

# HISTOIRE GÉOLOGIQUE DE LA LUNE

Sylvain Breton, docteur en planétologie et professeur de SVT

*Si les années 2010 ont été marquées par l'exploration martienne, la décennie qui s'ouvre va se tourner vers une cible bien plus proche, la Lune. L'occasion pour nous de faire le point sur ce que l'on sait de notre satellite pour mieux comprendre les objectifs des futures missions lunaires.*

## Petite histoire de l'exploration lunaire

L'étude de la Lune commence bien avant l'ère spatiale avec les premières cartes réalisées au télescope au XVII<sup>e</sup> siècle. De cette époque, la Lune a hérité des noms des deux principales formations géologiques, les terres et les mers. Mais c'est avec la guerre froide et la course à l'espace que nos connaissances sur la Lune ont explosé. Si l'on connaît souvent la fin de la course à la Lune avec le succès des missions américaines Apollo, on oublie parfois que l'URSS a été en tête de nombreuses années. Ainsi, en 1959, les sondes Luna sont les premiers objets humains à s'échapper de l'orbite terrestre (Luna 1) puis à s'écraser sur un autre corps céleste (Luna 2) et réaliser des photos de la face cachée de la Lune (Luna 3). Puis en 1966, Luna 9 est la première sonde à réussir un alunissage en douceur et Luna 10 à réussir une mise en orbite autour de la Lune. Suivront des missions robotisées dont 3 retours d'échantillons (Luna 16, 20 et 24) ainsi que la première astromobile robotisée (Luna 17) (figure 1).



Fig.1. Le rover Lunokhod 1 embarqué sur la mission Luna 17 est la première astromobile à la surface d'un corps céleste autre que la Terre. Son design va marquer les futures astromobiles martiennes de la NASA (source By Музей Космонавтики from Россия - FP2A3576, CC0).

Mais ce sont au final les États-Unis qui réussissent à poser les premiers astronautes sur le sol lunaire en 1969 avec la mission Apollo 11. Suivront 5 missions supplémentaires dont l'une embarquera un géologue, Harrison Schmitt, pour réaliser les prélèvements (figure 2).



Fig.2. Harrison Schmitt, le seul géologue à avoir échantillonné in situ des roches non terrestres lors de la mission Apollo 17 (source : NASA).

Depuis une trentaine d'années, des sondes placées en orbite autour de la Lune ont contribué à étendre encore nos connaissances sur la Lune, au-delà des sites visités par les astronautes d'Apollo. Ces sondes embarquent des instruments qui permettent de déterminer à distance (télé-détection) la composition et les propriétés physiques des matériaux présents à sa surface. Pour la composition (chimie, minéralogie), on emploie la spectroscopie qui consiste à analyser les rayonnements réfléchis ou émis par la surface lunaire dans certains domaines du spectre électromagnétique (ultraviolet, visible, proche infrarouge, X et gamma). Les méthodes spectroscopiques donnent accès aux types de roches présentes en surface. Elles s'appuient pour cela fortement sur les échantillons Apollo qui constituent des vérités terrains. Ainsi, les roches lunaires d'Apollo et les méthodes de télé-détection, sans oublier les roches lunaires qui parviennent naturellement sur Terre (les météorites lunaires), nous permettent d'avoir une bonne compréhension de l'histoire de la Lune.

Depuis le début des années 2000, on observe un regain d'intérêt pour notre satellite naturel, à la fois de la part des nouveaux acteurs de l'industrie spatiale (Chine, Inde, ESA, compagnies privées...) mais aussi de la NASA et de l'agence russe Roscosmos.

Pour terminer ce petit résumé, on peut faire le point sur les données accumulées depuis près de 70 ans. Il faut bien différencier les données issues des satellites en orbite autour de la Lune qui permettent de couvrir une

large surface (tableau 1) et les données plus locales, mais plus précises, collectées in situ par les rovers et landers. Ces données in situ souffrent cependant d'un biais d'échantillonnage avec une majorité de prélèvements réalisés dans les mers lunaires, où il est facile d'alunir. S'ajoutent à ces données collectées sur place les 380 kg de roches lunaires ramenées sur Terre, principalement des missions Apollo.

Nom de la donnée	Description de la donnée	Usage de la donnée
Photographies	Images prises dans la partie visible du spectre lumineux. La résolution des images lunaires acquises depuis l'orbite peut descendre jusqu'à 50 cm/px.	Renseigne sur la morphologie de la surface.
Photographies infra-rouge	Images prises dans la partie infrarouge du spectre lumineux. Peuvent être prises de jour ou de nuit.	Renseigne sur la morphologie de la surface. Renseigne sur la capacité thermique de la surface (lié à la granulométrie).
Images multi et hyper-spectrales	Images prises à plusieurs longueurs d'onde. Une image spectrale peut posséder une centaine de photos prises à différentes longueurs d'onde.	Renseignent sur la minéralogie de la surface.
Altimétrie	Données indiquant l'altitude d'un point. Cette donnée peut provenir d'un altimètre laser ou de calcul à partir de deux images prises avec un angle différent.	Renseigne sur la morphologie et la topographie de surface.
Gravimétrie	Données calculées à partir de la trajectoire des satellites indiquant les variations de l'intensité de la gravité lunaire.	Renseigne sur la répartition de la masse en profondeur.

Tab.1. Les différentes données de télédétection à disposition des chercheurs.

## Le grand intérêt d'étudier la Lune

Contrairement à la Terre, la Lune, du fait de sa petite taille, a rapidement perdu sa chaleur interne. Si sur la Terre la tectonique des plaques et le volcanisme façonnent la géomorphologie de ses grandes structures comme les planchers des fonds océaniques et les grandes chaînes de montagnes, il n'en est rien pour la Lune ou son activité interne, avec la production de magmas en profondeur a cessé il y a environ 2,5 milliards d'années (Ga).

Actuellement la surface de la Lune n'évolue plus que sous l'action de processus d'origine externe comme les impacts météoritiques. Par le jeu des processus internes encore actifs et de l'érosion (eau et atmosphère), la Terre renouvelle sa surface : 80 % de celle-ci a un âge inférieur à 200 millions d'années (Ma) tandis qu'il est de 4 Ga pour la Lune. Ainsi, il ne subsiste aucune trace de la première croûte qui s'est formée sur la Terre alors qu'elle est encore présente sur la Lune. Certaines roches ramassées par les astronautes Apollo « racontent » quand et comment cette croûte primaire s'est formée, ce qui est primordial pour comprendre les premiers stades de l'évolution d'un corps planétaire. Sur Vénus, il n'y a pas de roches plus vieilles

qu'un milliard d'années. Mars et Mercure possèdent des vestiges de leur histoire ancienne, mais c'est sur la Lune que l'on peut les observer le plus facilement. De ce point de vue la Lune est un objet unique dans le Système solaire car elle a gardé les traces de pratiquement toute son histoire géologique. Pour les planétologues, c'est une mine de renseignements pour comprendre la formation et l'évolution des corps planétaires solides.

## Morphologie de surface : les cratères d'impact

Une simple observation à l'œil nu ou aux jumelles de la surface de la Lune permet d'observer cet objet géologique très simple : une dépression circulaire entourée d'un bord surélevé (figure 3). La Lune est parsemée de ces dépressions de tailles variables nommées cratères d'impact car résultant de l'impact d'une météorite avec la surface lunaire à très grande vitesse. L'énergie libérée par l'impact forme une cavité par l'éjection d'une partie des roches de la surface qui forment une couverture tout autour du cratère (l'éjecta).

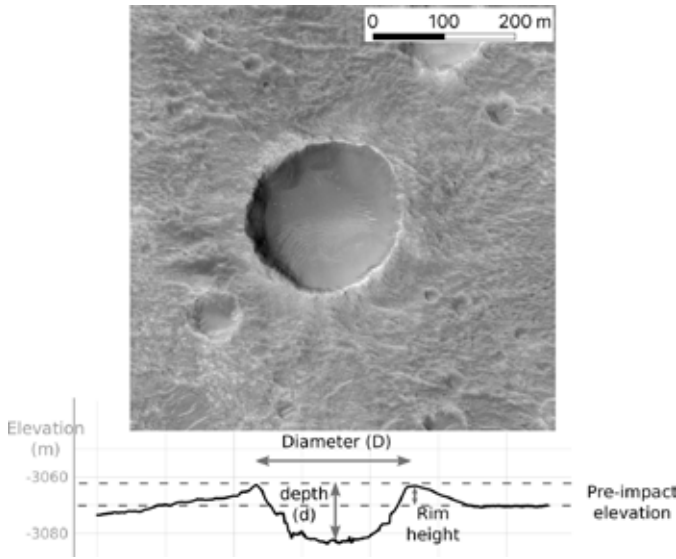


Fig.3. Photographie satellite de la surface de Mars montrant un cratère de météorite (source : NASA/HiRISE). Cette vue du dessus est complétée par un profil topographique passant par le centre du cratère.

En l'absence d'atmosphère et d'érosion, les cratères s'accumulent depuis des milliards d'années, de quelques centimètres de diamètre à plus de 1 000 km de diamètre. Les plus grands de ces cratères, appelés bassins d'impact, ont été remplis par des coulées de lave et forment aujourd'hui les mers lunaires.

L'omniprésence des cratères d'impact à la surface de la Lune a permis l'élaboration d'une méthode de datation largement utilisée par la communauté scientifique et extrapolée aux autres corps telluriques du Système solaire. L'idée de base est assez intuitive, plus la surface est vieille, plus elle a été exposée au bombardement météoritique et plus on y observe aujourd'hui des cratères. D'abord utilisée pour faire de la datation relative, les retours des missions Apollo ont permis de dater les échantillons par radiochronologie et ainsi associer une densité de cratères à un âge donné. Grâce à cette calibration les chercheurs ont donné un âge modèle à toutes les surfaces lunaires.

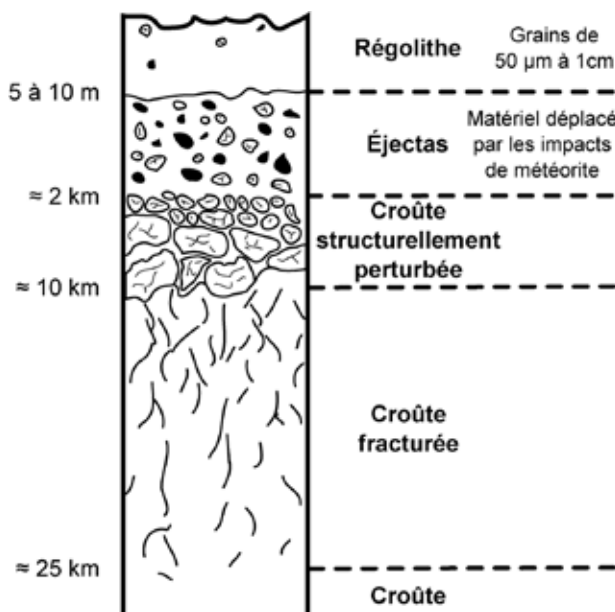


Fig.4. Coupe du régolithe lunaire.

Les âges donnés dans cet article, découlent de cette méthode.

Le processus de cratérisation est non seulement un mécanisme majeur de la géomorphologie lunaire, mais aussi de sa géologie. En effet, la formation des cratères s'accompagne d'une fracturation des roches de la surface. L'accumulation des éjectas forme le régolithe, composé de blocs millimétriques à métriques qui couvrent la roche mère sur une épaisseur de 5 à 10 m (figure 4).

Les plus gros impacts peuvent également entraîner une fonte du matériel impacté, et un réassemblage à chaud de fragments de roches fracturées, on parle alors de verres et de brèches d'impact (figure 5).

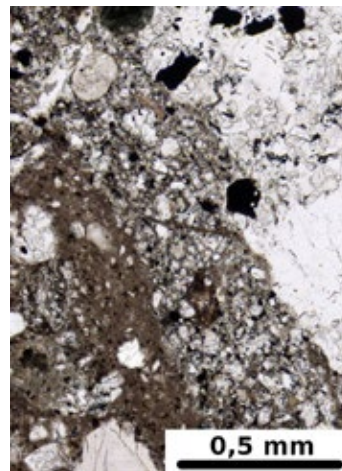


Fig.5. Échantillon Apollo 14267. Photographie de l'échantillon et photographie d'une lame mince de l'échantillon. Cette roche est une brèche d'impact. On observe les clastes à l'échelle macroscopique, mais aussi microscopique (source : NASA).

L'intérêt des cratères d'impact est d'excaver et donc de connaître quelles sont les roches présentes en profondeur. Pour les cratères jeunes ces roches n'ont pas eu le temps de subir une altération dues aux météorites et aux rayonnements provenant de l'espace.

## Mers lunaires et volcanisme

Une seconde observation facile à réaliser depuis la surface terrestre et pointée par les astronomes du XVII<sup>e</sup> siècle est la différence entre les mers lunaires, de couleur sombre, peu cratérisées plus basses en altitude et les terres lunaires, de couleur claire, très cratérisées et à plus haute altitude.

Les mers, principalement situées sur la face visible de la Lune, sont relativement jeunes (peu de cratères). Ce sont des formations volcaniques, constituées de roches qui sont des basaltes. Les mers correspondent au remplissage par des laves de très grandes structures d'impact appelées bassins d'impact. C'est pour cette raison que la majorité des mers lunaires ont une forme circulaire. La mise en place de ces dépôts basaltiques s'est produite entre 4,2 et 2,5-2,0 Ga, avec un pic d'intensité dans leur formation il y a 3,6-3,5 Ga. On connaît cependant quelques unités de mer qui seraient âgées de seulement environ un milliard d'années (datations par comptage de cratères à leur surface). Ces âges sont à vérifier par des prélèvements in situ.

Les traces de ce volcanisme effusif sont nombreuses : coulées et tunnels de laves plus ou moins effondrés (figure 6).

Les missions Apollo se sont posées dans ces mers et en ont ramené des échantillons de roche. On sait donc que ce sont principalement des basaltes à olivine ou pyroxène (figure 7) avec une teneur en fer plus importante que leurs équivalents terrestres.

Ces basaltes présentent une diversité en termes de composition élémentaire, en particulier, certains basaltes appelés KREEP<sup>1</sup> sont riches en potassium et en éléments incompatibles (éléments qui ne s'insèrent difficilement dans les réseaux cristallins silicatés). On explique cette composition par la présence, dans le manteau, d'une zone formée à la toute fin de la cristallisation du manteau et donc enrichie en ces éléments incompatibles.

En addition de ce volcanisme effusif, on observe, plus rarement, des dômes volcaniques ainsi que des coulées

<sup>1</sup> De K (potassium), REE (Rare Earth Element pour Terres rares) et P (phosphore).



Fig.6. Le sillon de Hadley, photographié lors de la mission Apollo 15 est un ancien tunnel de lave dont le plafond s'est effondré. En raison de la faible gravité lunaire, ces tunnels ont des dimensions largement supérieures à ceux observés sur Terre (source : NASA).

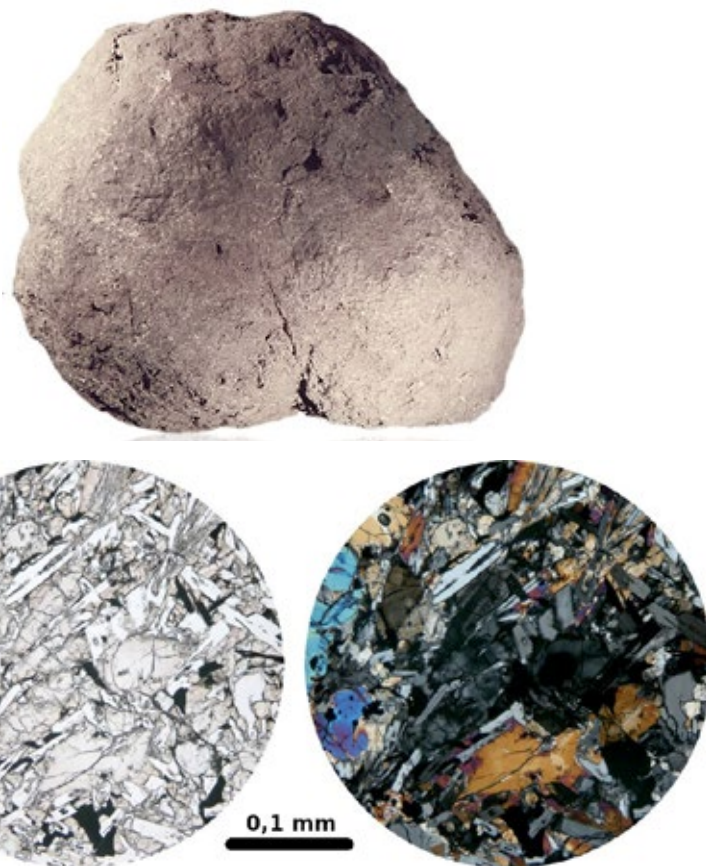


Fig.7. Photographies macroscopique et microscopique de l'échantillon Apollo 12002. Ce basalte est composé de clinopyroxènes, olivine et plagioclase. (source NASA).

pyroclastiques. Ces édifices sont rares et encore mal compris, la plupart de ces édifices ne sont pas liés à des magmas plus différenciés (plus riches en silice) comme sur Terre mais à une faible température du magma qui réduit la viscosité des basaltes. Cependant, certains dômes, comme ceux de Mairan ou Gruithuisen, présentent effectivement une composition enrichie en silicium et les processus à l'origine de ces magmas font partie des grandes questions scientifiques encore ouvertes sur la Lune.

## Les terres lunaires et la structure interne de la Lune

Après nous être intéressés aux mers lunaires, nous allons désormais nous intéresser aux terres lunaires. À la lunette ou à l'œil nu, on les identifie grâce à leur couleur plus claire que les mers. Ces terrains sont bien plus cratérisés, et donc antérieurs aux mers lunaires. Les terres sont datées de 3,8 à 4,3 milliards d'années.

Bien que les missions Apollo ne se soient pas posées directement sur les terres, on retrouve des fragments de ces terrains dans le régolithe des mers. Ces fragments ont été arrachés lors d'un impact sur les terres puis se sont écrasés dans les mers. Ces roches, principalement composées de feldspath plagioclase calcique (anorthose) (figure 8), sont appelées anorthosites et donnent cette couleur blanche aux terres lunaires.

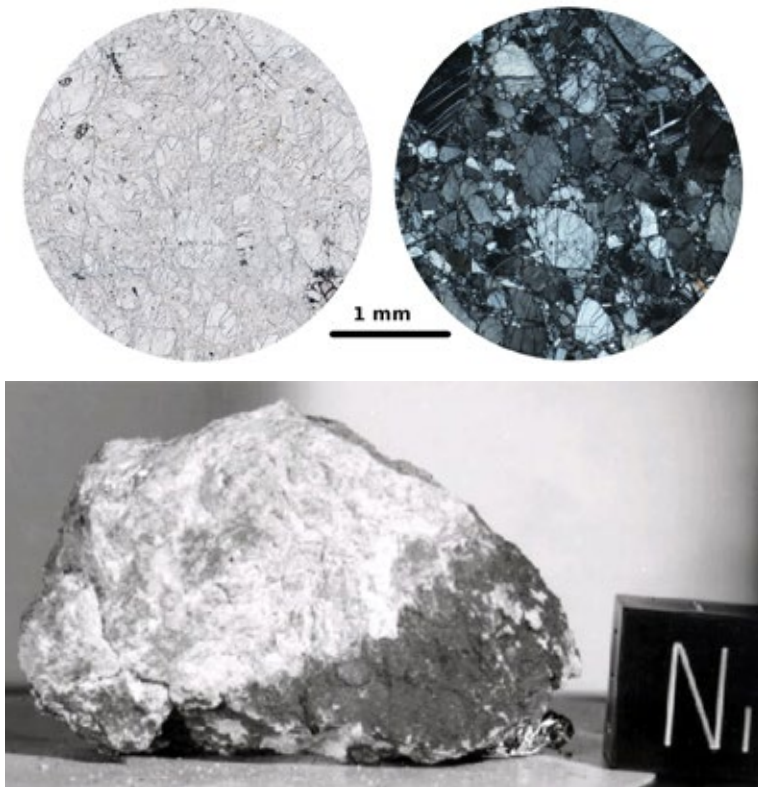


Fig.8. Photographies macroscopique et microscopique de l'échantillon Apollo 60025. Cette roche plutonique, composée de feldspath plagioclase calcique (anorthose), est caractéristique des roches formant les terres et la croûte lunaire (source NASA).

Cette composition anorthositique permet de proposer un scénario de formation de la croûte lunaire. En effet, lors de sa formation, la surface de la Lune était probablement recouverte d'un océan de magma. Lors du refroidissement de cet océan, des minéraux ont progressivement cristallisé : plagioclase, olivine, pyroxène. Les minéraux les plus denses (pyroxène et olivine) ont coulé au fond de l'océan de magma tandis que le plagioclase, plus léger est remonté à la surface de l'océan formant alors une « croûte de flottaison », qui deviendra plus tard les terres lunaires (figure 9).

Un observateur avisé pourra remarquer que les mers recouvrent une majeure partie de la face visible de la Lune. Il ne faut cependant pas oublier les pôles et la face cachée, qui sont principalement formés par des terres lunaires. Au final, les terres constituent 83 % de la surface lunaire. La répartition inégale des terres et des mers sur les deux faces de la Lune est encore mal comprise, mais elle est associée à une asymétrie de croûte, qui est 2 fois plus épaisse sur la face cachée. Cette anomalie pourrait résulter des effets de marée ou encore d'une cristallisation asymétrique de l'océan de magma. Une autre explication pourrait être l'existence d'un impact géant ayant arraché une importante partie de la croûte de la face visible, la rendant plus fine.

Le modèle de l'océan de magma, couplé aux données sismiques des missions Apollo permet d'esquisser

la structure interne de la Lune. La croûte est principalement anorthositique et a une épaisseur moyenne de 50 km avec une importante variation entre la face visible (croûte amincie) et la face cachée. Suit ensuite un manteau d'une épaisseur d'environ 1 000 km riche en olivine et pyroxène.

Enfin la Lune possède un petit noyau, d'environ 500 km de rayon. La taille exacte du noyau de même que son état physique et sa composition sont très mal contraints par manque de données. Il est probablement composé d'un mélange de fer et nickel et plusieurs analyses sismiques laissent penser qu'il est partiellement fondu. Pour terminer, il faut noter que le noyau de la Lune est relativement petit (environ 30 % du diamètre) par rapport aux noyaux des autres corps telluriques du Système solaire (environ 50 % du diamètre), ce qui peut s'expliquer par l'origine de la Lune.

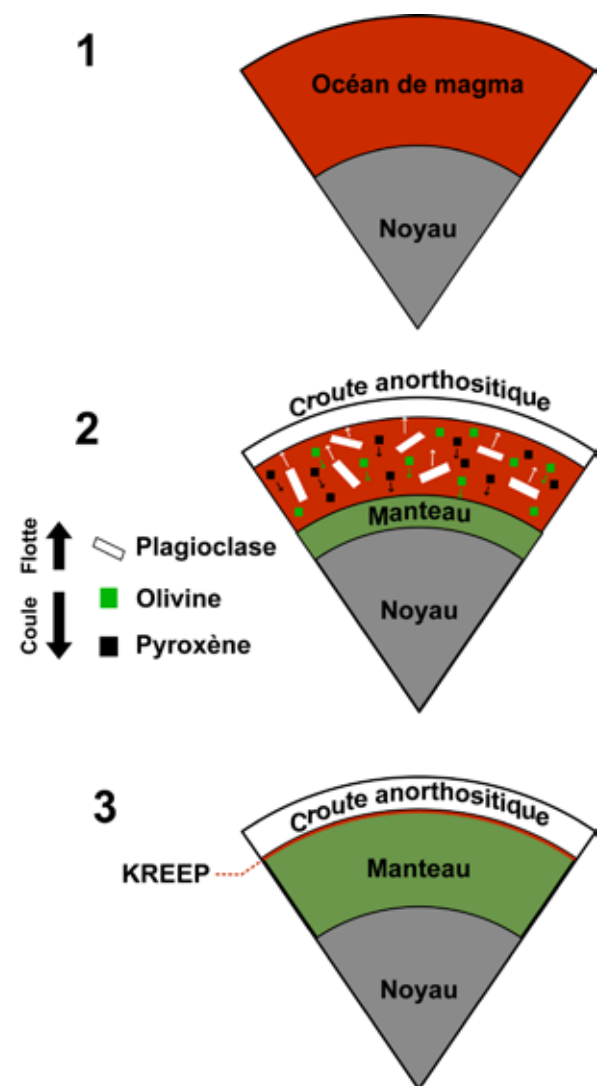


Fig.9. Océan de magma et croûte.

## La formation de la Lune

La Lune est unique dans le Système solaire. La Terre est le seul corps tellurique avec une lune différenciée et avec un diamètre du même ordre de grandeur que la planète qu'elle orbite. Et cette spécificité n'est pas sans

conséquence, la présence de la Lune autour de la Terre a probablement favorisé l'apparition de la vie en stabilisant l'obliquité de la Terre et par conséquent les climats terrestres. Comprendre la formation de notre satellite a donc des implications sur la fréquence d'un tel système à l'échelle de la Galaxie.

Hypothèse	Détail	Invalidation de l'hypothèse
Bourgeonnement	La rotation de la Terre était tellement importante que du matériel s'est échappé par force centrifuge, formant alors la Lune.	Impossible d'après les modèles physiques.
Capture	La Lune était un corps formé ailleurs dans le Système solaire. Déstabilisée de son orbite elle a croisé celle de la Terre et s'est mise à orbiter autour de cette dernière.	Compositions isotopiques de la Lune et la Terre trop semblables. Capture stable physiquement peu probable.
Co-formation	La Lune s'est formée en orbite autour de la Terre au même moment où la Terre se formait.	Non reproductible par les modèles physiques. Compositions élémentaires totales trop différentes.
Impact géant	Un corps de la taille de Mars s'est écrasé sur Terre. Le matériel éjecté par cet impact s'est mis en orbite autour de la Terre et a formé la Lune.	

Tab.2. Les différentes hypothèses de formation de la Lune.

Cette question de la formation de la Lune remonte à 1845. L'évolution des hypothèses face à l'arrivée de nouvelles données est un bon exemple de la démarche scientifique que nous allons donc détailler. C'est George Darwin (le fils de Charles) qui propose le premier une hypothèse basée sur des observations et un modèle simple basé sur la conservation du moment angulaire (équivalent de la conservation de mouvement pour les corps en rotation). Pour George Darwin, le frottement incessant des marées, opposées au mouvement de rotation de la Terre, diminue sa vitesse de rotation. Or, pour conserver le moment angulaire du système Terre-Lune, en conséquence de ce ralentissement, la Lune doit forcément s'éloigner de la Terre. Il en conclut donc qu'on peut remonter à une époque où la Lune s'est détachée de la Terre, puis a été éjectée par la force centrifuge (hypothèse du bourgeonnement).

Les missions Apollo ont permis de mesurer précisément la distance Terre-Lune, et la prédiction de George Darwin a bien été confirmée par les données : la Lune s'éloigne de la Terre de 3,8 cm/an. Cependant, les modèles physiques plus complexes ne permettent jamais la séparation initiale de la Terre et de la Lune, invalidant l'hypothèse de George Darwin. Entre temps, d'autres hypothèses avaient été proposées : co-formation, capture et accréation des débris en orbite d'un impact géant. Les données de chimie élémentaire et isotopique ont permis d'éliminer les hypothèses de co-formation et de capture (tableau 2).

Aujourd'hui le consensus scientifique est qu'un corps de la taille de Mars appelé Théia est entré en collision avec

la proto-Terre (90 % de la masse actuelle). Les débris éjectés par l'impact, principalement issus de l'impacteur se sont accrétés en orbite autour de la Terre pour former la Lune. Ce modèle explique bien le moment angulaire du système ainsi que la composition élémentaire (faible taille du noyau métallique de la Lune) et ses compositions isotopiques similaires à la Terre : la Lune a hérité de morceaux arrachés au manteau supérieur et à la croûte de notre planète.

Cette explication laisse cependant quelques questions en suspens. En effet, on ignore encore d'où provenait Théia. De plus la temporalité du processus est encore très mal contrainte, en particulier la vitesse d'accréation. La comparaison de certaines compositions isotopiques (W et Si) laisse penser qu'un équilibre isotopique a eu lieu entre le matériel terrestre et lunaire suggérant l'existence d'un disque de débris à très haute température qui aurait précédé la formation de la Lune. La découverte récente d'éléments volatils à l'intérieur de la Lune interroge les scientifiques : comment ont-ils pu survivre à un tel processus ? Autant de questions qui nécessitent des données supplémentaires.

## Le futur de l'exploration lunaire

Ces dernières années ont été marquées par un retour en force de l'exploration lunaire avec l'entrée de nouveaux acteurs ayant dynamisé le secteur : Chine, Inde, compagnies privées, ESA, Russie, Japon ou encore Émirat arabes unis (figure 10). Les raisons de ce regain

d'intérêt sont nombreuses : démonstrations techniques, tremplin vers Mars, exploitation de ressources ou encore tourisme spatial. Mais nous allons nous concentrer sur les objectifs scientifiques de ces missions.

Un des premiers objectifs est le retour de davantage d'échantillons. En effet comme mentionné précédemment, les échantillons lunaires actuellement sur Terre proviennent des mers lunaires. De nouvelles missions sur les terres ou sur la face cachée de la Lune permettrait de réduire le biais d'échantillonnage. De nouvelles roches détectées depuis l'orbite, et révélant une diversité inattendue, ne sont pas encore présentes dans les collections. Un second objectif est l'étude des volatils lunaires, en particulier l'eau. En effet, les missions orbitales ont mis en évidence la présence de glace dans

des zones d'ombre permanente au fond de cratères du pôle Sud. Cette découverte est importante d'un point de vue technique, permettant d'approvisionner d'éventuelles missions mais aussi scientifique. En effet, la Lune offre un environnement ancien unique, préservé, qui nous renseigne sur le premier milliard d'années de notre planète. C'est donc de nombreuses missions qui nous attendent, mais aussi de grandes questions et découvertes pour cette décennie à venir.

**Remerciements :** *Jessica Flahaut pour sa relecture et ses conseils et Serge Chevrel pour ses compléments.* ■



**Fig.10.** La sonde indienne Chandrayaan-3 s'est posée à la surface de la Lune le 23 août 2023. L'Inde est alors la 4<sup>e</sup> nation à réussir un alunissage en douceur. Cette sonde est accompagnée d'une petite astromobile et s'est posée près du pôle Sud de la Lune. (Source : Indian Space Research Organisation (ISRO-India)).