D'un point de vue physique, on peut peut considérer le système Terre-Lune comme une planète double.

La Lune

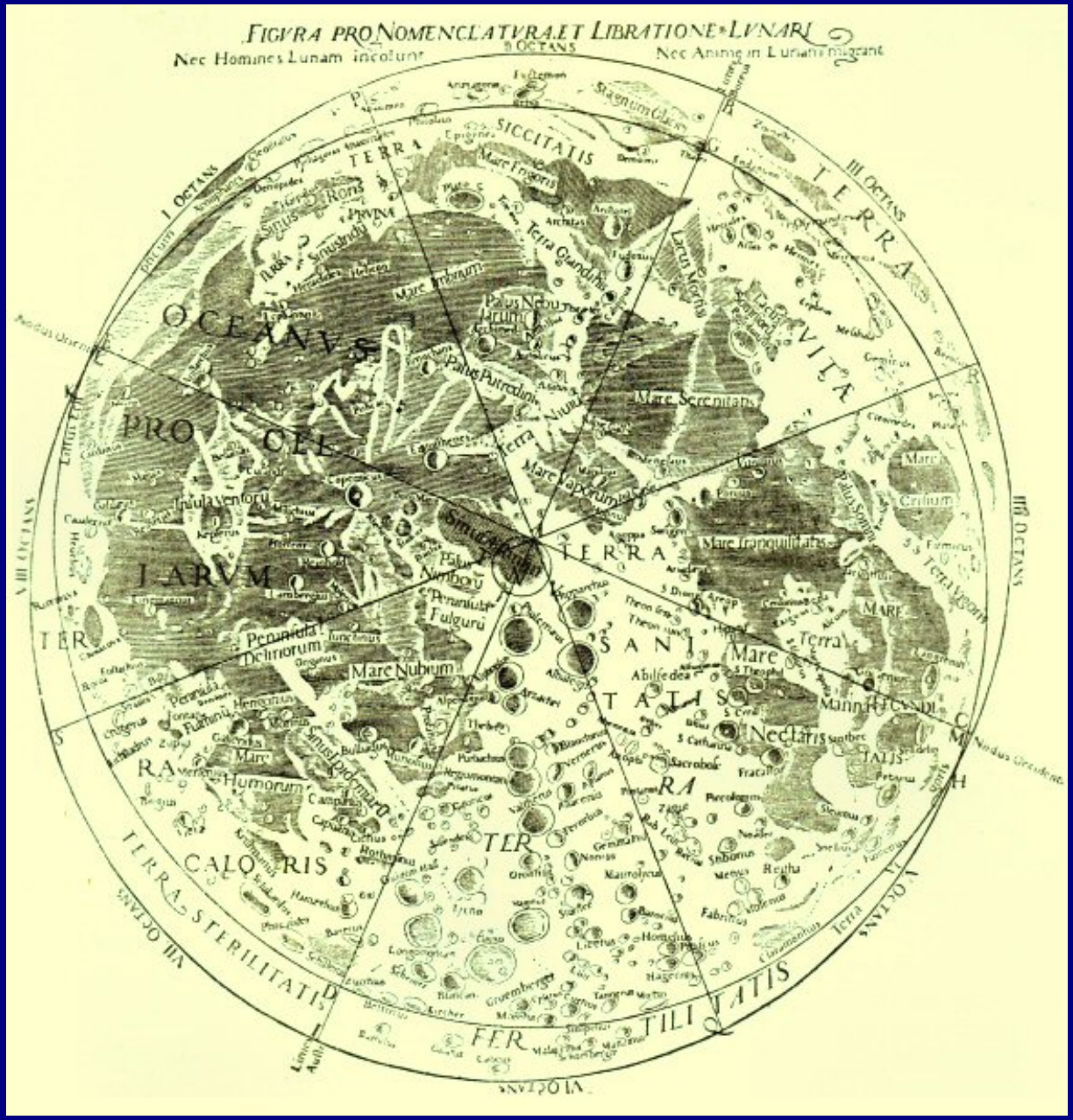
- L'astre le plus anciennement connu.
- Présente toujours la même face. En fait, du fait de l'ellipticité, et des mouvements de libration, 57% de la surface est observable.
- Dichotomie mers/continents.
- Avec la lunette astronomique, découverte des cratères : impacts ou volcans ?
- Parmi les plus grands cratères, certains projettent des raies claires (Tycho, Copernic) de 1000 km.

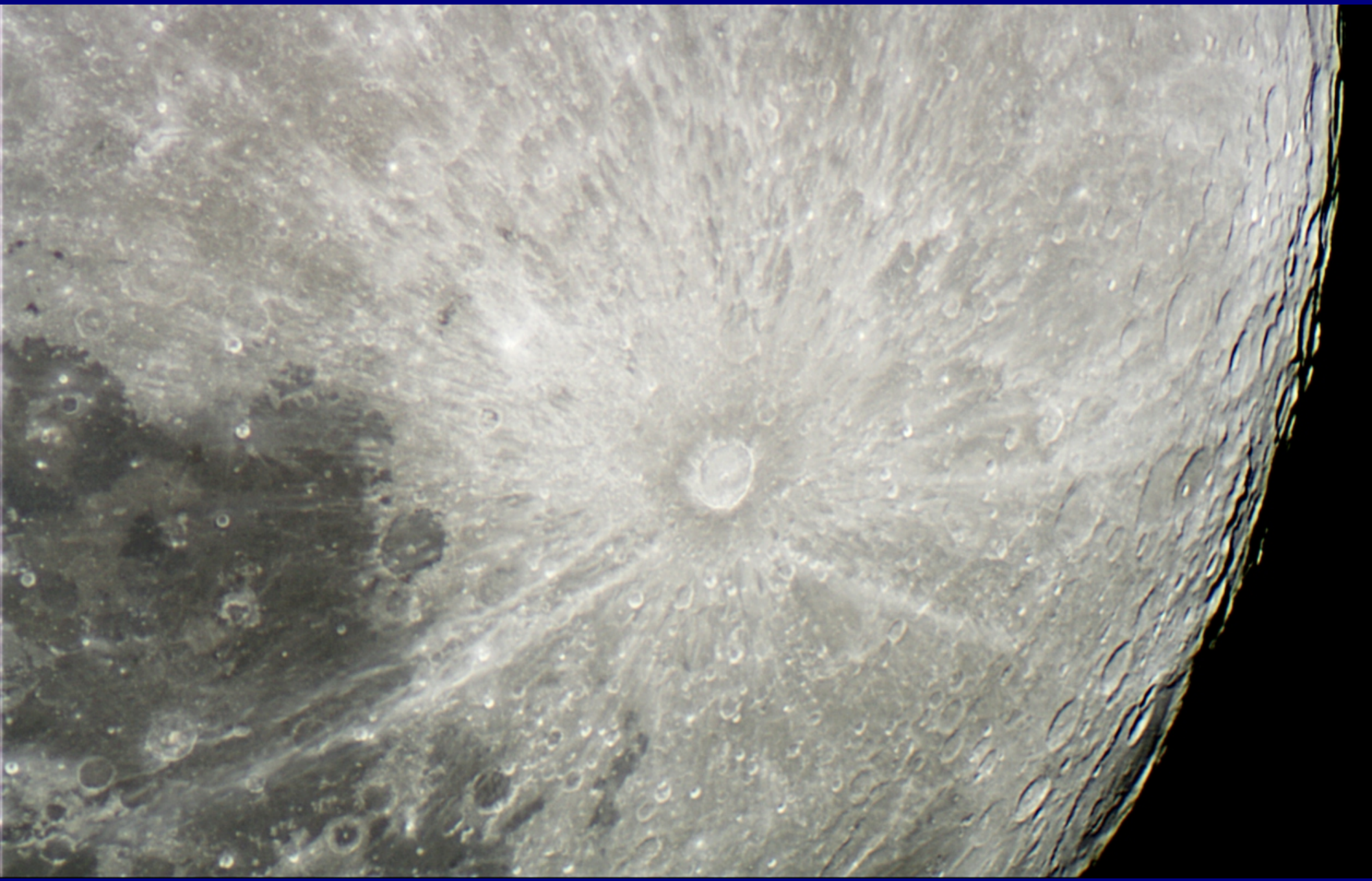
La Lune

Carte dressée en 1651 par Giovanni Battista Riccioli, jésuite, professeur à Pavie puis à Bologne.

Sa nomenclature a été, en grande partie, adoptée. La distinction entre mers et continents existait déjà avec Kepler.

(Riccioli fut chargé de réfuter la théorie héliocentrique de Copernic.)





Le cratère Tycho
[Kopernik Observatory & Science Education Center in New York State.]

La Lune au télescope

Des analyses plus techniques au télescope :

- polarisation de la lumière solaire réfléchie par la Lune
- sa variation avec l'angle de phase
- variation de l'albédo avec la longueur d'onde

Ce qu'on doit aux observations télescopiques :

- masse(Lune) = masse(Terre)/81
  densité 3,3 g/cm3, contre 5,5 pour la Terre. Pas de noyau métallique, peu de Fer.
- Spectre IR proche : silicates.
- Laves (basaltes) dans les mers, croûte.
- polarisation : sol couvert de poussière fine (10 micromètres).
- le contact direct avec le milieu interplanétaire entraîne un assombrissement progressif. Les cratères avec des raies claires sont « récents ».

Les observations par des satellites

- orbitographie et altimétrie laser
- cartographie détaillée (kilomètre, et 100 m pour 50%)
- observation fluorescence X : carte détaillée de Si, Al, Mg.
- émissions et irradiation gamma : éléments radio-actifs et composition à quelques cm de profondeur.
- mesure du champ magnétique

Orbitographie et altimétrie

- rayon moyen : 1738 km.
- densité 3,34 g/cm3
- moment d'inertie I= 0.99 * I(sphère homogène) Dans le cas de la Terre, le rapport est 0,8. Si noyau métallique : rayon < 400 km.
- La face cachée est élevée de 4km par rapport à la face visible, mais pas corrélé avec gravité. Equilibre isostatique : croûte (plus légère) 100 km coté caché, 50 km (plus dense) de l'autre.

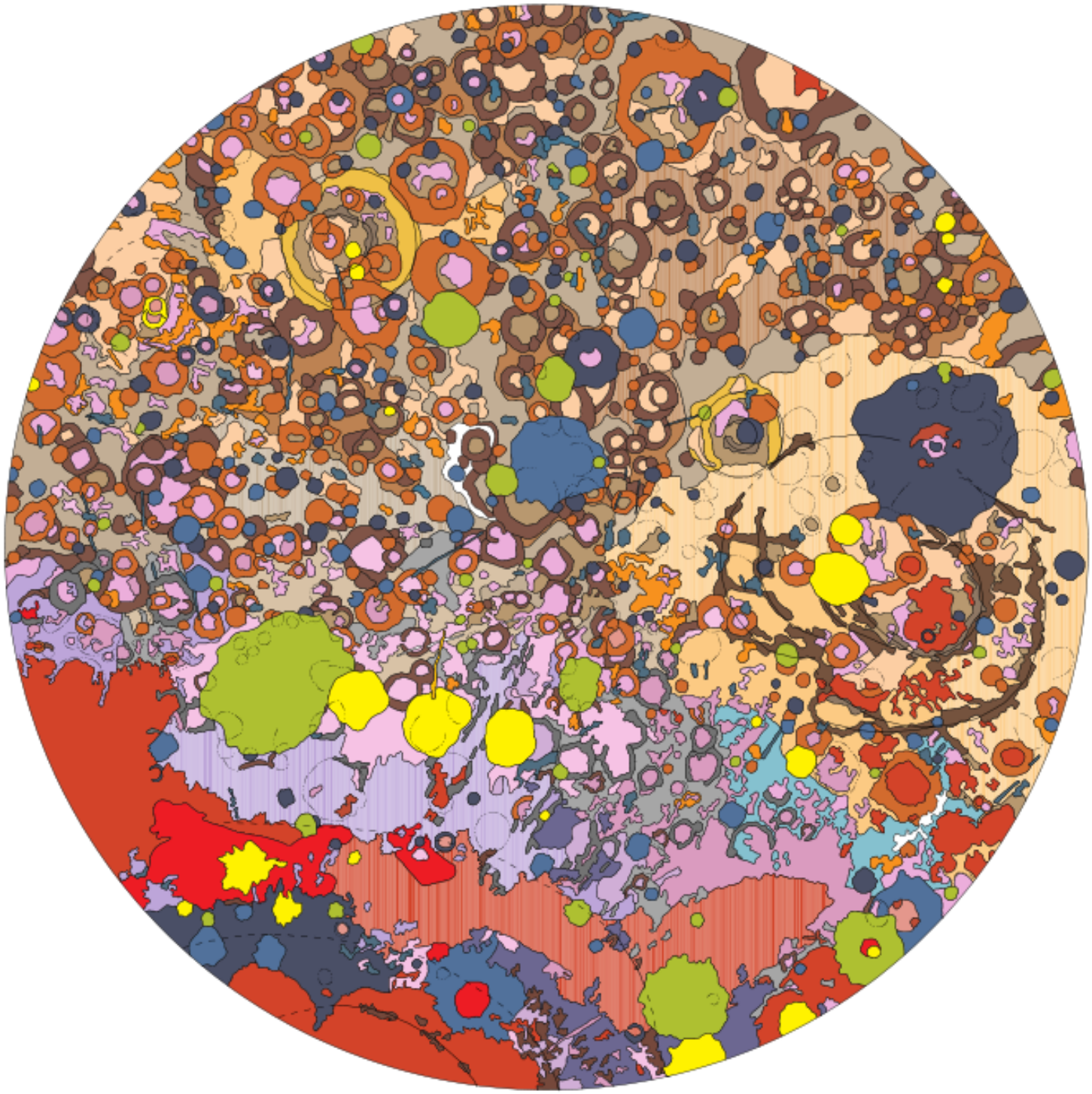
cartographie et analyse chimique

Les cartes géologiques de la Lune ont un grand succès sur les sites Web des amateurs de psychédélisme.

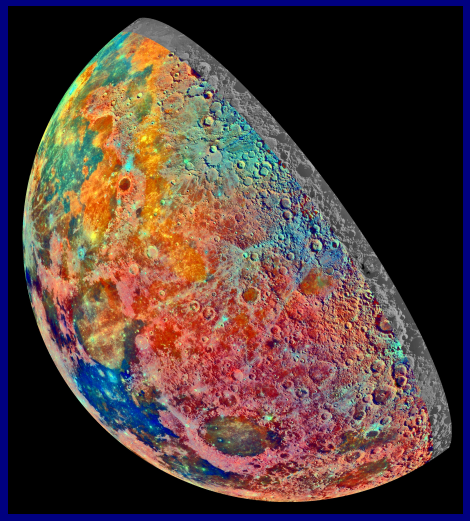
Plus difficile de les trouver sur des sites scientifiques. Apparemment, elles sont vendues,
donc non libres de droits.

La carte ci-contre vient du site publicitaire de l'US Geological Survey.

carte géologique de la Lune, sud-est, [USGS 1979]



cartographie et analyse chimique

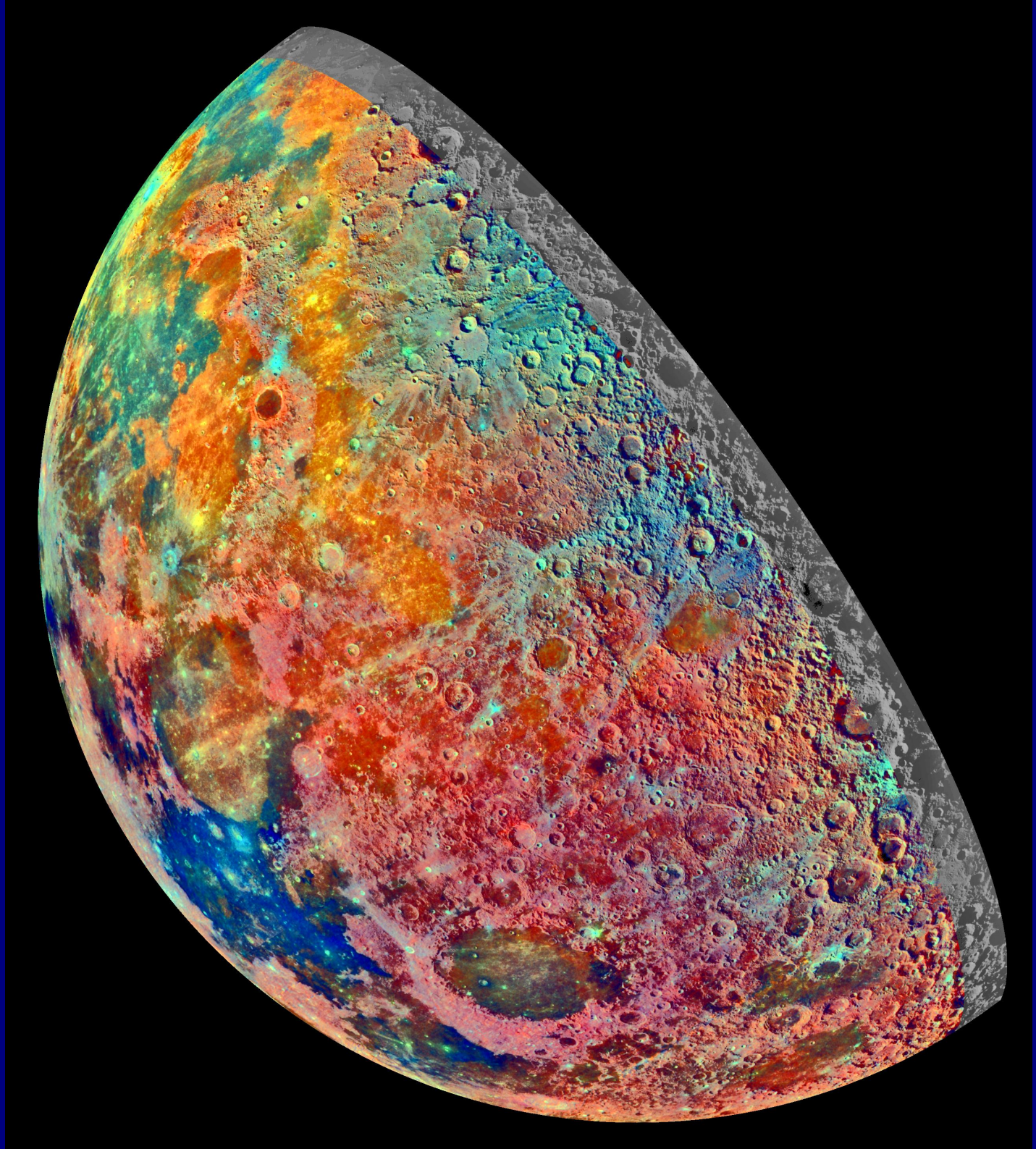


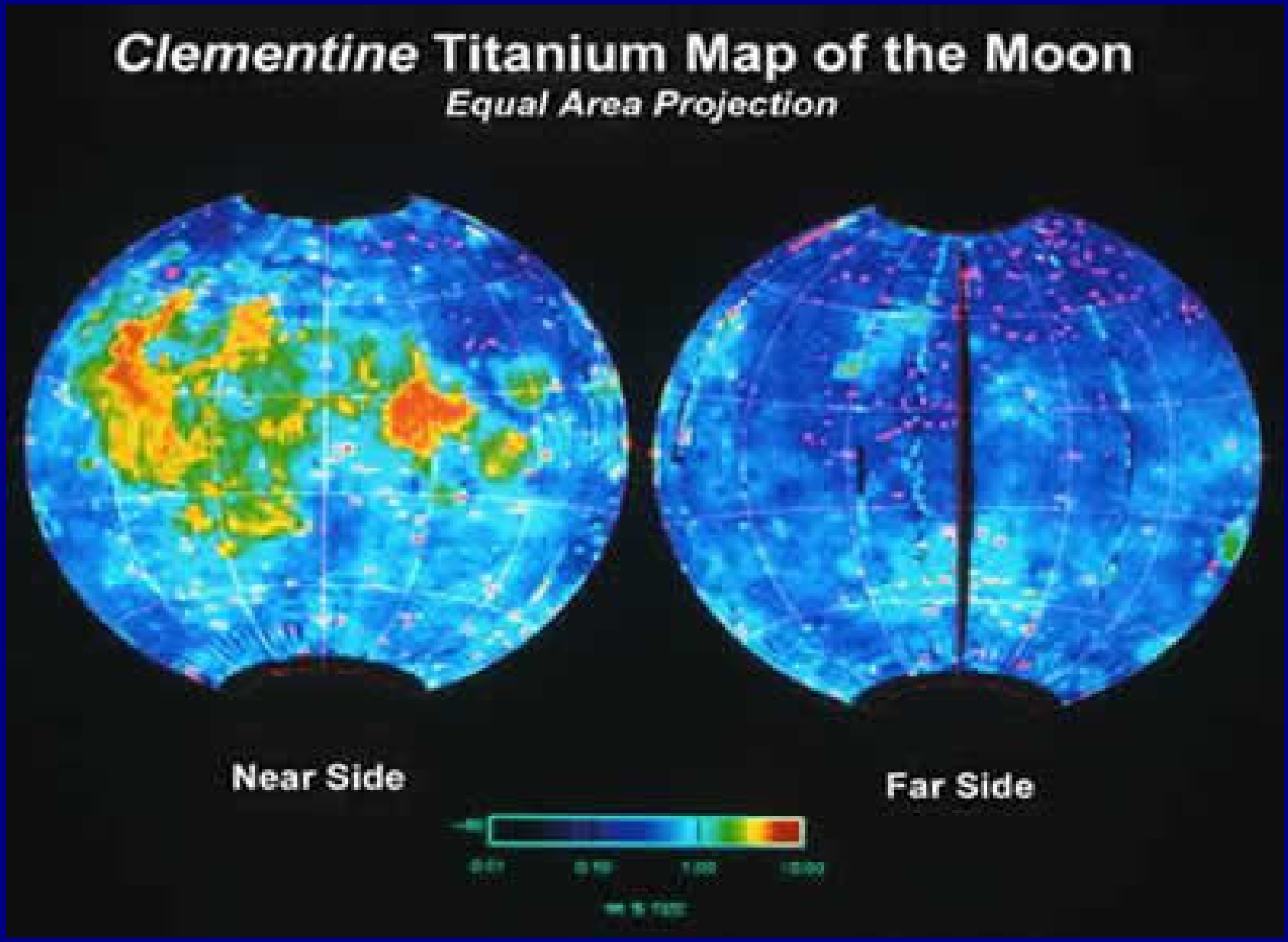
53 images taken through three spectral filters over the northern region.
The part of the Moon visible from Earth is on the left side in this view.
The color mosaic shows compositional variations in parts of the
Moon's northern hemisphere.

Bright pinkish areas are highlands materials, (oval lava-filled Crisium impact basin)
toward the bottom of the picture.

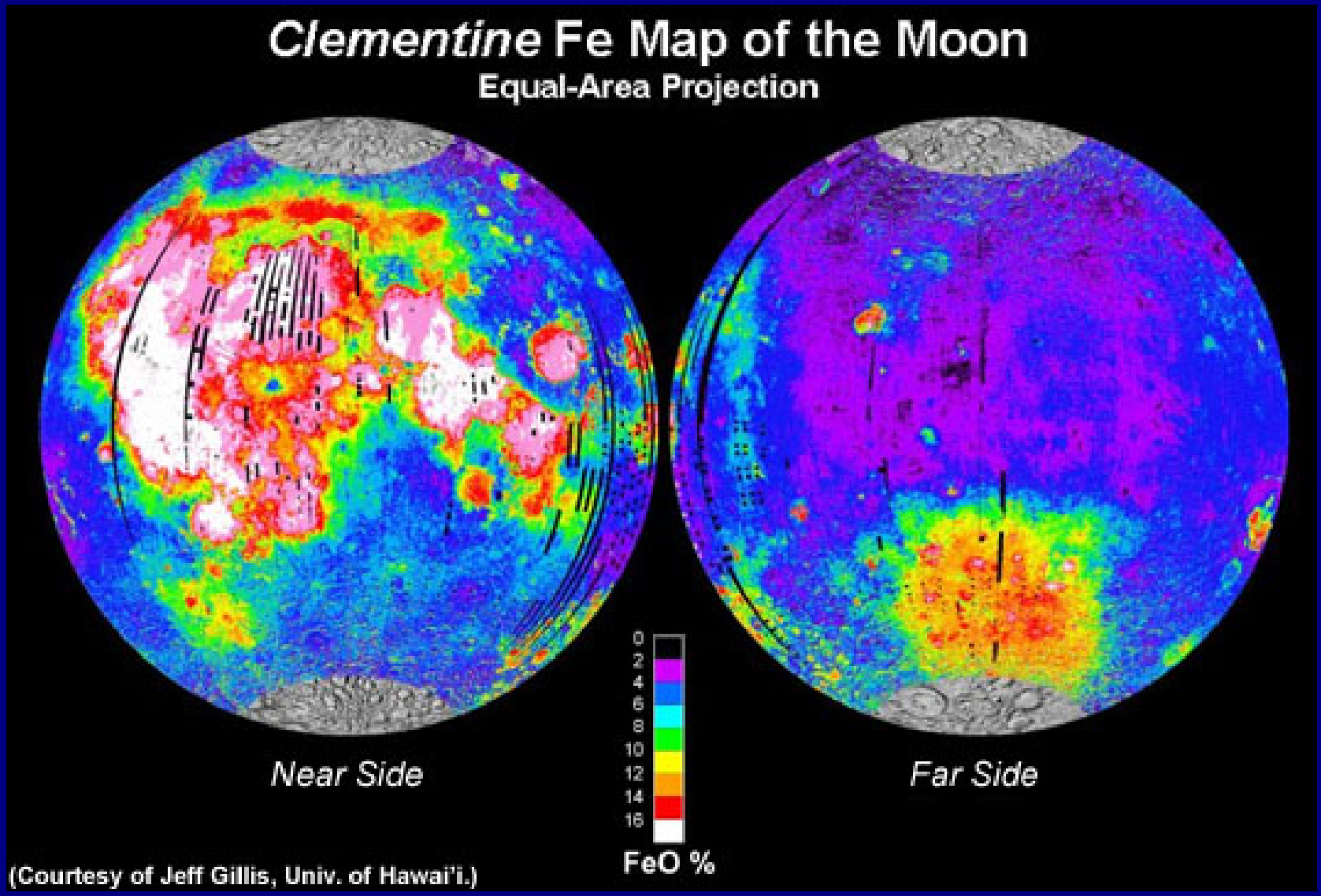
Blue to orange shades indicate volcanic lava flows.
To the left of Crisium, the dark blue Mare Tranquillitatis is richer
in titanium than the green and orange maria above it.

Thin mineral-rich soils associated with relatively recent impacts
are represented by light blue colors; the youngest craters
have prominent blue rays extending from them.
[Galileo, 1992. NASA/JPL]





Carte du titane à la surface de la Lune.
Certaines mers (dont « tranquilité » en sont spécialement riches.
Etablie à l'aide d'images et spectres en visible et IR.
Sonde Clementine [DoD NASA]



Carte du monoxyde de fer FeO à la surface de la Lune.
Etablie à l'aide d'images et spectres en visible et IR.
Sonde Clementine [DoD NASA]

Des hommes sur la Lune.

Après Armstrong (qui tient l'appareil photo), Aldrin descend du LM.
La première mission : collecter vite des poussières pour ne pas rentrer les mains vides (3,5mn).

Aldrin devant le LM. Des appareils ont été déployés.

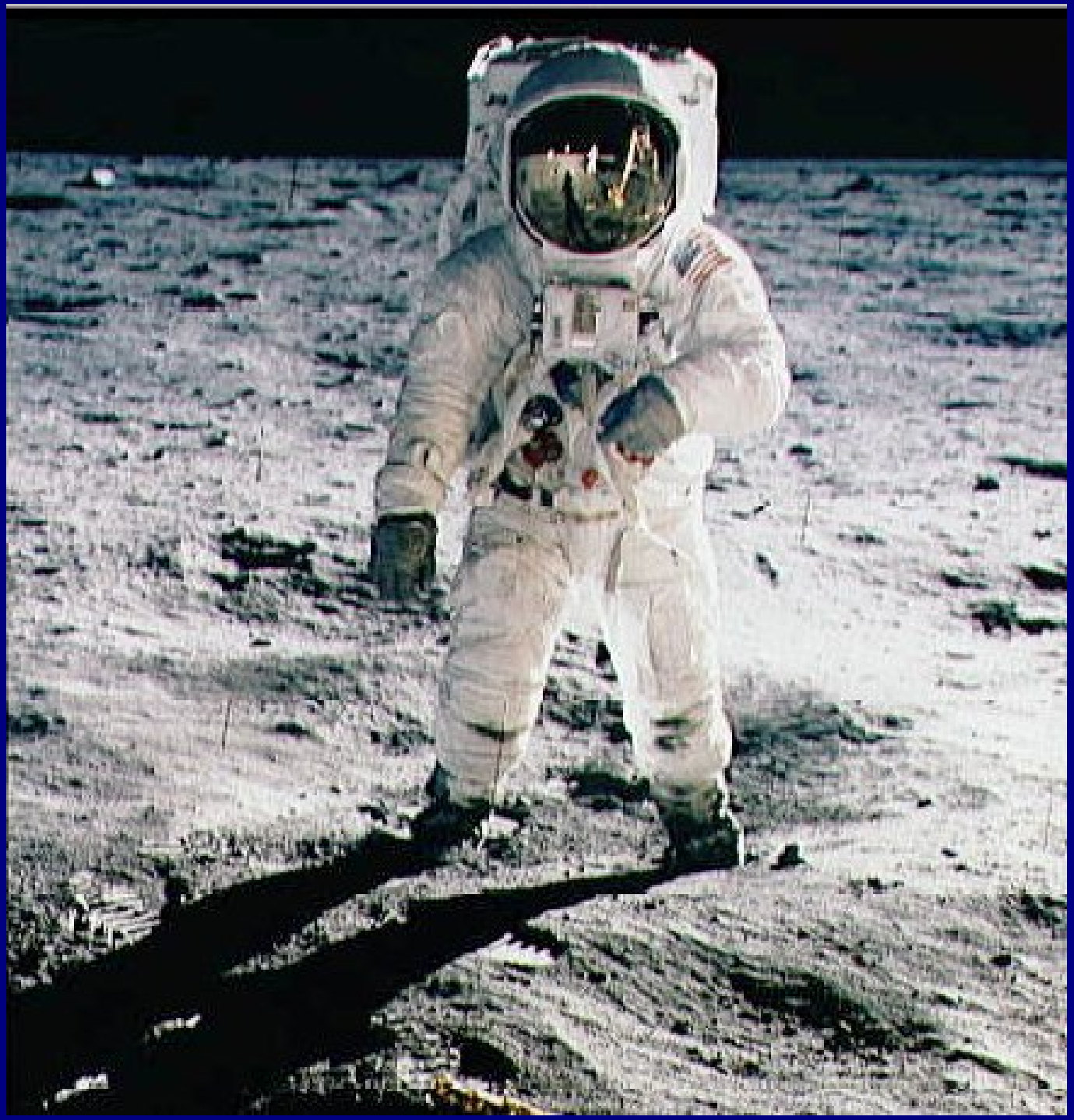
Sur la Lune, il est très difficile d'apprécier les distances, car l'horizon n'est qu'à 3 km. Il n'y a pas de point de repère. Il n'y a pas de diffusion : ce qui est loin (3km) est aussi net que ce qui est juste à coté.

Les montagnes sont érodées par le vent solaire et autres particules cosmiques.

Le ciel est plus noir que l'encre noire. Les étoiles brillent en plein jour et ne scintillent pas, car il n'y a pas d'atmosphère. Le Soleil est beaucoup plus intense que sur Terre. Il n'y a pas la couche d'air pour servir de filtre.

La lumière du Soleil vient d'une seule direction. Ce qui est à l'ombre est totalement dans le noir.

D'autre part la poussière caractérise le paysage lunaire. Elle est partout et s'incruste tant que les astronautes ont mis 3 mois pour s'en débarrasser. Elle pénètre dans les pores de la peau.



Aldrin

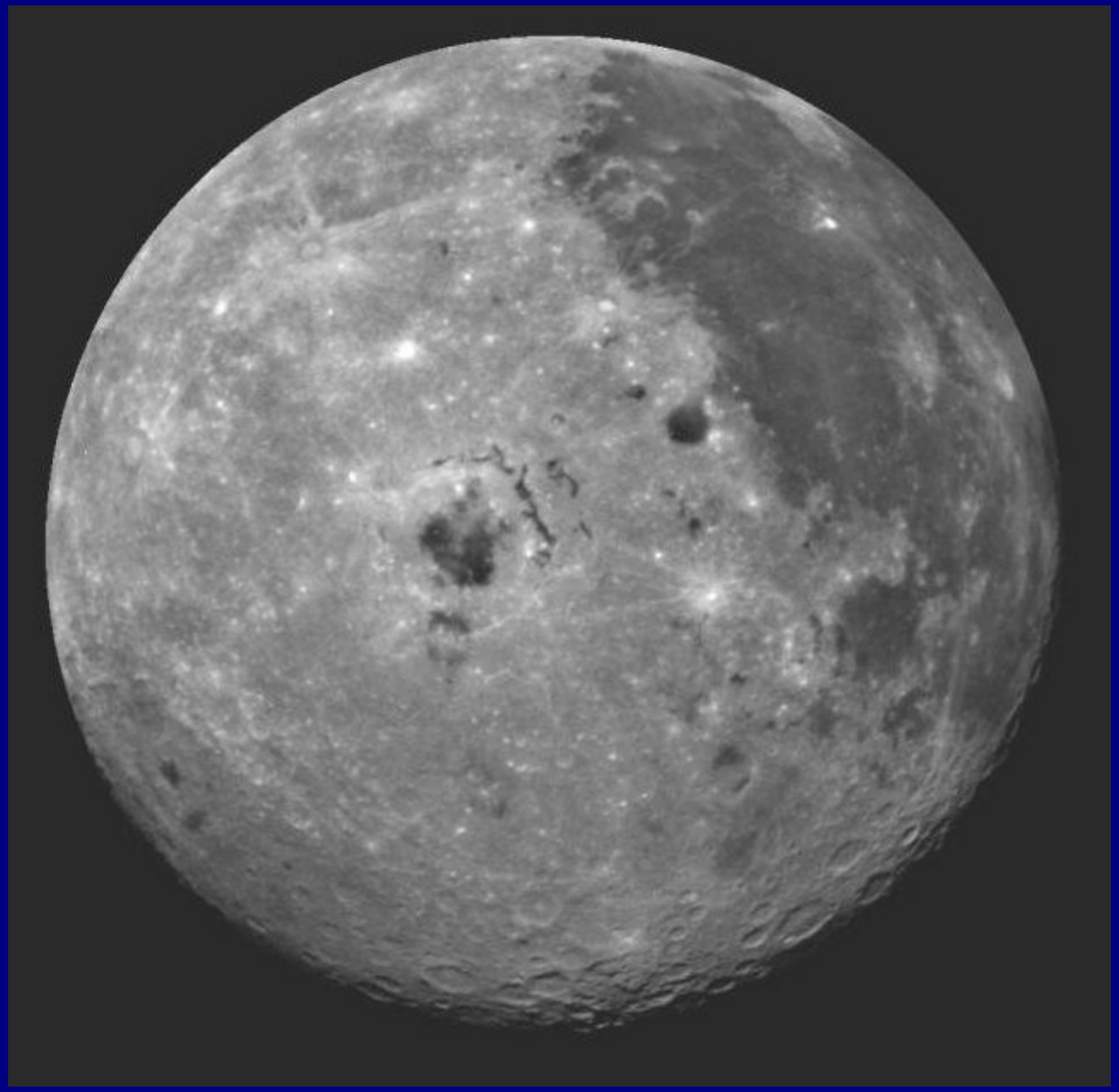
Déploiement d'appareillage : séismomètre, réflecteur laser, feuille d'alu (collecte vent solaire)...

Quelle est la nature des mers lunaires ?

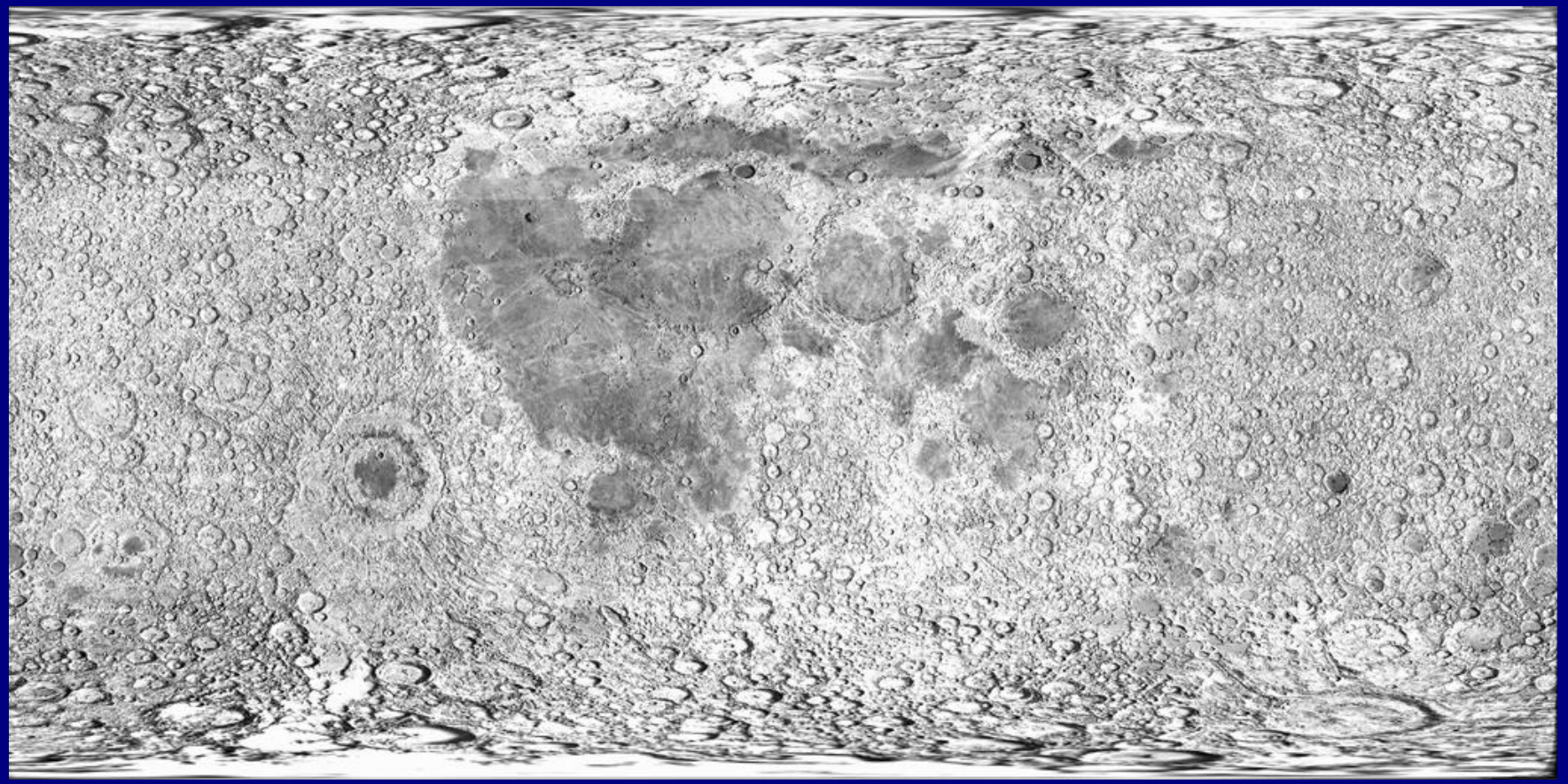
Les mers

Les mers sont absentes de la face cachée

prise par la sonde Galileo le 9 décembre 1990 depuis une distance de 560 000 km. Elle montre Mare Imbrium sur le limbe oriental (zone sombre à droite) et met Orientale Basin (avec une petite mer au milieu) presque au centre. L'étendue des hauts plateaux sur la face cachée est mise en évidence.
En bas à gauche, près du bord, se trouve le Aitken basin du Pôle Sud, semblableà Orientale mais beaucoup plus vieux et d'environ 2000 km de diamètre.

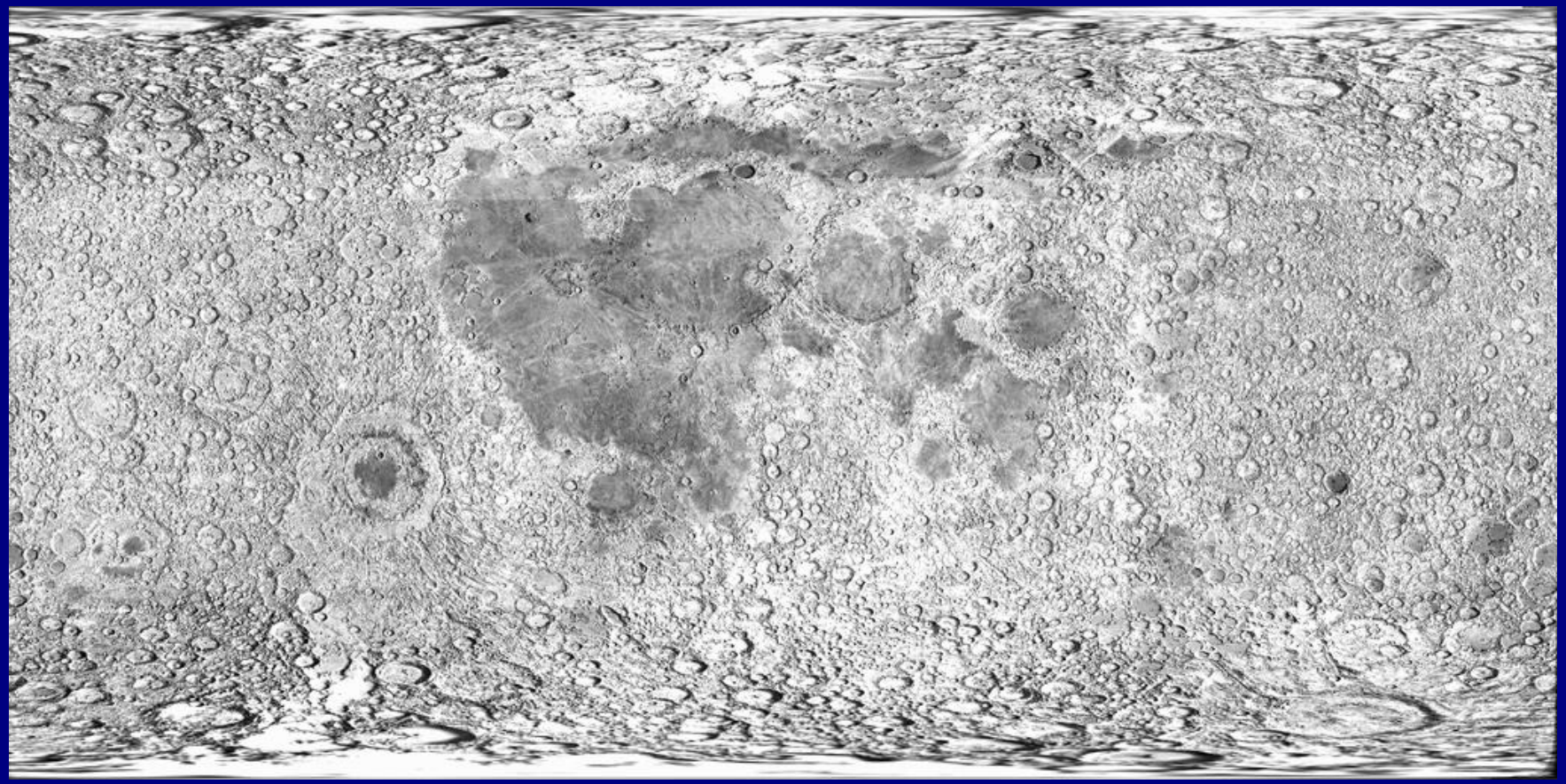


Quelle est la nature des mers lunaires ?



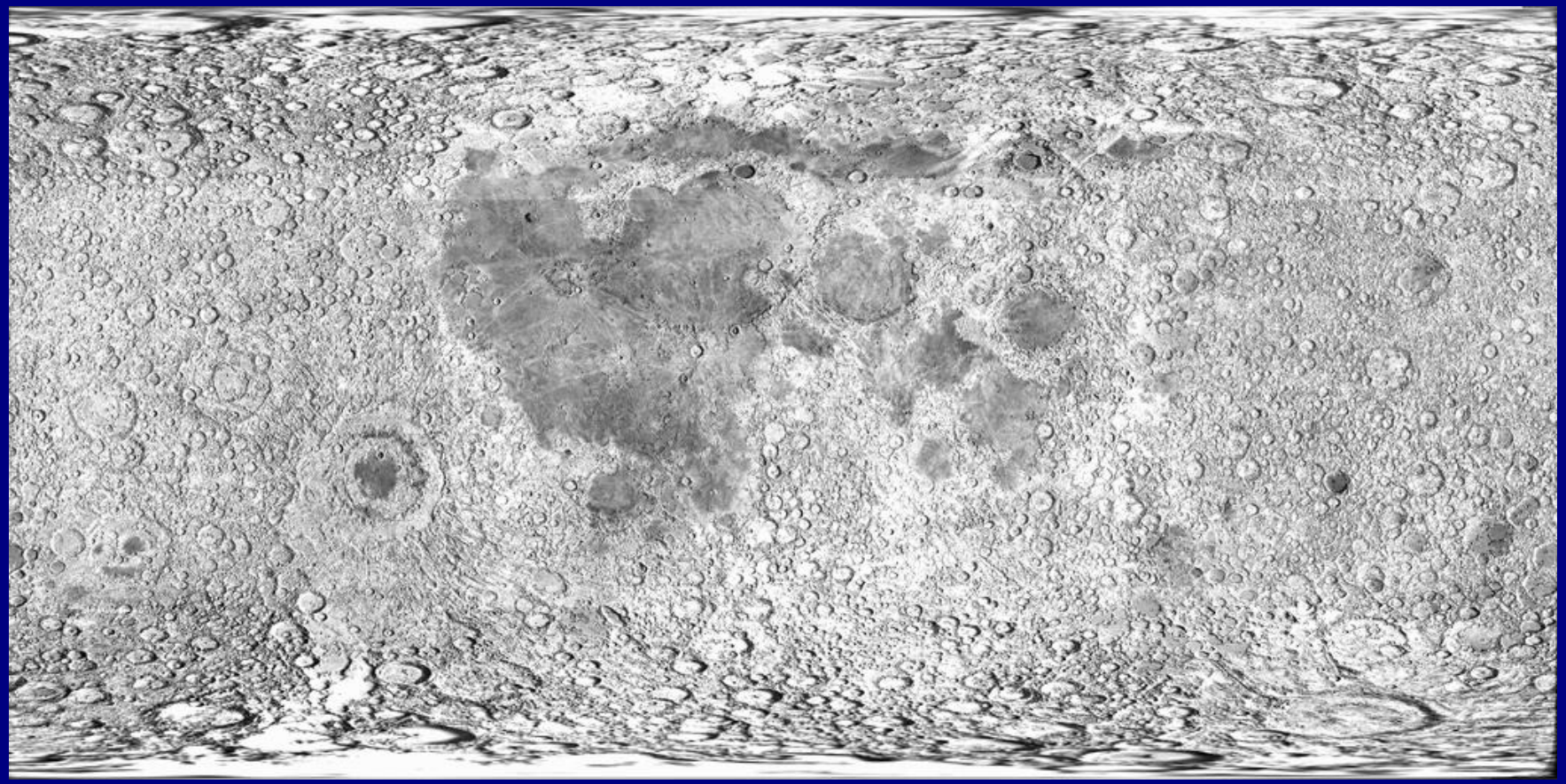
Asymétrie entre le coté vers la Terre et la face cachée.
Cratères. Pas de mer sur la face cachée,
sauf des laves au creux d'Oriental Basin..

De quelle matière sont faites les mers ? Pourquoi sont-elles plus foncées ?
Quelle est leur origine ?

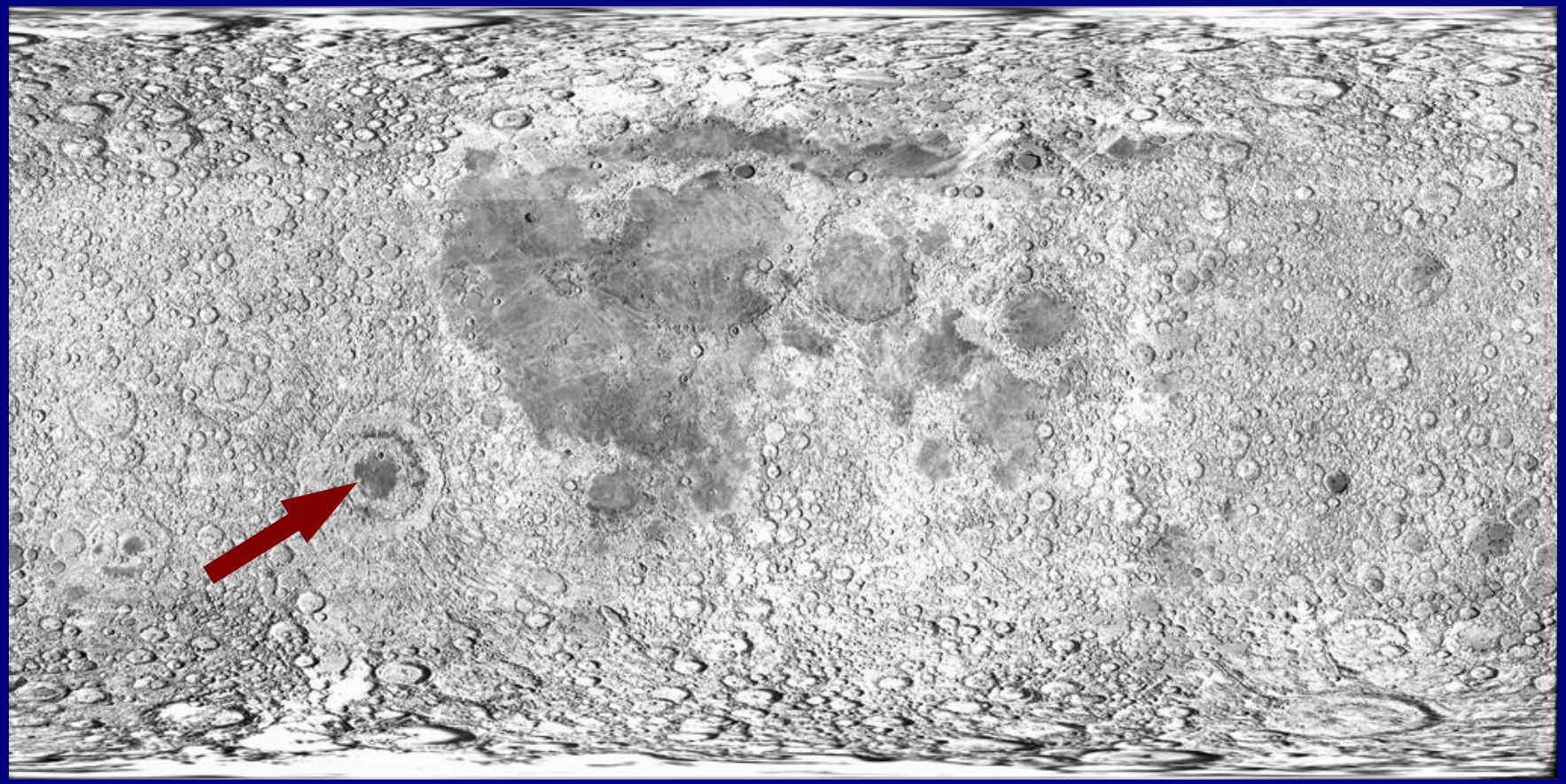


Comme les mers ont moins de cratères, on les suspecte d'être des terrains moins anciens.
Leur caractère plat évoque des coulées de lave, ou des roches préalablement fondues.

Qu'est-ce qui aurait fait fondre la lave ? Des volcans ? Des impacts de météorite ?



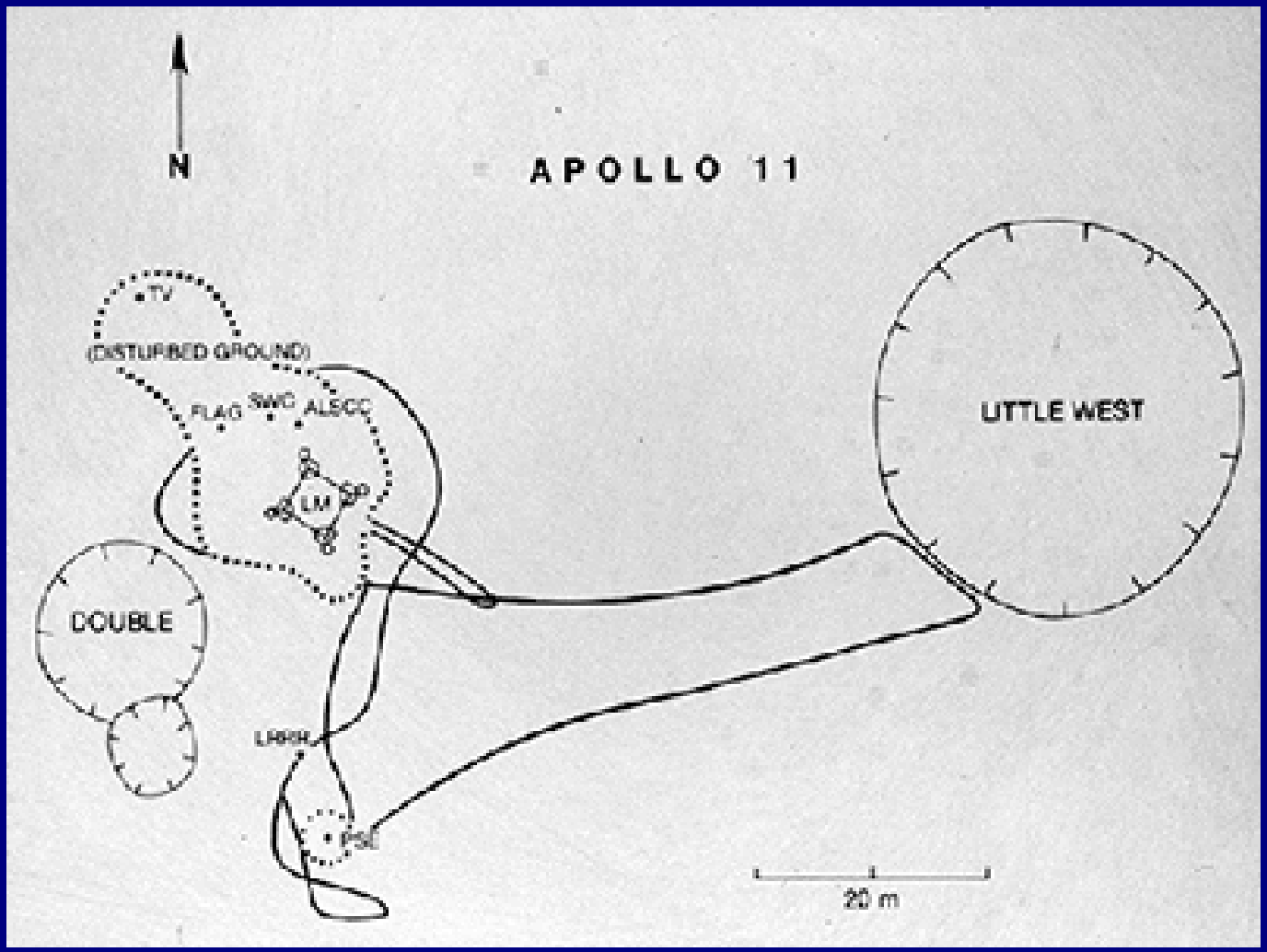
Les deux ?



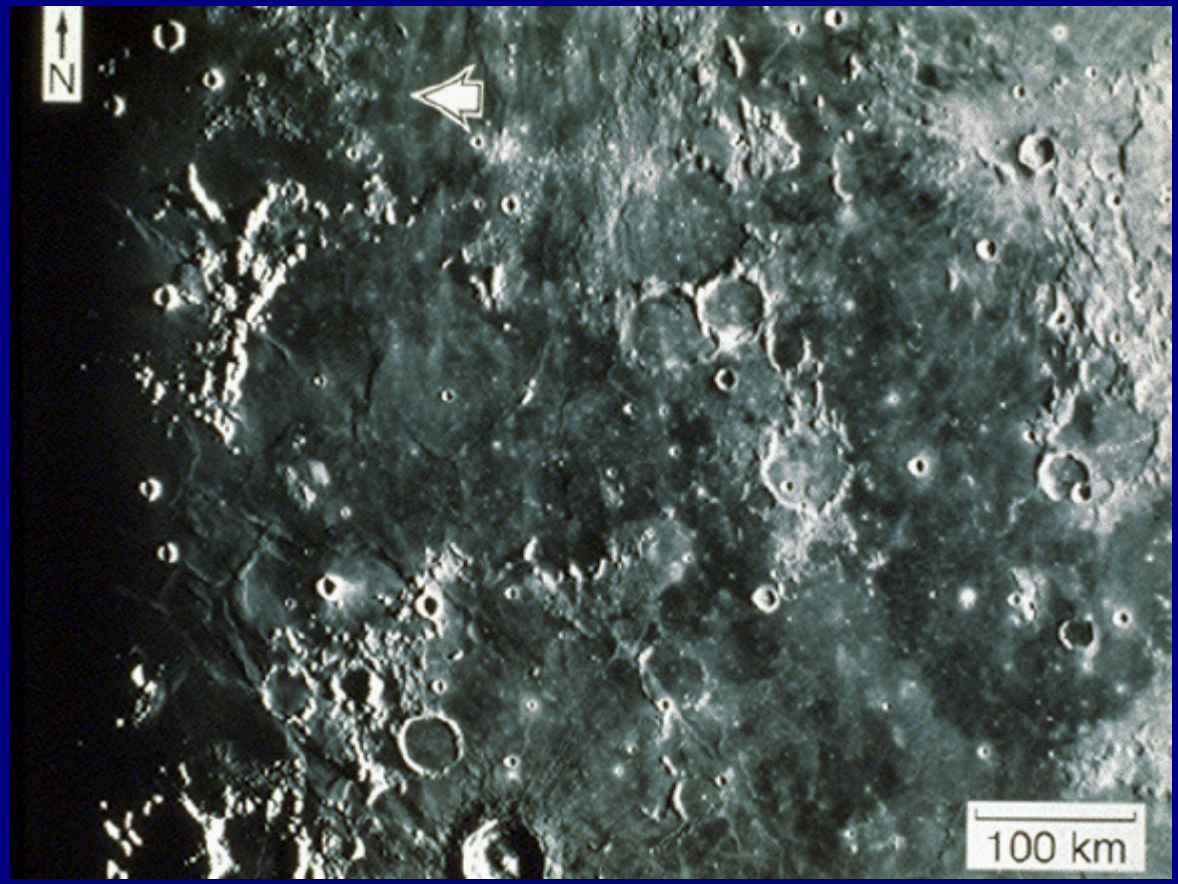
Création des mers : possible effet d'un énorme impact, marqué par le cratère « orientale basin »

Les deux premières missions Apollo se sont posées dans des mers. Elles ont permis de trancher la question de la nature volcanique des mers, principalement grâce à l'analyse des échantillons collectés.

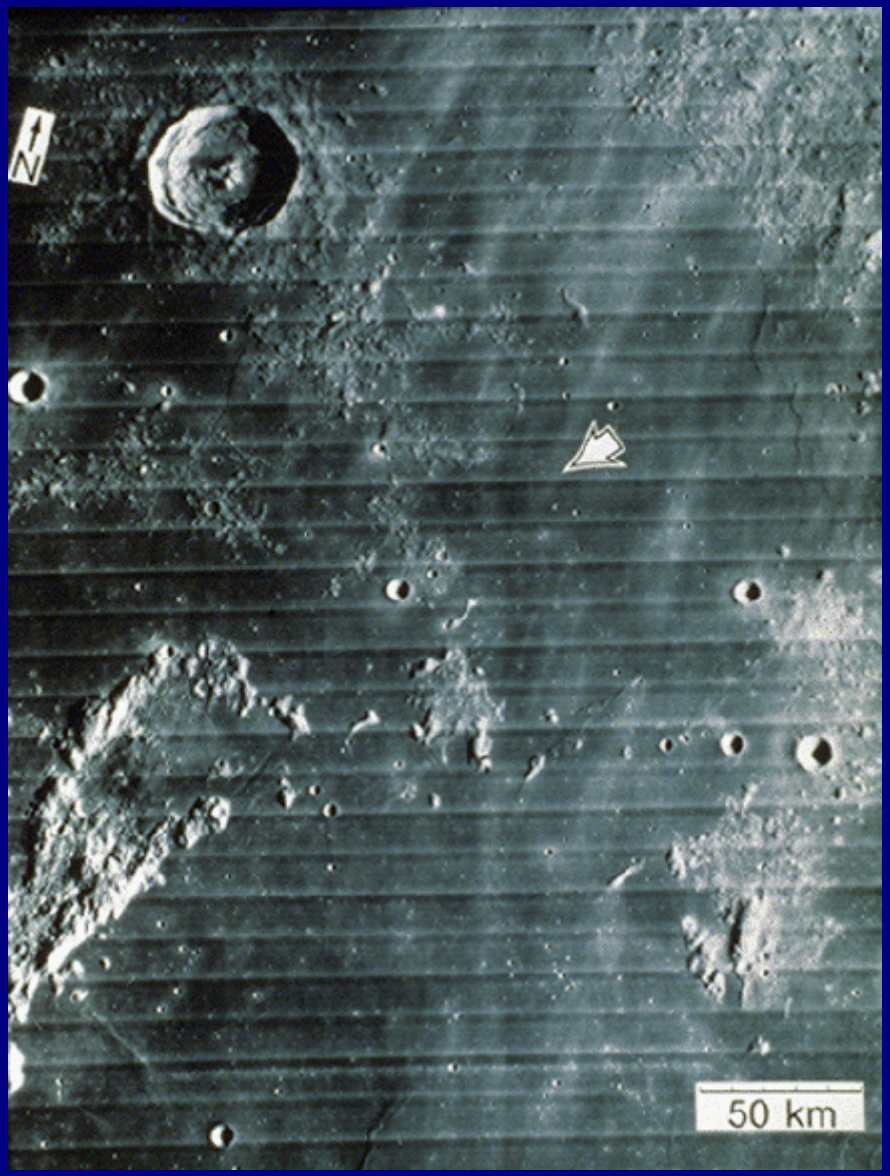
Site d'alunissage d'Apollo 11, vu du LM. 20 juillet 1969.
Mer de la Tranquillité, vue vers le nord.
Outre une mer, la NASA a choisi un site particulièrement plat, pour des raisons techniques liées pilotage du LM à l'alunissage et au décollage.



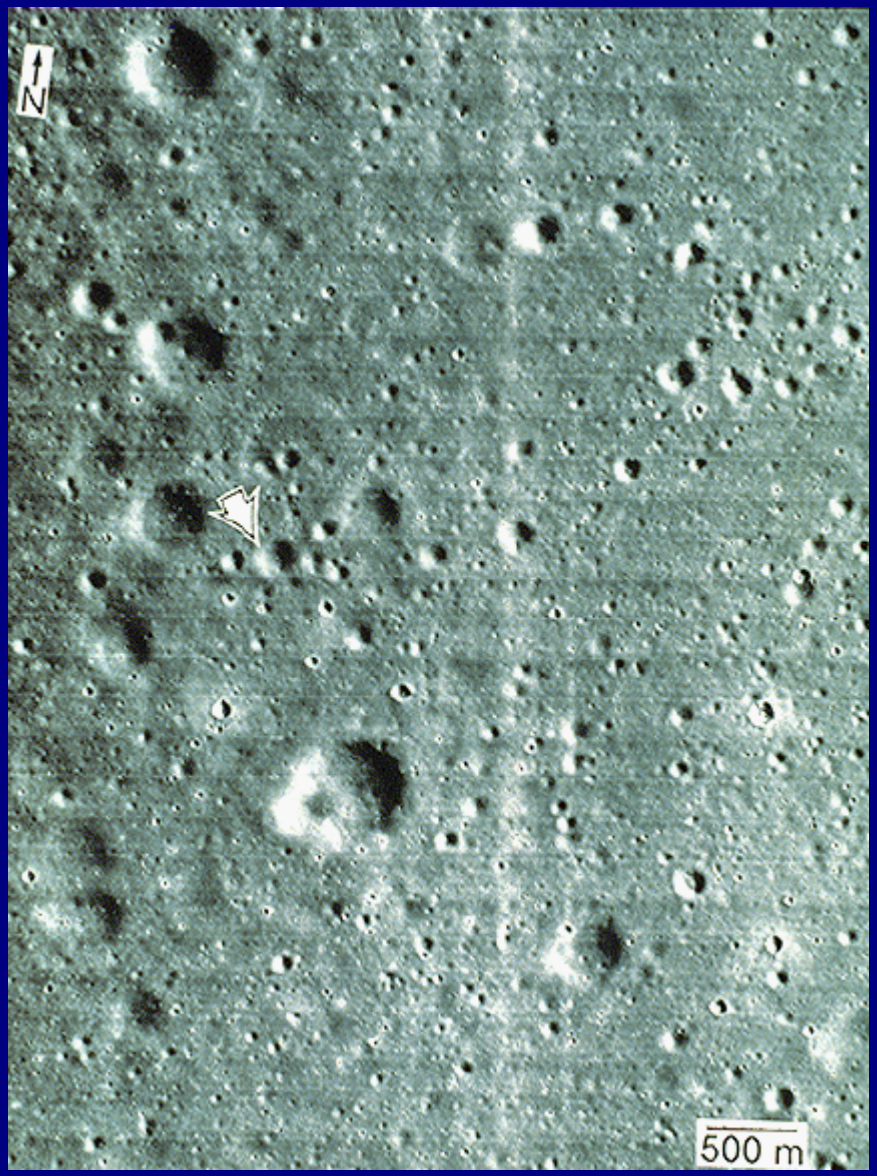
Les instruments étaient posés très près du LM.
Les astronautes n'ont pu aller bien loin.



Apollo 12 s'est aussi posé dans une mer : Oceanus Procellarum.
Mais sur un site recouvrant en partie des éjectas du cratère Copernic.

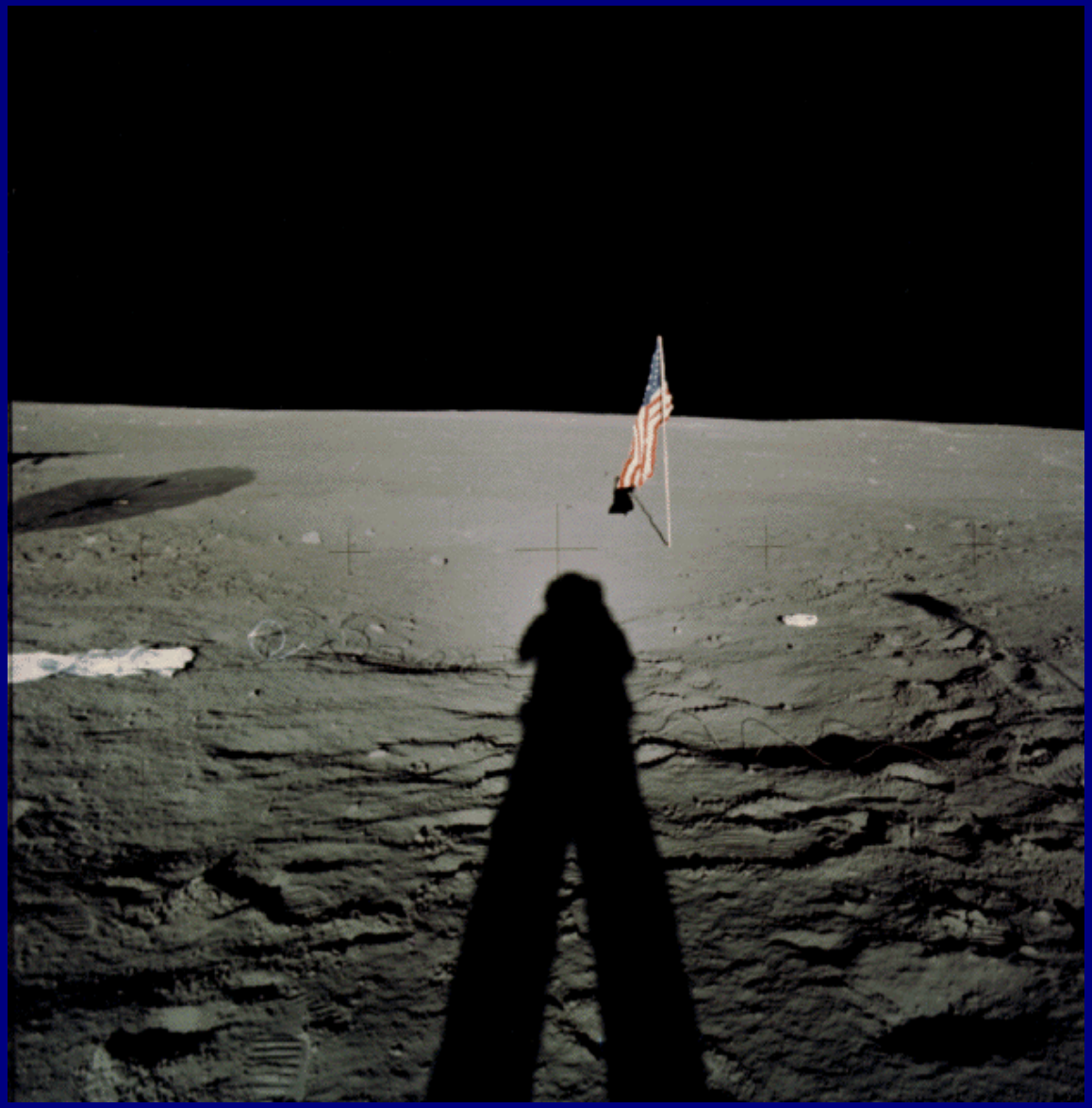


Les éjectas apparaissent comme des traces plus claires.



Les mers ont moins de cratères que les autres régions, ce qui laisse penser que leur formation est plus récente. On remarque néanmoins une grande quantité de petites cratères. Il ne sera pas si facile de les explorer.

Le site d'Apollo 12, vers l'est.



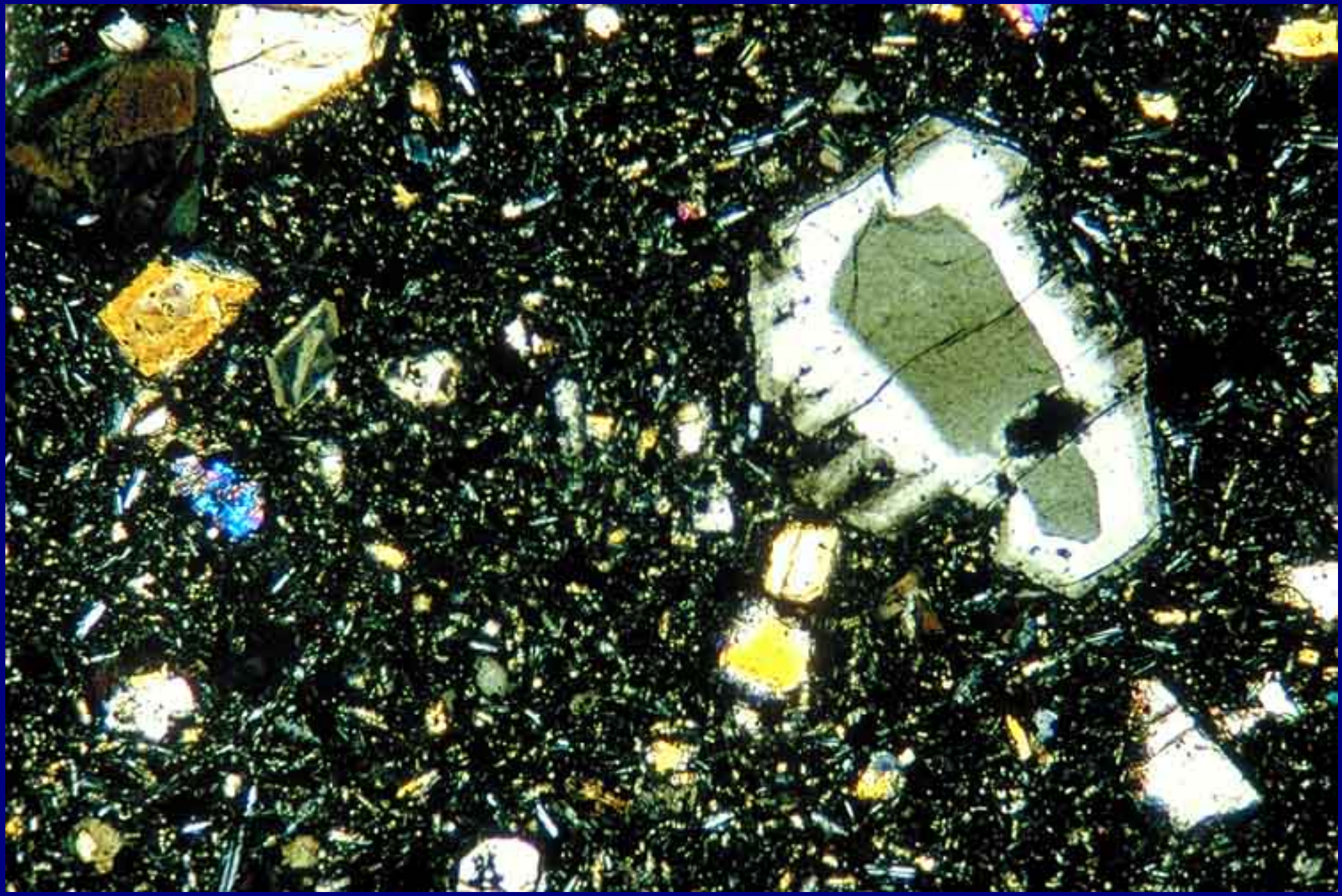
Le site d'Apollo 12, vers l'ouest.

Le site d'Apollo 12, vers le sud.

La collecte de roches

Les mers sont-elles bien faites de laves (basaltes) ?
Sorties d'Apollo 11 : deux heures.
Collecte rapide, moins documentée qu'avec les missions suivantes.

Les basaltes sont des roches issues des volcans, riches en silicates (à base de silicium, comme le sable, le verre etc).
Elles en sont sorties souvent liquéfiées et se sont solidifiées devenant amorphes ou cristallines.
Elles contiennent d'autres éléments, plagioclases, pyroxène, olivine...

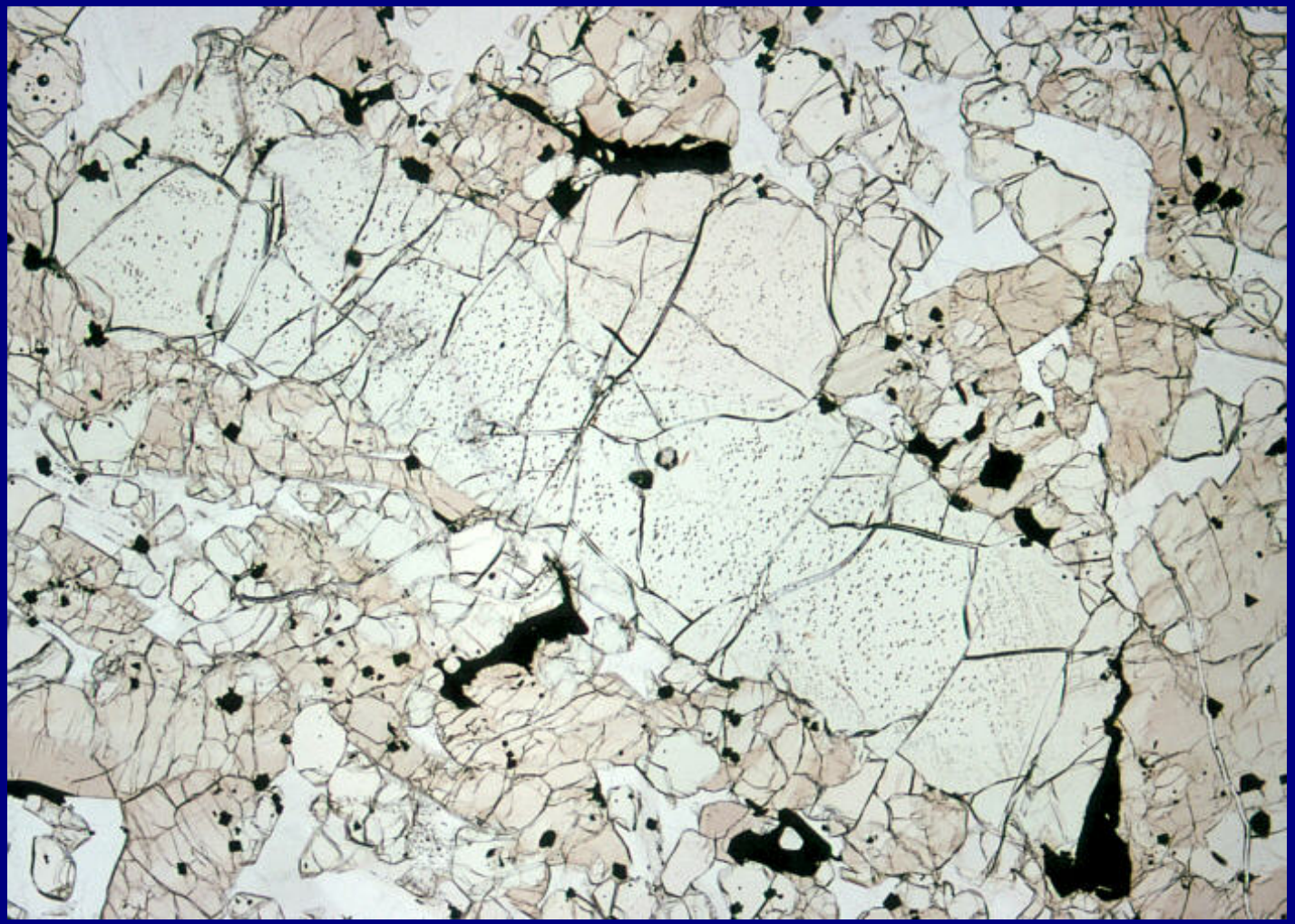


Une fine tranche d'un basalte terrestre, agrandie au microscope.

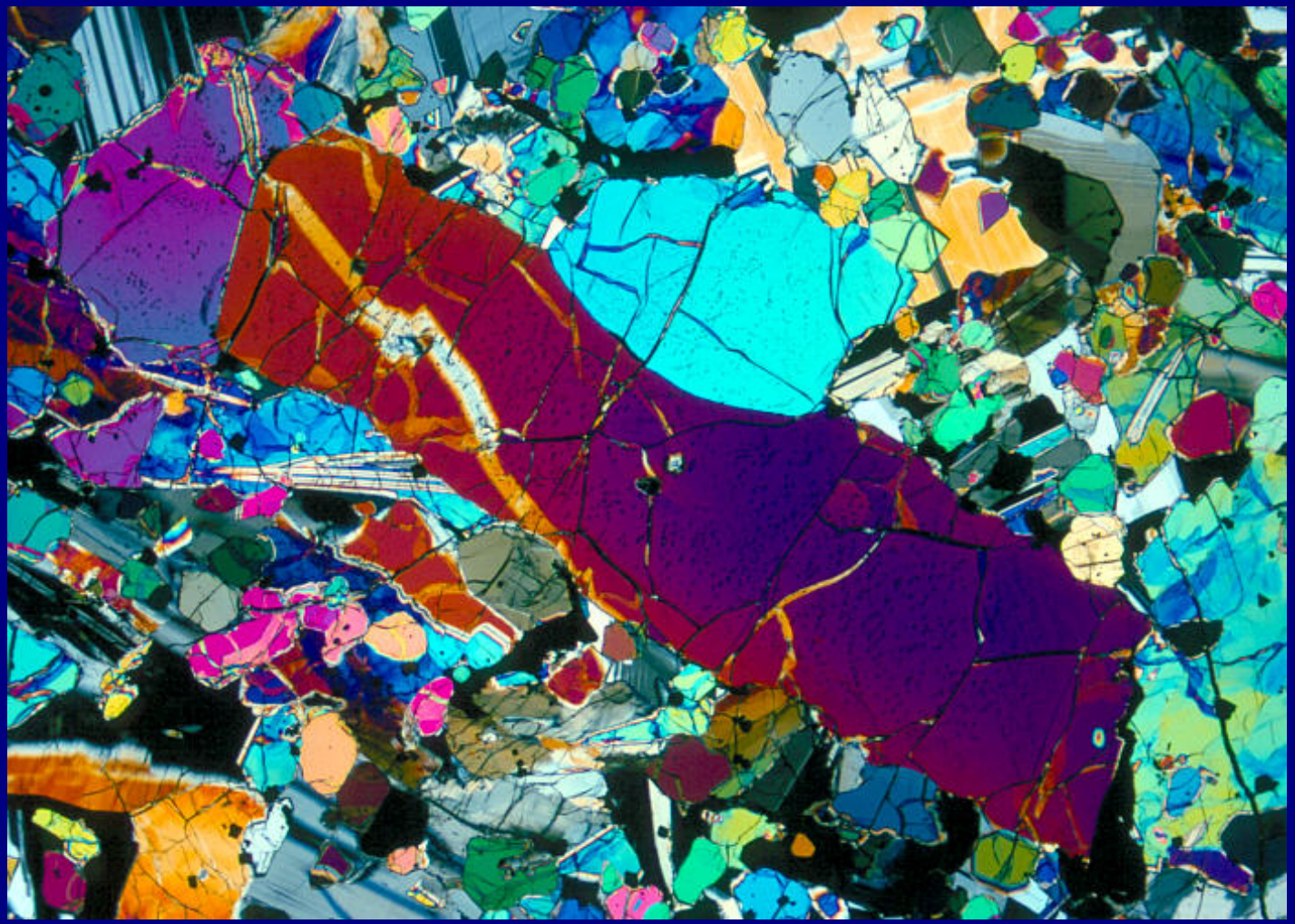
Sur le site d'Apollo 12. Un talus, que les astronautes espéraient formé par une petite formation volcanique.
(En fait, il s'agit d'éjecta de régolithe dus à l'impact d'une météorite.)

Des basaltes rapportés par la mission Apollo 15.
L'homme est le géologue Harrison Schmitt, d'apollo 17.
La dame est Andrea Mosie, qui n'est pas allée sur la Lune.
Dans la boite, l'atmosphère est « neutre », pour éviter des transformations chimiques qui pourraient altérer les propriétés de ces roches, brouillant les pistes pour l'interprétation de leurs propriétés.

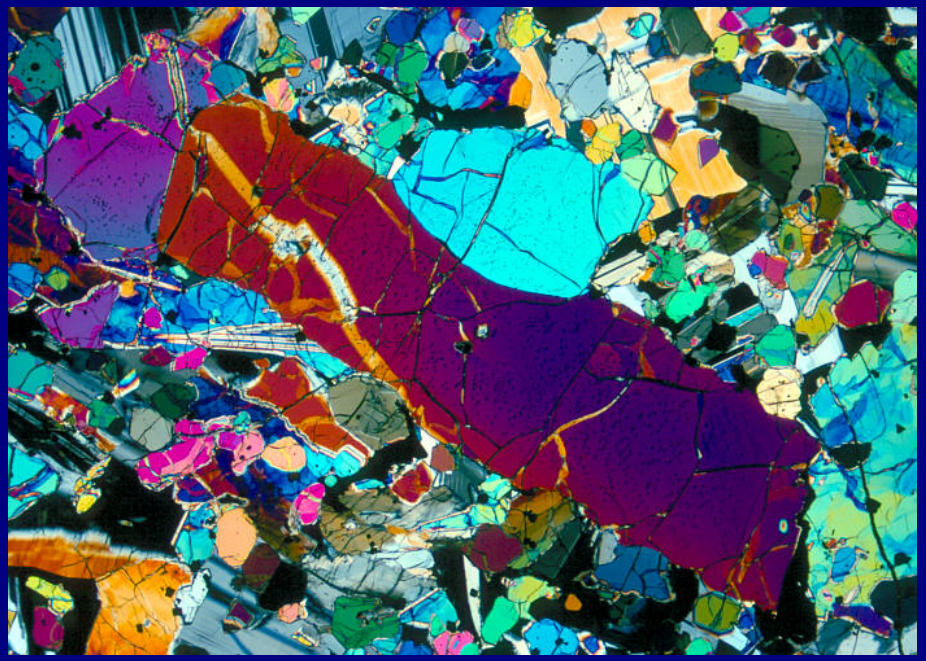
Un basalte lunaire, typique des mers. Celui-ci a été rapporté par Apollo 17, son ancienneté (le moment où il s'est solidifié) est estimé à 3,7 Md d'années.



Un échantillon de basalte rapporté par la mission Apollo 12.
C'est une fine section observée avec une lumière polarisée.
Il contient de l'olivine et du pyroxène. (des roches qui existent sur Terre).
Echantillon grossi 20 fois, en lumière polarisée (plane).

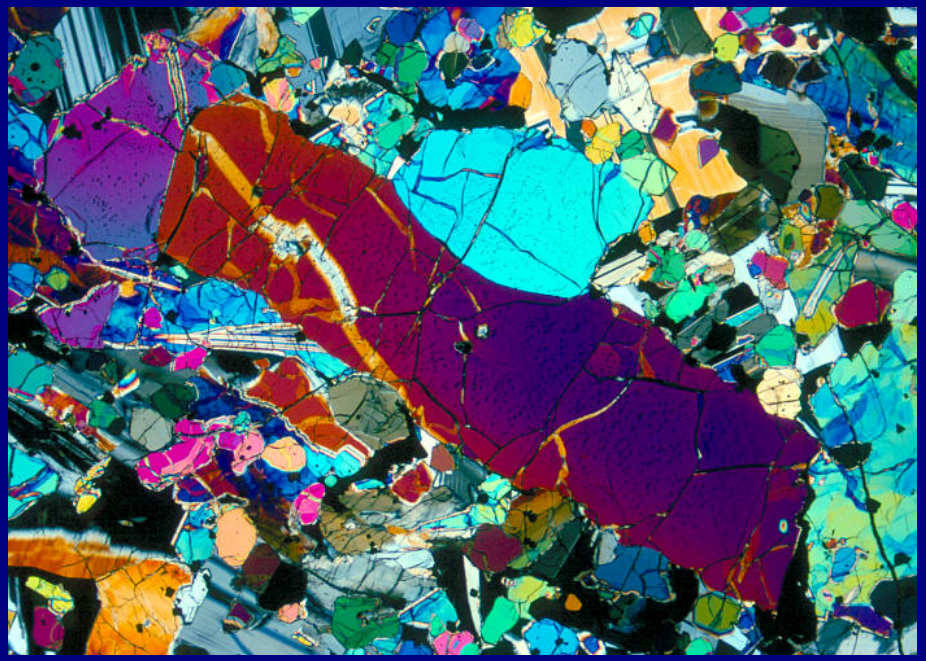


Le même échantillon.
Il contient de l'olivine et du pyroxène. (des roches qui existent sur Terre).
Echantillon grossi 20 fois, en lumière polarisée (transverse). Le pyroxène est bi-réfringent.



Si les mers avaient été formées par de nombreux impacts de météorites, on aurait trouvé des gouttes de roches fondue qui auraient été projetées à de grandes distance.
En vol, les petites gouttes auraient eu le temps de se solidifier, elles auraient formé des petites perles de verre. On n'en n'a pas trouvé beaucoup sur les sites d'Apollo 11 et 12. Cela semble indiquer que la lave des mers ne provient pas (directement) d'impacts de météorites.

L'analyse chimique a confirmé que les mers on été produites par de très vastes flots de lave, assez liquide, présentant quelque analogie avec la formation d'îles volcaniques comme Hawaï et l'Islande.



Mais les flots de lave n'appariassent pas tels quels : ils ont été exposés à des millions d'années de bombardement météoritique qui les a profondément transformés, mécaniquement, et chimiquement (apport des matériaux des météorites).

Des couches de lave « authentique » ont été prélevées par les astronautes d'Apollo 15...

Petite chronologie de la formation des mers : les bassins.

Les qq 100 premiers millions d'anées, grand bombardement. Pilonnage intense de la Lune. 4,2 à 3,8 Md années : création des grands bassins :
Nectaris, Humorum, Crisium, Imbrium, Orientale (du + ancien au + récent).

Fontes d'impacts : formation de mares de magma.
(Liquéfaction suite aux impacts, ce n'est pas du volcanisme.)

Seule une faible proportion de l'énergie d'impact peut provoquer la fonte. Surtout des déformations et des éjections, le volume des roches fondues ne dépasse pas (en général) le double du volume de la météorite.

Puis déclin des impacts.

Petite chronologie de la formation des mers : les basaltes.

Les mers de basaltes sont apparues plus tard.
Dues au chauffage interne de la Lune par les désintégrations radioactives : fontes locales en profondeur.

Grandes inondations basaltiques : 3,8 à 3,2 Md d'années.

Pourquoi surtout (mais pas seulement) dans les bassins ?
Parce-que ce sont les régions les plus amincies et fracturées de la croûte : dépression lithostatique (favorable à la fonte), et chemins de sorties pour les laves.

Magamas très variés, sans doute générées dans les régions supérieures du manteau.

Petite chronologie de la formation des mers : où sont les volcans ?

Laves de type lunaire à 1200 °C : viscosité très faible (5-10 poises). Cette viscosité est accrue par l'absence d'eau (/laves terrestres).

Fontaines de lave sortant d'une fissure. Coulent le long de faibles pentes.

Sur Terre : Islande, par ex. Laki en 1783 : fissure de 30 km, éruption de 7 mois couvrant 565 km2.

Mer des Pluies : 500 000 km2, sur 40m à qq 100 m. Des coulées de 1200 km ! (première éruptions de lave très chaude).

Pas de cônes : si scories, la faible gravité et l'absence de frottements atmosphériques envoie les scories très loin, peu favorable à un cône. Missions Apollo : aucun des candidats n'a été confirmé comme un cône ou une fontaine. Exception : dômes de Gruithisen (15-20 km) dans l'Océan des Tempêtes

Volcanisme de failles : à la fin de l'éruption, les failles sont recouvertes par leur propre lave.

La poussière, l'érosion

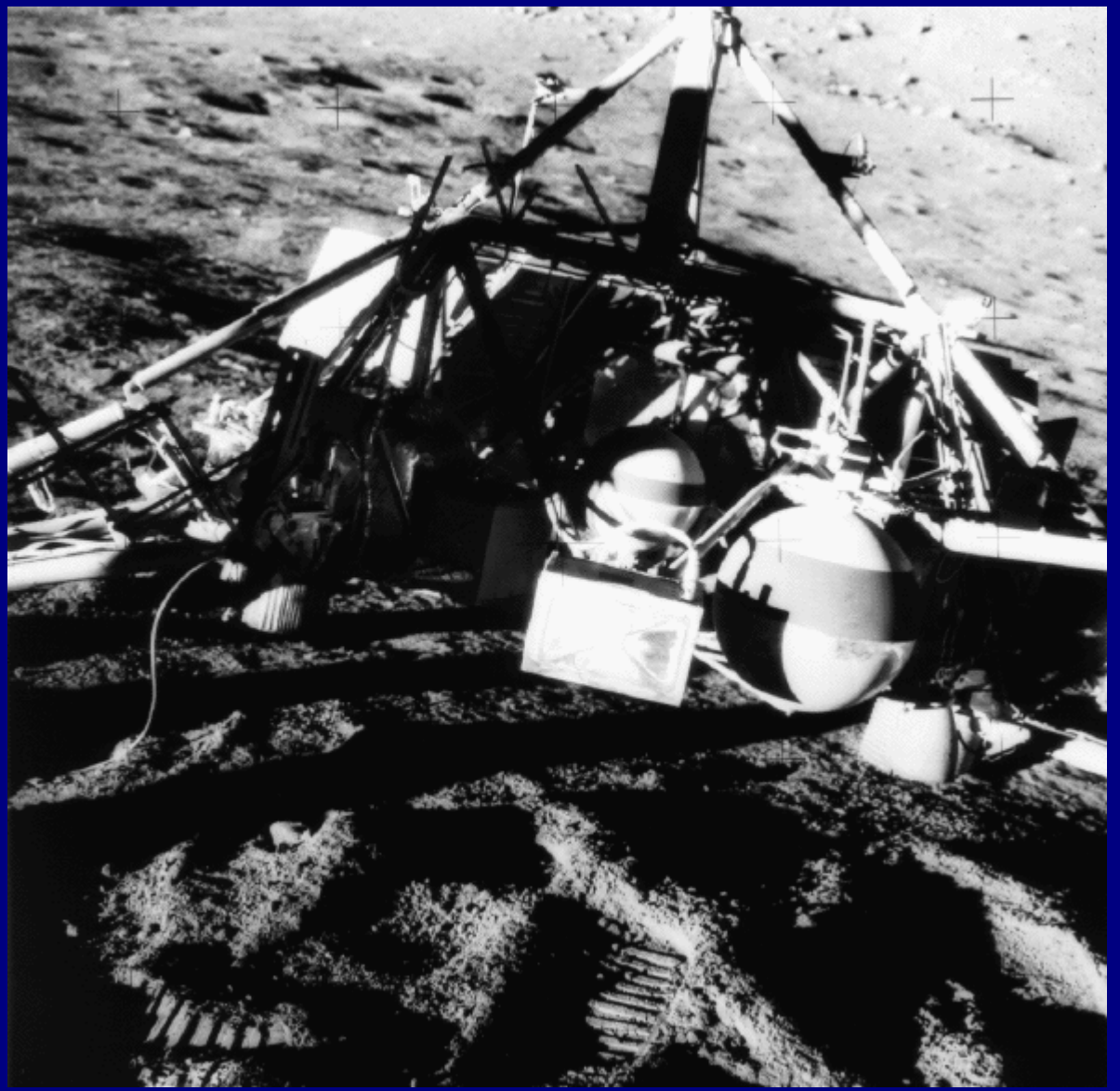
Y-a-t-il de l'érosion sur la Lune ? Comment fonctionne-t-elle ? Que produit-elle ?

Surveyor 3, sur la Lune.

Surveyor a convaincu la NASA que la poussière est assez dense pour porter un LM et des astronautes. On craignait de s'y enfoncer à plusieurs mètres.

Passé le premier centimètre, la densité de la poussière est environ la moitié de celle de la matière dont elle est faite (le reste est du au vide entre les grains).

Ici, Surveyor après un séjour de 2,5 ans sur la Lune, vu par Apollo 12. Il est propre.



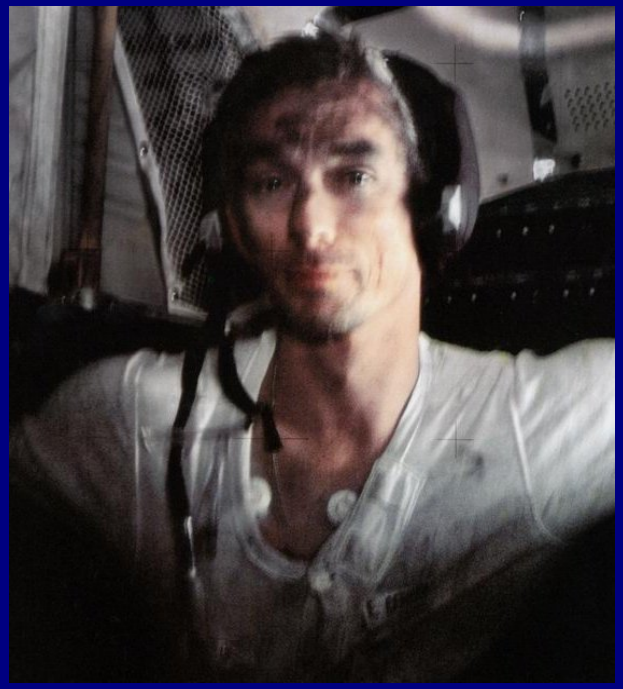
La lune est couverte d'une poussière fine. Il y en a partout.

Apollo 17. Harisson Schmitt faisant la collecte. Son scaphandre est gris de poussière.

La lune est couverte d'une poussière fine. Il y en a partout.

Apollo 17. Gene Cernan se reposant dans le LM (dépourvu de douche).

La lune est couverte d'une poussière fine. Il y en a partout.

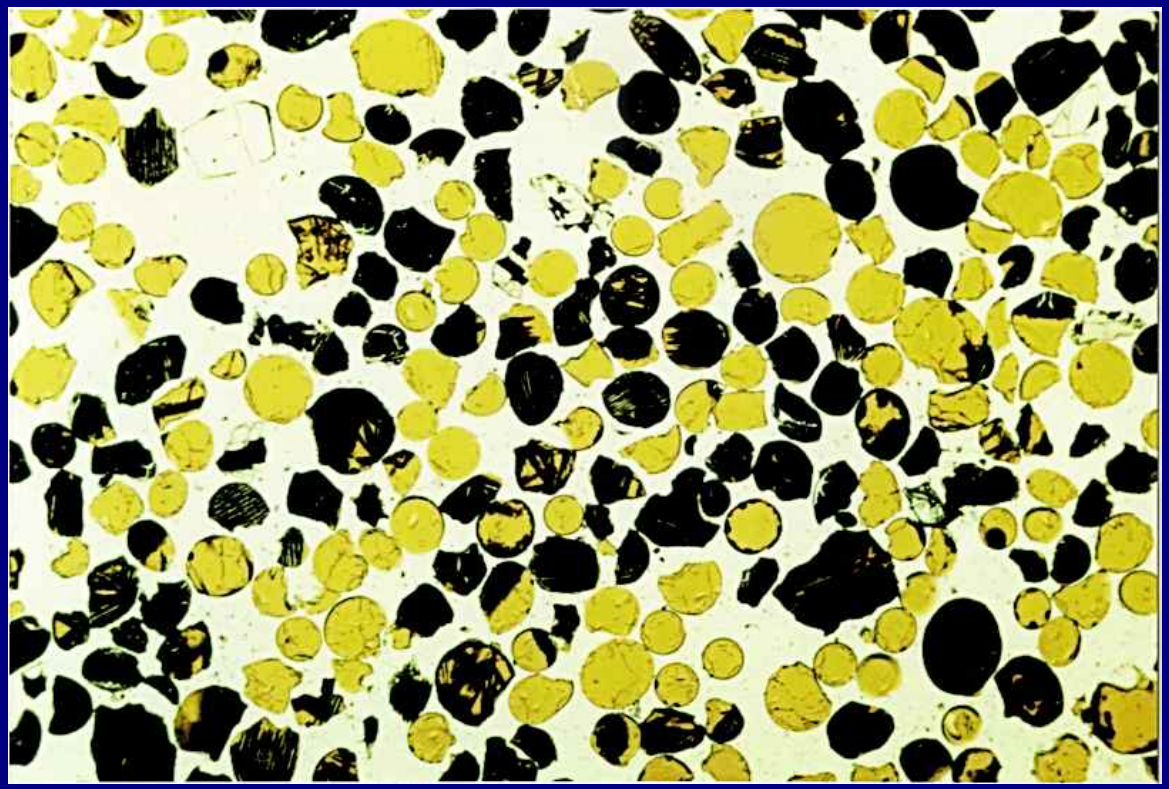


Feel it—it's soft like snow, yet strangely abrasive.

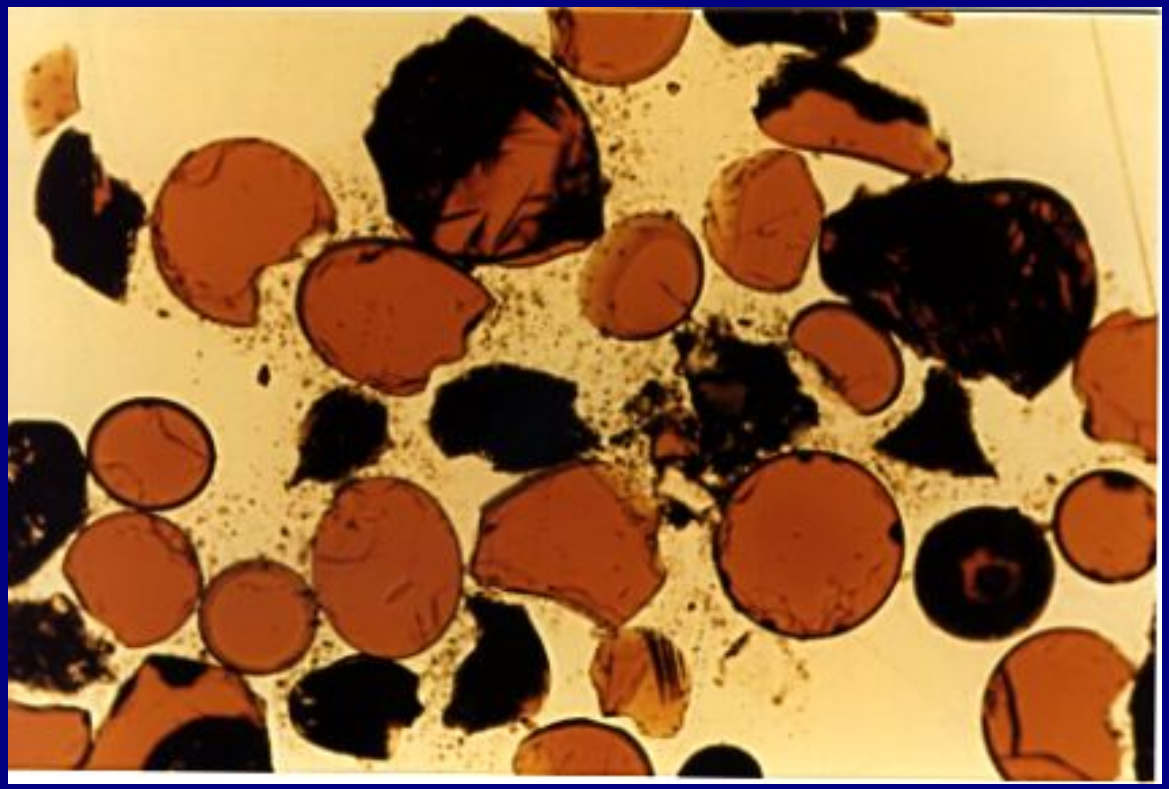
Taste it—"not half bad," according to Apollo 16 astronaut John Young.

Sniff it—"it smells like spent gunpowder," says Cernan.

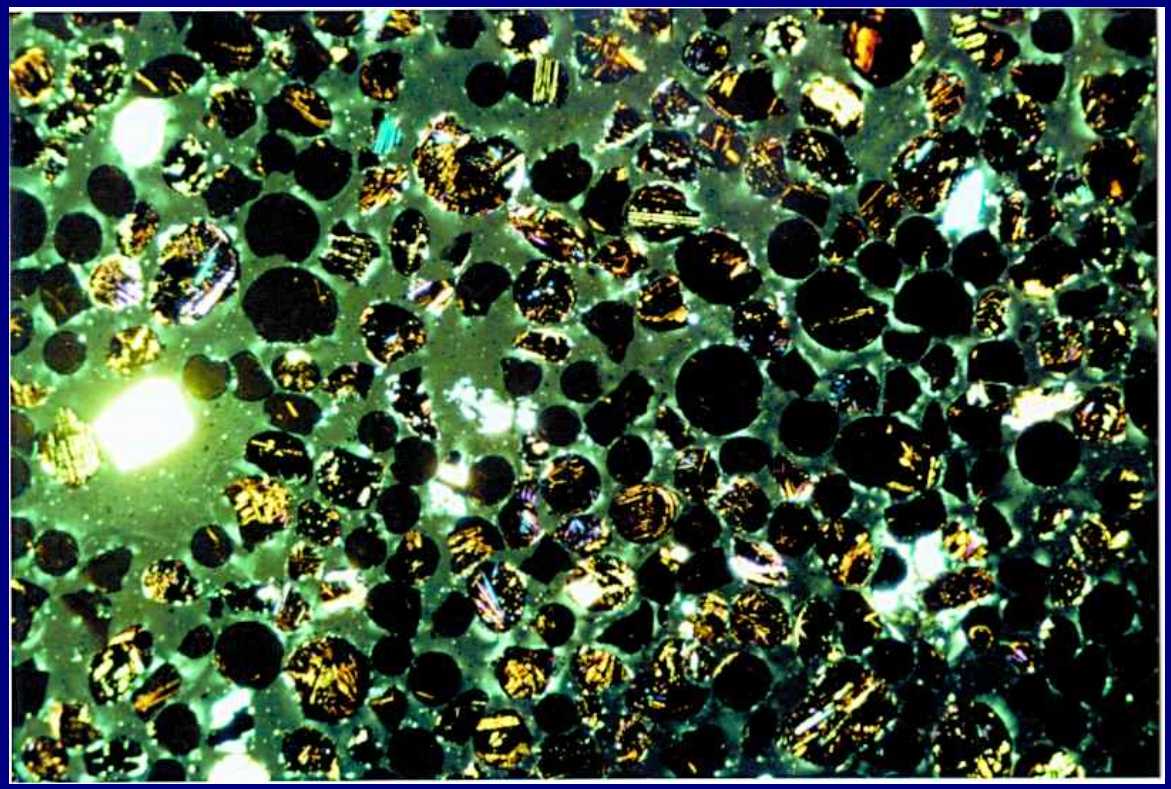
Elle est très collante. Impossible de la retirer des scaphandres.



régolithe du type « brown glass » rapporté par Apollo 17.



régolithe du type « brown glass » rapporté par Apollo 17.



régolithe du type « brown glass » rapporté par Apollo 17.

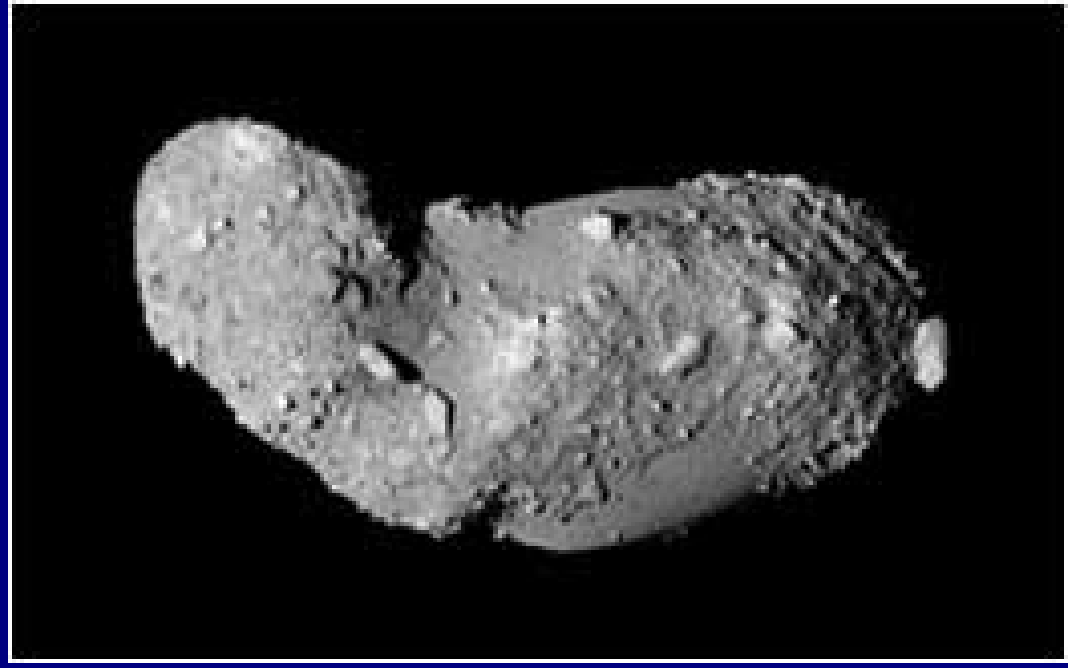
Phobos (satellite de Mars), comme presque tous les astéroïdes connus est également couvert de régolithe. [Mars Express, ESA]

Processus de mélange du régolithe :

éjectas (bombardement météorite)

glissement de terrain (vibrations)

convection granulaire (secousses verticales)



Itokawa [Hayabusa, JAXA]

Eros [NASA]

Le cycle de formation du régolithe

Bombardement de micro-météorites :

Broyer roches en surface, fondre, former des gouttelettes (sphérules, agrégats vitreux). Cratères de toutes tailles y compris microscopiques. N'agit que sur le premier centimètre.

A cause du choc, les grains fins passent sous les gros. Un grain de 1 micron ne reste que quelques milliers d'années en surface, à 100 microns, il y reste qq 100 000 ans.

Brassage horizontal (éjectas)

Impossible de dater la couche superficielle (1-3 cm).

Le cycle de formation du régolithe

Bombardement par le vent solaire.

Le flux le plus intense (10^8 protons /cm^3.s)

Energie keV/nucléon : pénètre à moins de 0,1 micron. N'irradie que les grains en surface. Les particules solaires restent piégées dans le grain.

Bombardement par les rayons cosmiques solaires.

1 MeV/nucléon. Pénètre à quelques microns.

Le cycle de formation du régolithe

Bombardement par les rayons cosmiques galactiques.

100 moins abondant que le solaire.

1GeV/nucléon : pénètre à 1 mètre, induit réactions nucléaires.

Le cycle de formation du régolithe

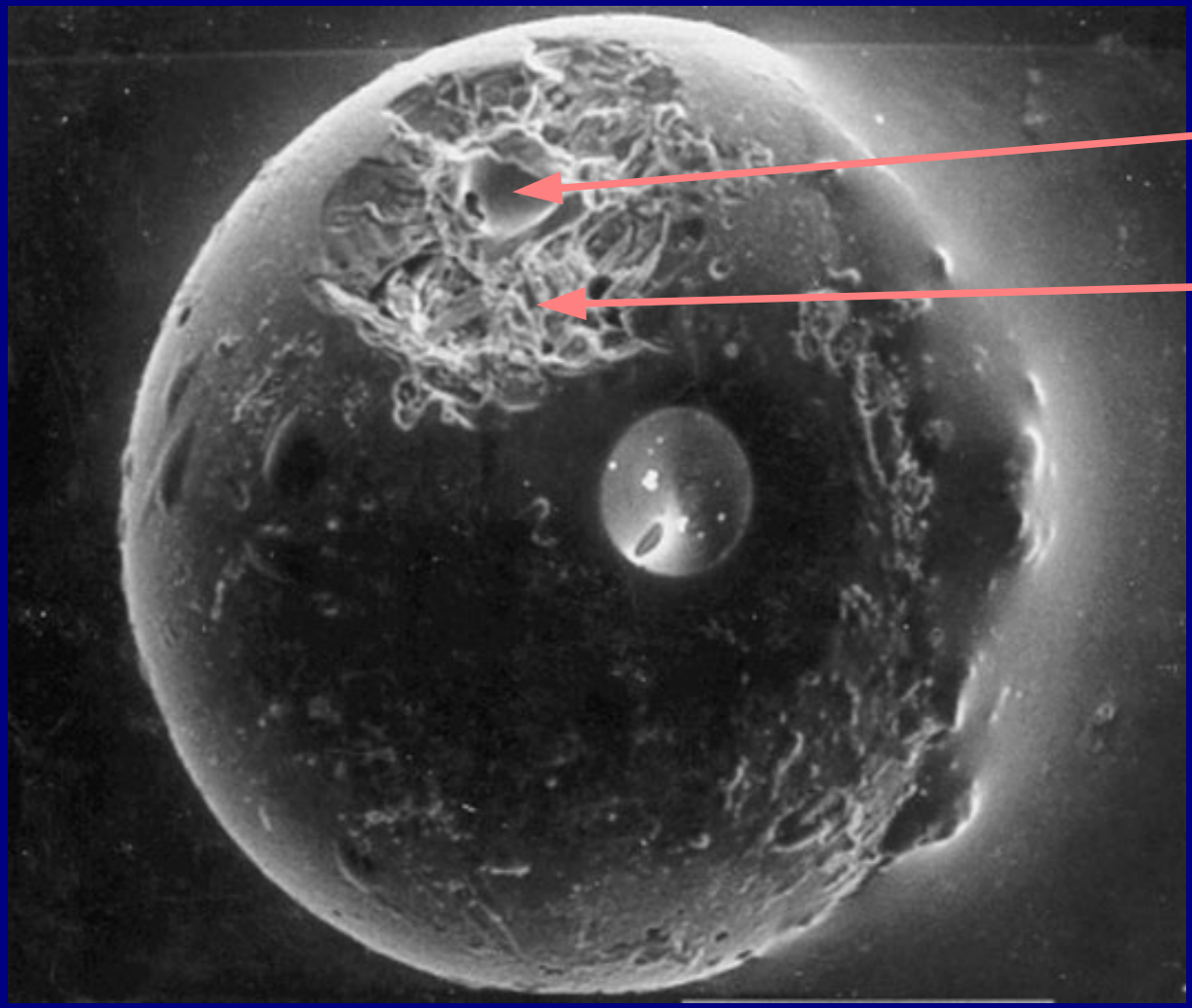
Vieillissement progressif du régolithe.

Emousse les cratères. Un cratère de 100 m à bords francs est érodé (bords arondis) en qq 100 millions d'années.

Augmentation des verres (au détriment du Fer), assombrissement progressif de la surface. En effet les éjectas récents (Kepler, Copernic) sont plus clairs.

Les cratères

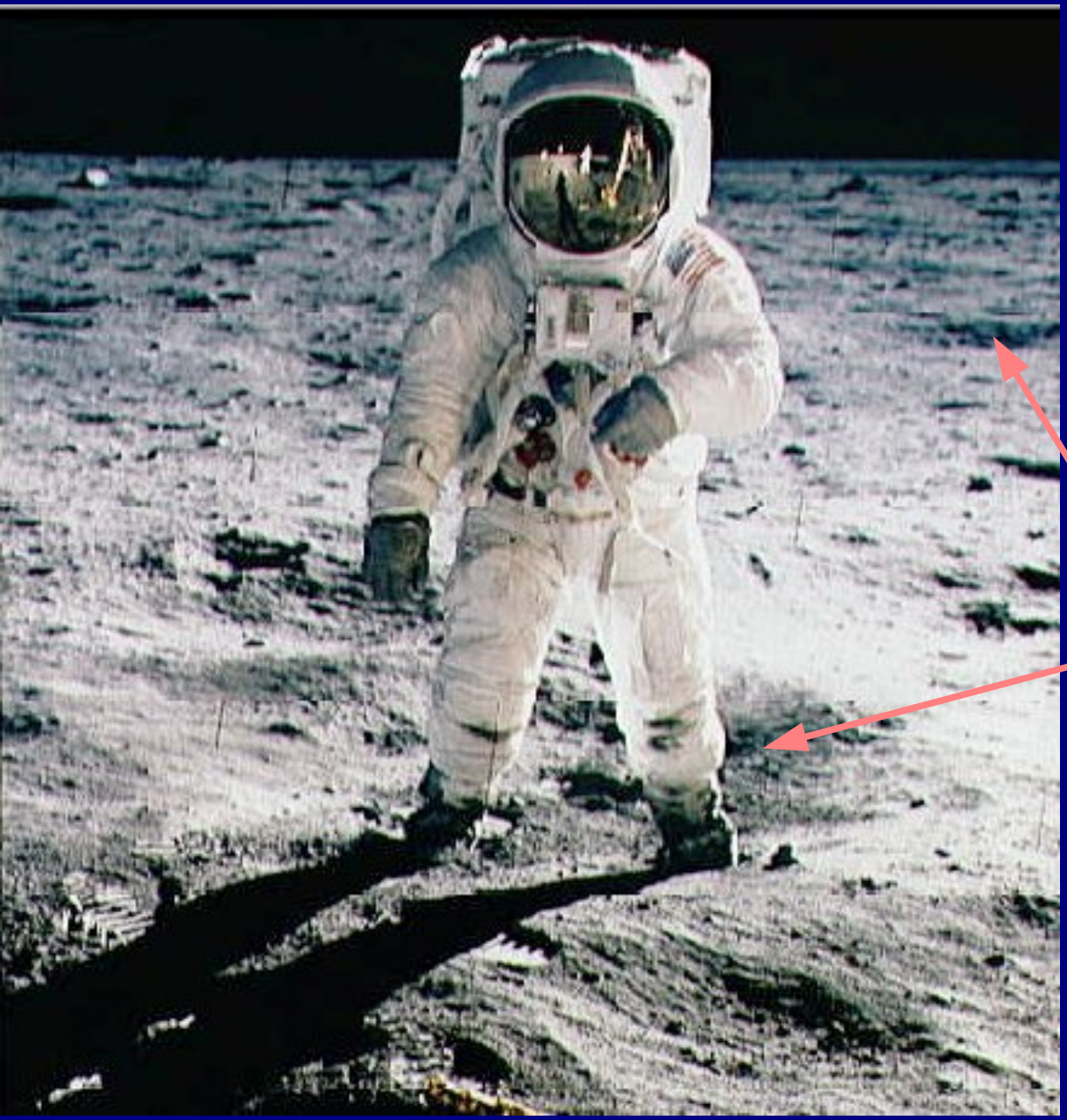
Il existe des cratères de toutes dimensions.



Sphérule de verre (0,25 mm) rapportée par Apollo 11.

[NASA, T.Culler (UCB), paru dans APOD mai 2007]

Il existe des cratères de toutes dimensions.

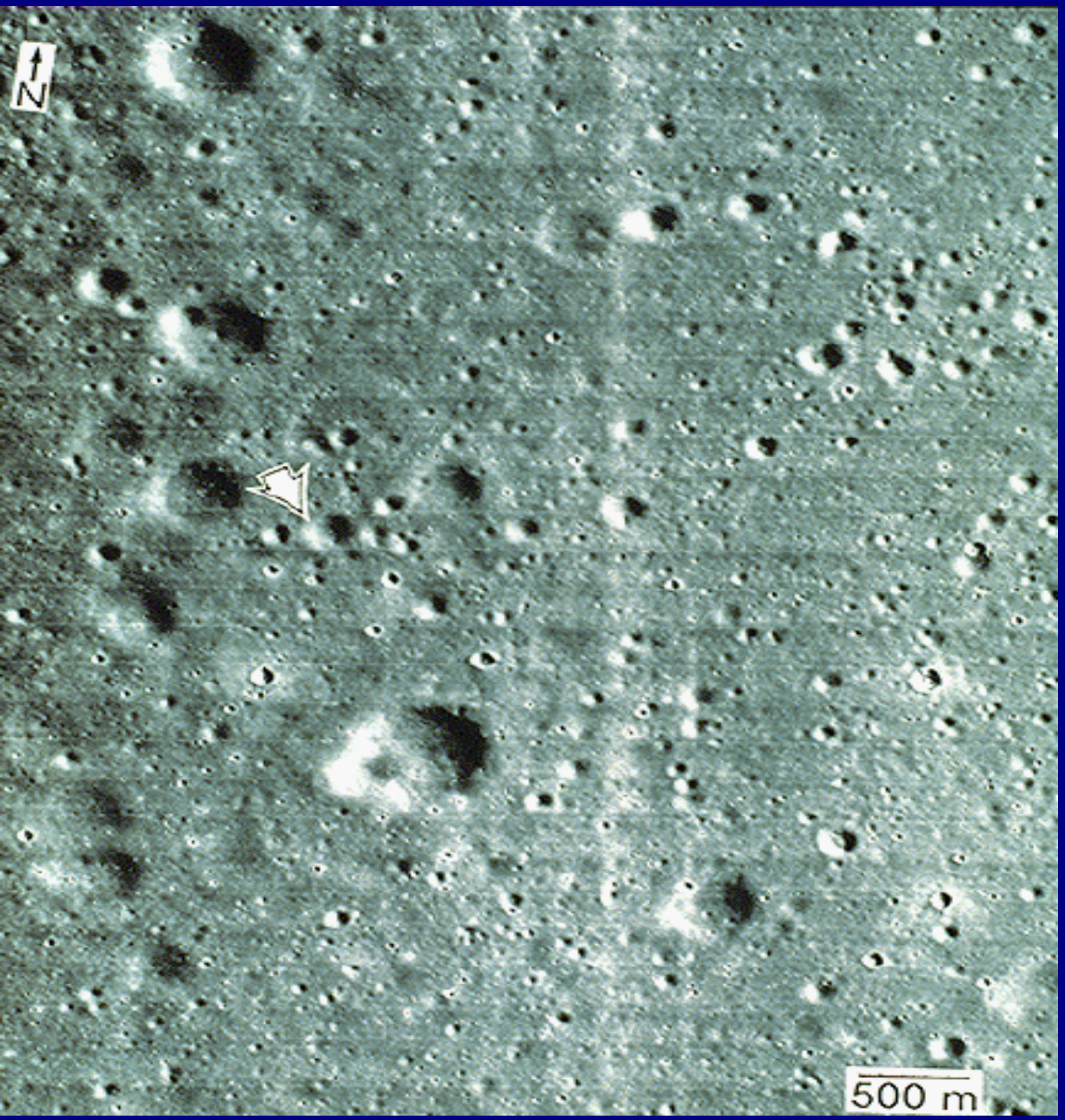


Petits cratères dans le régolith

Aldrin, Apollo 11.

Apollo 17, le cratère Shorty.
Ici, l'impact a atteint les couches rocheuses en dessous du régolithe.

Il existe des cratères de toutes dimensions.



site d'alunissage d'Apollo 12.

Il existe des cratères de toutes dimensions.

cratère Tycho.

Plus un cratère est grand, moins il est profond (en profondeur rapportée au diamètre).

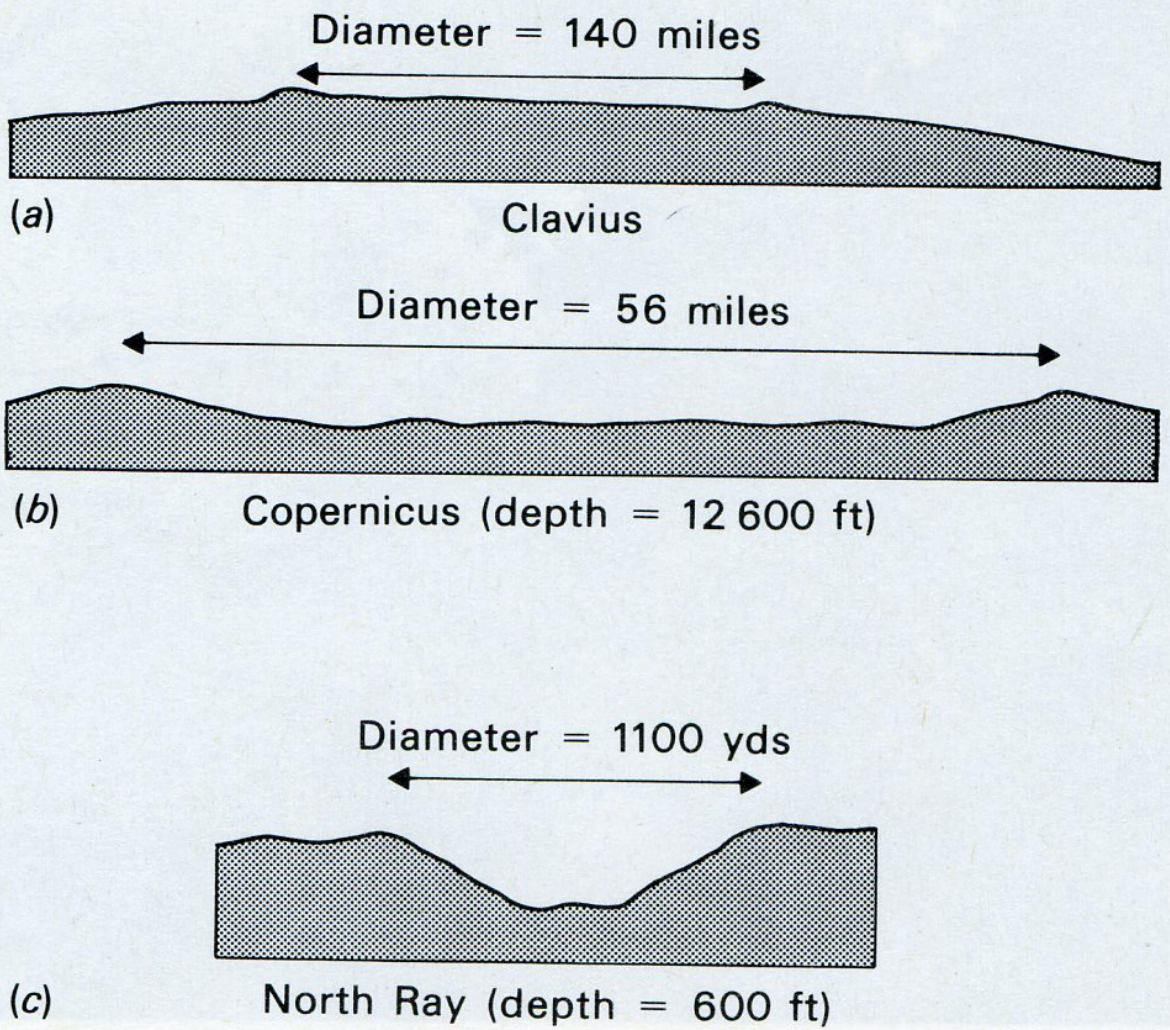


Figure 1.28. *Crater cross sections*. These typical cross sections show how shallow all but the smallest and freshest craters are, relative to their diameters. There is no vertical exaggeration in this diagram. Note how the largest craters are relatively less deep, and have flatter floors.

[Peter Cadogan, The moon our sister planet 1981]

Plus il est récent,

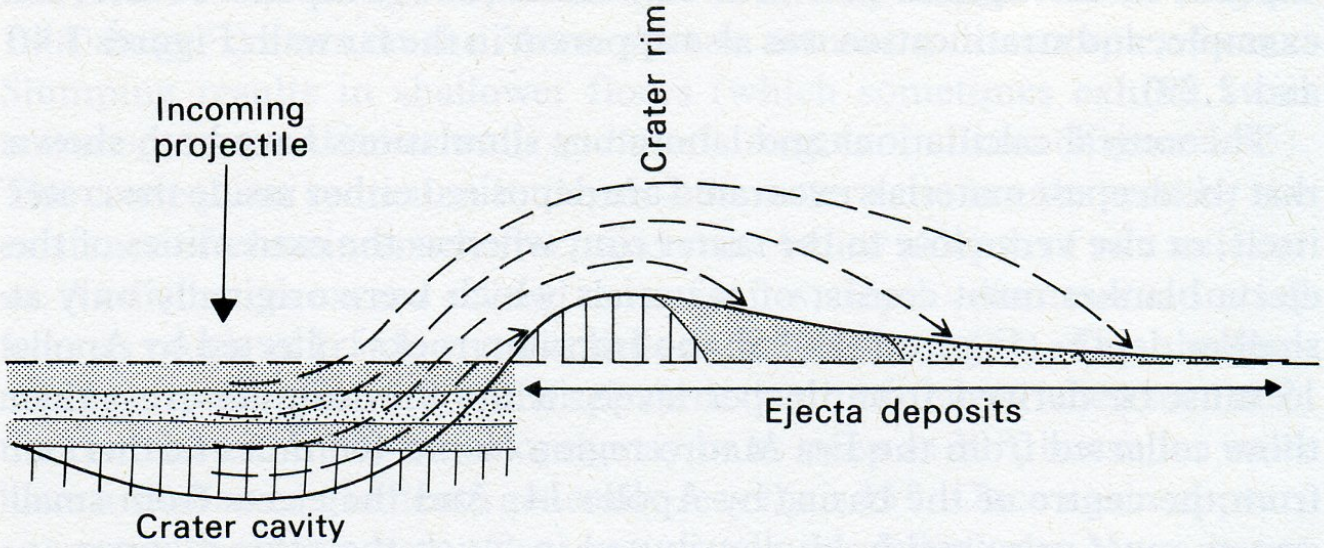
plus ses bords sont francs,

et plus il est clair.

Orbiter Apollo 15, Mare Imbrium,
Sinus Iridum, deux cratères :
Helicon A, 25km, 1,9 km
Helicon B (devant) 5,6 km, 1,1 km.

Les cratères : le processus principal du modelage de la surface lunaire.

Figure 1.41. *Ejecta thickness distribution*. The thickness of the ejecta blanket from a crater decreases sharply with distance from the crater rim. The deepest materials are deposited closest to the rim, with shallower ejecta being deposited further out.



Formations de verres : spherules 0,1 mm.

Un peu par volcanisme, surtout par impact.

Gouttes cristallisant en vol.

Datation échantillons éjectas cratère Copernic (Apollo 12) : < 500 MA.

Sur Terre, des sphérules analogues sont crées lors d'éruptions volcaniques.
Mais elles refroidissent dans l'air et retombent plus vite.
Elles sont plus grosses (1 cm).

Sphérules prélevées par Apollo 15.

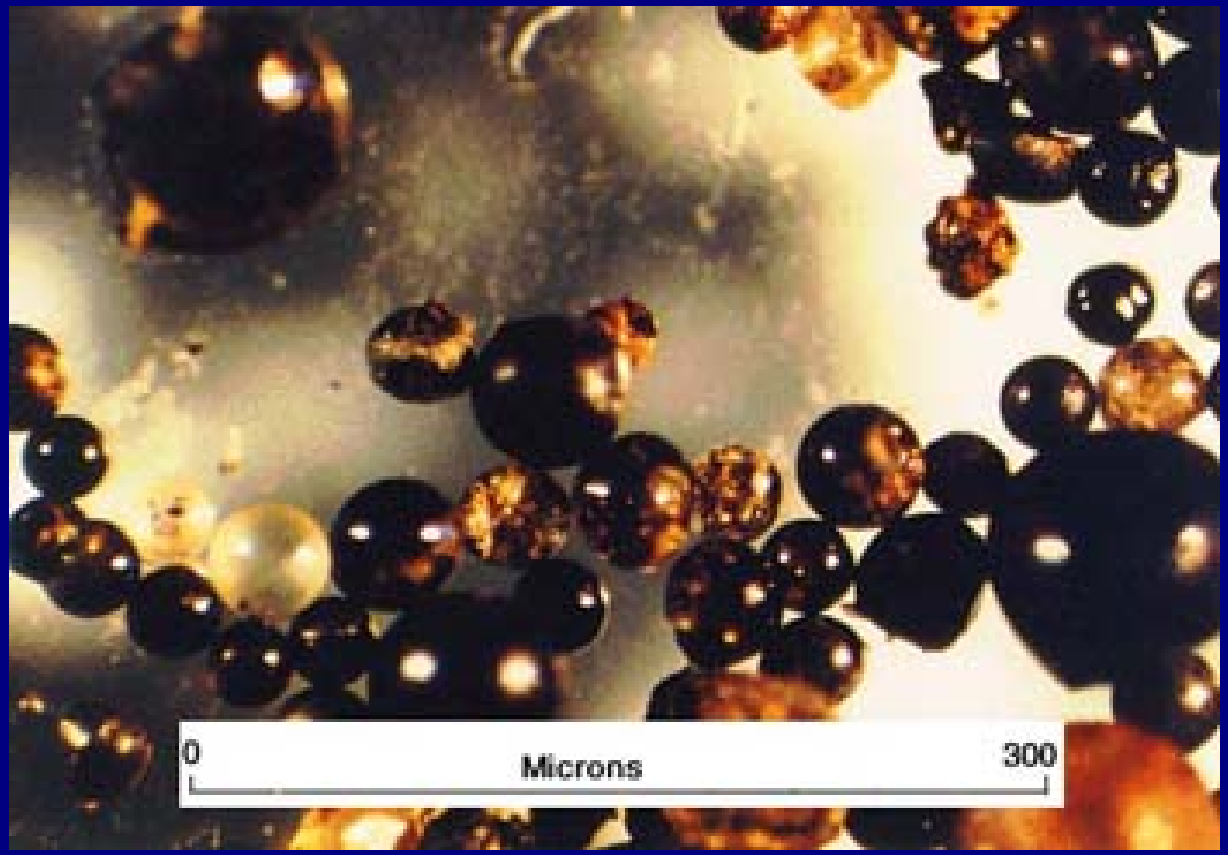
Formations de sphérules.

Sur Terre, des sphérules analogues sont crées lors d'éruptions volcaniques.
Mais elles refroidissent dans l'air et retombent plus vite.
Elles sont plus grosses (1 cm).

A gauche, tectite (impact) Indochine
A droite apache tear (volcanique) Arizona.

Des sphérules sont également observées sur Mars. Elles ne sont pas en verre.
Elles sont vraisemblablement en hématite et ont une toute autre origine associée à l'existence d'eau liquide et d'évaporation.
Mais il existe des explications alternatives liées à des impacts de météorites.

Formations de sphérules.

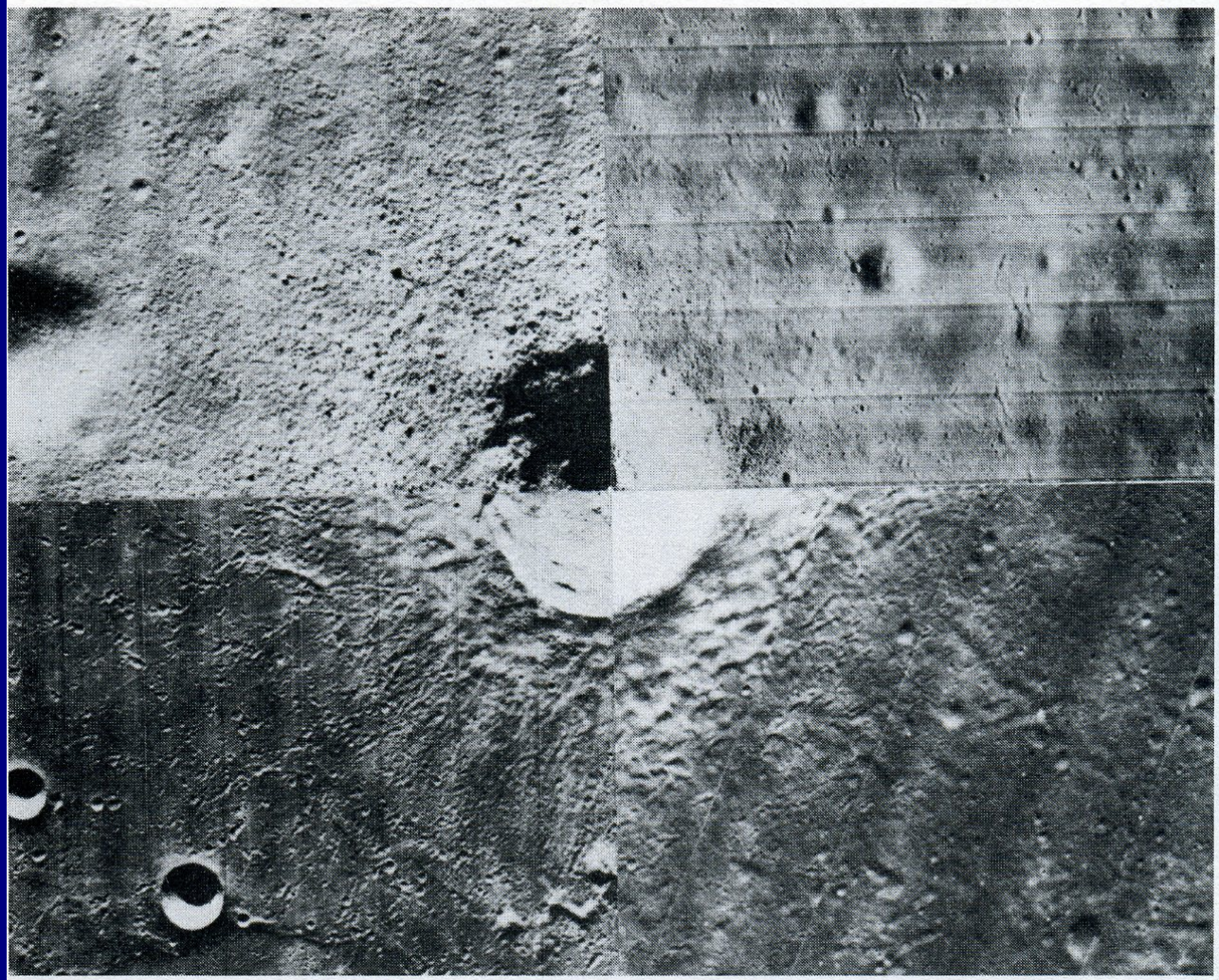


Sur Terre, des sphérules
sont crées lorsque des petites météorites
pénètrent dans l'atmosphère.
Elle chauffent,
se disloquent.
Une fois petites, elles tombent moins vite ;
elles ont le temps de refroidir,
de former un verre.

Sphérules de météorites
collectées dans l'Antarctique.

Les cratères : le processus principal du modelage de la surface lunaire.

Figure 1.42. *Ejecta blanket characteristics*. The nature of the ejecta blanket around a crater changes with increasing crater diameter. As this diameter rises from about 300 yards (top left) to 13 miles (clockwise to bottom left), the abundance of blocks decreases and there is a corresponding increase in secondary cratering and the development of dunes and furrows. (From Oberbeck, V. R., Morrison, R. H., Horz, F., Quaide, W. L. & Gault, D. E. (1975). *Proceedings of the Fifth Lunar Science Conference*, pp. 111–36. New York: Pergamon.)



Les cratères : le processus principal du modelage de la surface lunaire.

Davy chain photographiée par Lunar Orbiter 4. Le cratère principal fait 15 km. Un bel exemple de cratères secondaires. Ou bien, le météore s'est désintégré en plusieurs morceaux (comme la comète Schomaker-Levy) avant l'impact.

Les cratères : jusqu'où peuvent aller les éjectas ?

Dhofar 081 (174 g)
feldspathic glassy-matrix
fragmental breccia.
[Meteoretical Bulletin]

NWA 773
As with Dhofar 287, the stone appears to be a portion of a regolith breccia that contains a large clast of cumulate olivine gabbro and many small clasts.
[Fagan et al., 2003; photo Marvin Killgore]

Vitesse d'échappement de la Lune : 2,38 km/s (10 fois celle d'une balle de fusil).
31 météorites recensées (21 non appariées) sur 31 000 météorites cataloguées.
Arrivent sur Terre après un long séjour en orbite (qq 10^8 ans). Datées par l'usure causée par le vent solaire (sur toutes les faces).

Les cratères : jusqu'où peuvent aller les éjectas ?

Météorite martienne ALHA 77005.

Les cratères : jusqu'où peuvent aller les éjectas ?

The Dhofar 018 is an Howardite with a variety of xenoliths, such as CM and LL chondrites and an aubrite. A brownish stone weighing 833g was found in the desert. Mineralogy and classification
(M. Nazarov and M. Ivanova, Vernad;
L. A. Taylor, UTenn)
A vendre.

Météorites de Vesta .
Vesta, après un bombardement créant un énorme cratère aurait disséminée des fragments. Certains, déstabilisés par l'influence gravitationnelle de Jupiter auraient adopté une orbite croisant la Terre.

Les cratères

Les temps de grand bombardement

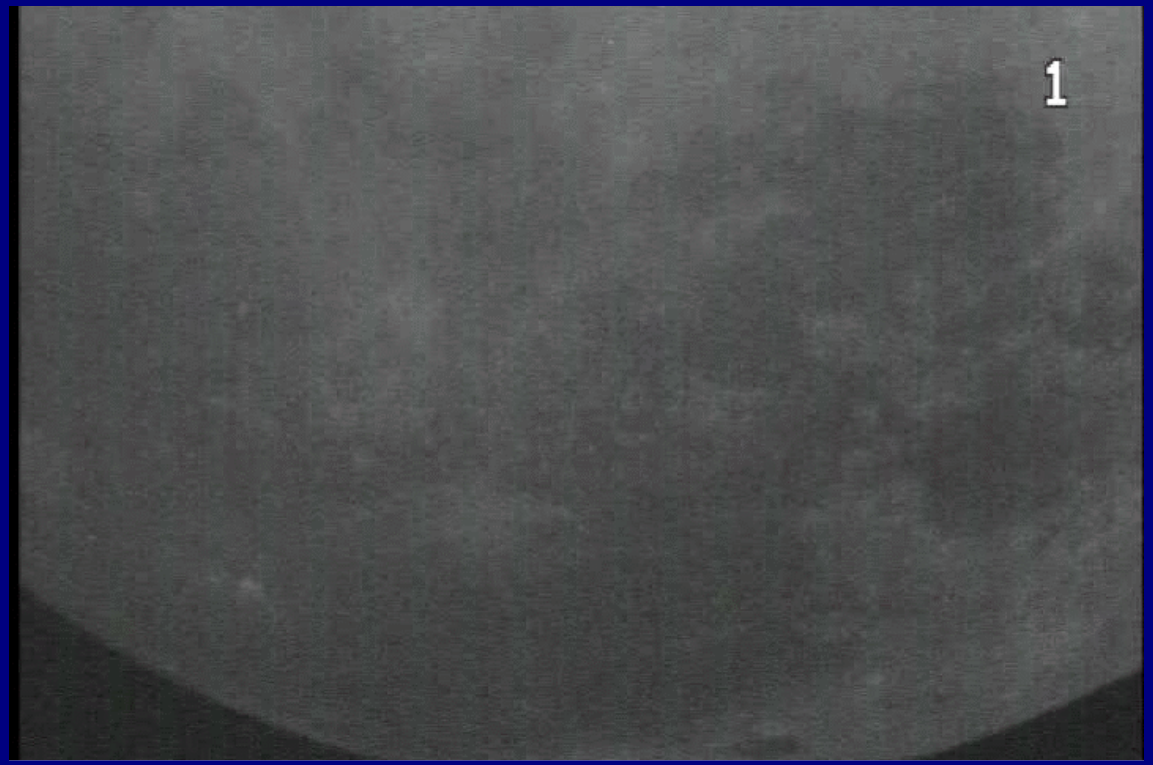
Dans les 800 premiers millions d'années du système solaire, bombardement extrêmement intense.

Les roches, même des mers, sont souvent si anciennes.

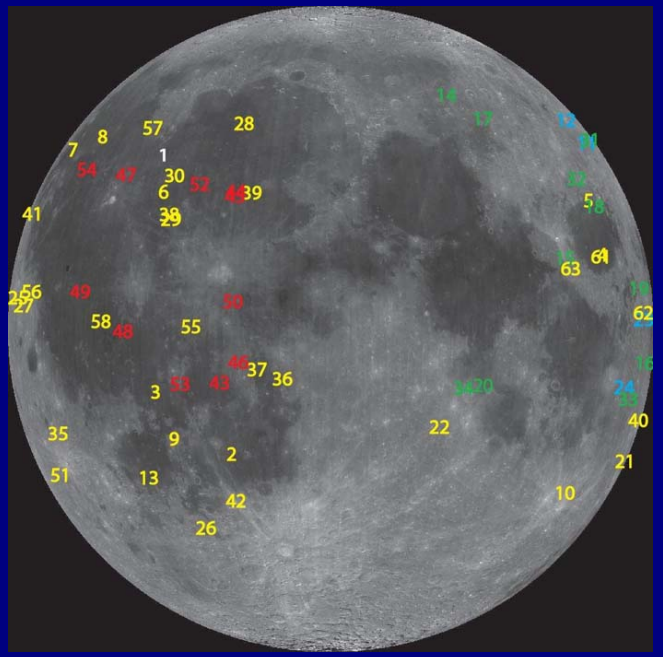
De nombreux cratères lunaires seraient des témoins de cette époque extrêmement reculée.

Les cratères

Y en-a-t-il de nouveaux ? Oui.



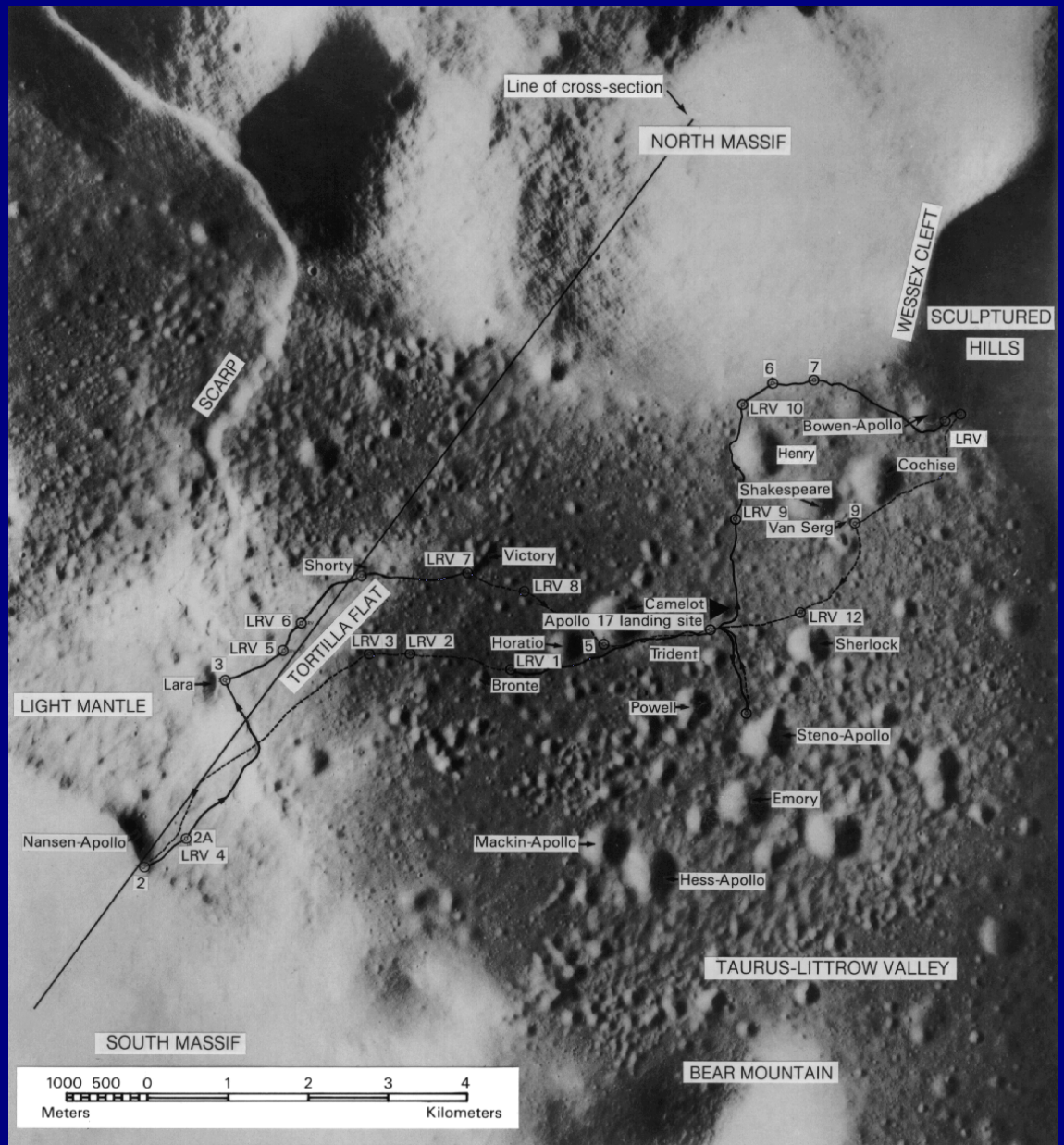
Un impact avec un éclair observé le 2 mai 2006 avec un télescope de 25 cm. 0,4 seconde, magnitude 7. Météorite de 25 cm, 38 km/s, 27 Giga Joules.



65 impacts lunaires observés par Cook et al. depuis 2005. [Marshall space center, Huntsville, Alabama. NASA]

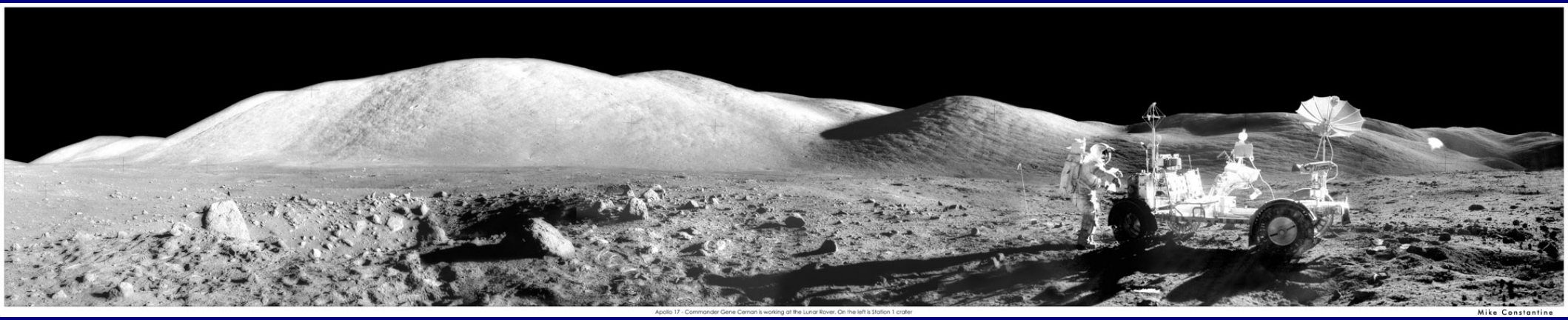
Les zones continentales, ou highlands, montagnes etc.

Quelle est la nature des zones « continentales » ?



Site et expéditions d'Apollo 17 dans la région Taurus-Littrow.

Quelle est la nature des zones « continentales » ?

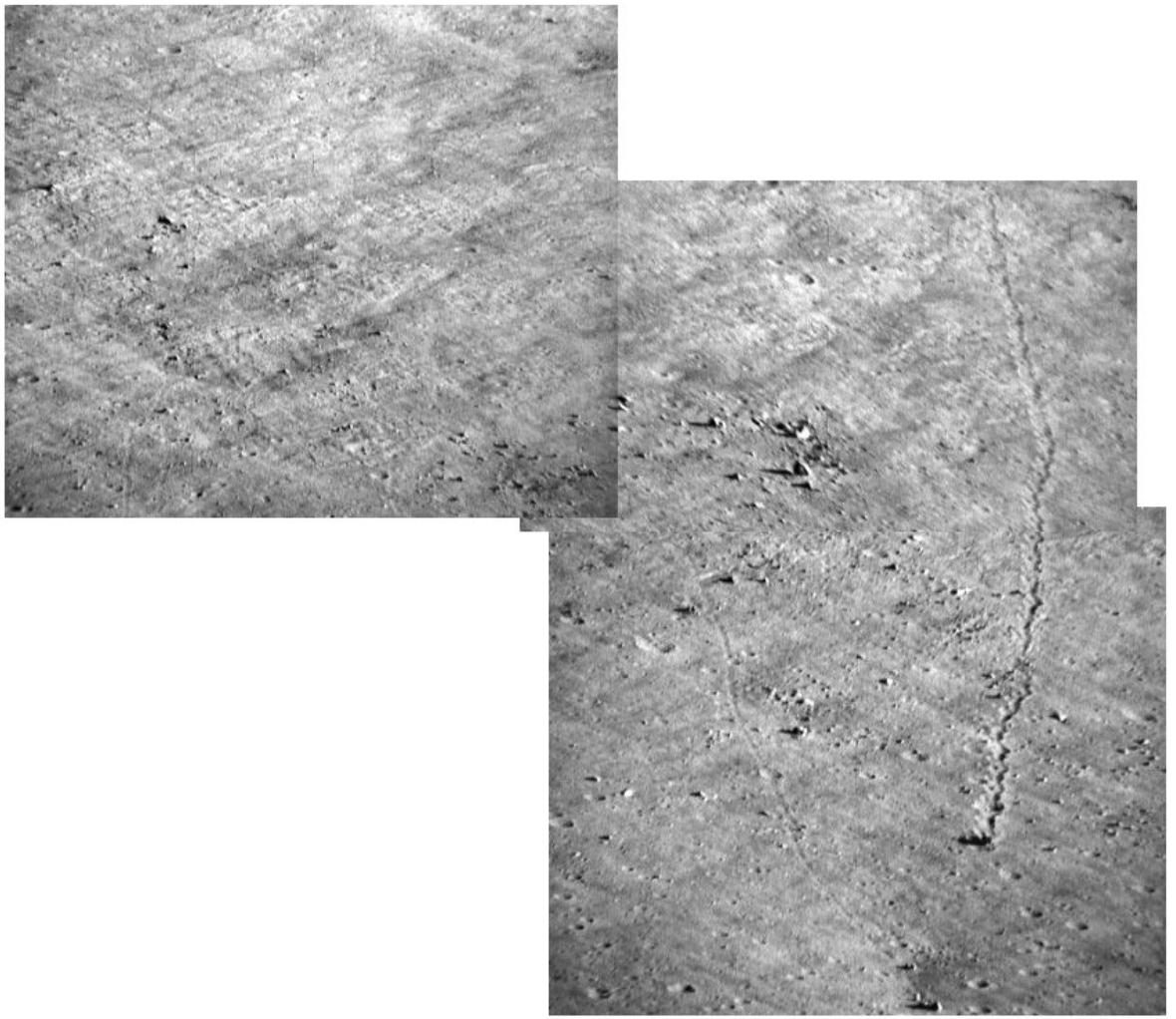


Apollo 17 dans la région Taurus-Littrow.
Vue panoramiques .

Zone continentale. Taurus-Littrow

Champ de rochers et North Massif.

Zone continentale.
Taurus-Littrow



Sur North Massif,
la trace d'un rocher qui a roulé.
Des glissements de terrains
« récents » sont donc possibles).

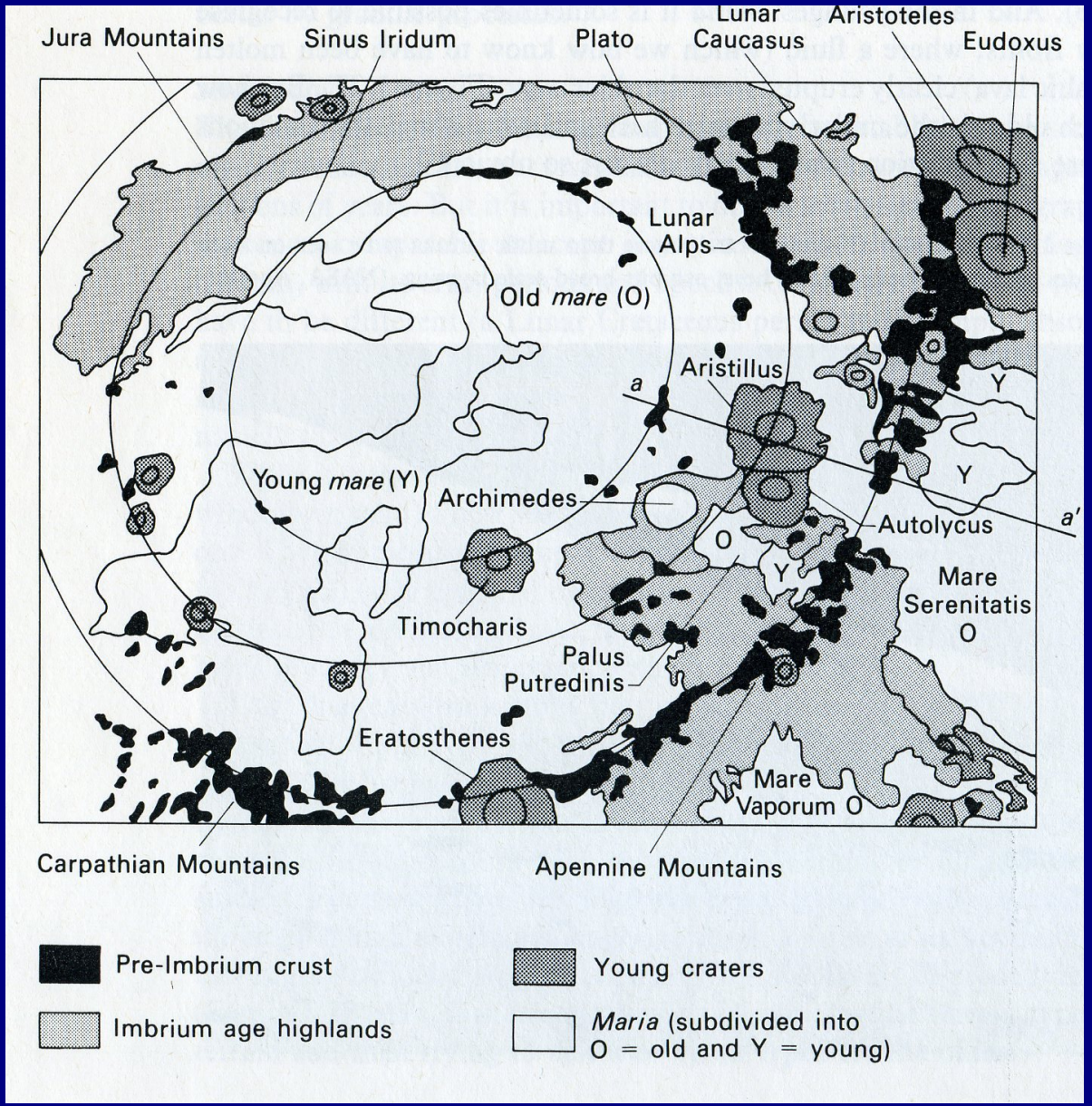
Quelle est la nature des zones « continentales » ?

La classification des montagnes (higlands) est plus controversée que pour les mers.

Ce sont des terrains bien plus riches en cratères, donc plus anciens.

Il apparaît que les montagnes sont placées autour de bassins, presque circulairement.

Ci contre, le bassin de « mare imbrium »
[The moon our sister planet, P. Cadogan]



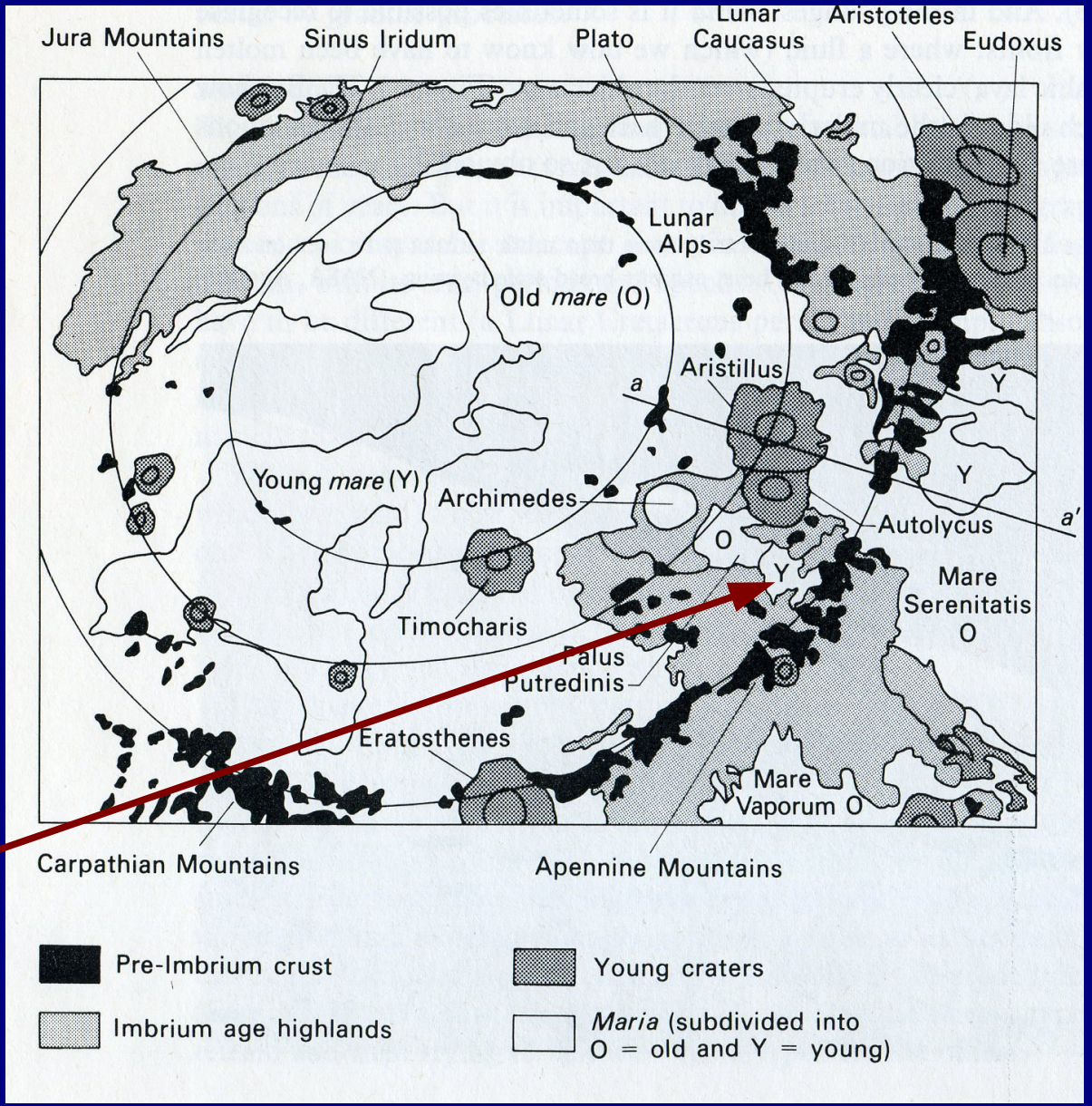
Peut-on étudier les strates géologiques ?

Pas de dépôts sédimentaires comme sur Terre (qui exigent de l'eau/liquide ou du vent).
Pas de datation paléontologique.

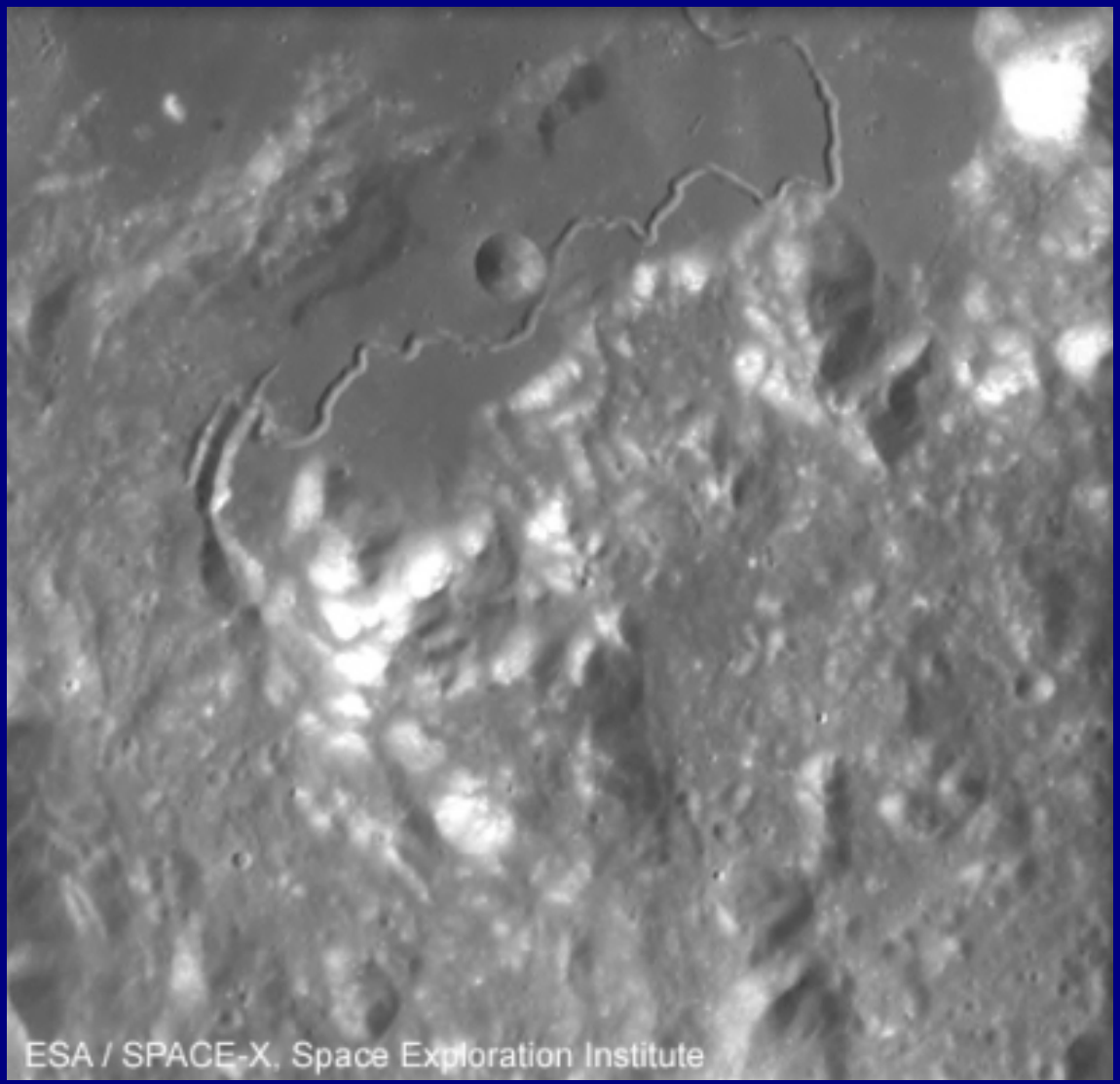
On envisage des strates formées par

- des couches de lave successives
- des couches diverses d'éjecta.

site d'Apollo 15, dans la mer jeune Palus Putredinis.



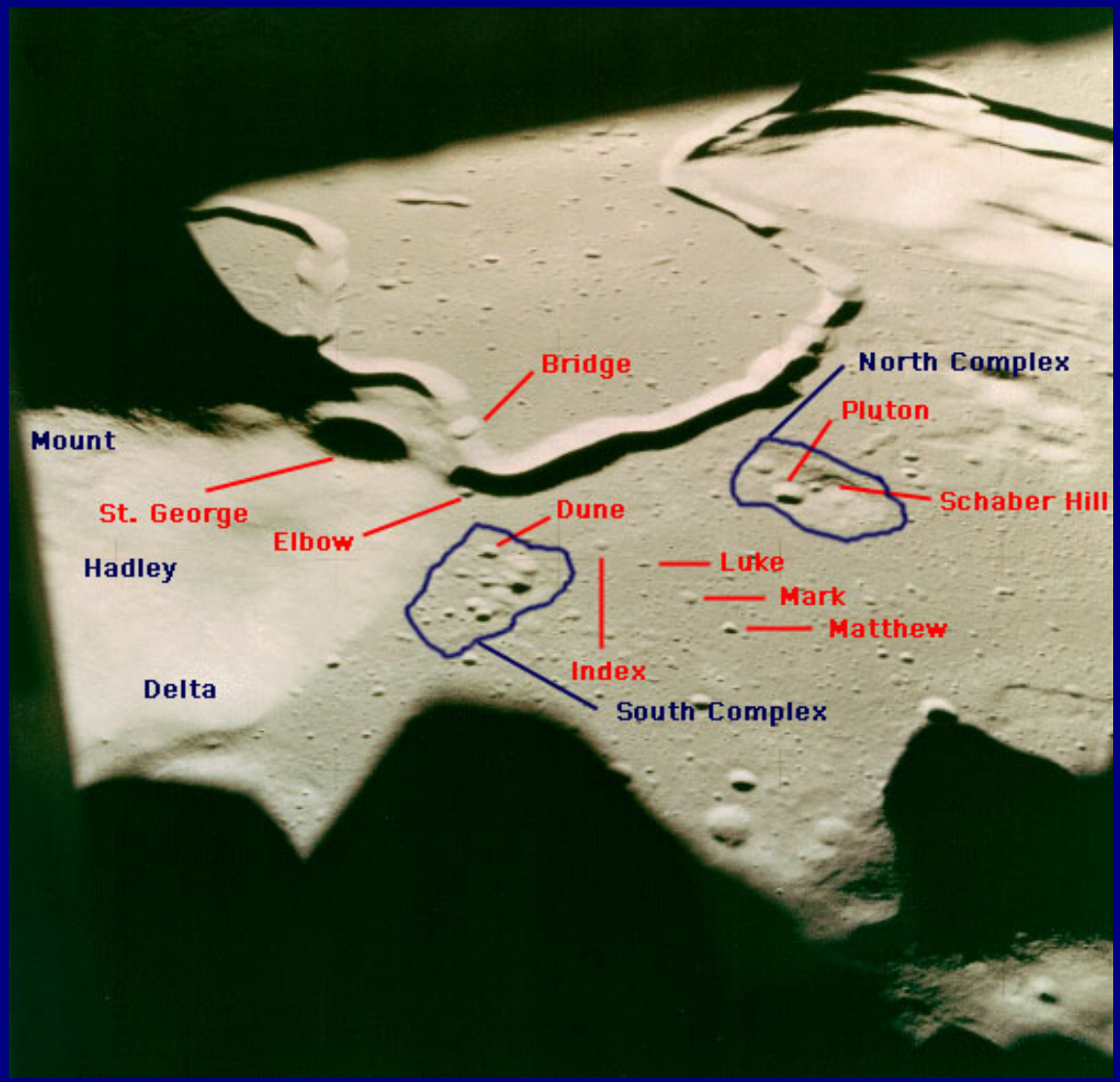
Explorer une région aux confins d'une mer. Apollo 15,16,17.



Le site Hadley, exploré par Apollo 15.

[SMART 1, ESA]

Explorer une région aux confins d'une mer. Apollo 15.

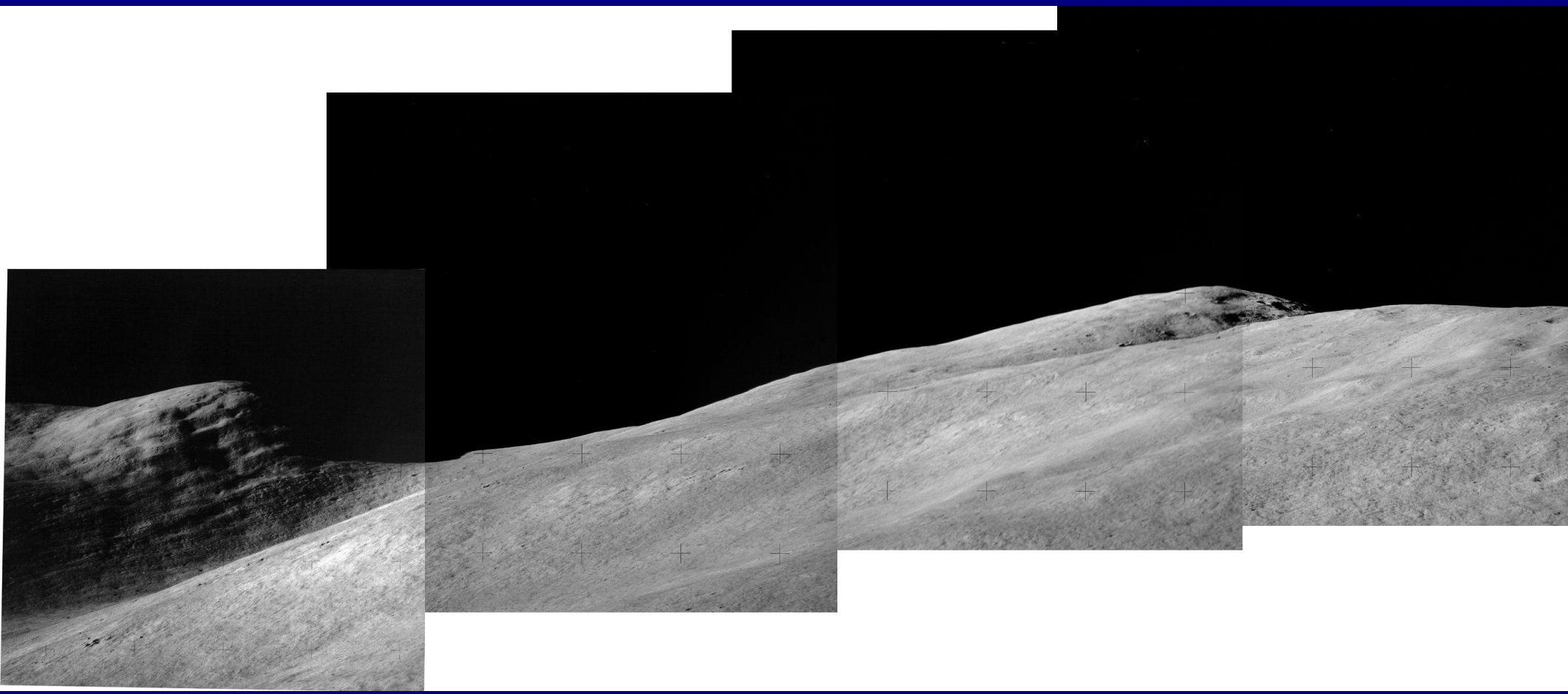


Le site Hadley, vu lu LM avant l'alunissage.

UNITED
STATES

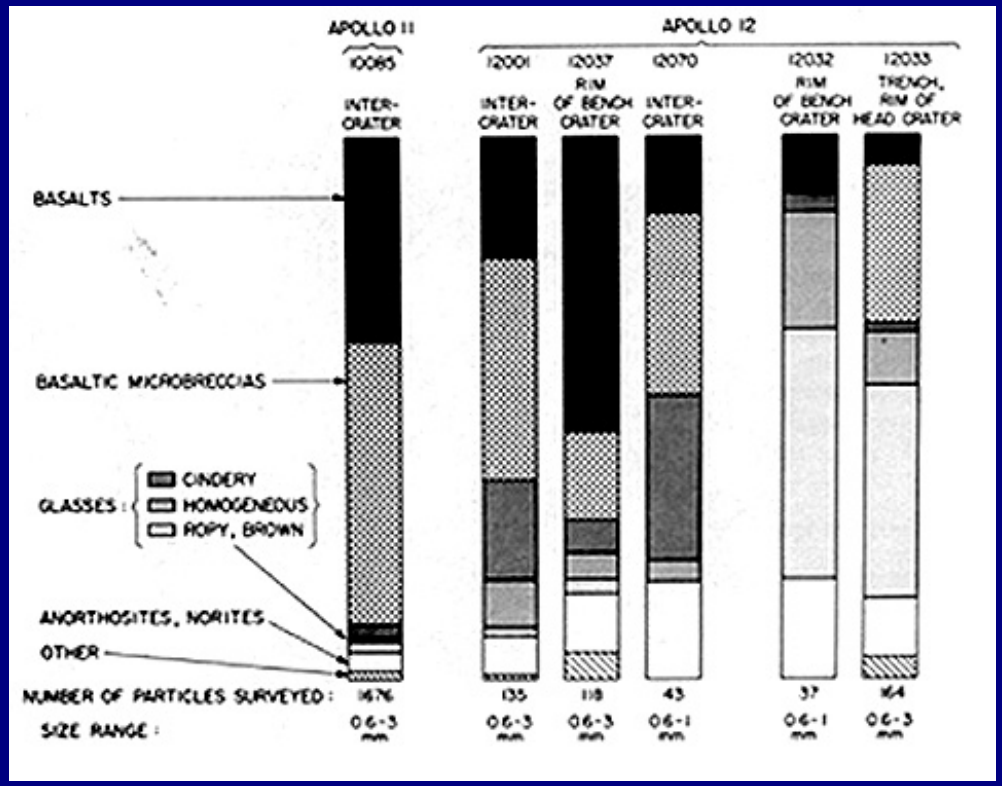
A partir d'Apollo 15,
la jeep a permis des EVA
plus loin du LM,
et la visite de terrains
de natures plus diverses.

Peut-on étudier les strates géologiques ?

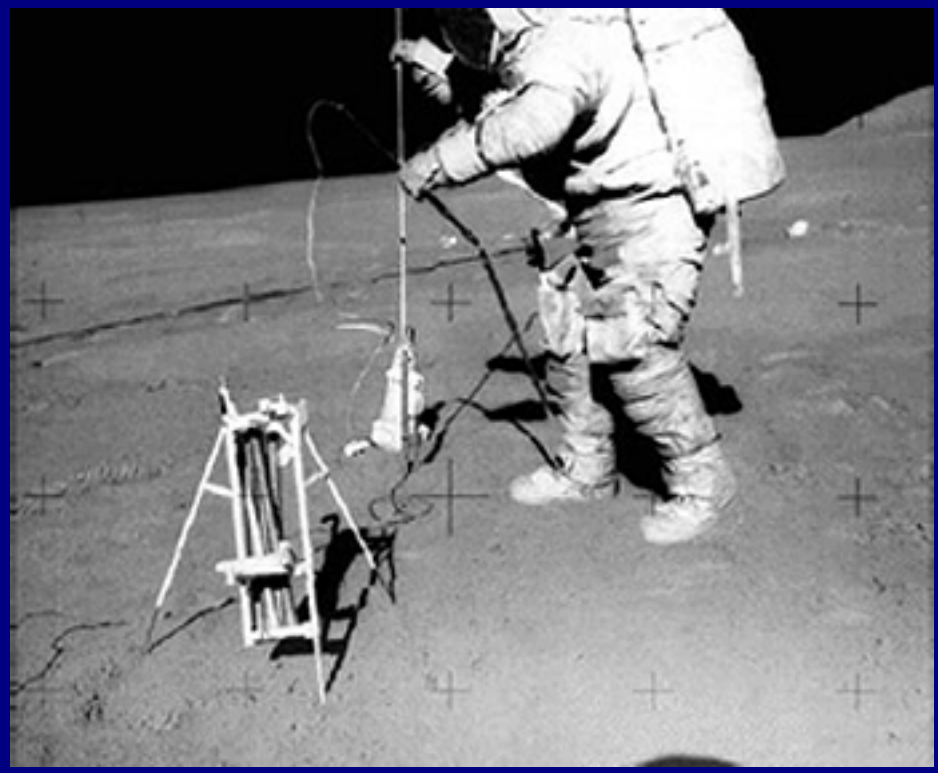


Silver Spur, Apollo 15. Un terrain stratifié.
Strates en affleurement (très rare).

Peut-on étudier les strates géologiques ?

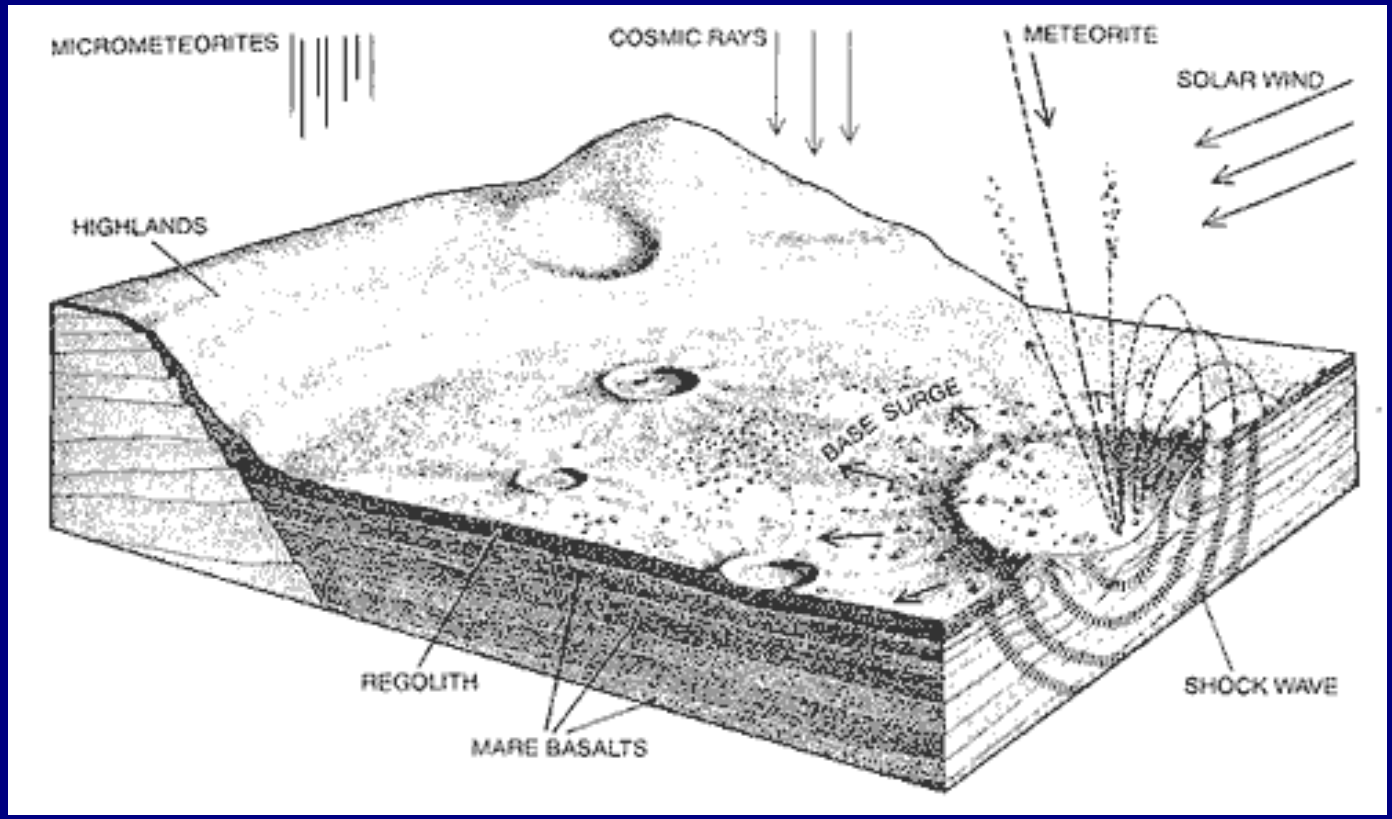


Résultats (schématisés) de carottes (Apollo 12) montrant effectivement une stratification des sols.



Forage, Apollo 15. Pas facile, sol dur. La carotte la plus longue : 2 mètres et quelques.

Origines des strates



Il y a bien longtemps : formation des bassins, puis coulées de lave.
Il y a eu aussi des coulées de lave dans les highlands.
Plus récemment :

- érosion des micrométéorites, rayons cosmiques, vent solaire ;
- éjectas des cratères (poussières, roche fondues, verre) ;
- glissements de terrain (bords des cratères)

Les roches des zones continentales

- plus riche en Al, Ca, plus pauvre en Ti, Fe.
- feldspath plutôt que du basalte.

  Un feldspath est un minéral à base de silicate double d'aluminium, de potassium, de sodium ou de calcium. Les feldspaths sont de la famille des tectosilicates. Il existe de nombreux feldspaths dont les principaux sont l'orthose, potassique, l'albite, sodique, et l'anorthite, calcique. Le mélange de ces deux derniers donne la série des plagioclases.

- des terrains anciens, très « mélangés » retravaillés. Beaucoup de verres, de basaltes, de breccias, granit. Métamorphisme (chocs).
- Une roche des origines, le KREEP

  Riche en potassium (K) éléments rares (REE) potassium (P) et uranium, thorium, zirconium... Sous diverses formes (verres, breccias, basalte).

Plagioclase lunaire, genesis rock, 4 MdA. Apollo 15 Anorthosite, riche en plagioclase.
Trouvée dans un cratère.

Komatiite (granite), 3,5 MdA (Aracheen), Groenland, Terre. Parmi les + anciennes.

La formation des sols alentours serait donc, vraisemblablement plus ancienne.
L'âge du système solaire est de 4,5 milliards d'années.
La formation des highlands se serait jouée dans le premier milliard d'années... à condition que la Lune fut formée en même temps que la Terre (et pas après).

Les roches des zones continentales

Une brèche récoltée par Apollo 16 dans des « highlands ».

C'est un agrégat de roches collées par du basalte, suite à un impact météoritique (fonte de certaines roches).

La datation du basalte indique que de tels impacts sont en général anciens (> 3MdA).

Des fragments de cette roches peuvent être des éléments de la croûte lunaire initiale, formée vers 4-4,5 MdA.

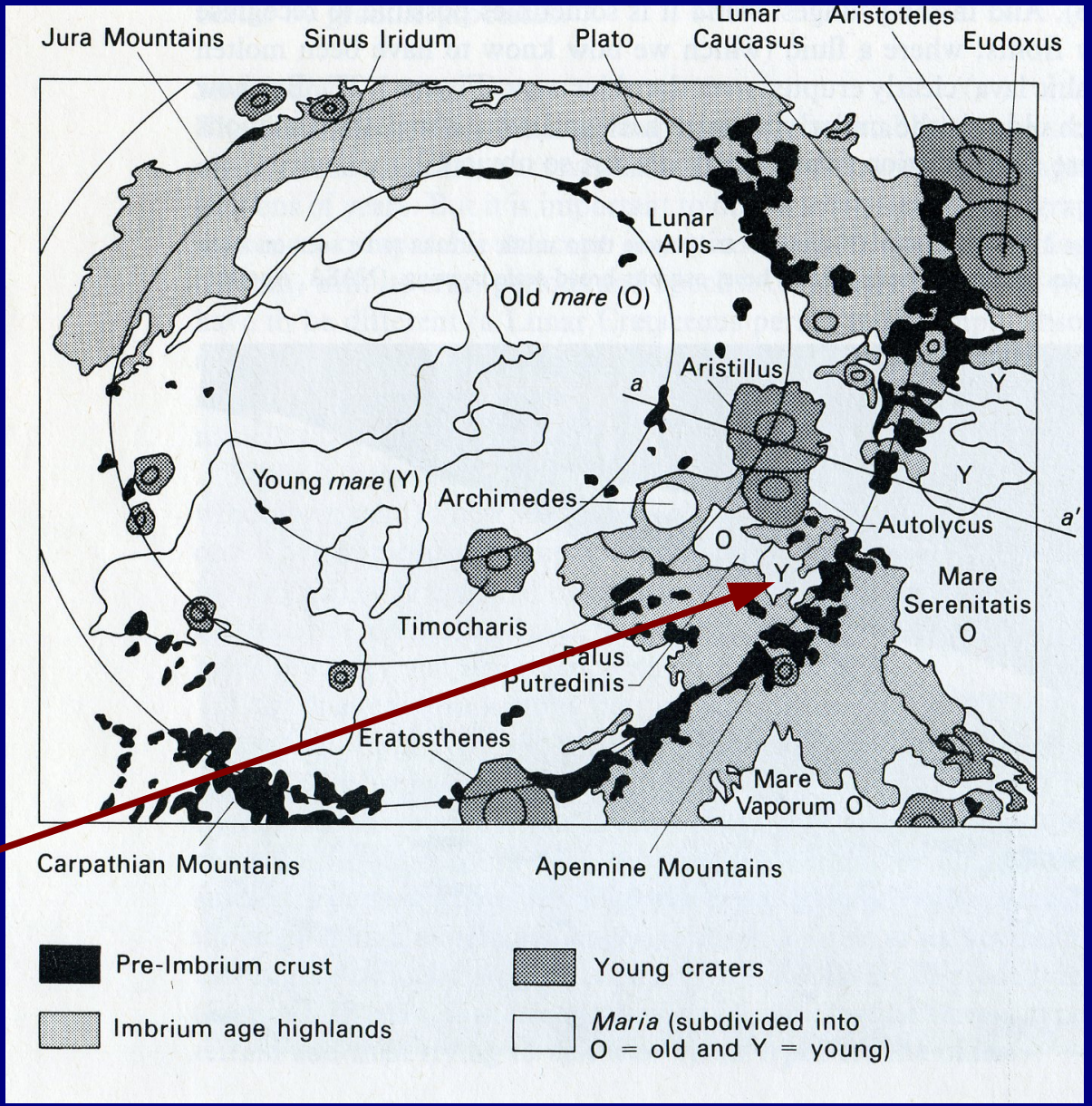
Une brèche trouvée sur Terre.

Les breccias sont des agrégats de roches diverses, collées les unes aux autres par un « ciment ». Sur terre, les breccias sont des roches sédimentaires (retravaillées par l'érosion) liées à la présence d'eau en particulier.

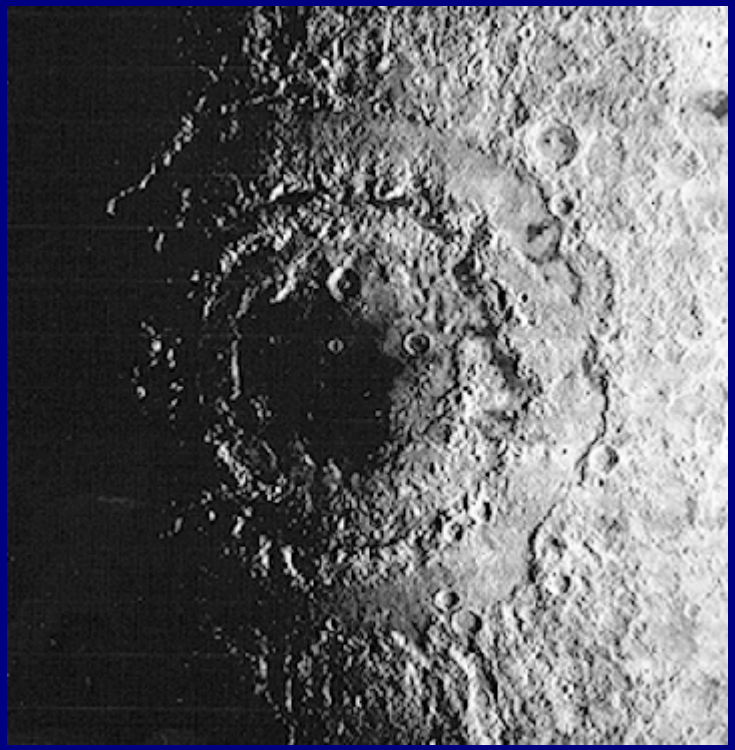
Quelle est l'origine des bassins ?

Les Apennines sont des blocs de croûte soulevée.
Le Jura est plus récent, contemporain de la formation de la mer.

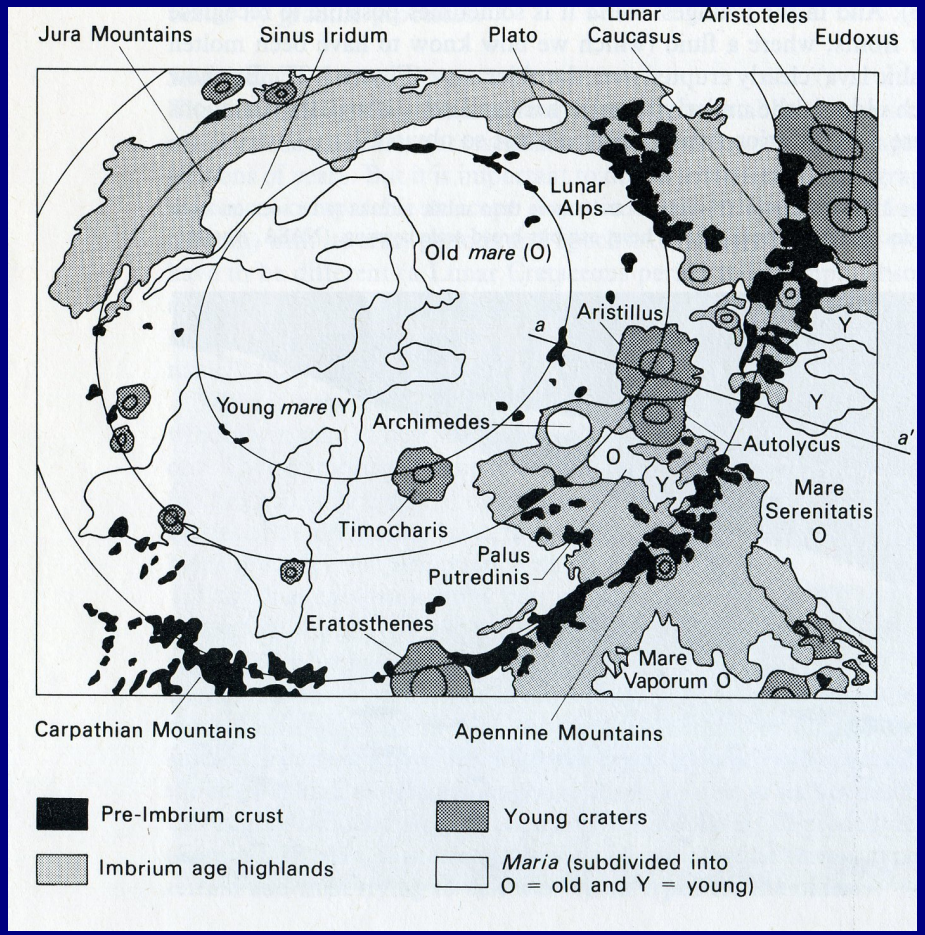
site d'Apollo 15, dans la mer jeune Palus Putredinis.



Quelle est l'origine des bassins ?



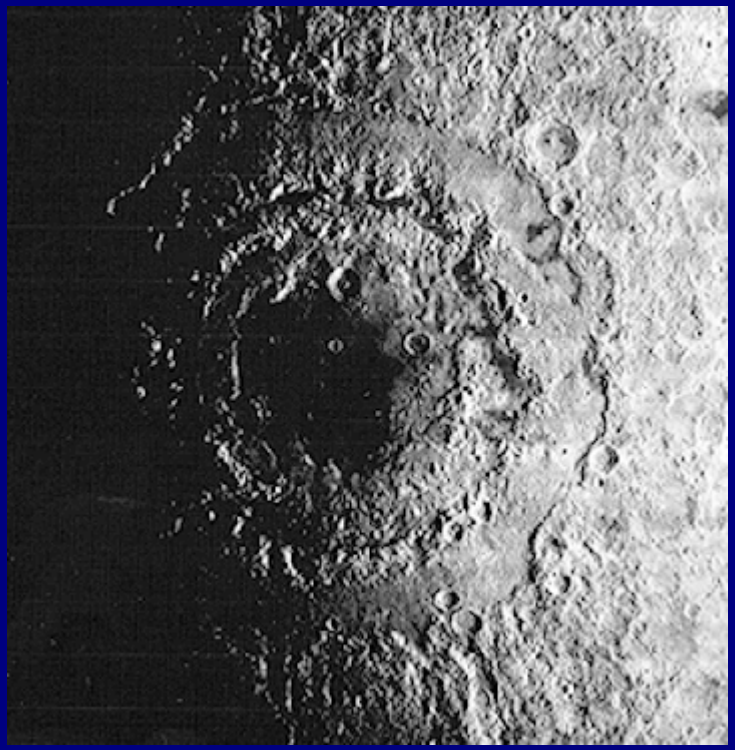
orientale basin/mare



imbrium basin

La forme circulaire des formations liées aux basins évoque de très forts impacts de météorites. Les basins auraient donc une origine semblable à celle des cratères.

Quelle est l'origine des bassins ?



orientale basin/mare

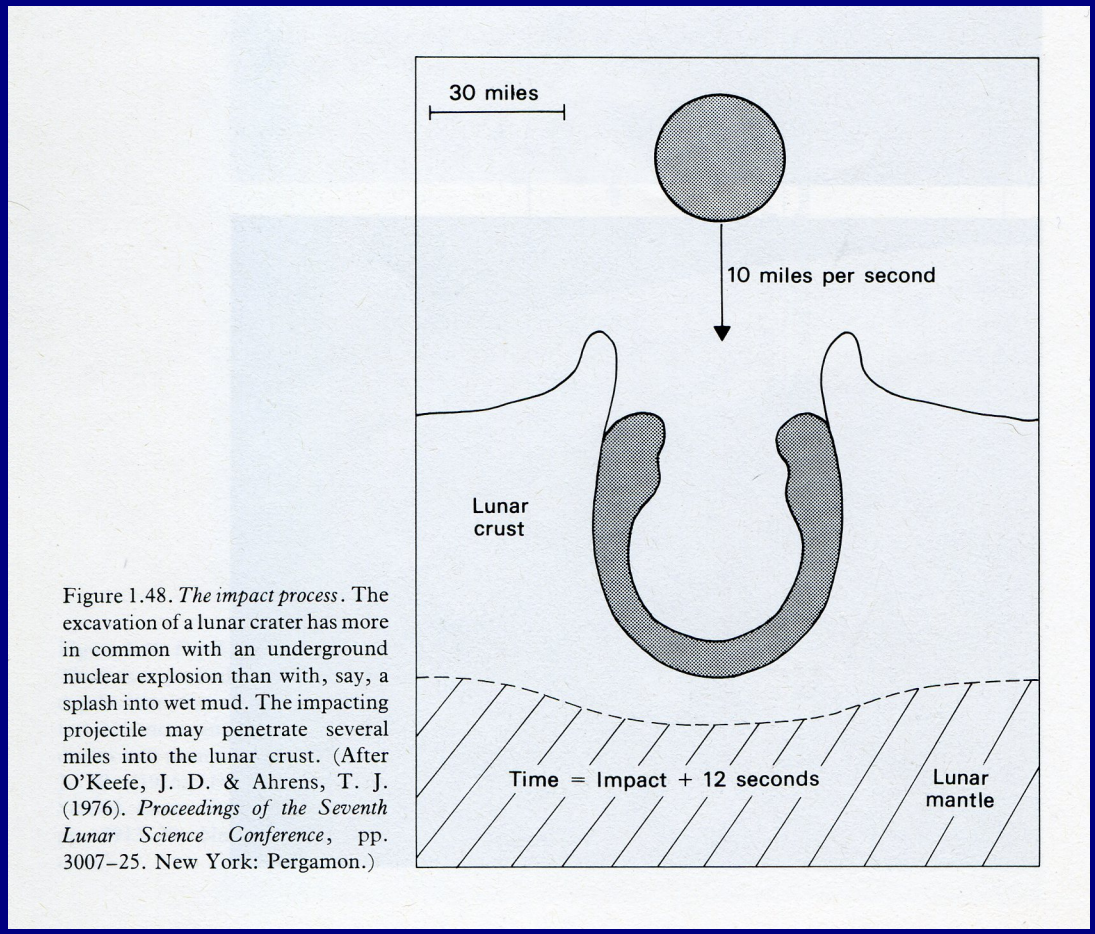
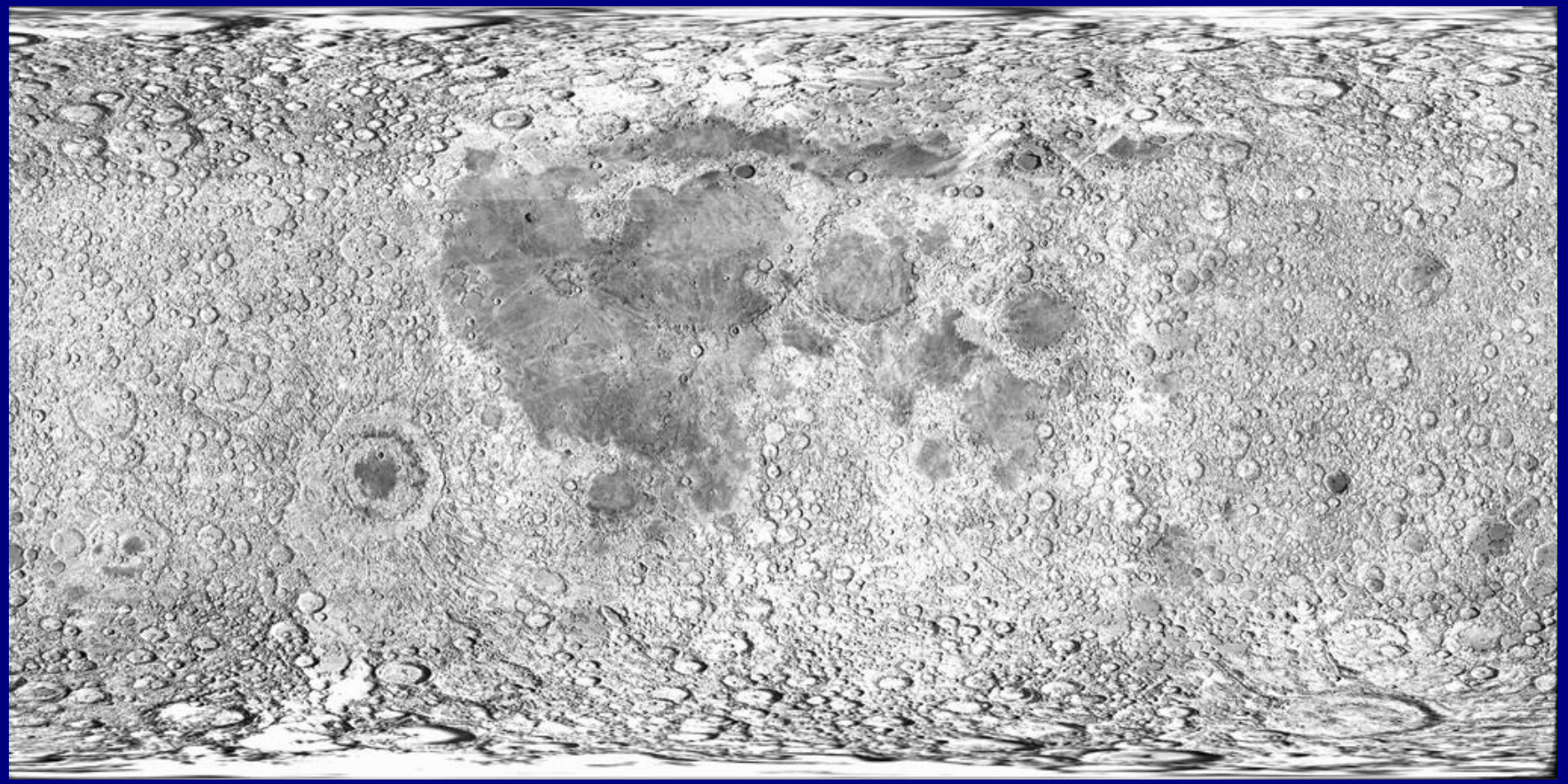


Figure 1.48. *The impact process*. The excavation of a lunar crater has more in common with an underground nuclear explosion than with, say, a splash into wet mud. The impacting projectile may penetrate several miles into the lunar crust. (After O'Keefe, J. D. & Ahrens, T. J. (1976). *Proceedings of the Seventh Lunar Science Conference*, pp. 3007–25. New York: Pergamon.)

La forme circulaire des formations liées aux basins évoque de très forts impacts de météorites.
Les basins auraient donc une origine semblable à celle des cratères.
L'impact ayant formé de bassin Imbrium daterait de 3,84 MdA.
Le remplissage du bassin par de la lave remonterait à 3,3 MdA.

Pourquoi pas de mer sur la face cachée ?



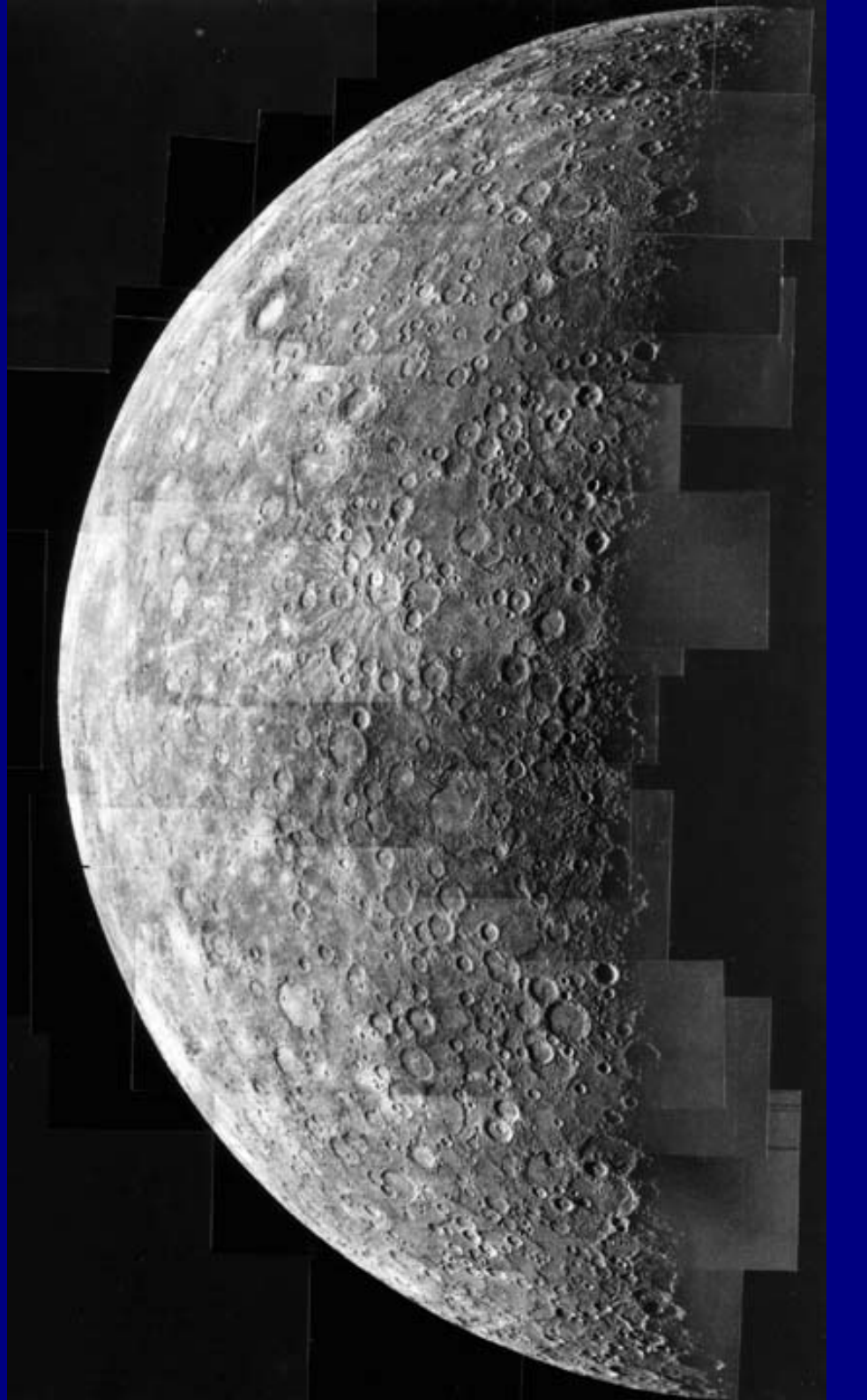
La croûte lunaire est plus épaisse du coté caché (100 km au lieu de 50).
Les fissures dans les bassins causées les impacts n'ont pas atteint le magma, donc, elles n'ont pas entraîné d'épanchement de lave.
Une seule exception : un petite mer dans orientale bassin.

Une planète dont la surface ressemble à celle de la Lune :

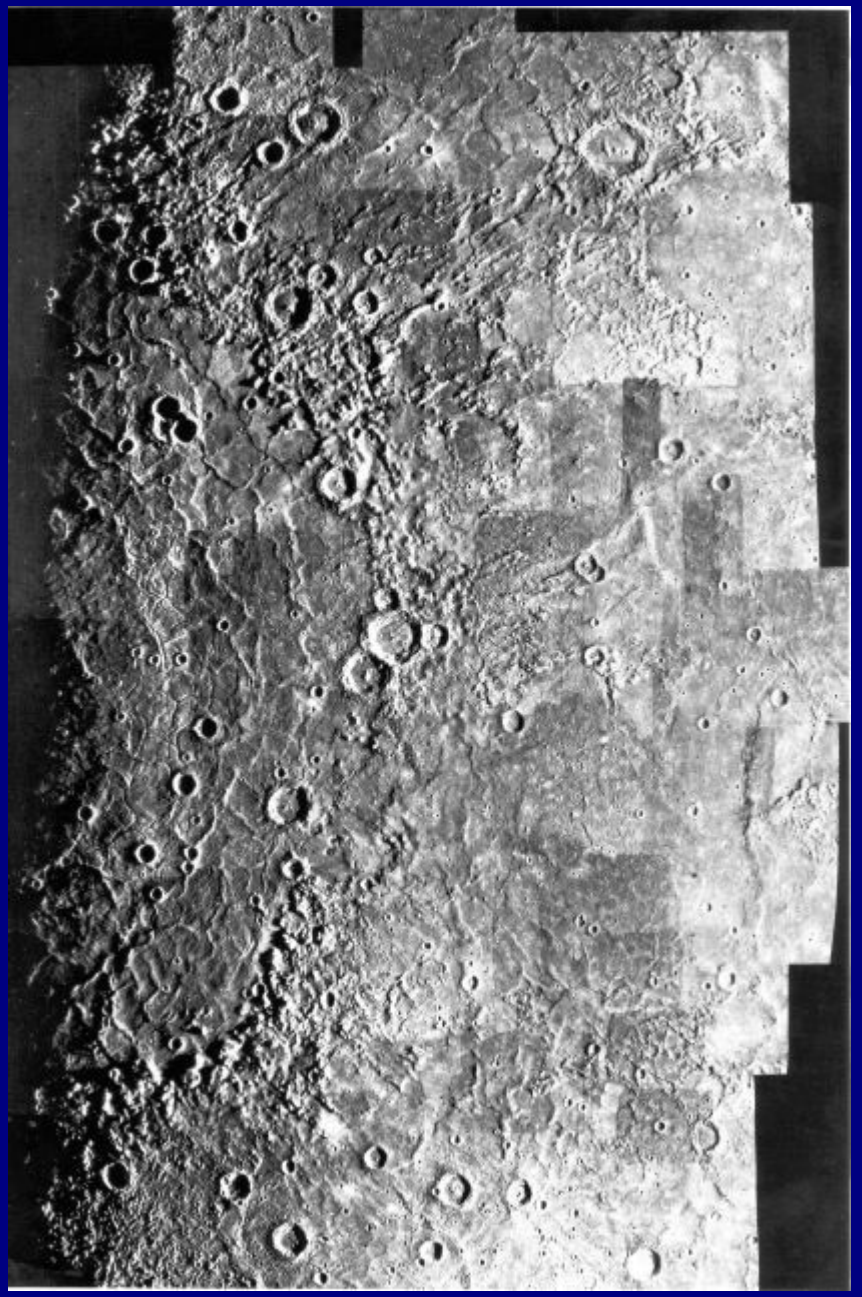
Mercure.

Mosaïque d'images prises par Mariner 10 en 1974.

Pas d'atmosphère,
rotation lente,
surface cratérisée,
mêmes teintes.



Bassin Caloris de Mercure.
Mariner 10
[NASA, JPL,NSSDC]



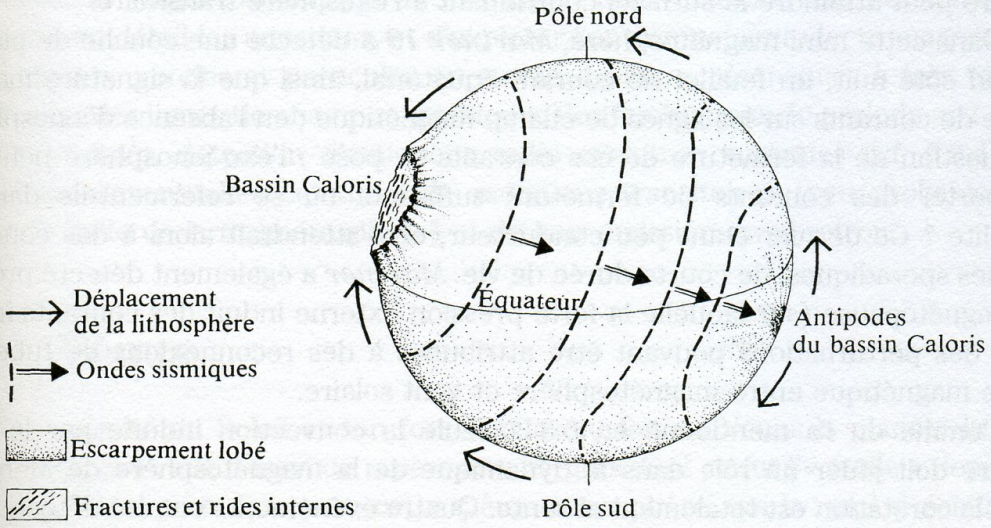


FIG. 6-2 – Les conséquences tectoniques de l'impact du bassin Caloris. (P. Masson, « Mercure », *Le Grand Atlas Universalis de l'Astronomie*, de Encyclopedia Universalis, 1983. Avec l'aimable autorisation de l'éditeur.)

L'origine de la Lune

Quelques hypothèses

- La Terre (liquide) tournait en 2 heures, et une partie du manteau (même densité de la Lune) s'en détacha.

Tient compte de la faible teneur en Fer de la Lune et du manteau terrestre.

Pour d'autres éléments (réfractaires) l'analogie ne tient pas bien.

Difficile de rendre compte de la masse (1/81) expulsée, ni surtout de l'inclinaison de l'orbite lunaire (5 degrés).

Quelques hypothèses

- La Terre a capté une Lune qui s'est formée ailleurs.

Mais c'est très peu probable (pas impossible).

Il faut que l'orbite initiale soit comprise entre 0,95 et 1,05 UA. Dans ce cas, les deux astres se sont formés dans des conditions très semblables, et on s'explique mal leur différences de composition globale (en particulier les grandes différences de taille du noyau métallique).

Quelques hypothèses

- La Lune s'est formée par accrétion, autour de la Terre, et en même temps qu'elle.

A l'avantage de ne requérir aucun événement cataclysmique.

Même problème que le modèle de capture, quand à la composition globale des deux astres.

Quelques hypothèses

- La Lune s'est créée par collision.

Pour arracher un astre comme la Lune, il faut une collision avec quelque chose de gros.

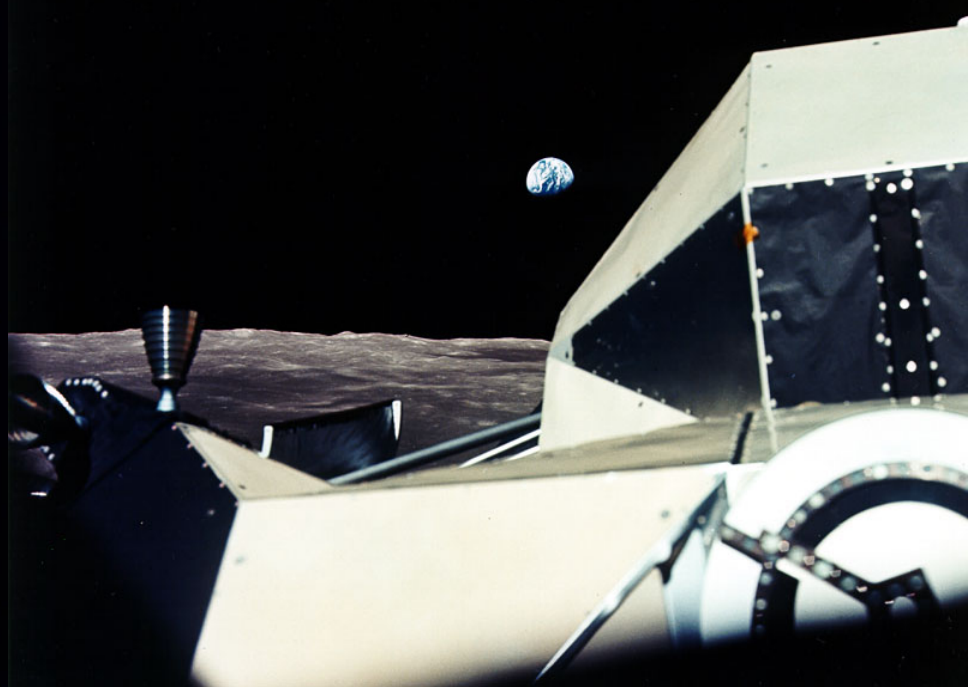
Dans les années 1980, des simulations numériques ont montré que les orbites peuvent être stables pendant des millions d'années, puis évoluer rapidement (perturbations gravitationnelles des planètes géantes). Des collisions ont pu se produire au début de l'histoire du système solaire (dans le premier milliard d'années). Cela est compatible avec les datations des roches lunaires (une collisions plus tardive ne le serait pas).

Des simulations numériques 3D ont montré qu'un impact latéral entre un corps de la taille de Mars et la Terre pourrait être l'éjection en orbite terrestre de matériel des deux astres, accompagnée de la fusion de deux noyaux riches en éléments lourds. C'est compatible avec une orbite lunaire inclinée et initialement elliptique (ce qui est possible).

Par ailleurs, les modèles de formation planétaire aboutissent à une vingtaine de planètes comme Mars, la Terre, Vénus, initialement. Il faut des impacts majeurs ou des déstabilisations d'orbite (échappements ?) pour expliquer le faible nombre actuel.

OK avec les compositions, proches du manteau terrestre, mais autorisant des différences.

Pour finir, un paradoxe (dans la série « mes sentiments ») :
Je pense que les missions habitées sont scientifiquement peu avantageuses, car très chères par rapport au bénéfice scientifique.
Mais la conquête de la Lune (Mercury, Apollo) me fascine.
La fin du programme avec Apollo 17 en 1972 déçoit quelque peu l'enfant émerveillé qui suivait cette aventure dans les journaux et sur la télé couleur d'une tante voisine.



lever de Terre,
orbiteur,
retour d'Apollo 17