

La Lune

Formation, structure, composition

Notions utilisées :

1. Introduction

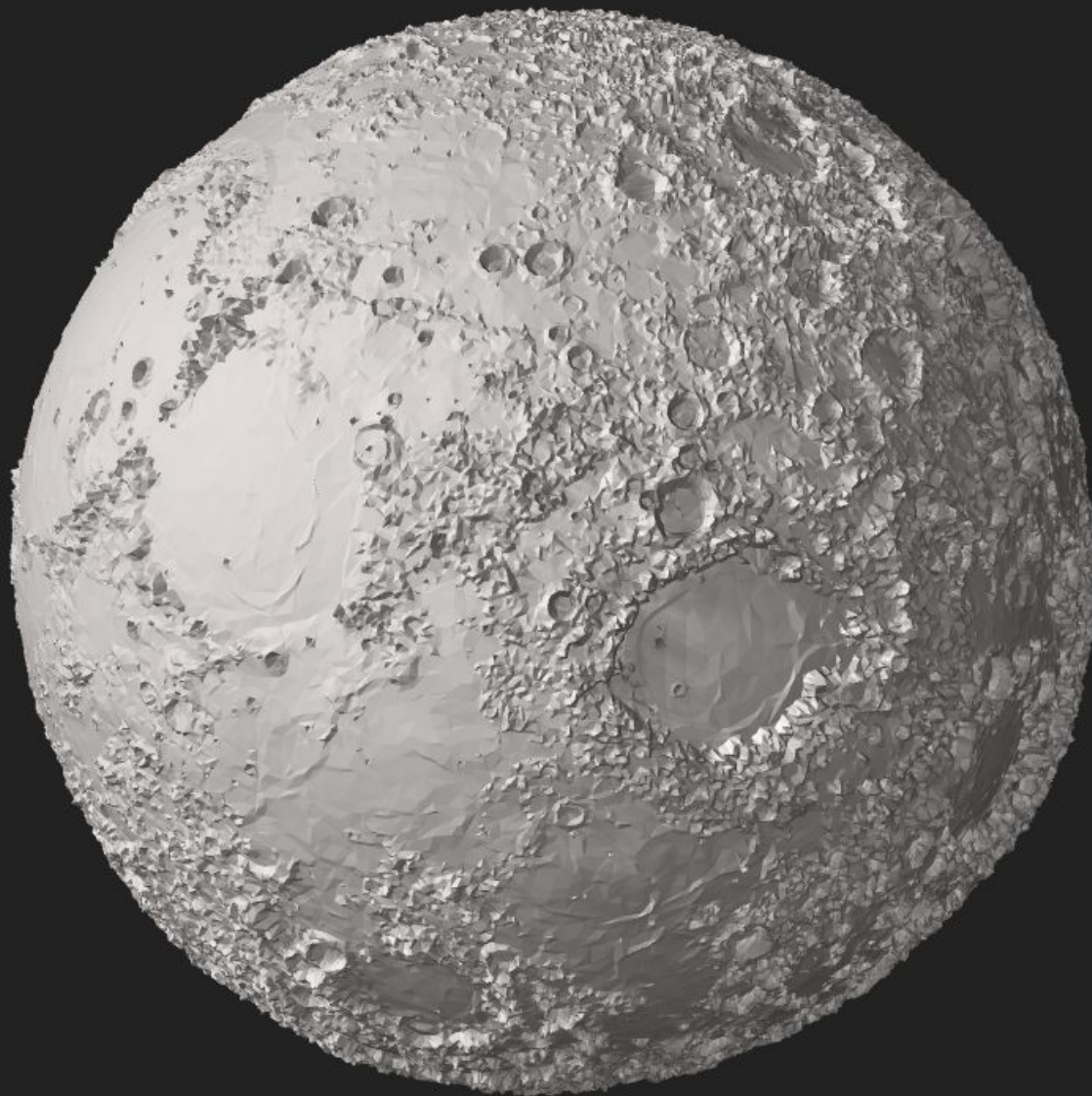
2-3. Structure de la matière

Pour une meilleure compréhension,
certaines explications pourront être
légèrement simplifiées/tronquées

Images : Wikipédia sauf mention contraire

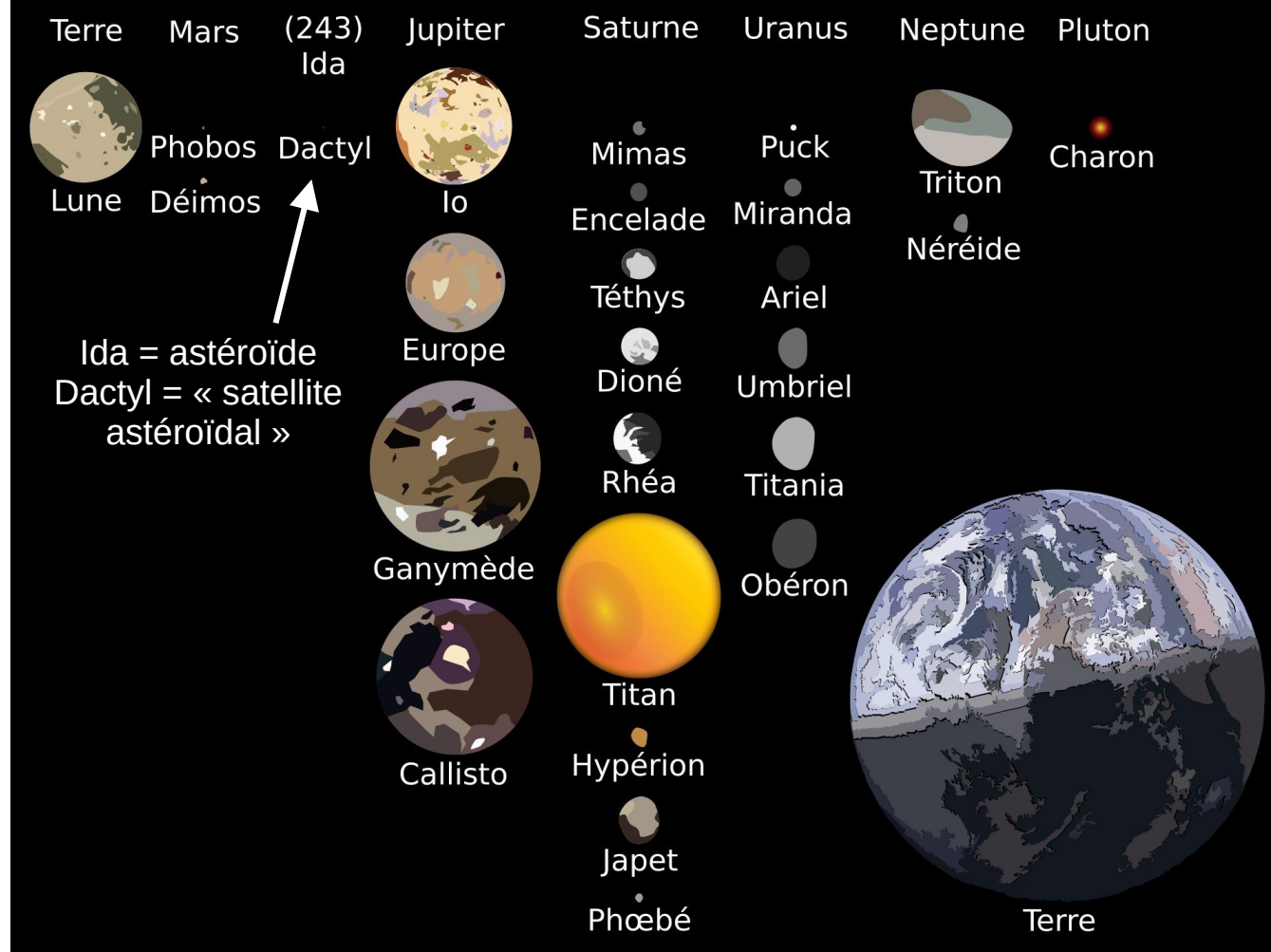
**Modèle numérique de terrain en 3D avec
une exagération verticale x10**

https://fr.wikipedia.org/wiki/Lune#/media/Fichier:Moon_elevation_2.stl



La Lune

- Ou « Terre I » = **unique satellite naturel permanent de la Terre**
- Plus **grand** des satellites planétaires par rapport à la taille de la planète autour de laquelle ils orbitent
- Par extension, le terme « lune » désigne **tout satellite naturel** d'une planète ou d'un autre objet non stellaire.
- Système solaire :
8 planètes et 214 satellites



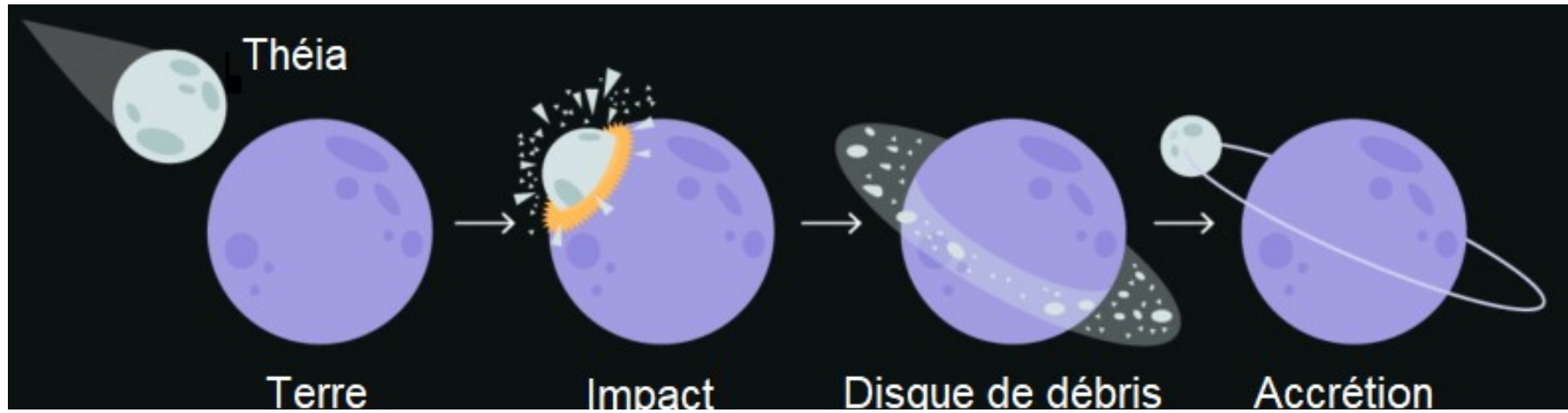
Principaux satellites naturels du Système solaire
(à l'échelle par rapport à la Terre)

Formation

- Hypothèse privilégiée : Lune formée à partir des débris issus d'un **impact** entre la (proto-)Terre et « Théia » (protoplanète de taille ~ Mars) il y a 4,5 milliards d'années → dislocation de Théia, la croûte et une partie du manteau terrestre
- **Projection de débris** en orbite autour de la Terre
- **Accrétion** de ce nuage de débris
 - Temps très court : ~ 1 siècle

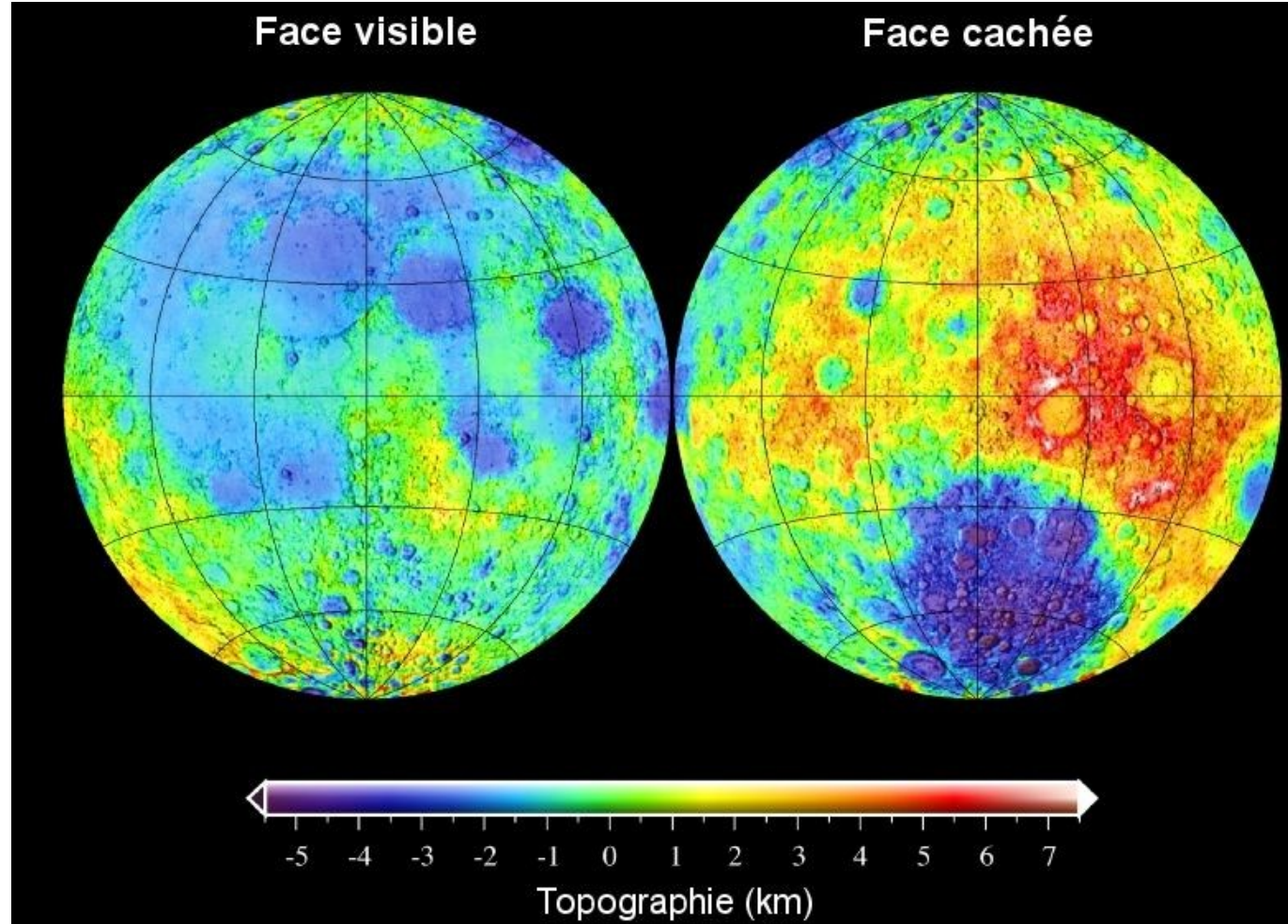


La Terre et la Lune photographiées par la sonde Mars Reconnaissance Orbiter : elles ont ~ la même phase



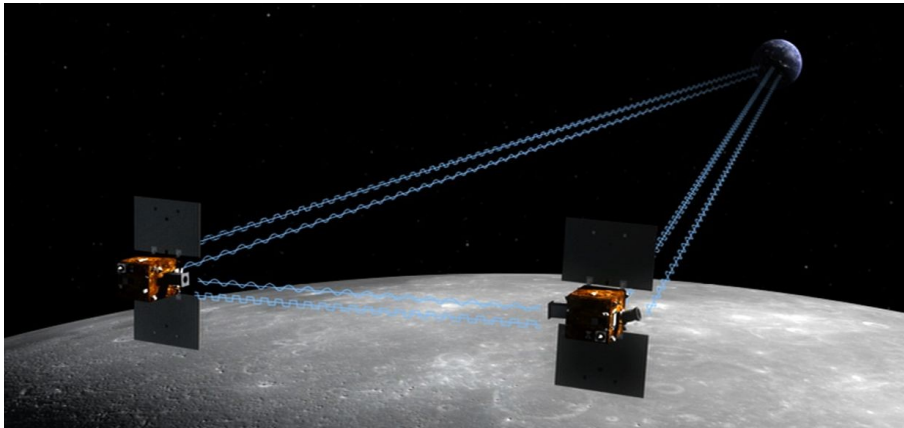
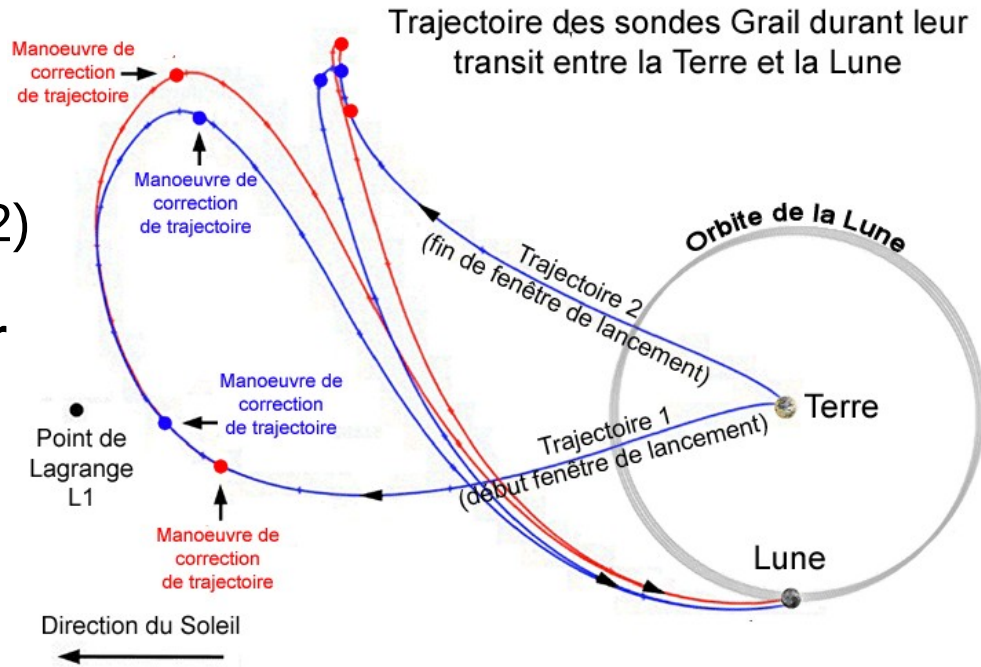
La sélénographie

- = étude de la surface lunaire
- $\Delta alt > 12$ km
- **Mers** = grandes plaines sombres sur la Lune :
 - formées par d'anciennes coulées volcaniques
 - causées par l'impact de très grosses météorites
 - au départ confondues avec de vraies mers
- **Terres** : correspondent géographiquement à des *highlands*



Mission GRAIL

- Pour « **Gravity Recovery And Interior Laboratory** » (mission de la NASA en 2012)
- But : **relevé très détaillé du champ gravitationnel** de la Lune pour **déterminer sa structure interne**
- Principe : 2 sondes (« Ebb » et « Flow ») en orbite basse ($h = 50 \text{ km}$, $T = 113 \text{ min}$)
 - Distance dépendante des variations du champ gravitationnel lunaire, mesurée à qq μm près !



Mission GRAIL (2)

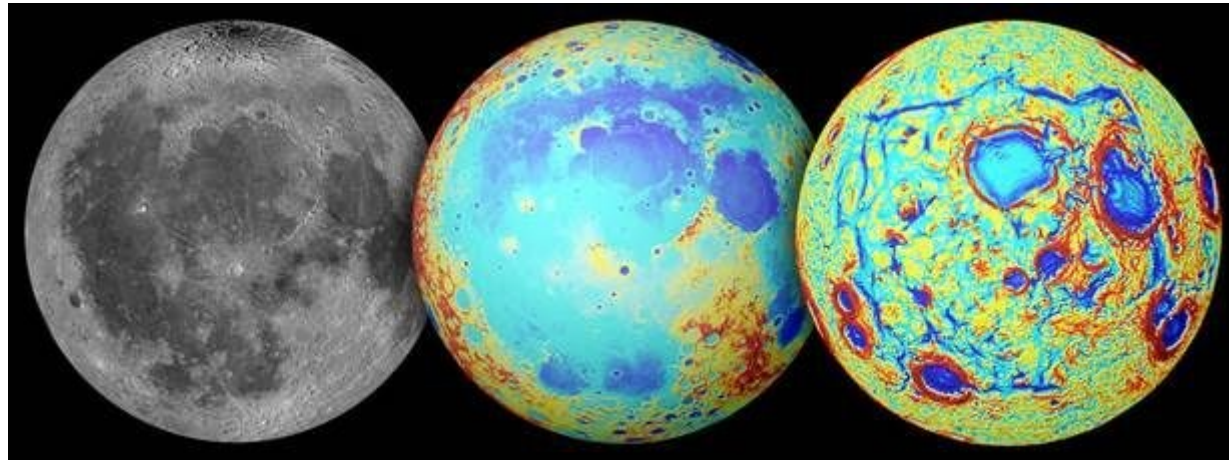
- Objectifs :

- Cartographier la structure de la croûte et de la lithosphère lunaires
- Comprendre l'évolution thermique de la Lune
- Connaître la formation et la structure interne de la Lune
- Mettre une limite sur la taille du noyau de la Lune
- Extrapoler ces connaissances aux autres planètes
- Limiter les risques encourus par les futures missions lunaires (habitées ou non) en déterminant avec plus de précision la trajectoire des engins



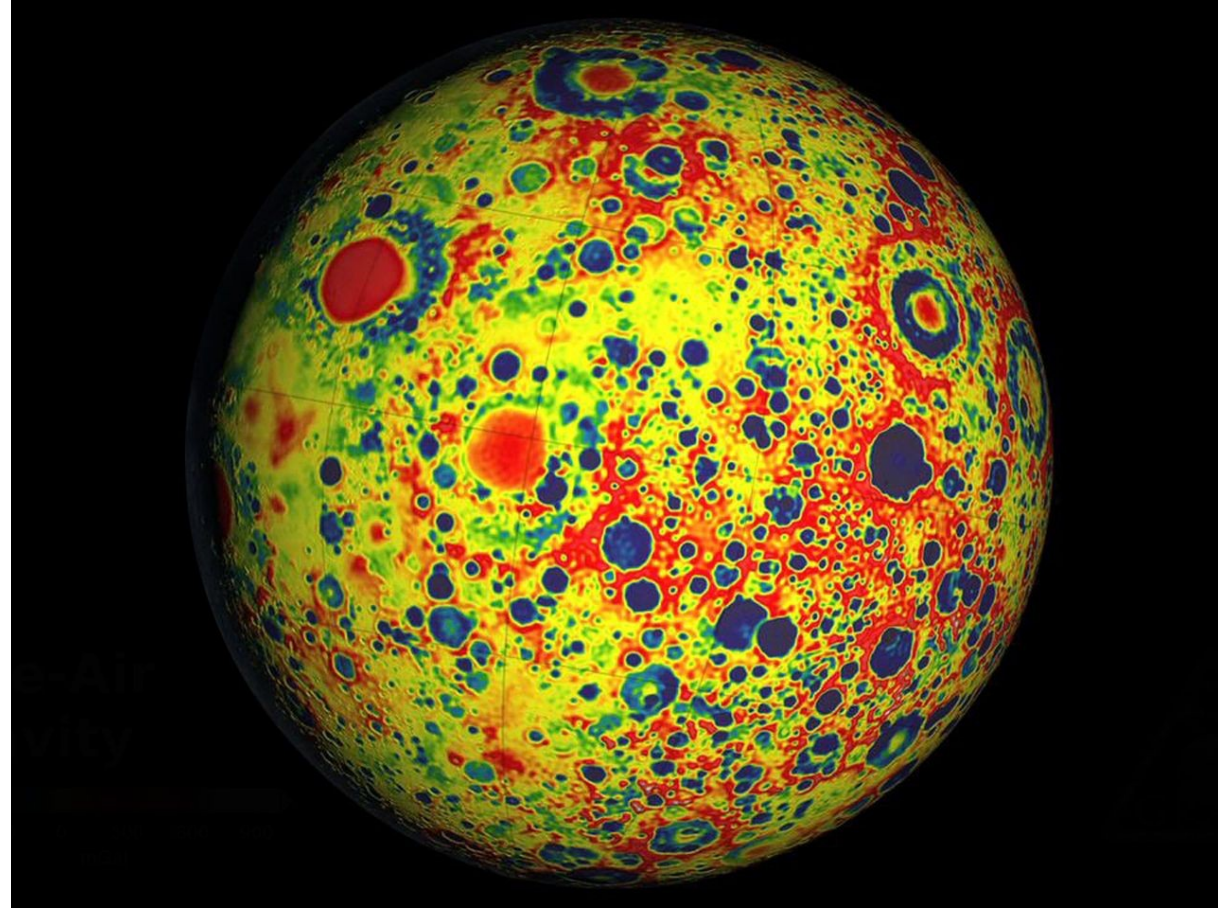
Océan des Tempêtes « Oceanus Procellarum »

1. Lumière visible
2. Topographie (↑ rouge, ↓ bleu)
3. Gradients de gravité (structures de forme rectangulaire)



Structure (1)

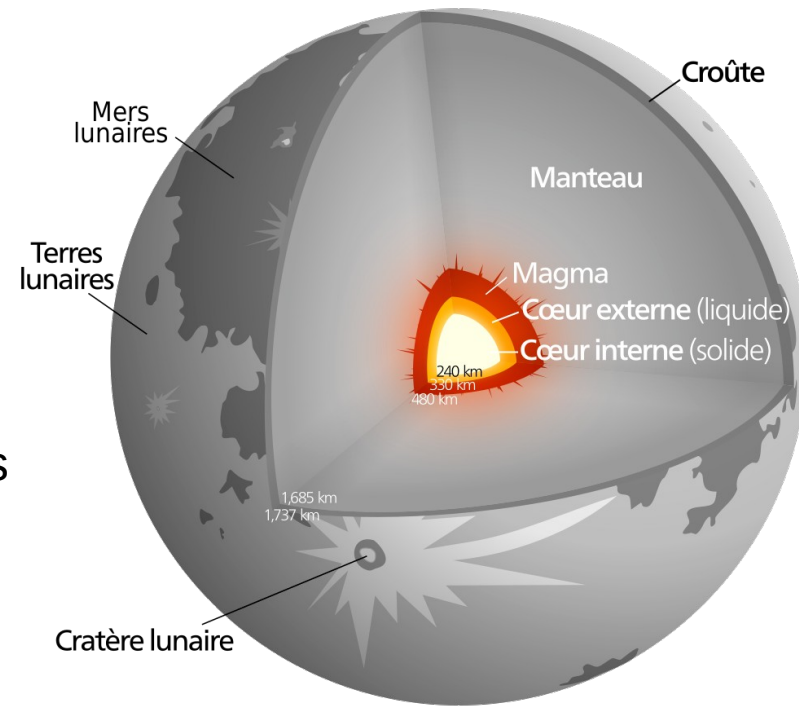
- Rayon : 1738 km,
Périmètre : 10 900 km
≈ 1/4 de la Terre
- $M_{\text{Lune}} \approx 7 \times 10^{22} \text{ kg}$
 - 81 fois plus légère que la Terre
 - 5-6 fois plus lourde que Pluton !
- Densité : 3,3
(Terre : 5,5, déjà bien connue au XIX^e – Newton : « Entre 5 et 6 »)
= **la plus dense du Système solaire**
- Gravité de surface six fois plus faible que sur Terre → **poids divisé par six** sur la Lune (mais masse identique...)
- Vitesse de libération :
2,38 km/s contre 11,2 km/s



Carte du champ gravitationnel, mesurée par l'expérience GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory, 2012) : **en rouge excès de masse, en bleu déficit de masse**. Ces mesures sont des indications de la structure interne de la Lune.

Structure (2)

- Champ gravitationnel lunaire différent des autres planètes du système solaire : **variations systématiquement corrélées avec caractéristiques topographiques** (cratères, failles ou montagnes)
- Le champ gravitationnel lunaire a **gardé la trace du grand bombardement** qui a affecté toutes les planètes terrestres (fractures provoquées par ces événements qui s'étendent parfois jusqu'au manteau)
- Épaisseur moyenne de la croûte lunaire : **30-40 kilomètres**
- Étude du CNRS : cœur constitué d'un **noyau solide** d'environ 250 kilomètres de diamètre et entouré d'une **couche en fusion** d'environ 350 kilomètres.
 - Terre : 1200 km / 2200 km
- Composition de la Lune **proche de celle de la Terre**
 - renforce la théorie d'une formation de la Lune à partir de matériaux terrestres éjectés à la suite d'un impact



Champ magnétique

- < 1 % du champ terrestre
- Pas de champ magnétique planétaire dipolaire comme la Terre
 - Mais a existé il y a 2-4 Ga
- Champ dû à la magnétisation des roches crustales

Composition



Composant	Formule chimique	Composition	
		Mers	Terres
Silice	SiO ₂	45,4 %	45,5 %
Alumine	Al ₂ O ₃	14,9 %	24,0 %
Oxyde de calcium	CaO	11,8 %	15,9 %
Oxyde de fer(II)	FeO	14,1 %	5,9 %
Oxyde de magnésium	MgO	9,2 %	7,5 %
Oxyde de titane	TiO ₂	3,9 %	0,6 %
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0,6 %	0,6 %
		99,9 %	100,0 %

Table 3. Model compositions of Earth, Venus, and Mercury

	Earth	Venus	Mercury
Mantle + crust, %	67.6	68.0	32.0
SiO ₂ , %	47.9	49.8	47.1
TiO ₂ , %	0.20	0.21	0.33
Al ₂ O ₃ , %	3.9	4.1	6.4
Cr ₂ O ₃ , %	0.9	0.87	3.3
MgO, %	34.1	35.5	33.7
FeO, %	8.9	5.4	3.7
MnO, %	0.14	0.09	0.06
CaO, %	3.2	3.3	5.2
Na ₂ O, %	0.25	0.28	0.08
H ₂ O, %	0.21	0.22	0.016
K, ppm	200	221	69
U, ppm	0.021	0.022	0.034
Th, ppm	0.076	0.079	0.122
Core, %	32.4	32.0	68.0
Fe, %	88.8	88.6	93.5
Ni, %	5.8	5.5	5.4
S, %	4.5	5.1	0.35
Co, %	0.27	0.26	0.25
P, %	0.62	0.58	0.57

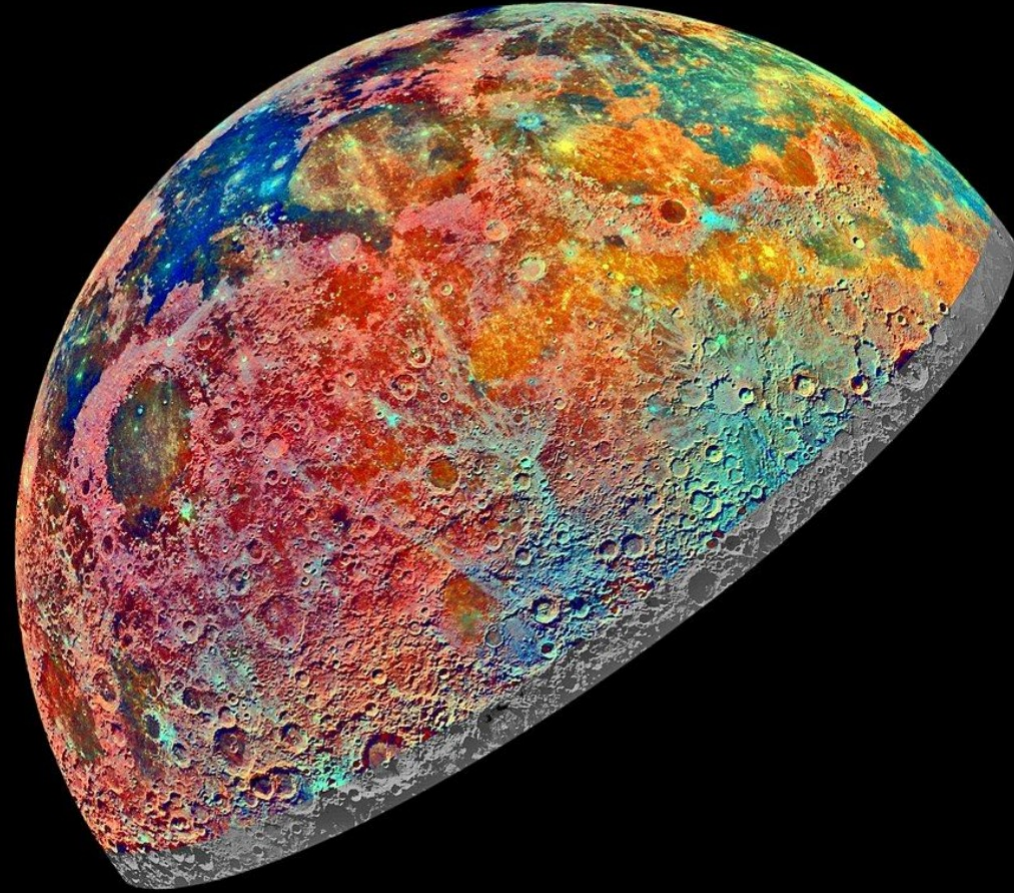
E171

Composition



Couleurs saturées : Brun-rougeâtre-rouille →
minerais de fer, bleu → minerais d'oxyde de titane

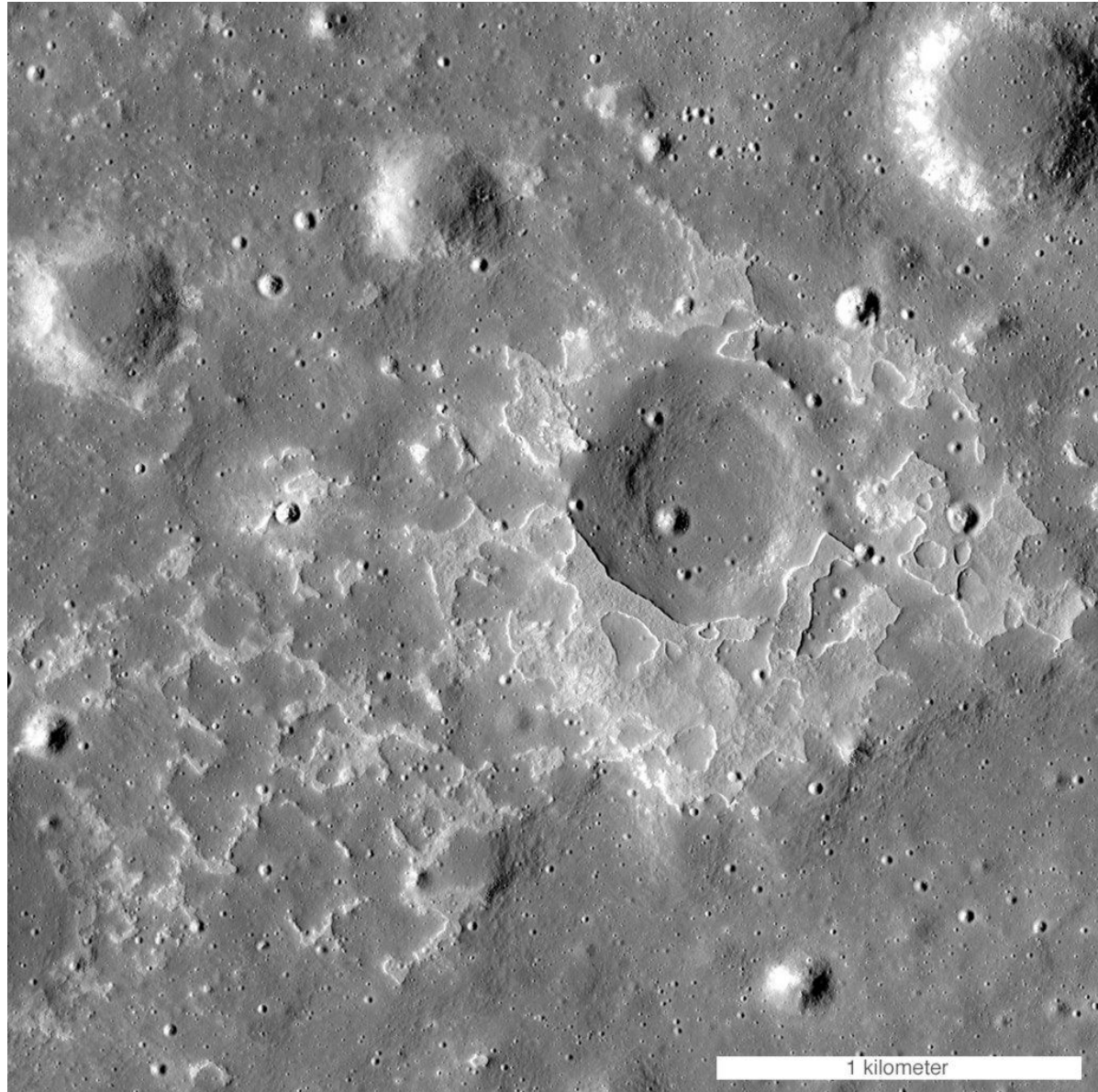
<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00131>



Compilation de ~50 images prises par la sonde Galileo en 1992.
Les couleurs (artificielles) indiquent des matériaux différents

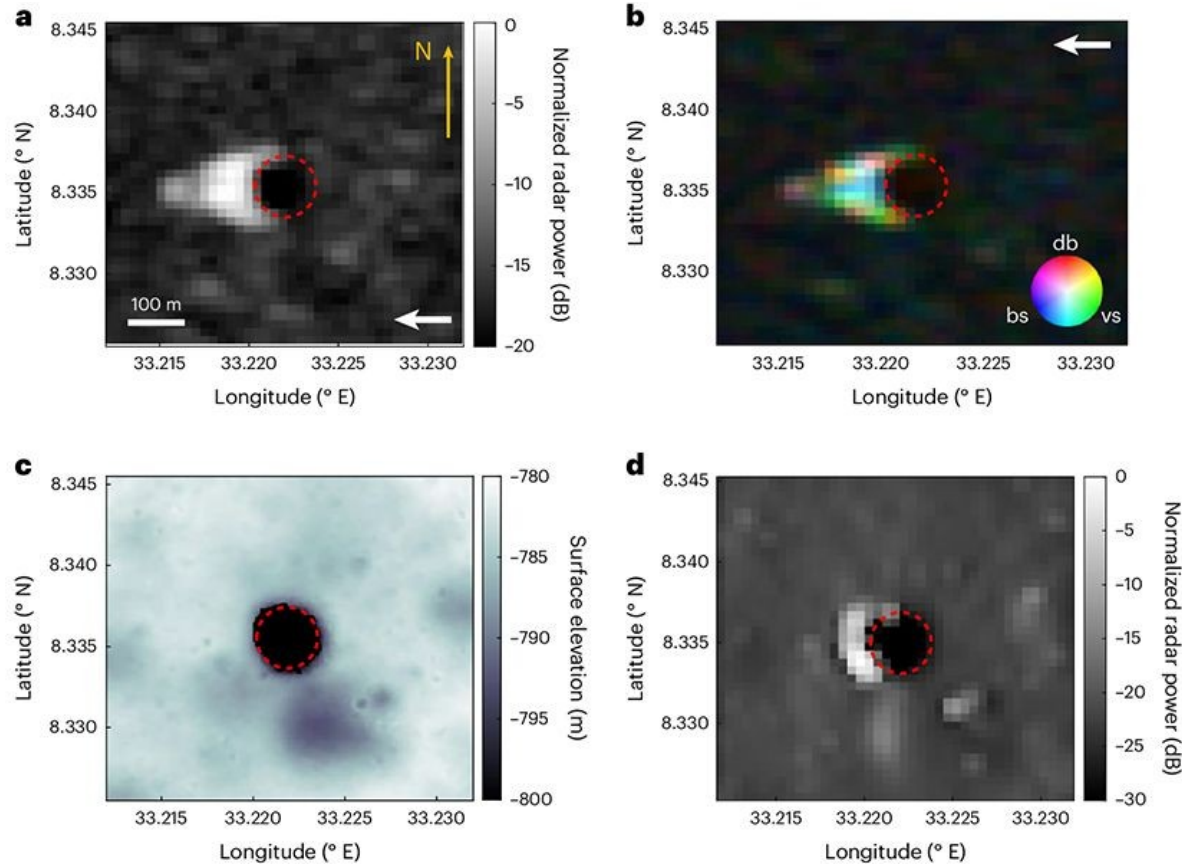
Volcanisme

- Signes d'activité volcanique « récente »
 - Dépôts de roches il y a ~100 voire 50 millions d'années
- Diminution progressive de l'activité volcanique
- → modification de la compréhension de son évolution



Des tunnels sur la Lune

- Article Nature du 15/07/2024 :
« Radar evidence of an accessible cave conduit on the Moon below the Mare Tranquillitatis pit »
- Images de Lunar Reconnaissance Orbiter (2010)
- Existence de conduits souterrains
- Intéressant pour :
 - la science : histoire de la Lune et du Système solaire
 - une future colonisation : environnement moins hostile que la surface



Atmosphère

- **Négligeable par rapport à celle de la Terre**
 - Masse totale inférieure à 25 tonnes (rappel : Terre : 5×10^{18} kg (10^{-6} de la masse totale))
 - $P \sim 3 \times 10^{-15}$ bar (0,3 nPa), la nuit
- En pratique, la Lune peut quasiment toujours être considérée comme **entourée par du vide**
 - Absence d'atmosphère responsable des **très grandes variations de T_p : -180 / +120 °C**
- Origines :
 - **Dégazage** : libération de gaz par les roches
 - **Pulvérisation cathodique** : bombardement de la surface par des micrométéorites, le vent solaire et le rayonnement solaire
 - Gaz réabsorbés par la surface ou emportés par la pression de radiation ou (si ionisés) le champ magnétique accompagnant le vent solaire
- Composition : Ne, He, H₂, Ar, CH₄, NH₃, CO₂, traces d'oxygène, ...

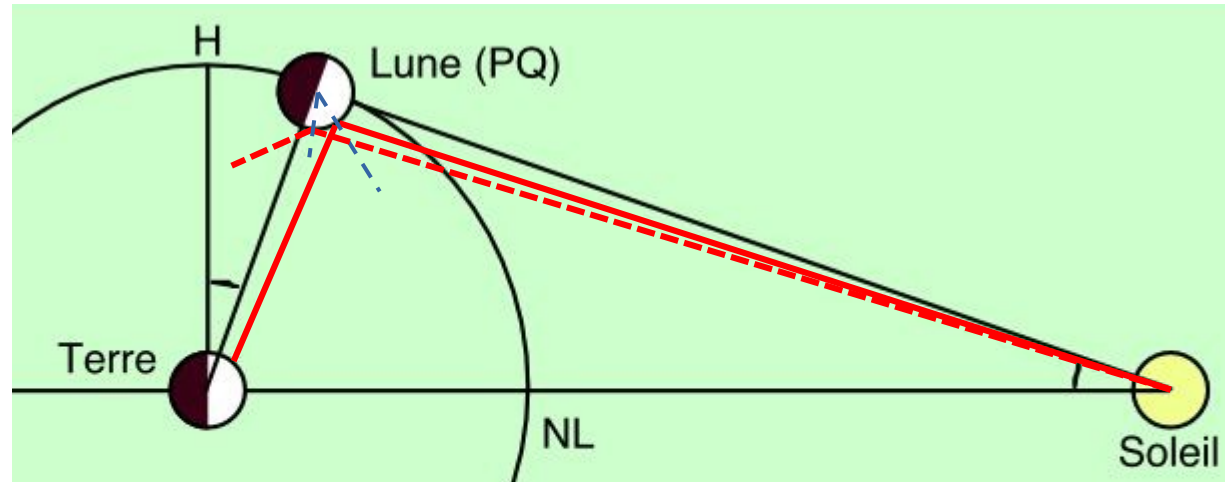
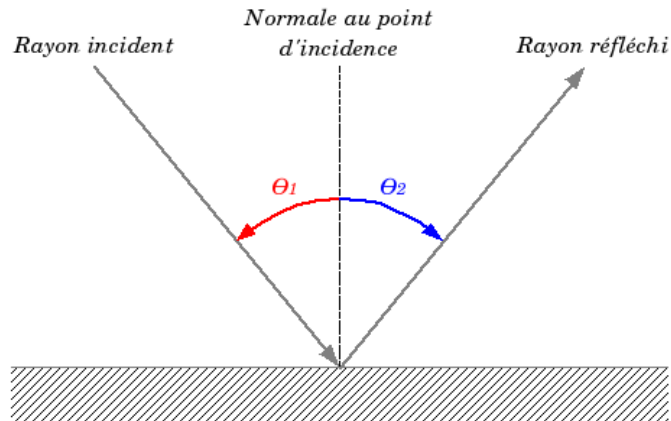


Vue de la PL depuis l'ISS en 2006, déformée par l'atmosphère terrestre

- **Étude de 2017 : la Lune aurait eu une atmosphère**
 - Pendant 70 millions d'années, il y a 3 à 4 milliards d'années
 - Composée des gaz éjectés par des éruptions volcaniques lunaires
 - deux fois plus épaisse que l'atmosphère actuelle de Mars
 - Ciel jaunâtre (présence de soufre)
 - Aurait pu permettre l'émergence de la vie
- Atmosphère finalement **éjectée par les vents solaires** → **dissipée dans l'espace**

Lumière

- La Lune n'émet pas de lumière, elle **réfléchit** celle reçue du Soleil
- = source secondaire, qui renvoie ~11 % de la lumière qu'elle reçoit
 - = « Albédo de Bond » (rappels : corps noir $a = 0$, miroir parfait, $a = 1$)
- = « **Objet diffusant** »
 - Pas comme un miroir qui ne réfléchit que dans une direction (angle de réflexion = angle d'incidence)
 - Absorption puis réémission de la lumière dans toutes les directions.
 - Sinon on ne verrait pas un disque complet, seulement une partie, comme une boule à facettes

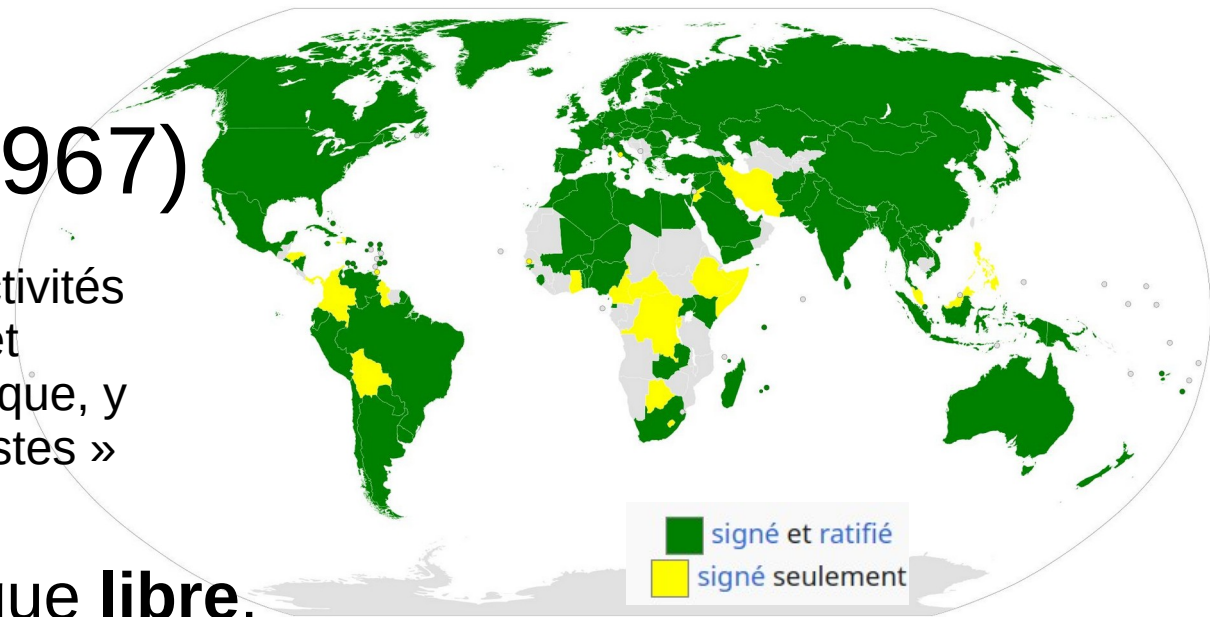


La Lune rousse

- **Lunaison qui suit Pâques**
- Pâques est le dimanche après la première pleine lune qui suit le 21 mars
 - Donc entre le 22 mars (si PN le samedi 21/03) et le 25 avril (si PN le 20/03 → 18/04)
- Commémore la dernière Cène, la Passion et la résurrection du Christ
- La Lune rousse (= période à risque pour les plantes) se situe en général en avril, avec des **gelées tardives qui peuvent brûler et faire roussir les jeunes pousses**
- Pas grand-chose à voir avec la Lune, en fait...

Traité sur l'espace (1967)

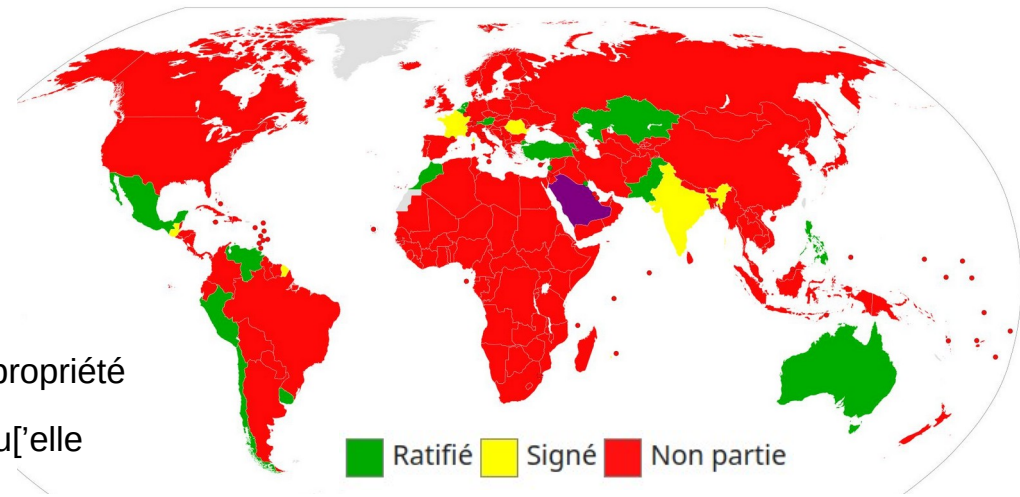
« Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes »



- Espace extra-atmosphérique **libre**, exploration et utilisation **pour le bien de tous**
- Aucun pays ne peut **se l'approprier**
- Pas d'**armes** nucléaires ou d'ADM en orbite autour de la Terre, sur la Lune ou tout autre corps céleste – **utilisation pacifique**
- **Assistance** aux astronautes, quelle que soit leur nationalité
- Responsabilité pour les dommages causés, yc par ONG
 - 2023 : 1^{ère} sanction contre un opérateur de satellites pour **création de débris spatiaux**

Traité sur la Lune (1979)

- Art 3 : utilisation à des fins pacifiques
- Art 4 : « Exploration » et « utilisation » menées pour le bien de tous les pays et générations
- Art 6 : liberté de recherche scientifique
- Art 11 :
 - Ressources = patrimoine commun de l'humanité, pas de propriété
 - Engagement à établir un régime international régissant « l'exploitation des ressources naturelles de la Lune lorsqu'[elle deviendra] possible. »



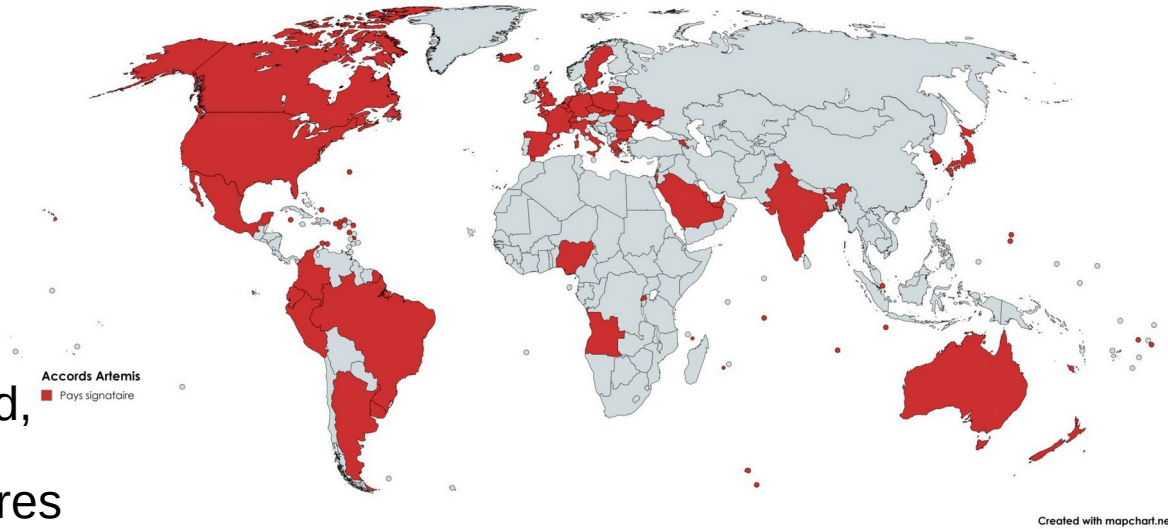
Mais accord = **échec car ratifié par aucun pays travaillant à aller sur la Lune...**

- 2015 : « Space act » (Barack Obama, PNP 2009) :
 - Droit d'exploiter les ressources spatiales, sans affirmer exclusivité ou souveraineté ≈ contradiction avec le traité international sur l'espace
- 2020 : Trump :
 - « Les États-Uniens doivent pouvoir s'engager dans l'exploration commerciale, la récupération et l'utilisation des ressources de spatiales dans le respect des lois en vigueur. L'espace extra-atmosphérique est un domaine d'activité humaine juridiquement et physiquement unique, et les États-Unis ne le considèrent pas comme un bien commun de l'humanité. »

Ressources lunaires

- 250+ projets d'exploitation des ressources lunaires, par 6+ pays
 - Russie, Chine, USA, Corée du Sud, Inde, Japon, Europe, ...
 - Utilisation pour des missions lunaires et au-delà
- Éléments présents :
 - Eau (glace)
 - Métaux
 - Régolithe (couche de poussière produite par les impacts de météorites)
 - Hélium 3 (100 000 tonnes / qq kg sur Terre, utilisé dans la fusion nucléaire)

Va-t-on assister à une
« Conquête de la Far Moon » ?

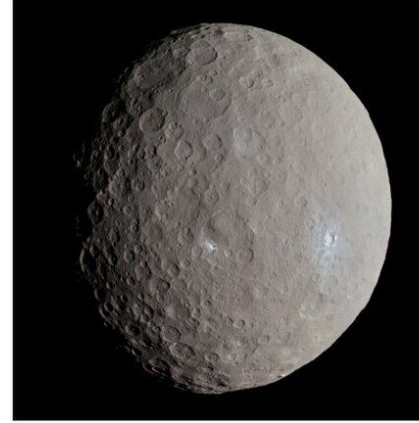


- **Exploitation imminente :**
 - Artemis III (2028) : mission habitée préparant des installations permanentes
- 2020 : traité Artemis : réaffirmation de certaines dispositions du traité sur l'espace (notamment Art. 10 sur exploitation, mais dispositions de 1967 vagues)
- Mais pas signé par Russie et Chine notamment (coopération en cours pour la construction d'une station lunaire habitée « ouverte à tous les partenaires internationaux intéressés » – 2035 ?)

Une planète ??

- D'après la définition de l'UAI (Union astron. internationale) donnée en 2006 (après la découverte d'Éris en 2003, plus grande que Pluton), une planète est un corps céleste qui :
 1. orbite autour du Soleil
 2. a une masse suffisante pour atteindre un équilibre hydrostatique (forme ~ sphérique)
 3. a nettoyé le voisinage de son orbite (= aucun corps de taille comparable sur l'orbite)
- Système solaire :
 - **8 planètes** (« Mon Vieux Tu Me Jettes Sur Une Nouvelle Planète »)
 - **5 planètes naines** : Cérès, Pluton, Hauméa (et ses lunes), Éris (et sa lune Dysnomie), Makémaké (et sa lune)
 - Caractéristiques : 1, 2, **B** (+ 4 : n'est pas un satellite)
- **Système binaire planétaire** :
 - Deux planètes en orbite l'une autour de l'autre
 - Centre de gravité du système extérieur aux 2

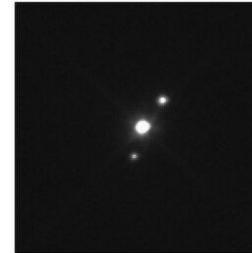
Planètes naines reconnues par l'UAI et leurs années de découverte



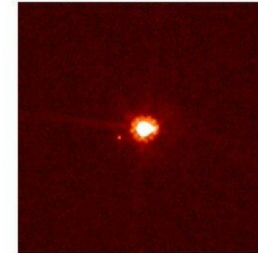
Cérès (1801)



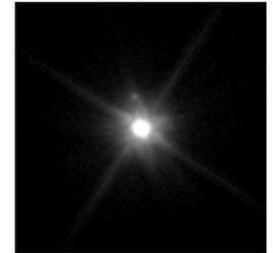
Pluton (1930)



Hauméa (2004)

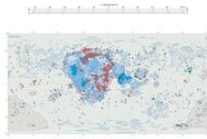
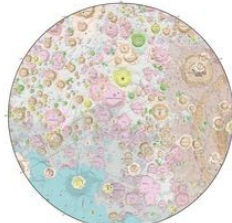


Éris (2005)

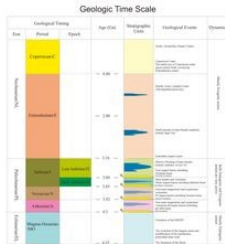


Makémaké (2005)

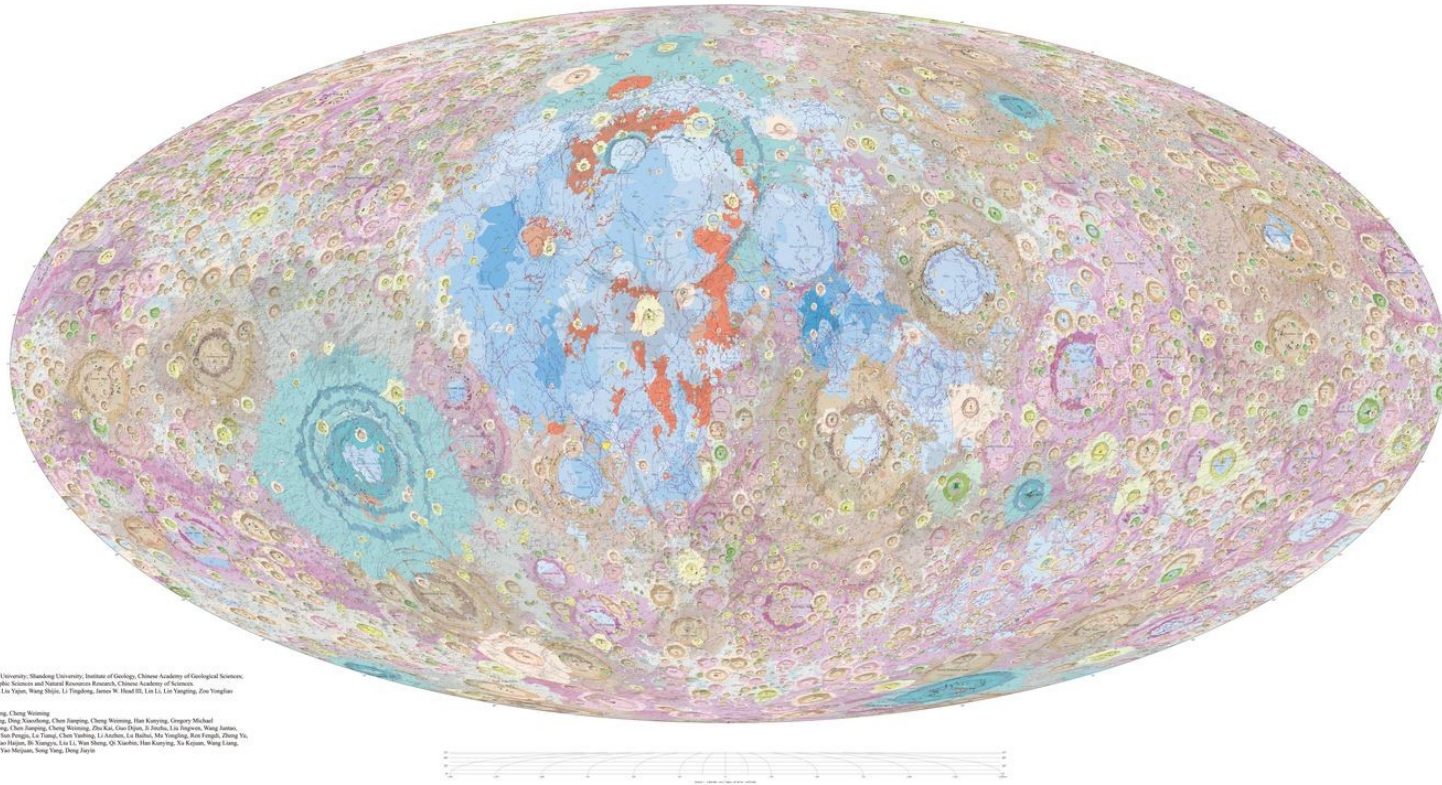
North Polar Region



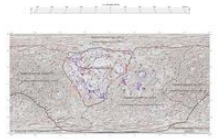
Lithologic Map of the Moon (1 : 20 000 000)



Sponsored by: Institute of Geophysics, Chinese Academy of Geosciences; Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences
Project Leader: Professor Zhang Xing, Institute of Geophysics, Chinese Academy of Geological Sciences
Science Consultant: Wang Chengping, Liu Guangping, Zhou Chengping, Gao Haili, Liu Yiqun, Wang Shijie, Li Jingfang, James W. Howell, Li Li, Li Yaping, Zhu Xianjun
Editorial Board: Wang Chengping, Liu Guangping, Zhou Chengping, Gao Haili, Liu Yiqun, Wang Shijie, Li Jingfang, James W. Howell, Li Li, Li Yaping, Zhu Xianjun
Executive Editor: Li Jiaofang
Editorial Assistant: Li Jiaofang, Liu Guangping, Zhu Xianjun, Chen Zhenping, Cheng Weiming
Copy Editor: Chen Yaping, Li Jiaofang, Chen Zhenping, Zhu Xianjun, Chen Zhenping, Chen Weiming, Han Kexiang, Gongyue Michael
Production: Wang Chengping, Liu Guangping, Zhou Chengping, Gao Haili, Liu Yiqun, Wang Shijie, Li Jingfang, James W. Howell, Li Li, Li Yaping, Zhu Xianjun
Design: Zhang Xing, Wang Chengping, Liu Guangping, Zhou Chengping, Gao Haili, Liu Yiqun, Wang Shijie, Li Jingfang, Li Jiaofang, Han Kexiang, Gongyue Michael
Illustration: Li Jiaofang, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping
Proofreading: Li Jiaofang, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping, Chen Zhenping
Publication: Geological Publishing House
Publication Date: Li Yiqun, Wang Shijie, Li Jingfang, James W. Howell, Li Li, Li Yaping, Zhu Xianjun
Publication Number: 16000000
Publication Year: 2010
Publication Month: May
Publication Day: 10



South Polar Region



Tectonic Map of the Moon (1 : 20 000 000)



20

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/The geologic map of the Moon at 1-2.5M scale.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/The_geologic_map_of_the_Moon_at_1-2.5M_scale.png)