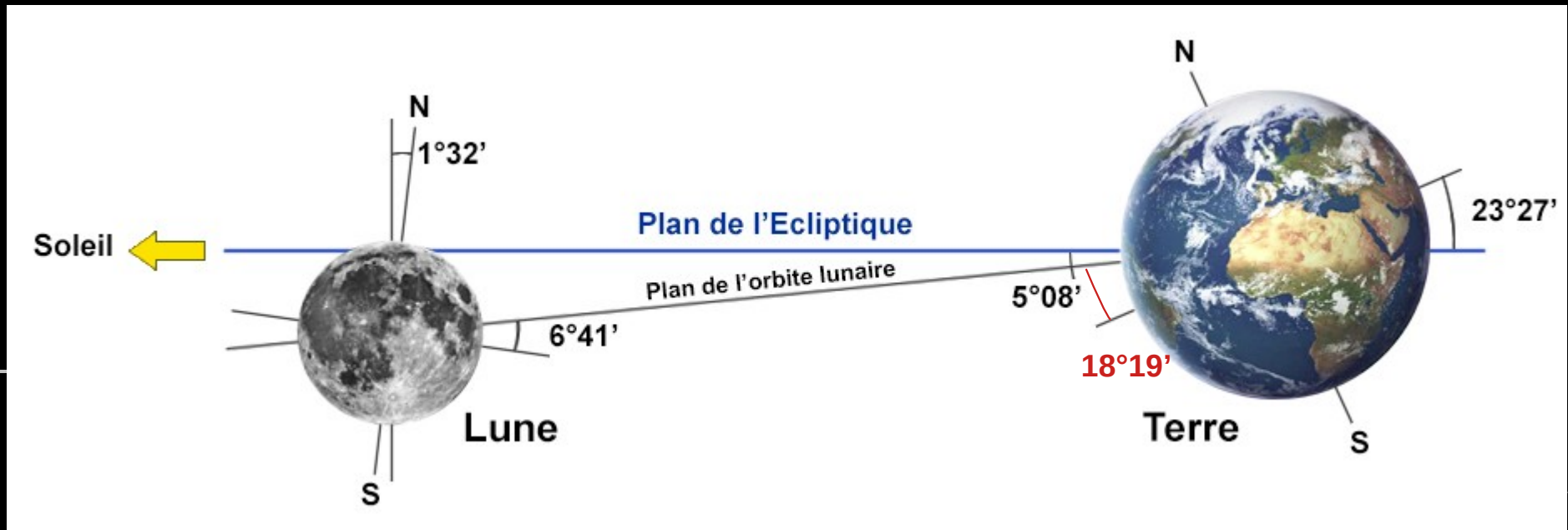
Ce que nous ont appris les échantillons lunaires sur l'origine de la Lune



La Lune, un corps particulier

Du 17ème siècle jusqu'en 1969, les astronomes ont étudié "à distance" la Lune, et ont montré que la Lune 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 la Lune qui orbite presque dans le plan de l'écliptique (inclinaison de 5°)



La Lune, un corps particulier

2- Les satellites majeurs des planètes sont extrêmement petits par rapport à leur planète. Le rapport des diamètres Terre/Lune est de 3,66. (26 pour le rapport Jupiter Ganymède)

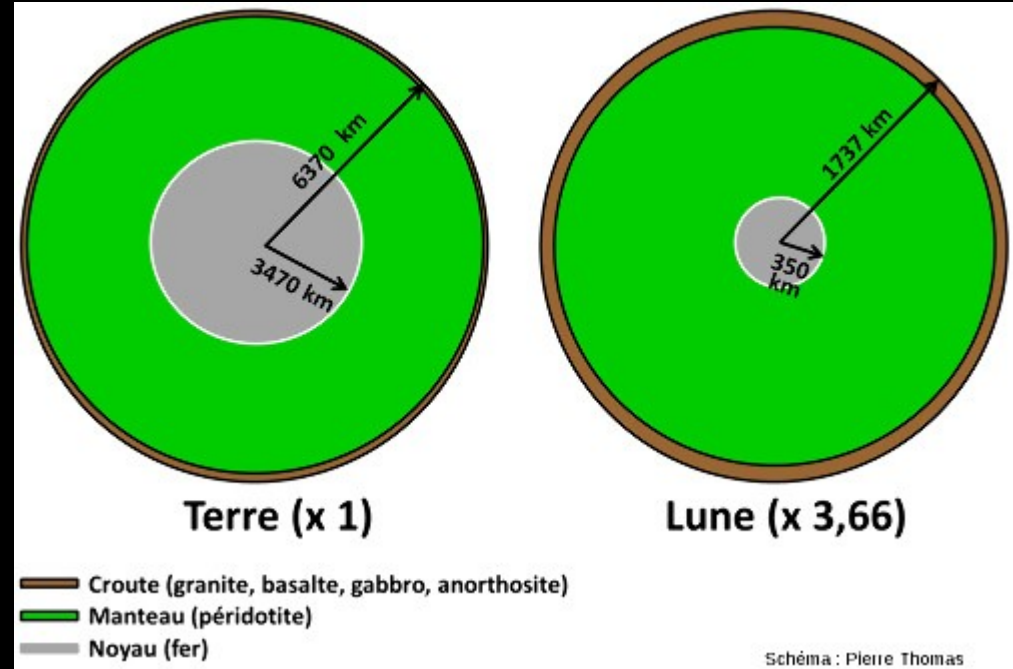


La Lune, un corps particulier

3- La lune a une masse volumique faible comparée aux autres corps telluriques du système solaire, preuve qu'elle ne contient que très peu de fer, moins que les autres corps telluriques.

La Terre, Mars, Vénus ou Mercure ont un noyau ferrique (30% en masse) beaucoup plus important que celui de la lune (2%)

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



Hypothèses sur l'origine de la Lune avant 1969


Trois familles d'hypothèses ont été émises durant le 19ème et la première moitié du 20ème siècle pour expliquer notre Lune, unique dans le système solaire.

1- Origine par fission

La première famille d'hypothèses est appelée « origine par fission ». Elle est basée sur 2 observations indépendantes.

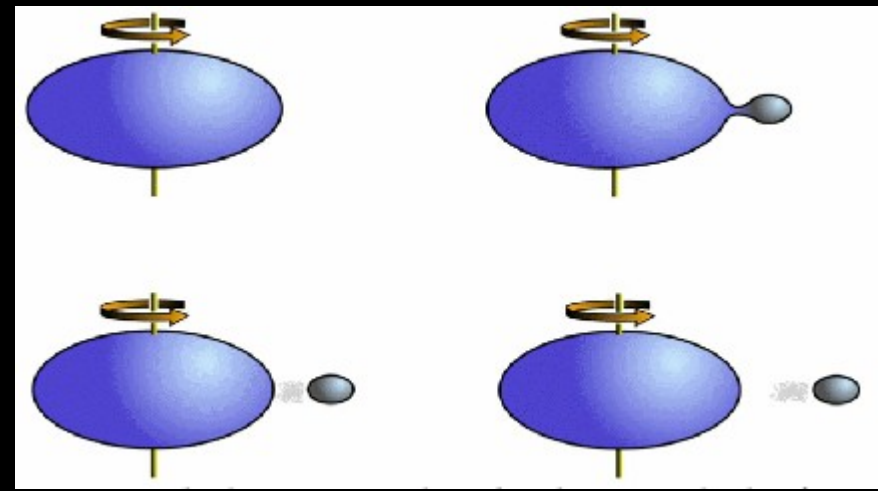
1/ On sait depuis Newton que la lune devait tourner beaucoup plus près de la Terre et que la Terre devait tourner beaucoup plus vite à leur création (la vitesse de rotation de la Terre diminue de 1,7 m/s en 1 siècle, ce qui pourrait donner une journée de 3,8 h il y a 4,5 Md d'années)

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.

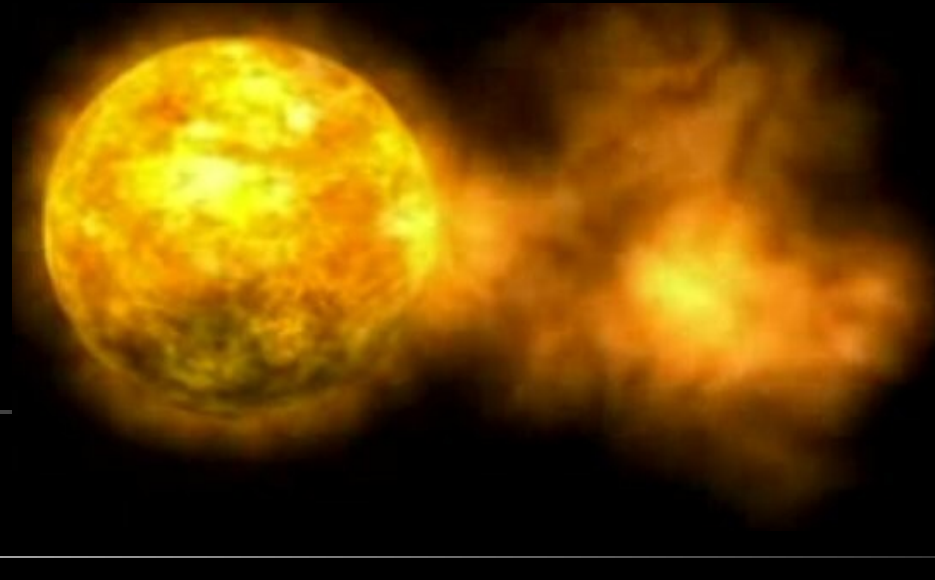


Origine par fission

Avec d'autres astronomes, George Darwin, proposa que la Lune soit un morceau de la Terre. En rotation très rapide à l'origine, la force centrifuge aurait arraché un morceau de la surface terrestre qui se serait mis en orbite autour de la Terre.



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,

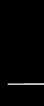


2- Formation simultanée

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.

Cette hypothèse ne pose pas de problème quant au rapport des masses ou des volumes.

Mais elle n'explique pas du tout la différence de masses volumiques.

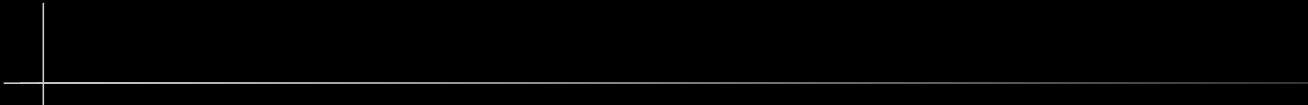


3- Capture

Un corps formé dans une autre région du système solaire (ce qui expliquerait la différence de composition chimique et la rareté du fer) aurait été capturé par la gravité terrestre et se serait mis en orbite autour de la Terre.

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 accrété à la même distance du Soleil que la Terre et devraient avoir la même composition chimique



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.

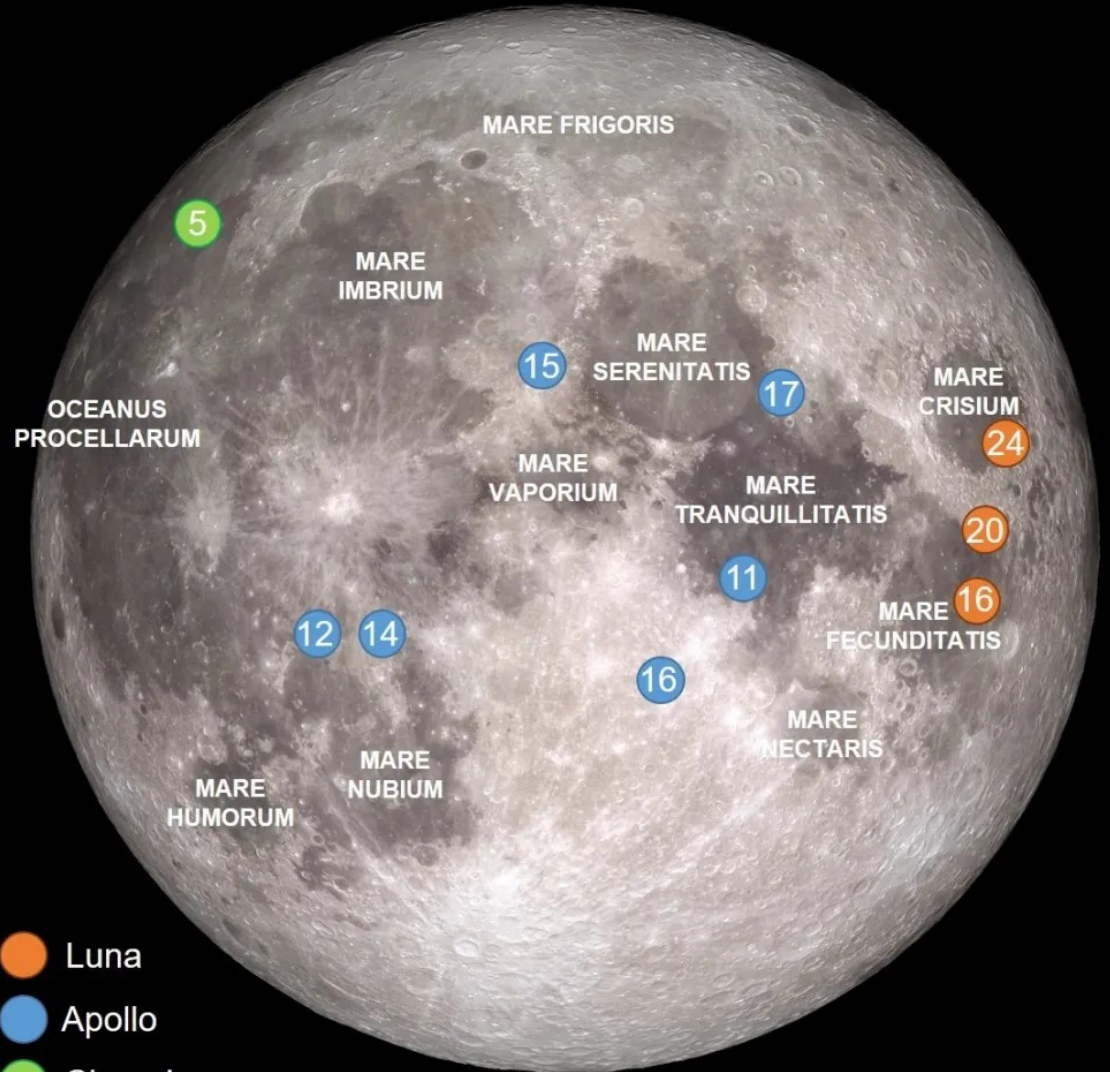
Quelles données nouvelles ont apportées les missions lunaires ?



**LE VOYAGE
DANS LA LUNE**

Quelles étaient ces missions ?

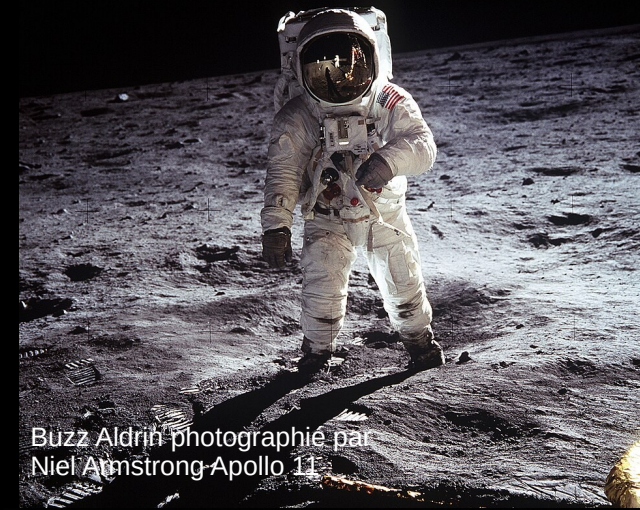
Carte des missions ayant rapportées des échantillons (Chang'e 6 est sur la face cachée)



- Luna
- Apollo
- Chang'e

Quelles étaient ces missions ?

- Les missions Apollo ont rapportées 382 kg de prélèvement en 6 missions, répartis en 2196 échantillons partagés en 110.000 lots
 - Apollon 11 le 21 juillet 1969
 - 5 autres missions jusqu'à Apollo 17
 - Assistées à partir d'Apollo 15 de véhicule lunaire
 - Alunissages sur la face visible
 - Les missions Apollo sont les seules missions habitées sur la lune (12 astronautes ont marché sur la Lune entre 1969 et 1976)



Buzz Aldrin photographié par
Neil Armstrong-Apollo 11



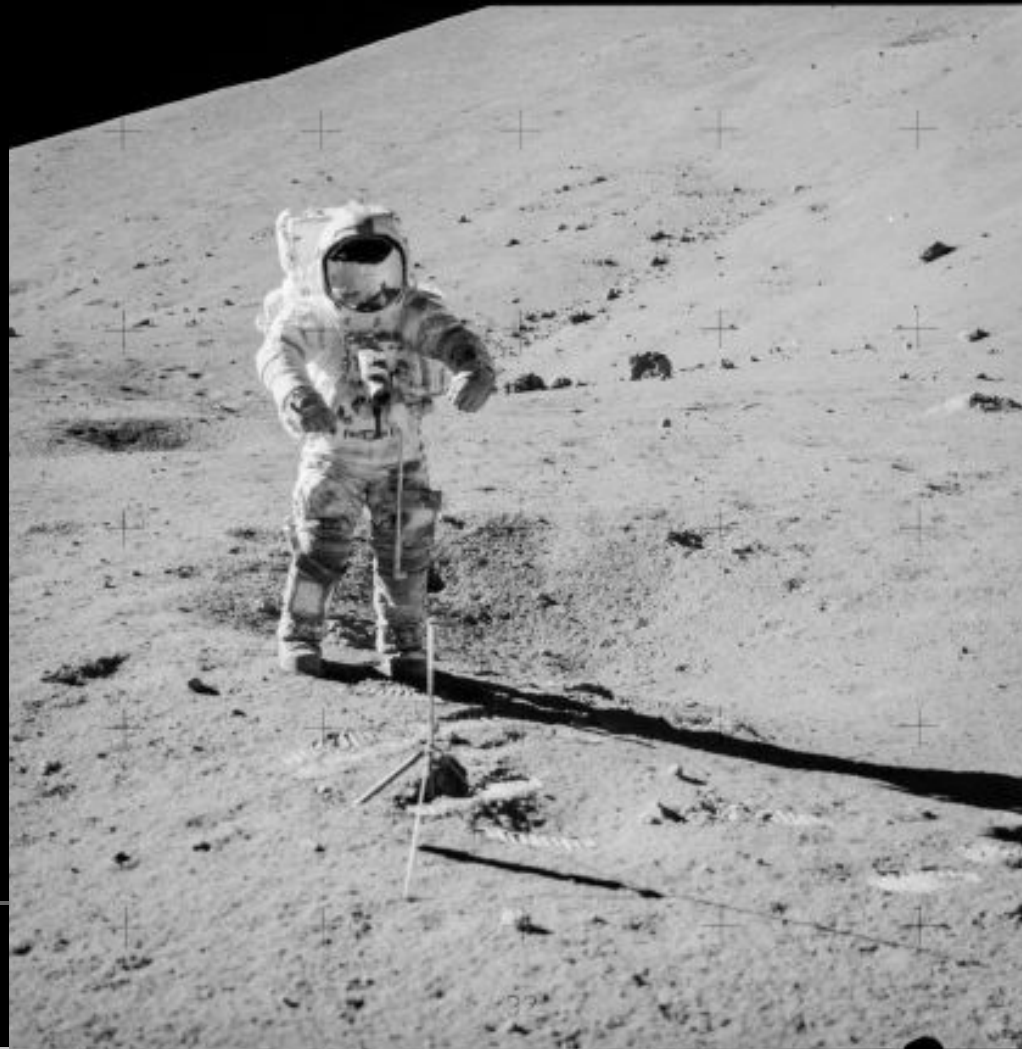
Eugene Cernan conduisant un
rover lunaire lors de la mission
Apollo 17 avant son assemblage
final (les caméras et antennes ne
sont pas installées).

Apollo 17



L'astronaute Gene Cernan en train de
prélever un échantillon de sol lunaire.
Apollo 17

Crédit : Nasa



Quelles étaient ces missions ?

- Les missions Luna : programme soviétique pour l'exploration lunaire
- 24 sondes spatiales font officiellement partie de ce programme. Ce seront en fait 45 missions de 1959 à 1976
 - (Sputnik -compagnon de route- en 1957 fait 1400 révolutions autour de la Terre en 3 semaines et Youry Gagarine , premier homme dans l'espace à bord de Vostok 1 le 12 avril 1961. John Glenn 1^{er} américain en orbite le 20/02/1962 et Alan Shepard dans l'espace le 5 mai 1961)
 - Luna 1 en 1959, 1^{er} engin à s'affranchir de l'attraction terrestre
 - Luna 2 en 1959, 1^{er} objet artificiel à atteindre le sol lunaire
 - Luna 9, atterrissage en douceur en février 1966
 - Luna 16 en 1970, 1^{er} robot à collecter des échantillons et à les ramener sur Terre (101g)
 - Luna 17, rover Lunokhod en novembre 70
 - Luna 20 (1972) et Luna 24 (1976) rapportent respectivement 55g et 170g

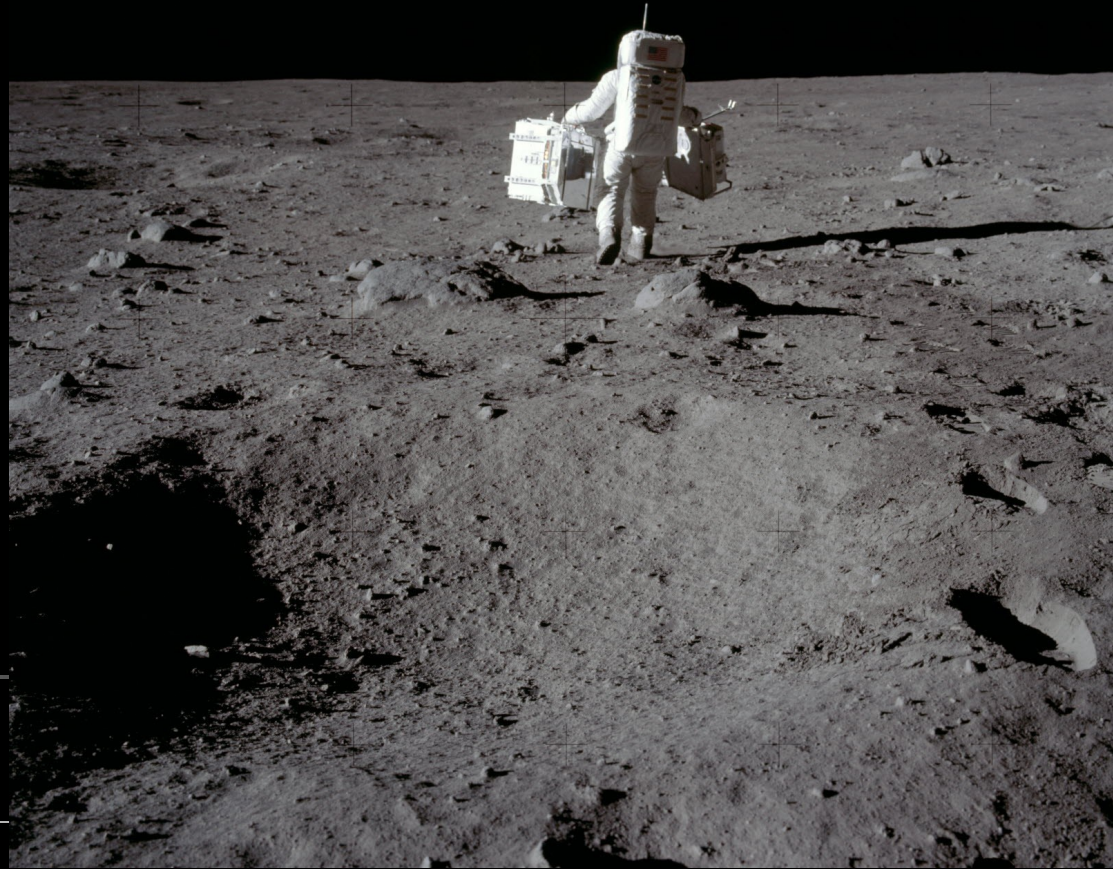


Quelles étaient ces missions ?

- **Les missions Chang'e -Déesse de la Lune - 嫦娥六号**
 - Chang'e 5 en 2020 rapporte 1.731 g de l'Océan des tempêtes
 - Chang'e 6 en 2024 rapporte en juin 2024 1.935,3 g de la face cachée, le South Polar Aitken, zone où un impact violent a arraché des roches profondes du manteau



Que trouve-t-on sur la Lune ?



Que trouve-t-on sur la Lune

- Des drapeaux (18 US et 3 Chinois)
- Du matériel technique (180T)
- Des rovers
- Une statuette en alu et une plaque commémorative déposée par Apollon 15 (Fallen Astronaut)
- Un plaque signée Nixon, Armstrong, Aldrin et Collins fixée sur le pied du LEM
- Une balle de golf d'Alan Shepard
- 12 paires de bottes
- Une plume de faucon déposée par David Scott Apollo 15
- Les cendre de Eugène Shoemaker, géologue des planètes (astrogéologie)
- 96 sachets d'excréments



Un petit mot au sujet de ces roches

Les échantillons rapportés par les missions Apollo ont permis d'identifier trois minéraux jusqu'alors inconnus, l'armalcolite, la tranquillityite et la pyroxferroite

L'analyse des échantillons ramenés par Chang'e 5 a permis la découverte d'un nouveau minéral, baptisé changesite-(Y) par les chercheurs.

Le président américain Richard Nixon a donné à 135 pays et aux cinquante États américains des morceaux de Lune.

Trois échantillons de roche lunaire rapportés par Luna 16 ont été initialement offerts à l'épouse de Sergueï Korolev. Vendu 2 fois par Sotheby's en 1993 puis en 2018 pour 442 500 dollars puis 855 000 dollars.

Il s'agit du seul échantillon qui ne soit pas la propriété d'un gouvernement.



Quelles données nouvelles ont apportées les échantillons lunaires ?

La datation radiochronologique des échantillons lunaires suggèrent que la Lune est légèrement plus jeune que la Terre

La datation de la croûte lunaire la plus ancienne donne un âge de 4,36 milliards d'années, contre un âge de 4,52 milliards d'années pour la Terre environ

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



Quelles données nouvelles ont apportées les échantillons lunaires ?

L'analyse isotopique des échantillons lunaires montre que la Lune et la Terre sont étrangement similaires, alors que d'autres corps (Mars, les météorites...) sont isotopiquement différents.

Les analyses chimiques des roches lunaires montrent que les silicates de la Lune ont une composition chimique comparable à celle du manteau terrestre...

....à deux différences notables près :

- par rapport au manteau terrestre, la Lune est considérablement appauvrie en éléments volatils (à basse température de vaporisation), en particulier le potassium.
- à l'opposé, la Lune est enrichie en éléments réfractaires (à haute température de vaporisation), en particulier l'uranium et le thorium



|

Quelles sont les conclusions de toutes ces découvertes ?

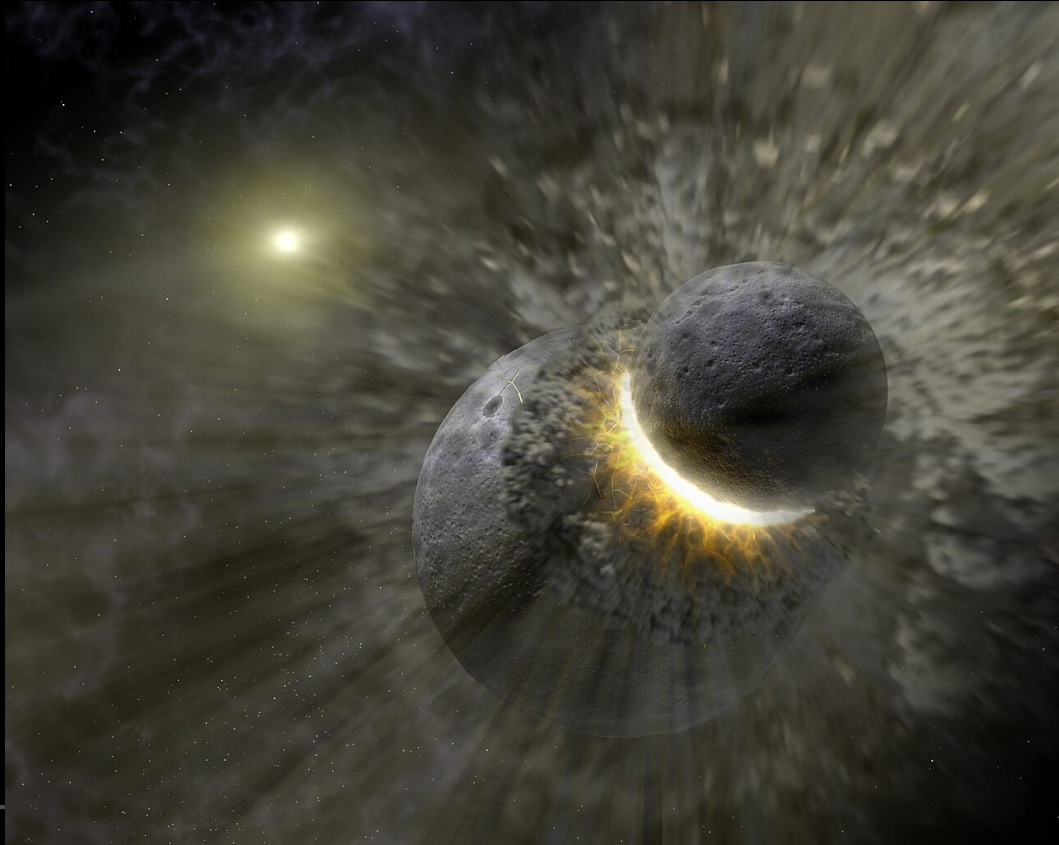
Les 3 hypothèses anciennes de la formation de la lune ne sont pas satisfaisantes

La Lune est plus jeune que la Terre

La Terre et la Lune sont faites de la même matière

La Lune a probablement été totalement fondue

Ces connaissances orientent vers la thèse d'un cataclysme majeur : un impact serait à l'origine de la lune



L'hypothèse de l'impact

Il y a 4,5 milliards d'années, un astre gros comme Mars aurait percuté la Terre encore jeune.

Cet immense choc aurait donné :

- l'inclinaison de la Terre, qui a donné les saisons,
- La Lune qui par son attraction a donné les marées, et peut-être la vie



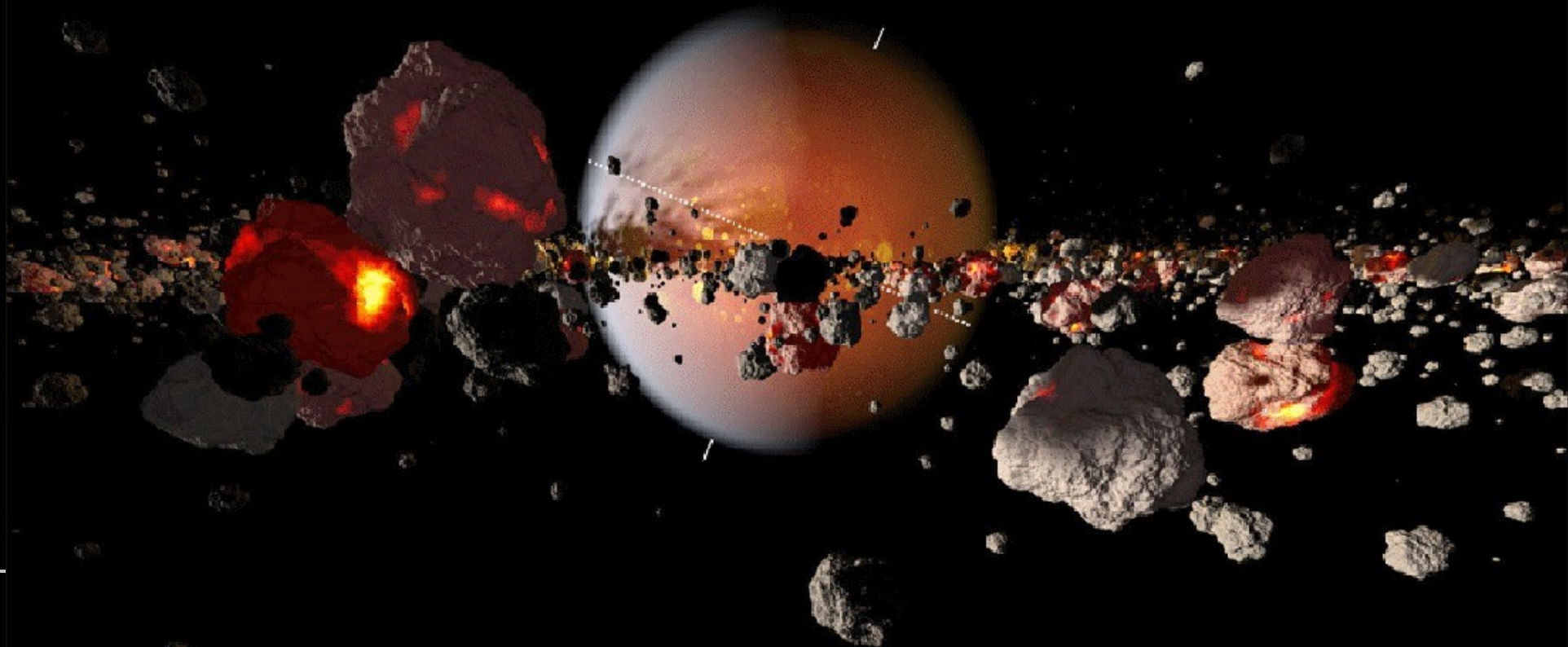
L'hypothèse de l'impact

Deux équipes 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, gros corps qui orbitait aussi dans le plan de l'écliptique.

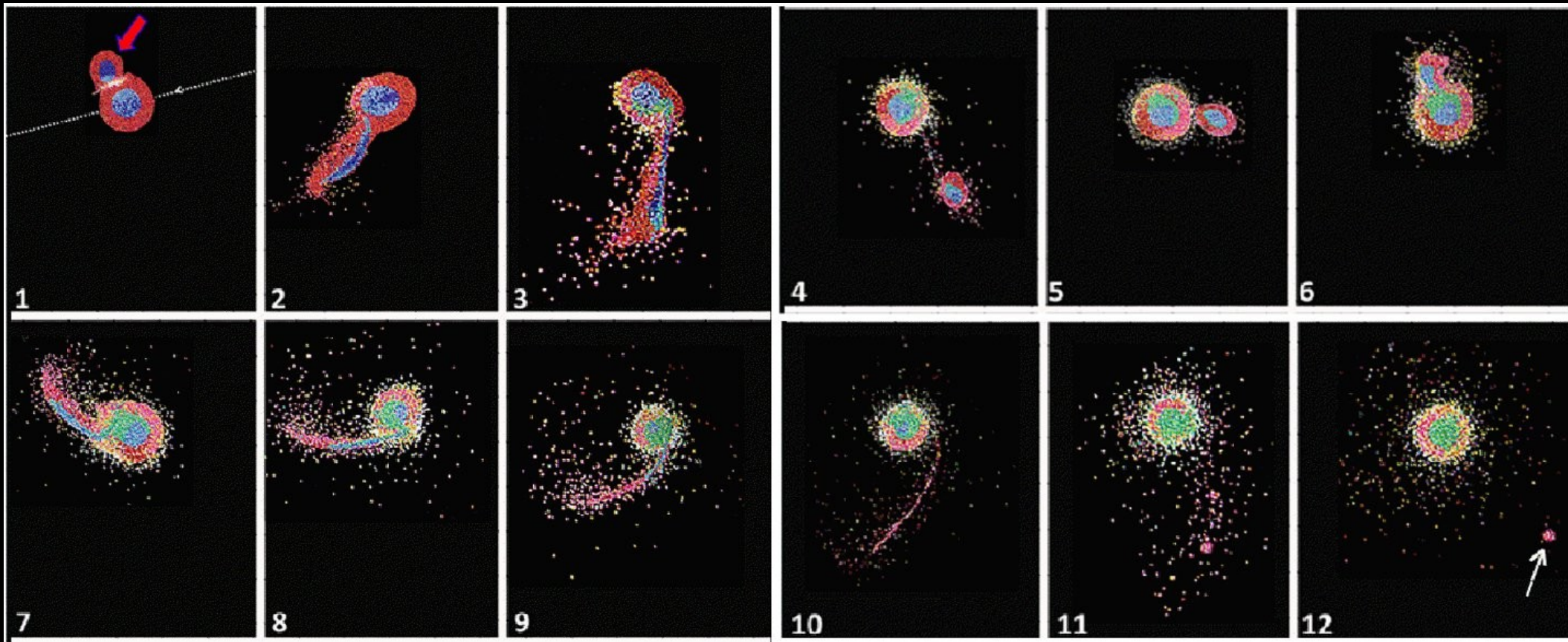
Ce choc aurait presque complètement fragmenté Théia et aurait arraché de gros fragments de manteau terrestre. Le noyau de Théia aurait chuté sur la Terre et s'y serait incorporé.

Des fragments des manteaux de Théia et de la Terre, portés à très haute température par le choc, auraient perdu leurs volatils et se seraient enrichis en 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 en quelques mois





fragments de Théia et du manteau terrestre en orbite autour de la Terre en train de se ré-accréter pour former la lune



Simulation informatique illustrant la formation de la lune après l'impact avec Théia

Ce scénario de l'impact fut testé par des simulations informatiques

Ces simulations détaillèrent les caractéristiques (masse, vitesse, orbite...) à donner à Théia pour former le système Terre-Lune .

Les simulations indiquaient que la masse de Théia devaient être comprise entre 0,12 et 0,17 masse terrestre, soit une masse voisine de la masse de Mars.

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 simulations 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

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

L'eau sur la Lune : le résultat des missions Apollo

Pour simplifier, les roches ramenées par les missions Apollo ne contiennent pas d'eau libre, ni de groupements hydroxyles (OH)

Cette absence d'eau dans les échantillons lunaires s'explique par la genèse de la Lune : ré-accrétion en orbite terrestre de fragments de manteau terrestre portés à très haute température par l'impact qui les a complètement déshydratés.

Des indices très variés confirment que les roches ne contiennent aucune humidité et ne présentent aucune trace d'altération par un processus aqueux. En comparaison avec les roches terrestres les roches lunaires s'avèrent particulièrement sèches.



L'eau dans les cratères polaires

L'axe de rotation de la Lune est presque perpendiculaire au plan de l'écliptique. Il n'y a pas de saisons sur la Lune

Le fond des cratères situés près des pôles sont dans la nuit perpétuelle. La température y est extrêmement basse, -238°C

Grace à ces très basses températures, de la glace pourrait être piégée au fond de ces cratères polaires.

Cette glace proviendrait de la vapeur d'eau dégagée par les impacts sur la Lune.

C'est la sonde NASA Clémentine qui a découvert en 1994 les premiers indices de glace polaire (réfraction d'ondes radio ... par de la glace...)

La sonde NASA Lunar Prospector, en orbite polaire autour de la Lune en 1998-1999, a noté l'abondance de deutérium (donc d'hydrogène) dans les cratères polaires. Cela indiquerait de grandes quantité de glace, se chiffrant en millions de tonnes

La sonde japonaise Kaguya (en orbite lunaire en 2007-2009) a réussi à photographier le fond de l'un de ces cratères perpétuellement plongés dans la nuit. Cette sonde n'a pas vu de glace « vive »,

La sonde indienne Chandrayaan 1 (2008) avait pour mission de cartographier la Lune et d'observer la glace d'eau.

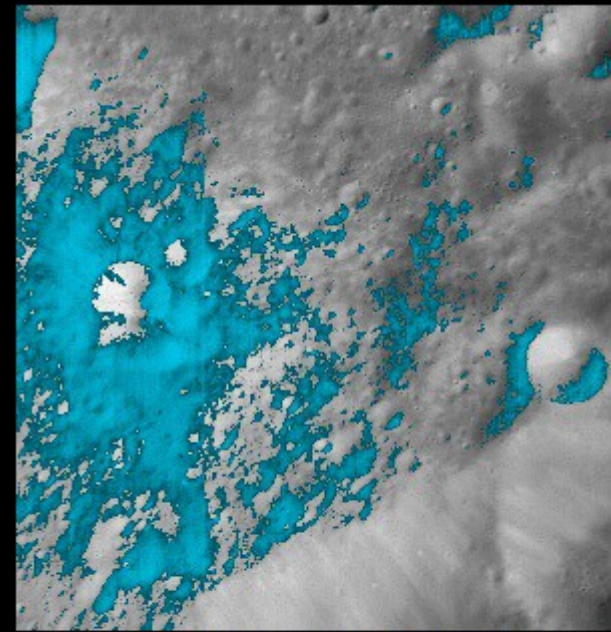
Elle a largué un impacteur MPI dans la zone polaire sud pour analyser la composition de la poussière soulevée par l'impact.

Les résultats sont peu probants

....



Infrared Reflectance



Blue = water absorption strength

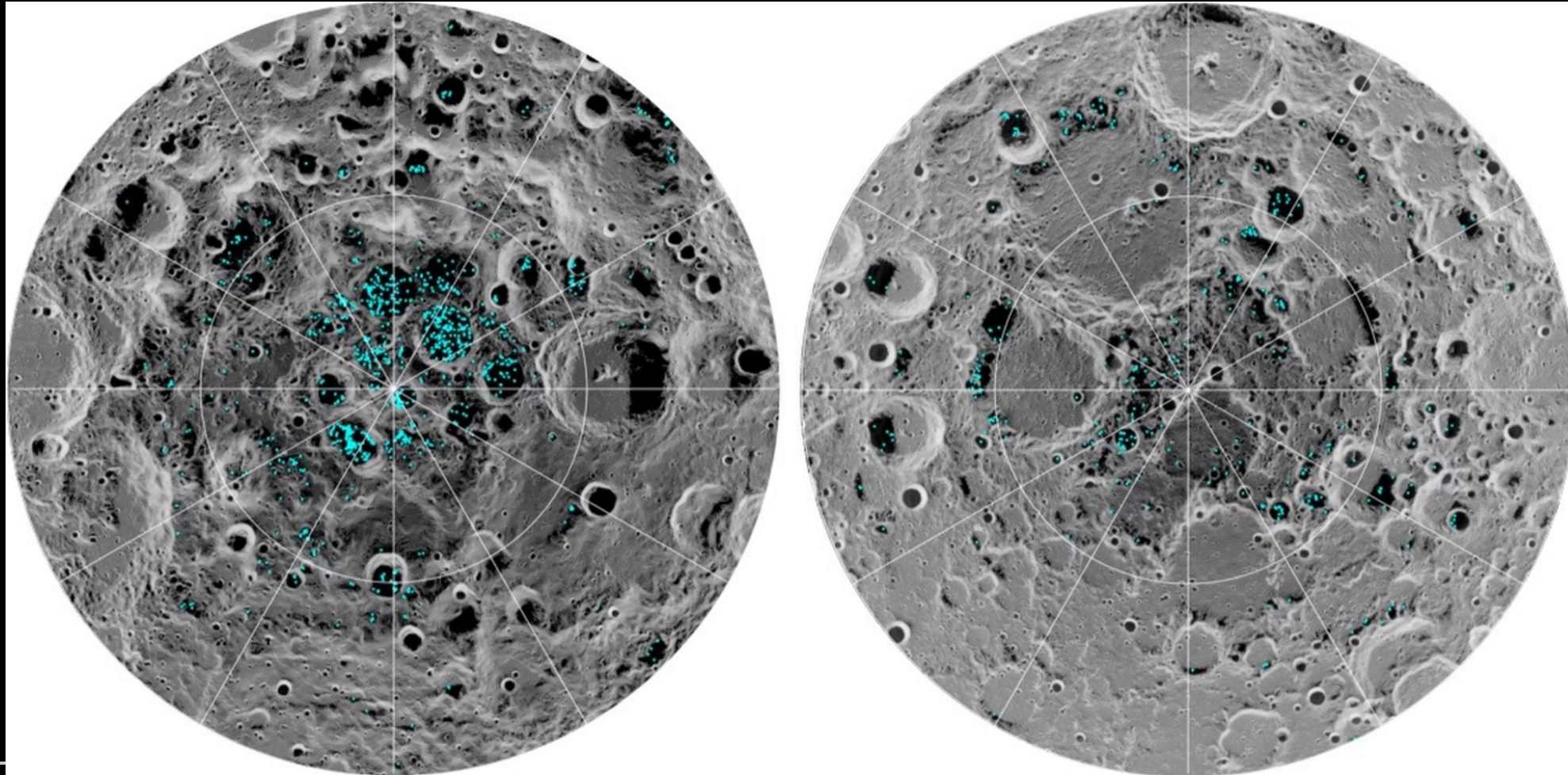


Image montrant la distribution de la glace de surface au pôle Sud (gauche) et au pôle Nord (droite) de la Lune, basée sur la vision du spectromètre de la NASA Moon Mineralogy Mapper (M3) à bord de la sonde orbitale indienne Chandrayaan 1

Conclusion

L'hypothèse de l'impact est donc celle qui explique le mieux la majorité des données à notre disposition.

Mais il reste des questions.

Ces questions posent entre autres le problème de l'échantillonnage.

Les échantillons Apollo ont été prélevés en surface, dans un secteur assez limité de la Lune (relativement près du centre de la face visible), et ne sont peut-être pas parfaitement représentatifs.

Les échantillons rapportés par Chang'e 6 (face cachée, issus d'un cratère d'impact gigantesque) n'ont pas apporté d'éléments franchement nouveaux

L'eau est elle présente dans les cratères du pôle sud et sous quelle forme ?

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

Merci pour votre attention

