

Sur, Autour de, et Depuis la Lune

Philippe Zarka
CNRS-Observatoire de Paris, France

philippe.zarka@obspm.fr

« 22ème Festival d'Astronomie »
Haute-Maurienne Vanoise, 30/7/2006

La Lune : Carte d'Identité

- unique satellite de la Terre
- distance : 384402 km = 1,28 seconde-lumière
- masse : $M_{\text{LUNE}} = 7,35 \times 10^{22} \text{ kg} = 1,23\% \times M_{\text{TERRE}}$
- rayon : $R_{\text{LUNE}} = 1727 \text{ km} = 0,27 \times R_{\text{TERRE}}$
- densité : $\rho_{\text{LUNE}} = 3,344 \text{ g/cm}^3 = 0,6 \times \rho_{\text{TERRE}}$
- gravité : $g_{\text{LUNE}} = 1/6 \times g_{\text{TERRE}}$

- Objet des plus nombreuses et plus anciennes observations astronomiques
- Mouvement complexe (Terre, Soleil, Aplatissement Terre, Planètes)
 - « Théorie » de la Lune $\geq 18^{\text{ème}}$ siècle (Euler, Clairaut, d'Alembert, Lagrange, Laplace, Delaunay...)
- Études physiques : télescopiques $\geq 17^{\text{ème}}$ siècle, puis spatiales ≥ 1959
 - origine, évolution, structure, composition ... ?

Ce dont on NE VA PAS parler ici :

- les éclipses
- les calendriers
- la place de la Lune dans la mythologie ou l'imaginaire collectif
- la toponymie des reliefs, etc ...

Ce dont on VA parler ici :

- les observations pré-spatiales
- l'exploration spatiale passée et à venir
- les connaissances (physico-chimiques) obtenues
- les grandes questions

Terre-Lune $\approx$ planète double



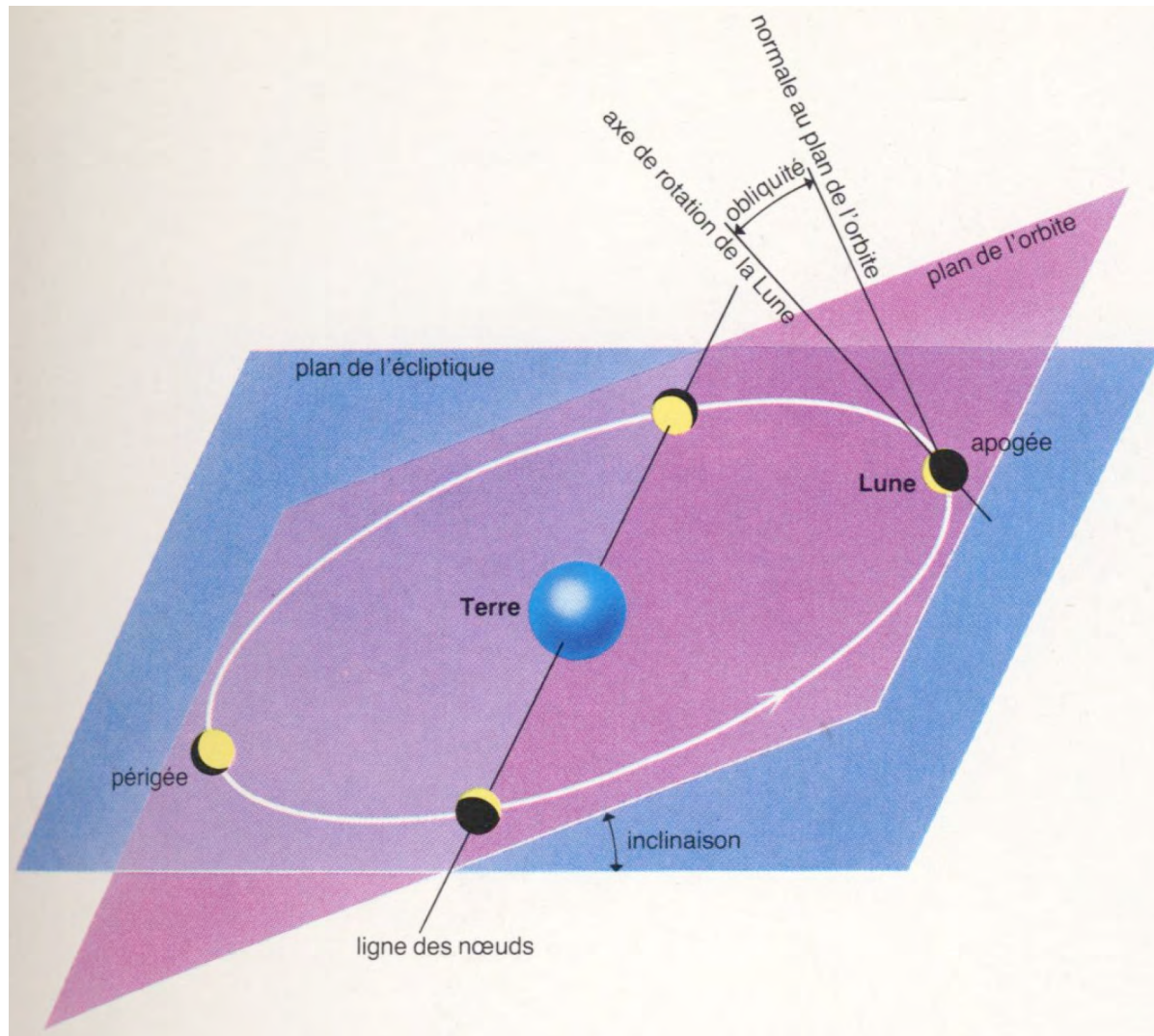
Photo: Galileo/NASA

Satellite	Planète	a (km / Rp)	e	i (°)	R (km / Rp)	ρ (g/cm ³)
Lune	Terre	384402 / 60,3	0,0554	5,16	1737 / 0,27	3,344
Io	Jupiter	421800 / 5,9	0,0041	0,036	1821 / 0,025	3,528
Europe	Jupiter	671100 / 9,4	0,0094	0,469	1560 / 0,022	3,014
Ganymède	Jupiter	1070400 / 15,0	0,0011	0,170	2631 / 0,037	1,942
Callisto	Jupiter	1882700 / 26,3	0,0074	0,187	2410 / 0,034	1,834
Mimas	Saturne	185600 / 3,1	0,0206	1,57	199 / 0,003	1,14
Encelade	Saturne	238100 / 3,9	0,0001	0,01	249 / 0,004	1,00
Téthys	Saturne	294700 / 4,9	0,0001	0,17	530 / 0,009	1,00
Dioné	Saturne	377400 / 6,3	0,0002	0,002	559 / 0,009	1,50
Rhéa	Saturne	527100 / 8,7	0,0009	0,33	764 / 0,013	1,24
Titan	Saturne	1221900 / 20,3	0,0288	1,63	2575 / 0,043	1,88
Ariel	Uranus	190900 / 7,5	0,0012	0,04	579 / 0,023	1,66
Umbriel	Uranus	266000 / 10,4	0,0039	0,13	585 / 0,023	1,40
Titania	Uranus	436300 / 17,1	0,0011	0,08	789 / 0,031	1,71
Obéron	Uranus	583500 / 22,8	0,0014	0,07	761 / 0,030	1,63
Miranda	Uranus	129900 / 5,1	0,0013	4,34	236 / 0,009	1,20
Triton	Neptune	354800 / 14,3	0,0000	156,8	1353 / 0,055	2,06
Néréide	Neptune	5513400 / 223	0,7512	7,23	170 / 0,007	1,5
Charon	Pluton	19410 / 17,1	0,0002	99,1	593 / 0,52	1,85

Taille relative >> / autres satellites
~ Pluton - Charon



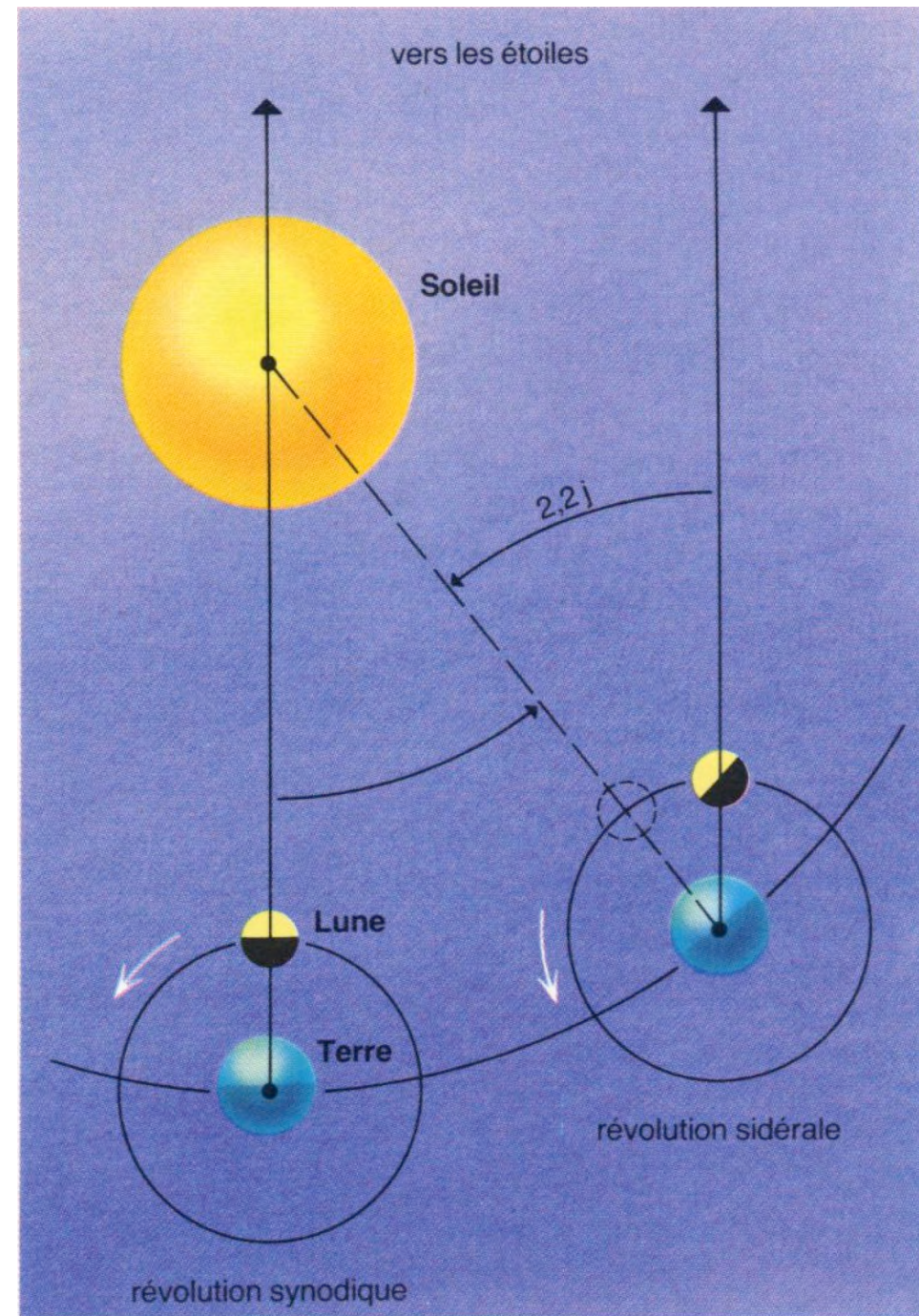
Orbite elliptique ($e=0,0554$) inclinée de $5,16^\circ$ sur l'écliptique



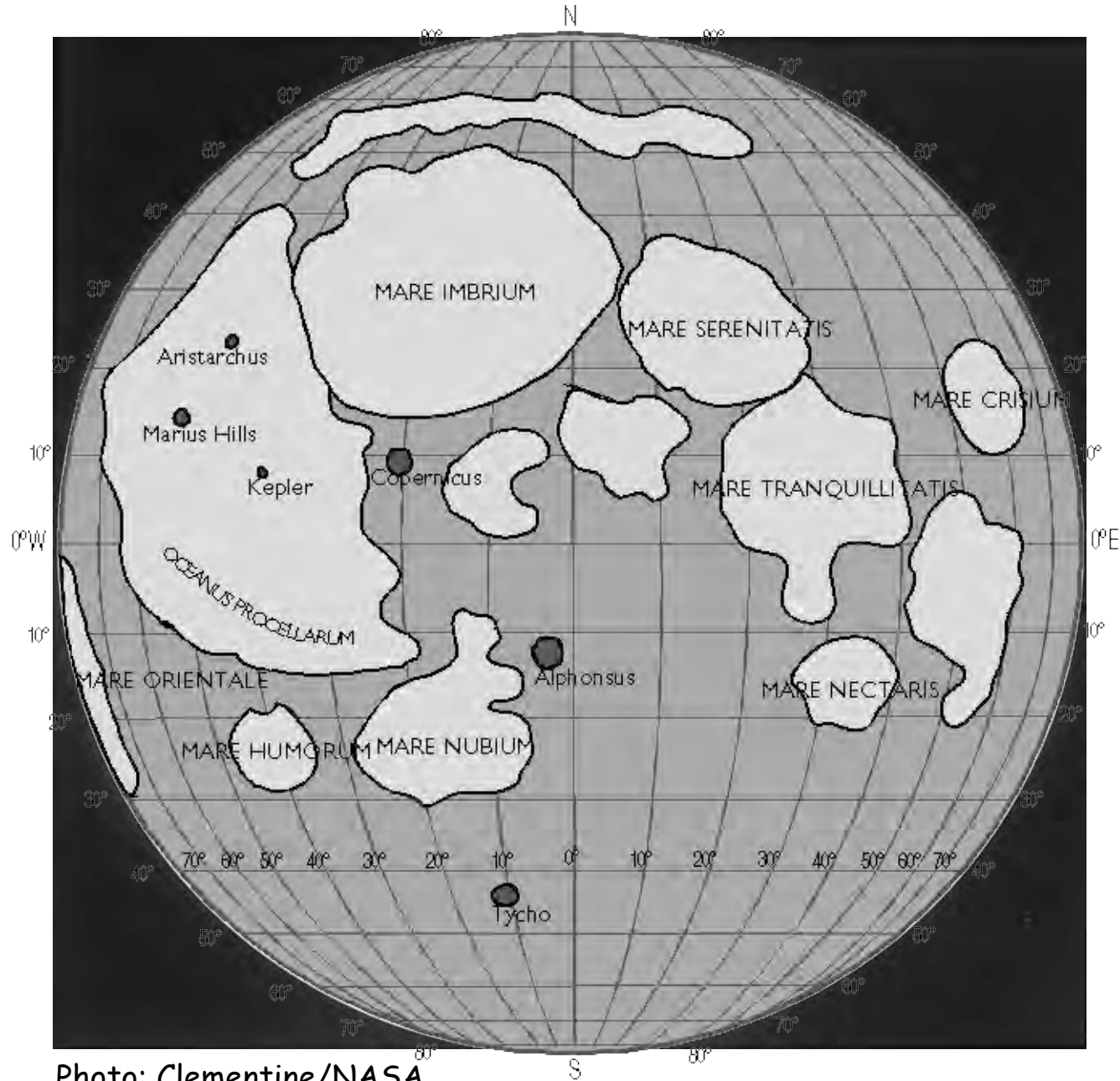
- + perturbations du Soleil et des planètes
- avance du périgée lunaire ($P=8,85$ ans)
- mouvement rétrograde de la ligne des nœuds ($P=18,6$ ans)

Révolution lunaire :

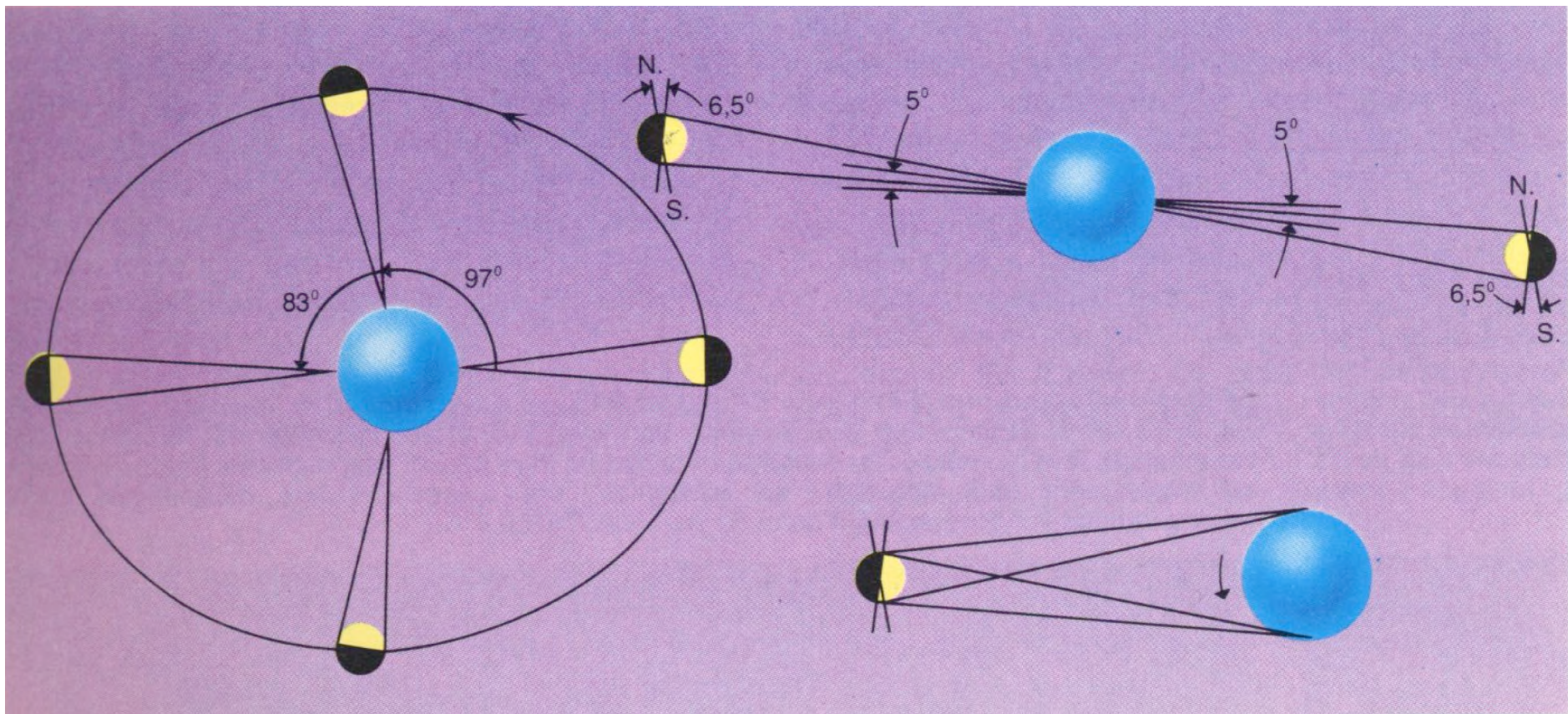
- Psidérale = 27,32 jours
- Psynodique = 29,53 jours



La Lune présente toujours la même face à la Terre ...

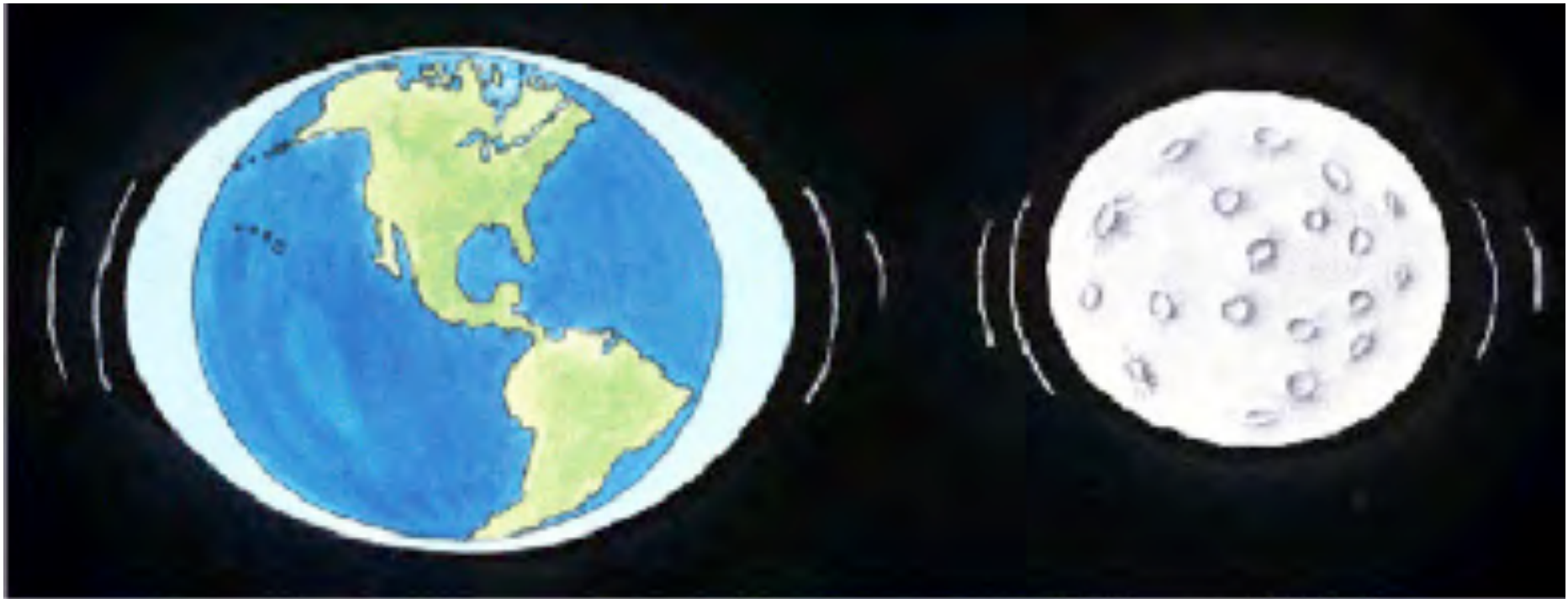


... aux librations optiques EW ($e \neq 0$), NS ($i \neq 0^\circ$), diurne (distance Terre-Lune finie), et physiques (perturbations dynamiques) près
→ 59% de la surface est en fait observable depuis la Terre



Pourquoi ?

→ Effet des marées !



Effets de marée

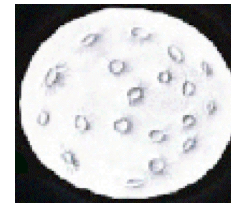
- Gravitation en $1/R^2 \rightarrow$ gravitation différentielle en $1/R^3$
(+ force centrifuge différentielle, va dans le même sens que la gravitation différentielle)
- Système Terre (M, R, Ω) - Lune (m, r, ω)

$$\begin{aligned}\text{Energie : } E_{\text{TOTALE}} &= E \text{ rotation (Terre)} + E \text{ révolution (Lune)} \\ &= MR^2\Omega^2/5 - GMm/2r\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Rotation : } K_{\text{TOTAL}} &= K \text{ rotation (Terre)} + K \text{ révolution (Lune)} \\ &= 2MR^2\Omega/5 + mr^2\omega \\ &= 2MR^2\Omega/5 + m(GM)^{1/2}r^{1/2}\end{aligned}$$

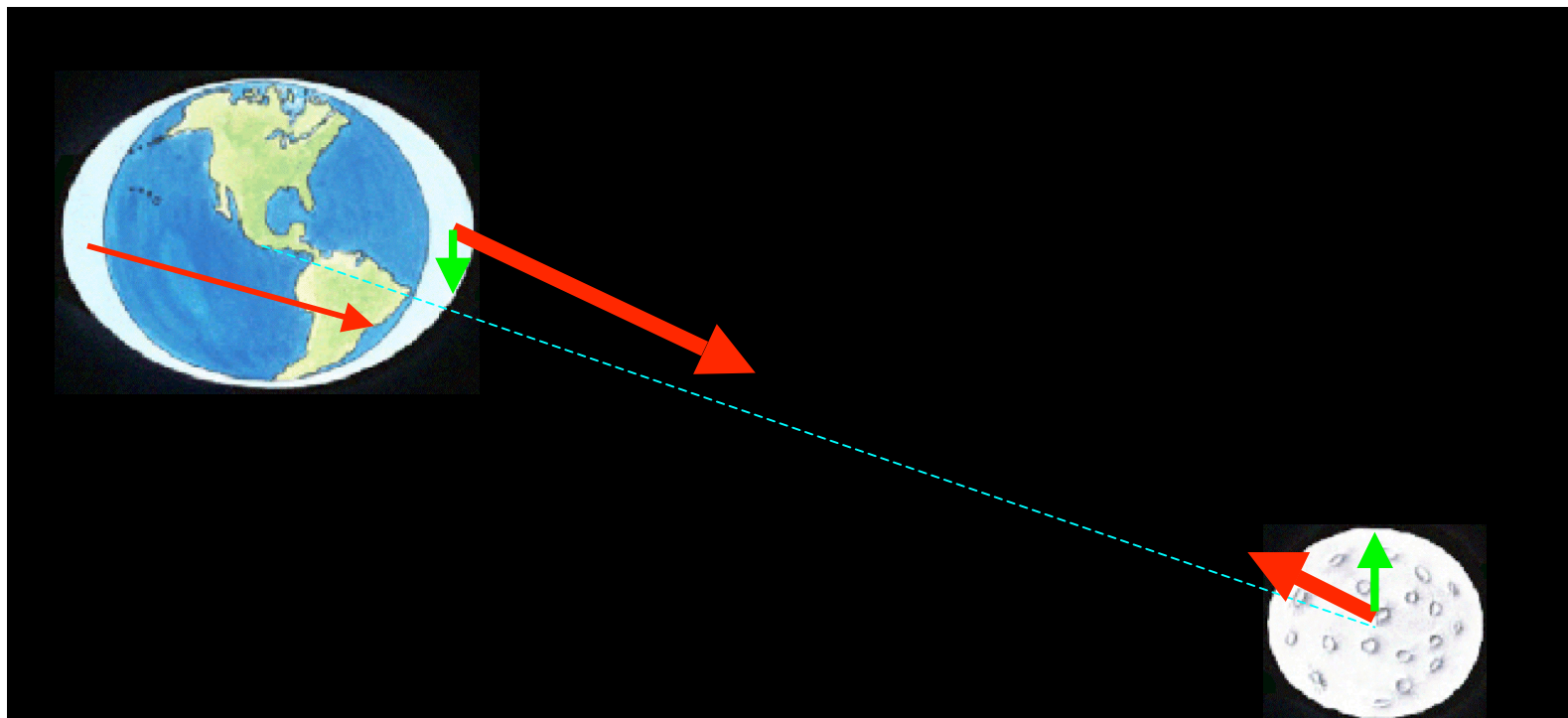
Action de marée de la Lune sur la Terre (1)

- Marées océaniques : si pas de continents, 70 cm d'amplitude, exactement 2 fois/jour (semi-diurne)
- Avec les reliefs des fonds océaniques, amplitudes jusqu'à 17m et occurrence variable (semi-diurne $\pm$ régulières, voire diurnes - *Vietnam*)



Action de marée de la Lune sur la Terre (2)

- Bourrelet océanique terrestre en avance / direction Terre-Lune car la Terre tourne + vite
- La résultante de la force Lune → Terre freine la Terre
 - Ω diminue (correspond à une augmentation de P de 2×10^{-10} s/an)
 - par conservation de K , r augmente (actuellement de 3,74 cm/an)
- De même, la résultante de la force sur la Lune l'accélère : la Lune gagne de l'énergie totale aux dépens de la Terre



Action de marée de la Lune sur la Terre (3)

- Si la révolution du satellite est plus rapide que la rotation du corps central → effet inverse = rapprochement du satellite
(ex : *Phobos*, migration vers l'intérieur des Jupiters chauds)

+ Dissipation (frottement océans / fonds océaniques)
→ perte d'énergie totale du système ($\sim 2 \times 10^{12}$ W)

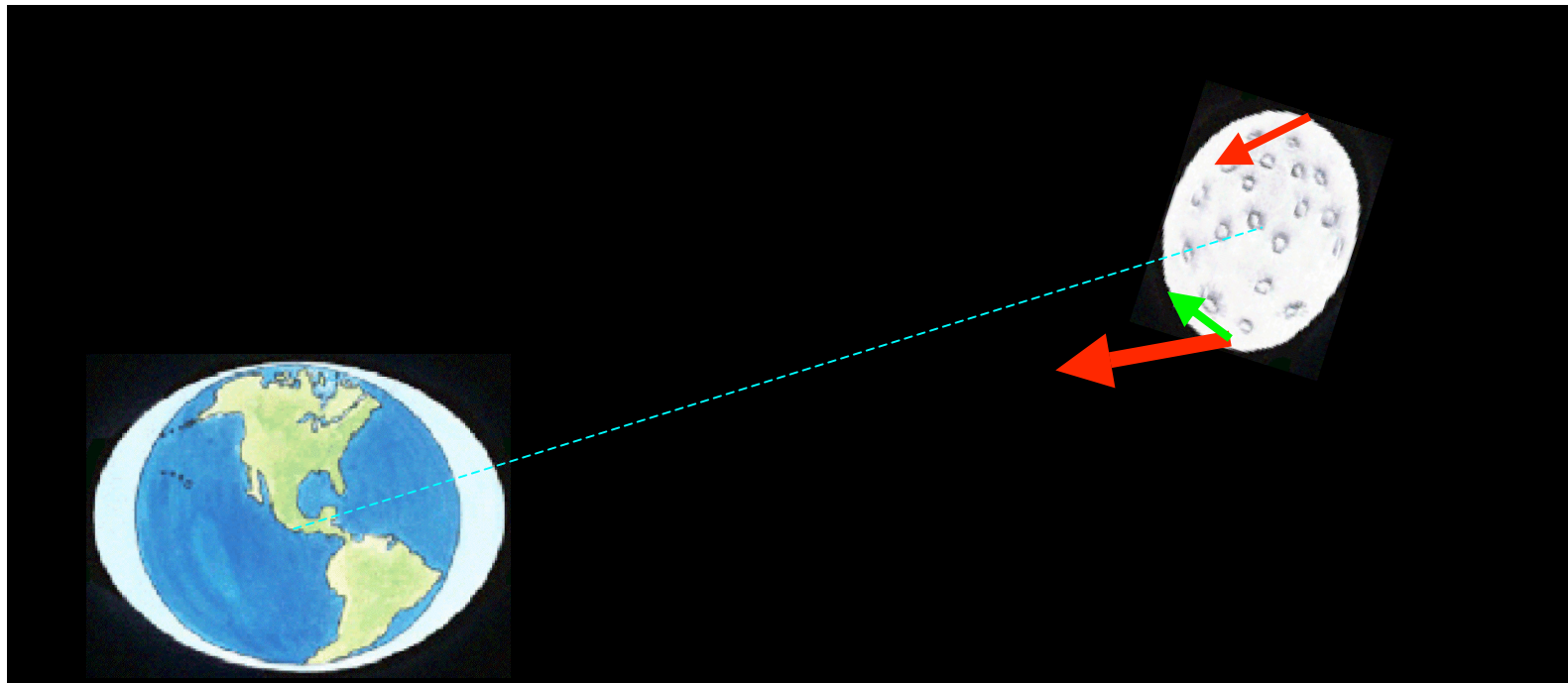
- Si l'énergie dissipée était constante, la Lune aurait dû être au plus près de la Terre (formée ou capturée) il y a 2×10^9 ans.

Mais on verra que la Lune est âgée de $\sim 4,5 \times 10^9$ ans

→ la dissipation varie avec la répartition des continents terrestres
→ le début de l'éloignement peut dater de l'origine du système

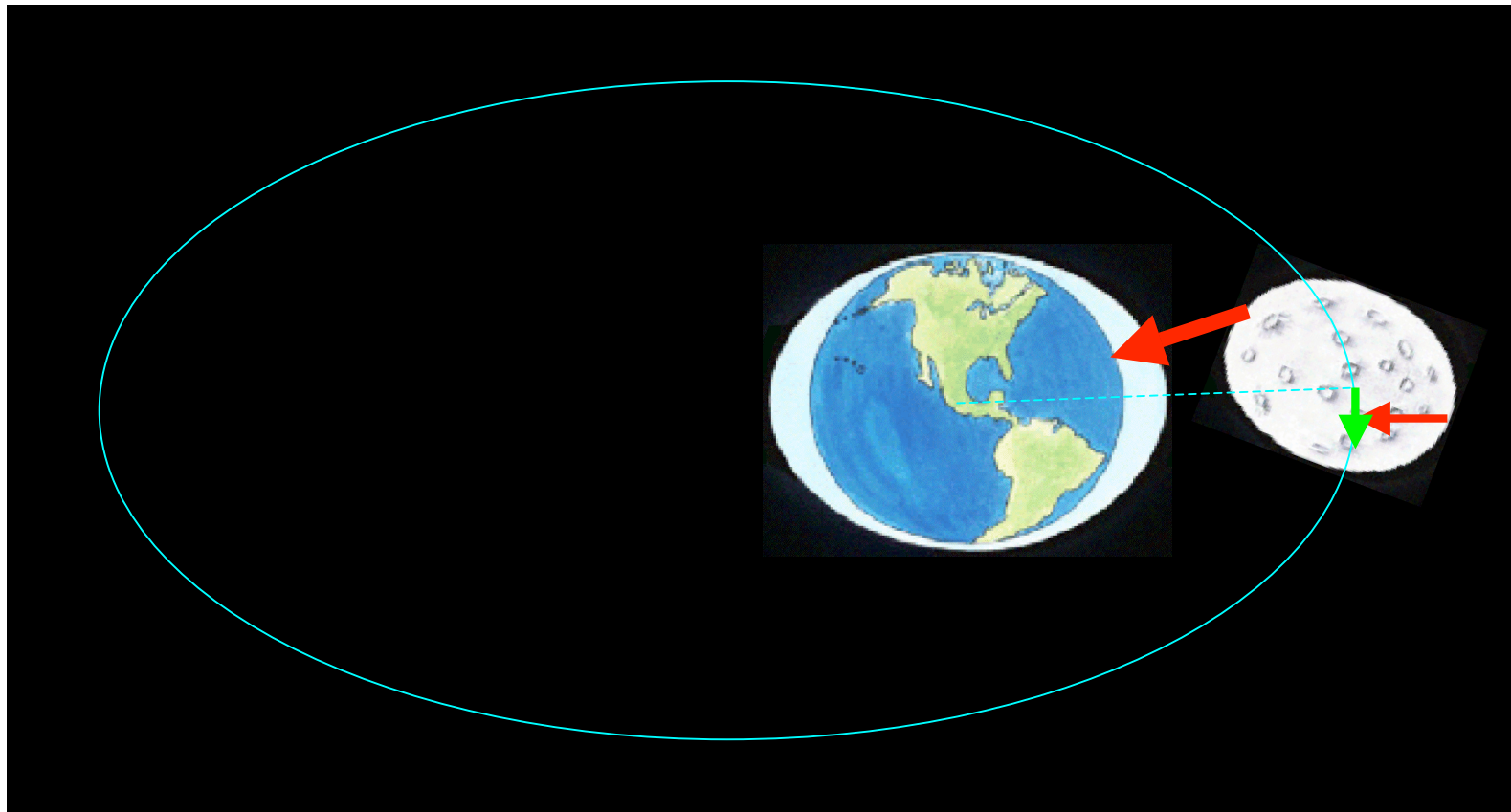
Action de marée de la Terre sur la Lune

- Marée solide d'amplitude ~ 1 m
- Elle ralentit la Lune $\rightarrow$ rotation synchrone en quelques millions d'années (idem satellites de Jupiter...)
- Rotation synchrone (en moyenne) $\rightarrow$ face cachée (far side en anglais)
- L'équilibre final du système correspond à la double rotation synchrone (ex : Pluton-Charon)
 - $\rightarrow$ pour Terre-Lune, $P = 47$ jours, atteint en $\sim 5 \times 10^{10}$ ans



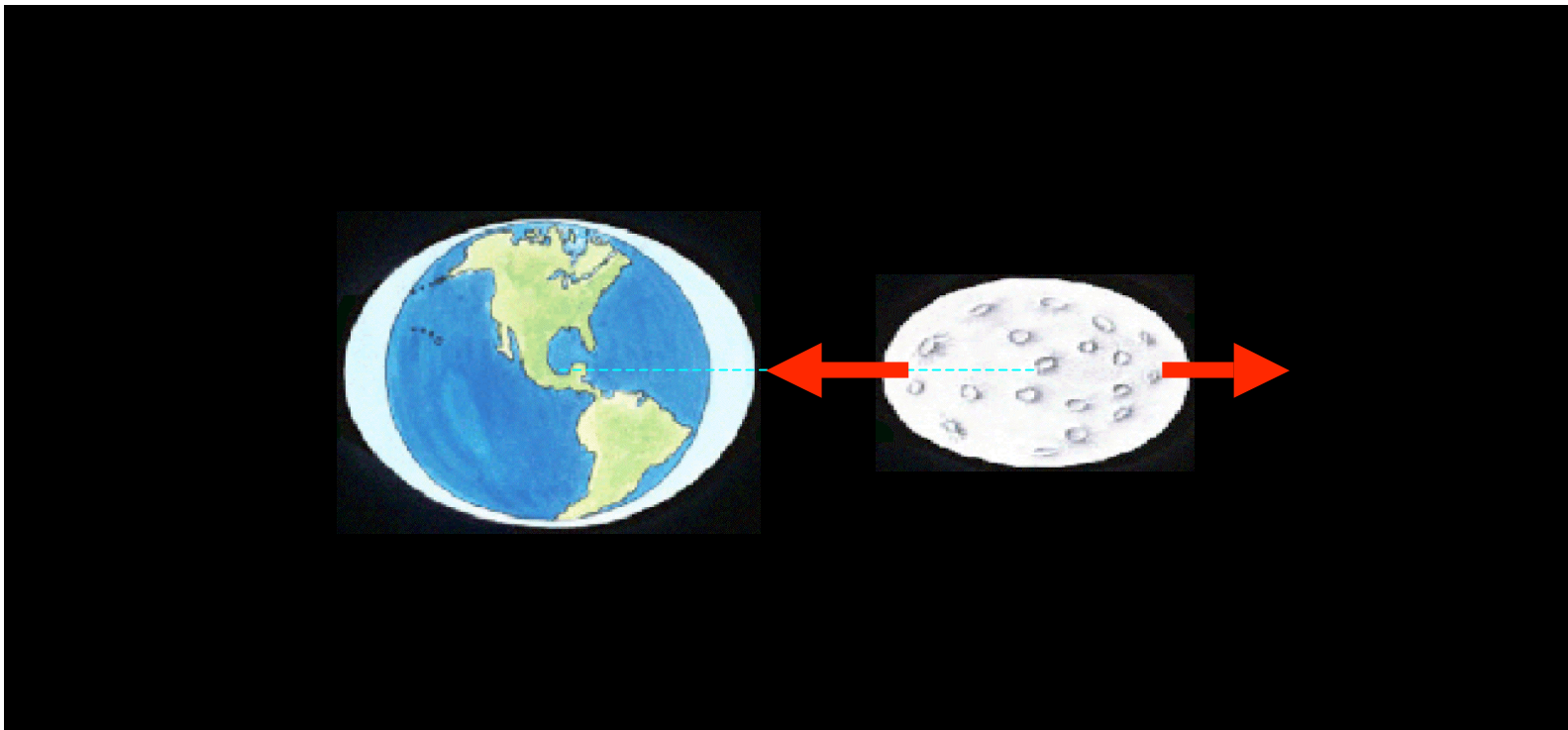
Circularisation d'une orbite elliptique

- Satellite synchrone
- Au périastre, V_{orbitale} élevée $\rightarrow$ bourrelet en avance
- Résultante des forces sur les 2 bourrelets tire le satellite en arrière sur son orbite $\rightarrow$ ralentissement $\rightarrow$ apoastre moins élevé $\rightarrow$ l'orbite se circularise
- Effet inverse à l'apoastre, mais beaucoup plus faible ($1/R^3$)



Limite de Roche

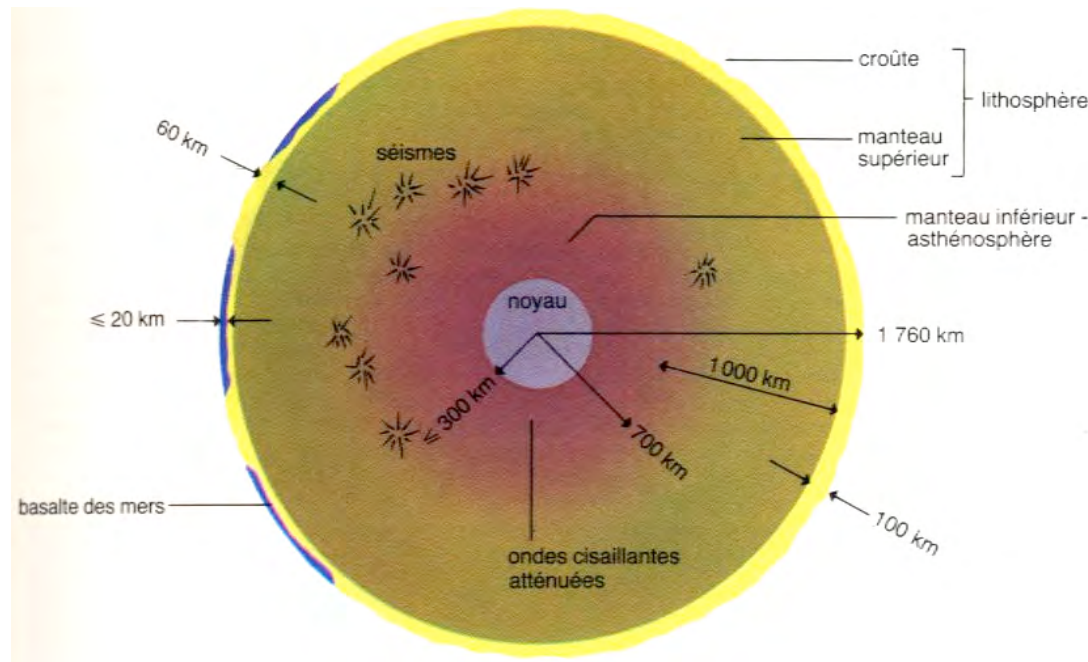
- Si la gravitation différentielle entre les 2 faces opposées du satellite est
 - forces de cohésion (auto-gravité + forces moléculaires)
 - le corps se brise
 - $D_{\text{Limite}} \sim R (\rho_{\text{PLANETE}} / \rho_{\text{SATELLITE}})^{1/3}$
- Tous les anneaux planétaires sont à une distance $< D_{\text{Limite}}$
 Les (gros) satellites sont au delà
 Pour les petits satellites, la cohésion moléculaire est $>$ auto-gravitation



Études au télescope de la face visible

Imagerie visible, Spectroscopie, Polarisation de la lumière solaire diffusée / angle de phase, Albédo / λ

- $M_{\text{LUNE}} = M_{\text{TERRE}}/81$, $\rho_{\text{LUNE}} \sim 3.3 \text{ g/cm}^3 < \rho_{\text{TERRE}} = 5.5 \text{ g/cm}^3$
→ pas de gros noyau métallique, faible teneur globale en fer

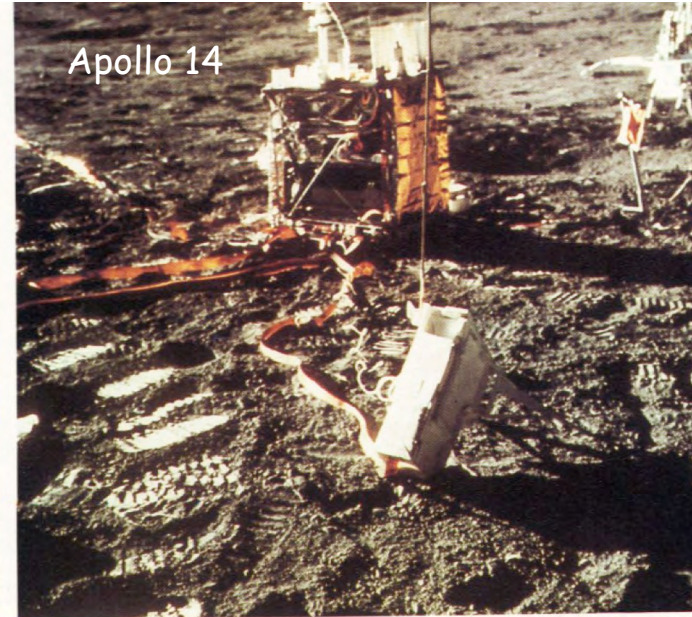
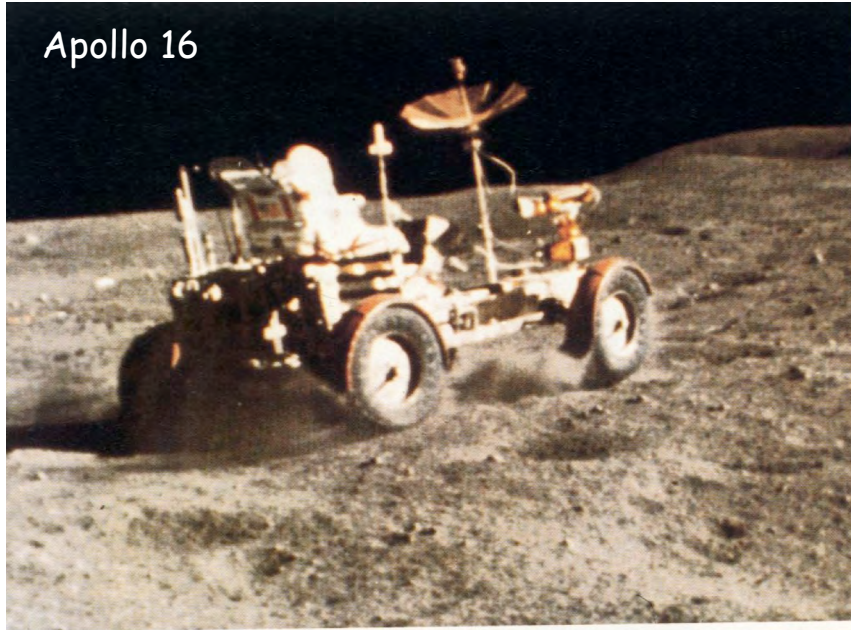


- Librations physiques → distribution des masses à l'intérieur de la Lune

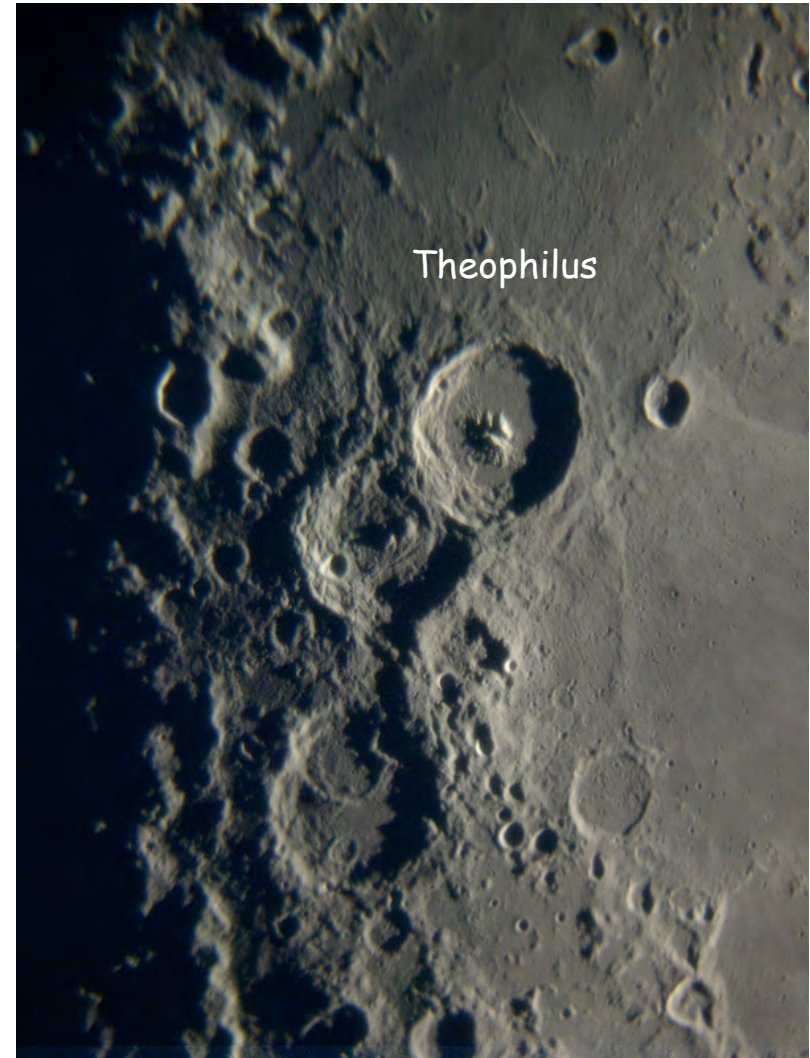
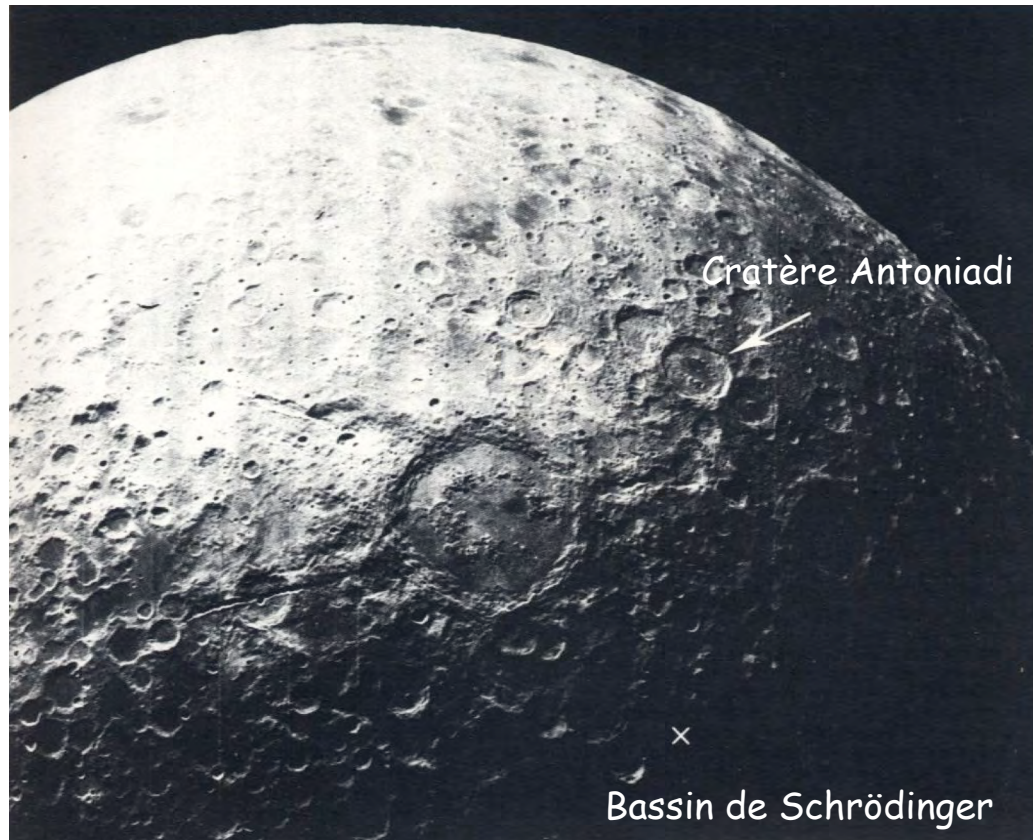
- Mers sombres (albédo <10%, ~35% de la surface visible)
moins cratérisées que les continents + clairs → mers + jeunes ?
= épanchements de laves basaltiques (volcaniques, pyroxène/olivine, pauvres en silice)
→ existence d'une croûte (de feldspath = aluminosilicates de K, Na, Ca)
+ manteau liquide, idem Terre



- Existence d'un régolite = poussière de $\sim 10 \mu\text{m}$ recouvrant toute la surface (épaisseur $\sim$ quelques mètres)

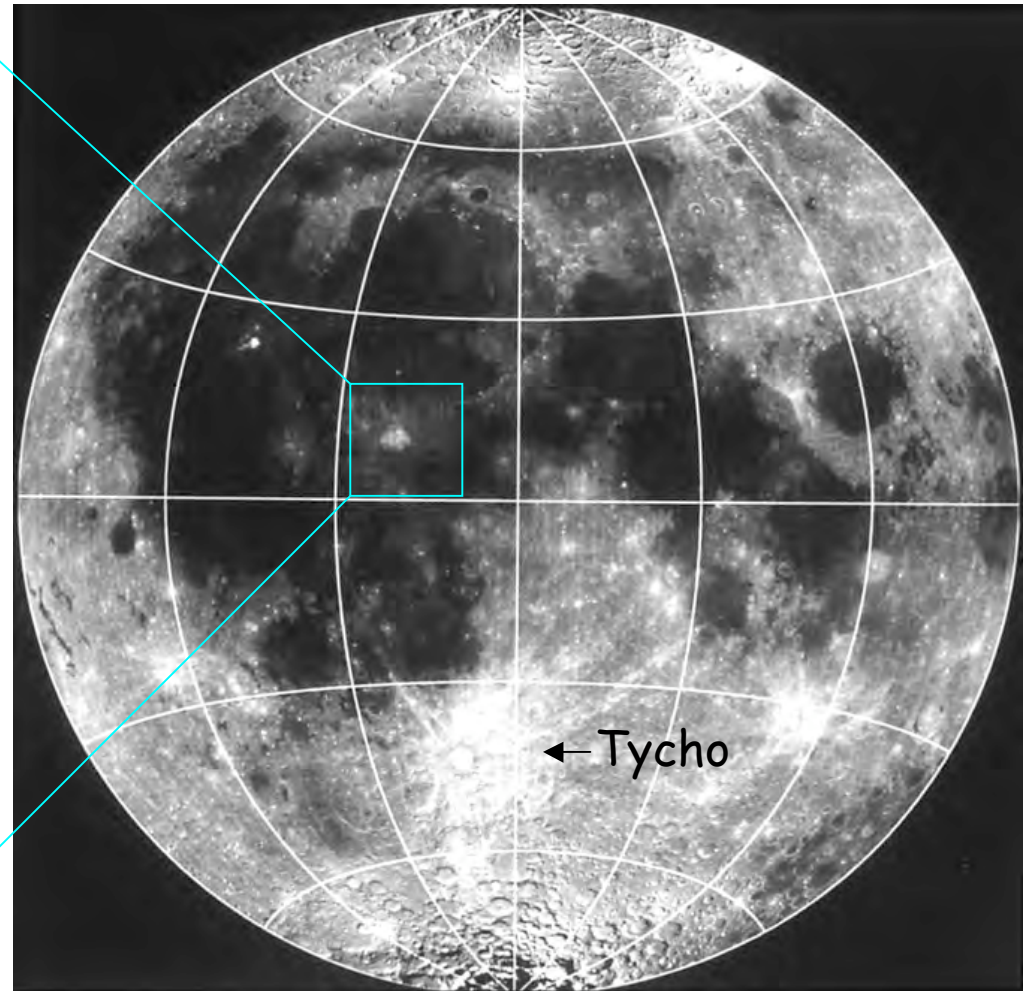


- Nombreux cratères avec/sans piton ou anneau central



- Certains grands cratères (Tycho, Copernic) projettent des « raies » sur ≥ 1000 km de long

Copernicus, $\varnothing$ 110 km

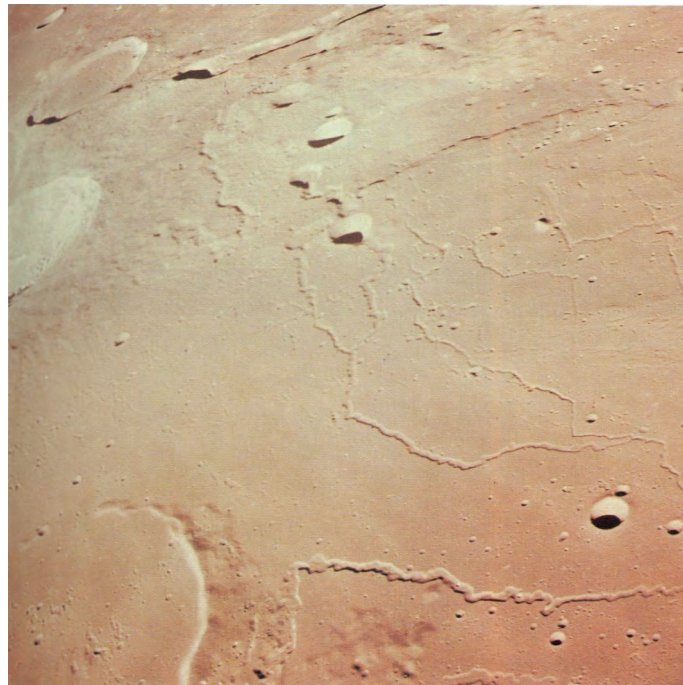


- Rares vallées sinueuses et escarpements

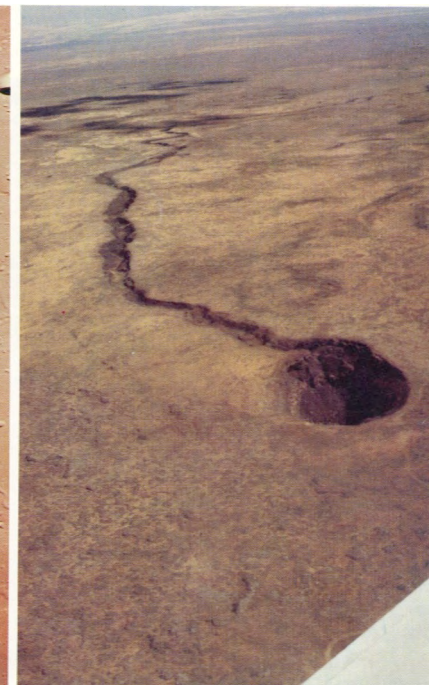
Site Apollo 15, bassin Imbrium, vallée Halley
(fracture/effondrement de lave ?)



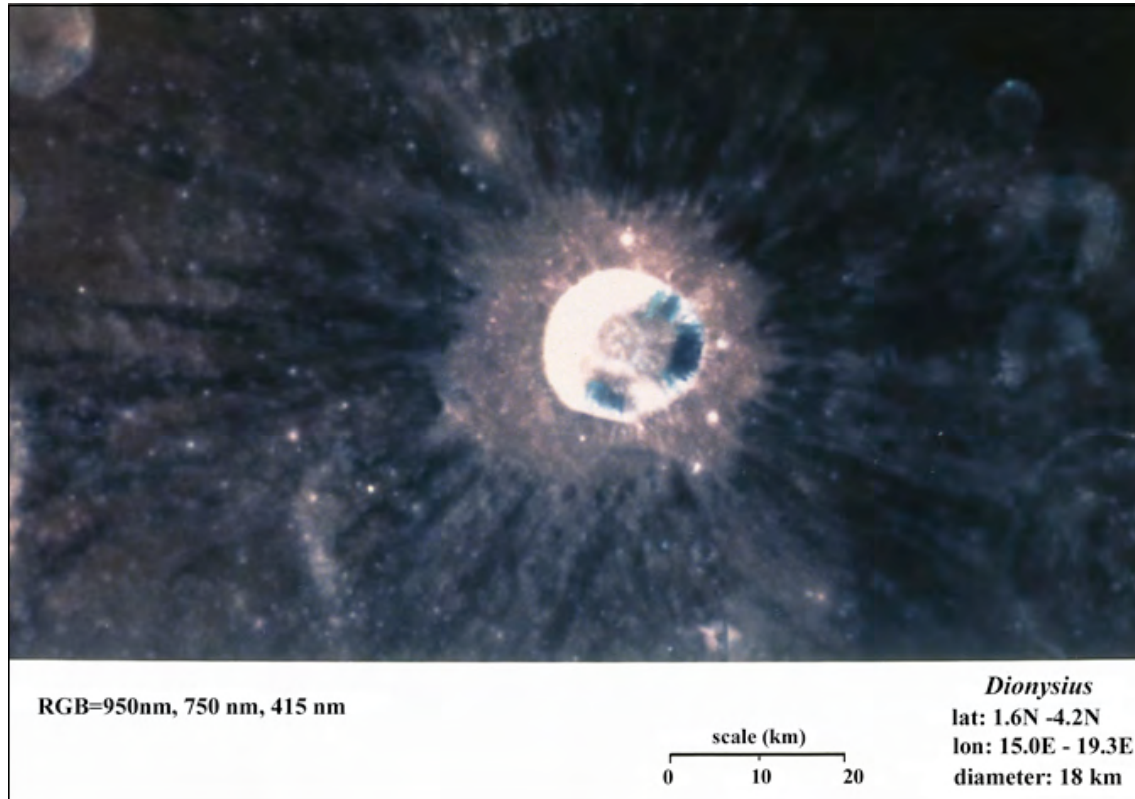
Oceanus Procellarum



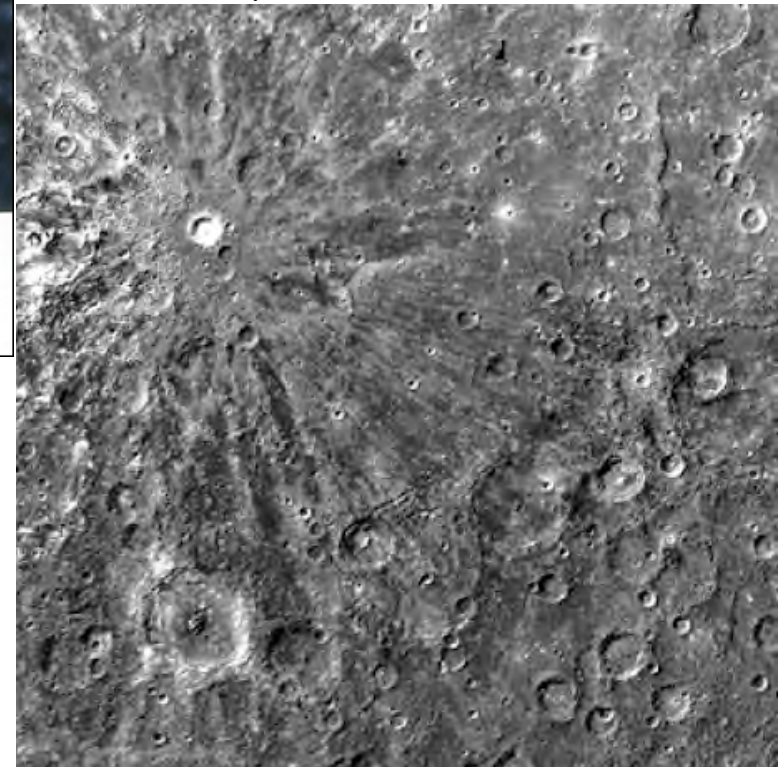
Idaho, USA



- La surface évolue (s'assombrit) par interaction avec le milieu interplanétaire (vent solaire) → les raies s'estompent en vieillissant



Cratère Copley (Mercure)
à rayons érodé, $\varnothing=30$ km



Premières explorations spatiales

- compétition russo-américaine dans les années 1960s

URSS :

- Luna 1-3 & 9-24 (1959-76) : survols, orbiteurs, alunisseurs automatiques
 - 1^{er} survol de la Lune (L1)
 - 1^{er} impact (L2)
 - 1^{ères} images de la face cachée (L3)
 - 1^{er} alunissage en douceur (L9, 13, 16)
 - 1^{er} satellite lunaire (L10-12, 14, 19, 22)
 - 1^{ère} analyse du sol
 - 1^{er} retour d'échantillon (L16, 20, 24 : 310g au total, dont carottage à 2,4 m)
 - 1^{er} rover (L17, 21)
- Zond 3, 5-8 (1965-70) : survols circumlunaires automatiques
 - images, rayons cosmiques solaires & galactiques, micrométéorites, champ magnétique, émission radio, vent solaire, charges utiles biologiques (tests pour missions habitées)

Face « cachée »
par Luna 3 (1959)
→ continents brillants



USA :

- Ranger 1-9 (1961-65) : impacteurs automatiques
 - images TV haute résolution de la surface lors de l'impact
(+ radiations, sismomètres)
 - (R1-2) tests : lanceur, sonde stabilisée 3 axes, communication, séquences automatiques... (R3-5) échecs (R6-9) impacts Lune
 - (R7-9) → 17000 images des mers et continents jusqu'à une résolution de 30 cm

→ cratérisation généralisée
(~fractale)

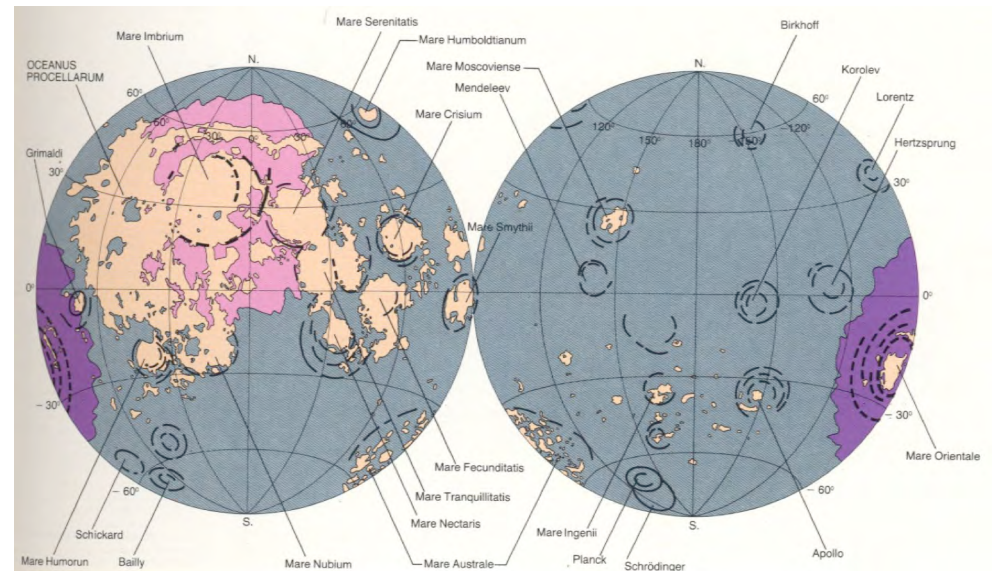


USA :

- Surveyor 1-7 (1966-68) : alunisseurs automatiques
(S1,3,5-7) alunissage en douceur
→ faisabilité, télécommande du sol, tests de sites pour Apollo (mers équatoriales), images TV, propriétés chimiques, magnétiques, mécaniques du sol (actions des fusées & sonde + images du résultat)
→ 87000 images détaillées des sites d'alunissage
→ opération durant plusieurs nuits lunaires (17 mois au total)
- Lunar Orbiters 1-5 (1966-67) : succès total
(LO1-3) photos à basse altitude, recherche de sites d'alunissage Apollo
(LO4-5) cartographie 99% de la surface à une résolution <60 m
(2m sur des sites sélectionnés)
→ système de caméras MR/HR sophistiqué (développement film, scan, transmission)
→ mesures du champ de gravité, environnement de radiations, micrométéorites

Origine des cratères ?

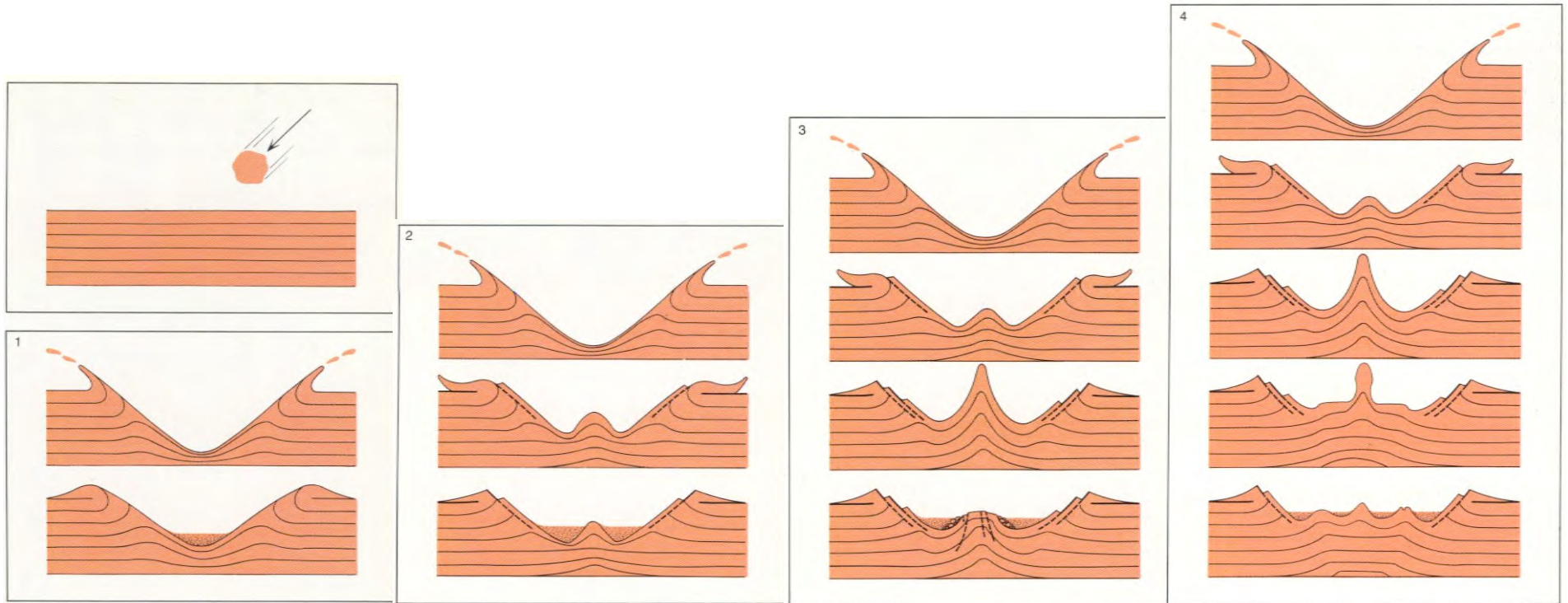
- Origine controversée : Impacts ? Volcanisme ?
- Element morphologique dominant, sur les 2 faces, variété de formes :
 - simples (bol) avec couronne de débris (éjecta) pour $\varnothing \leq 10$ km
 - complexes à fond plat + piton central, parois en terrasses, couronne + rayons de débris, pour $\varnothing = 20-200$ km
 - bassins ≥ 200 km avec anneau central (Orientale, Imbrium)
- Présence de cratères partout sur la Lune (y compris régions non volcaniques = continents = 80% de la surface)
- Comparaisons avec cratères terrestres
- Simulations en labo, explosions
- Traces d'ondes de choc



Origine des cratères ?

→ origine = impacts !

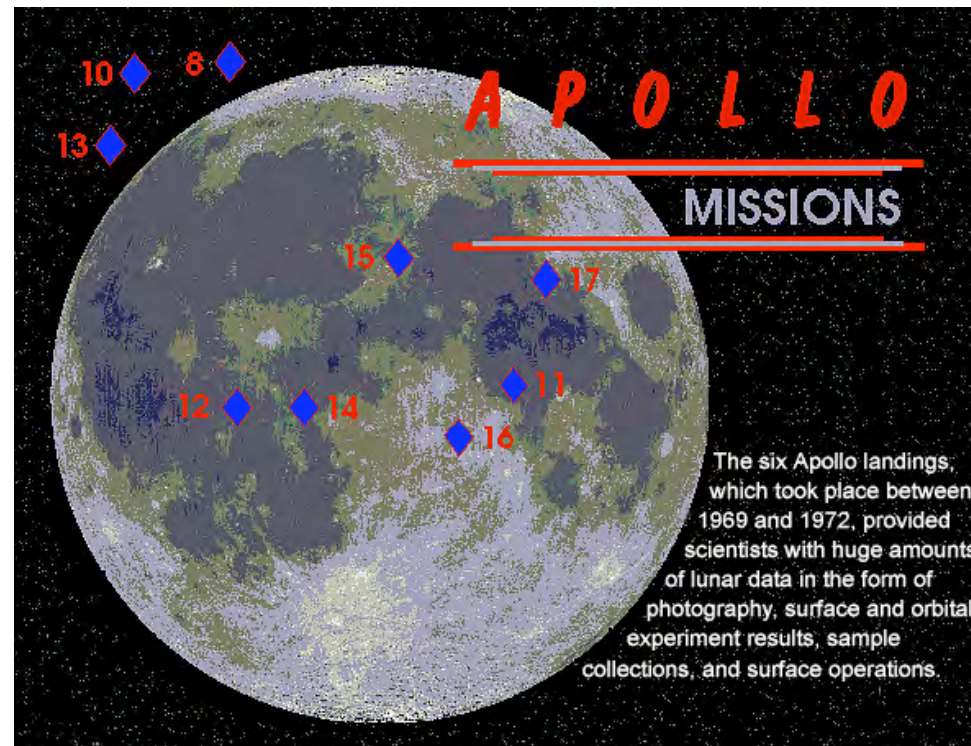
- Pitons & anneaux centraux = rebonds d'onde de chocs
- Terrasses = glissements de terrain



- Densité de cratérisation → chronologie relative
(+ assombrissement par criblage)
→ Mers jeunes, Continents + anciens !

Le Programme Apollo

- Apollo 1-17 (1967-72) : 6 vols habités avec alunissage d'astronautes (A7-10) tests
(A11) alunissage le 20/7/1969, Mer de la Tranquillité
(A12,14-17) données scientifiques, rendez-vous A12-S3 (mesure de l'exposition au vent solaire), derniers pas en 12/1972 (A17)
 - ~400 kg d'échantillons ramenés sur Terre
 - impacts scientifique, culturel, économique, stratégique considérable



Résultats Scientifiques du Programme Apollo

- Orbitographie + altimétrie Laser
- Mesures (physico-chimiques) en orbite
- Mesures in situ
- Analyses d'échantillons

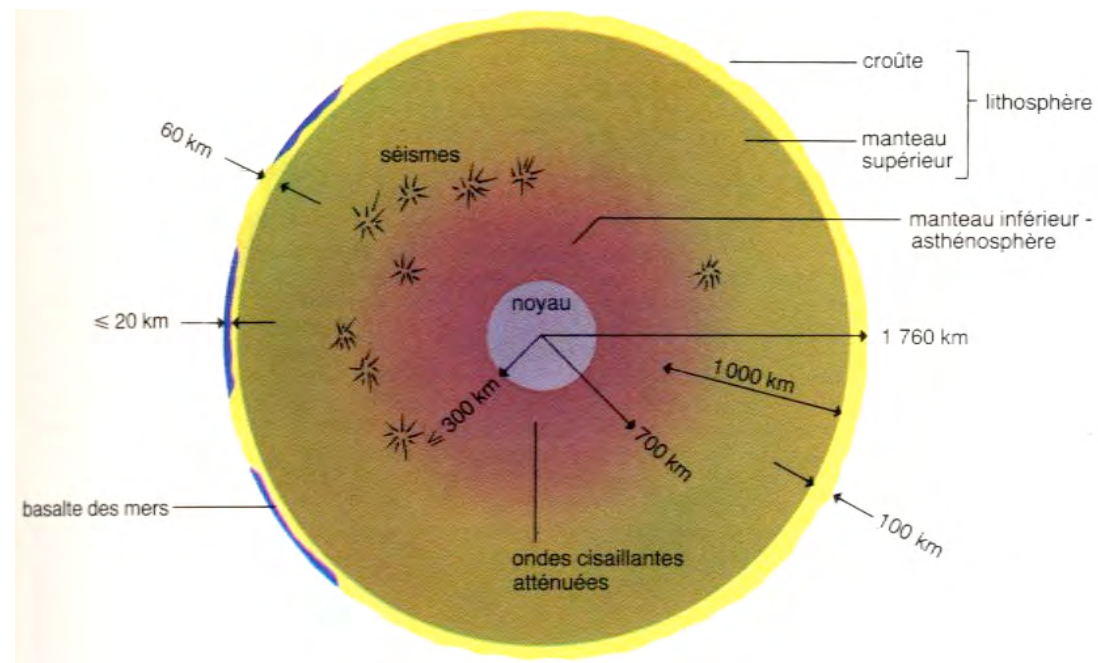
• Orbitographie + altimétrie Laser

→ $R_{\text{LUNE}} = 1737 \text{ km}$, $M_{\text{LUNE}} = 7,35 \times 10^{22} \text{ kg}$, $\rho_{\text{LUNE}} = 3.344 \text{ g/cm}^3$

→ Moment d'inertie = $0,99 \times$ Sphère Homogène ($0,8$ pour la Terre)

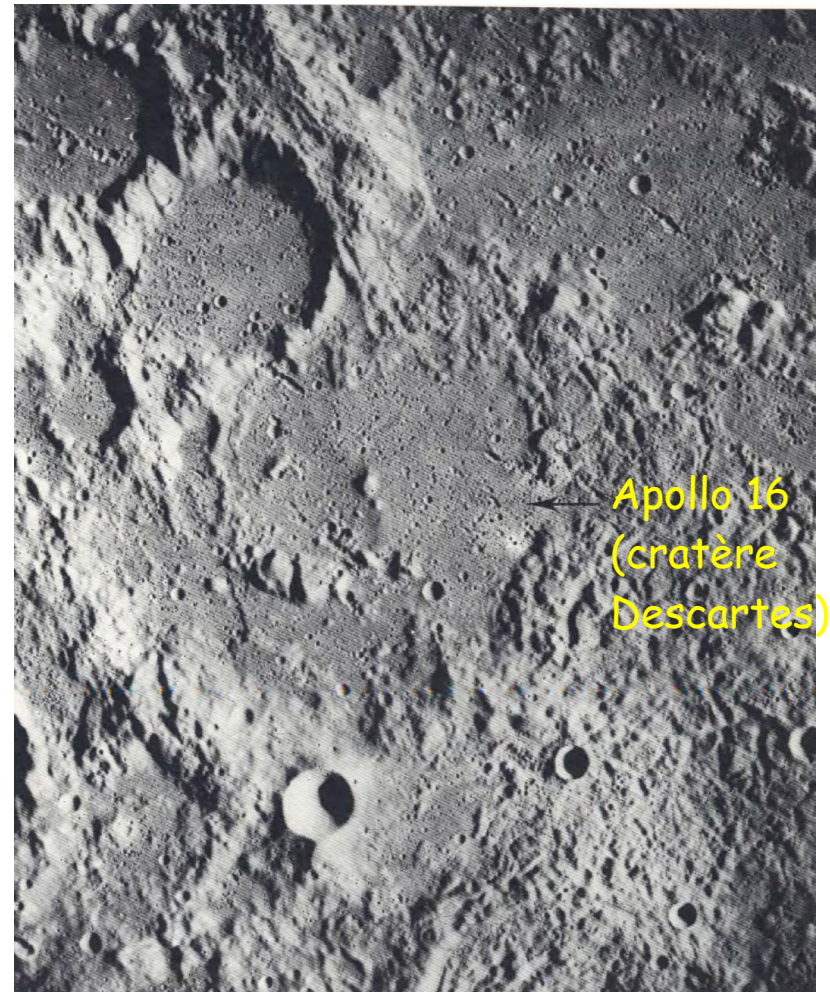
→ noyau métallique $< 400 \text{ km}$

→ Face cachée 4 km + élevée que la face visible / centre de masse (sans anomalie de gravité associée) → croûte + épaisse (100 km) et + légère que sur la face visible (50 km)



- Mesures en orbite (1)

→ Imagerie optique : cartographie complète au km de résolution, >50% à 100 m de résolution autour de l'équateur

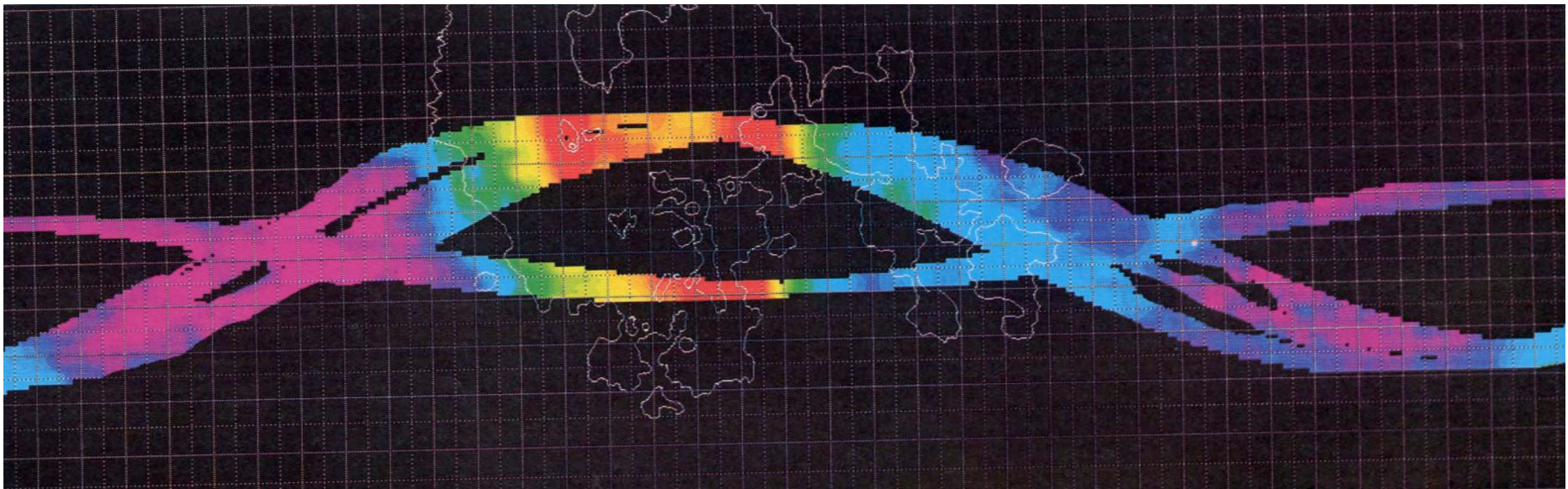


- Mesures en orbite (2)

→ Spectrométrie X (fluorescence provoquée par le rayonnement X solaire) : composition chimique : Al, Si, Mg avec une résolution ~ 20 km, sur quelques μm de profondeur

→ Spectrométrie γ (désintégration naturelle de U, Th, K + irradiation du sol par le rayonnement cosmique galactique) : composition chimique (éléments radioactifs, Fe, Ti...) avec une résolution ~ 100 km, sur quelques cm de profondeur

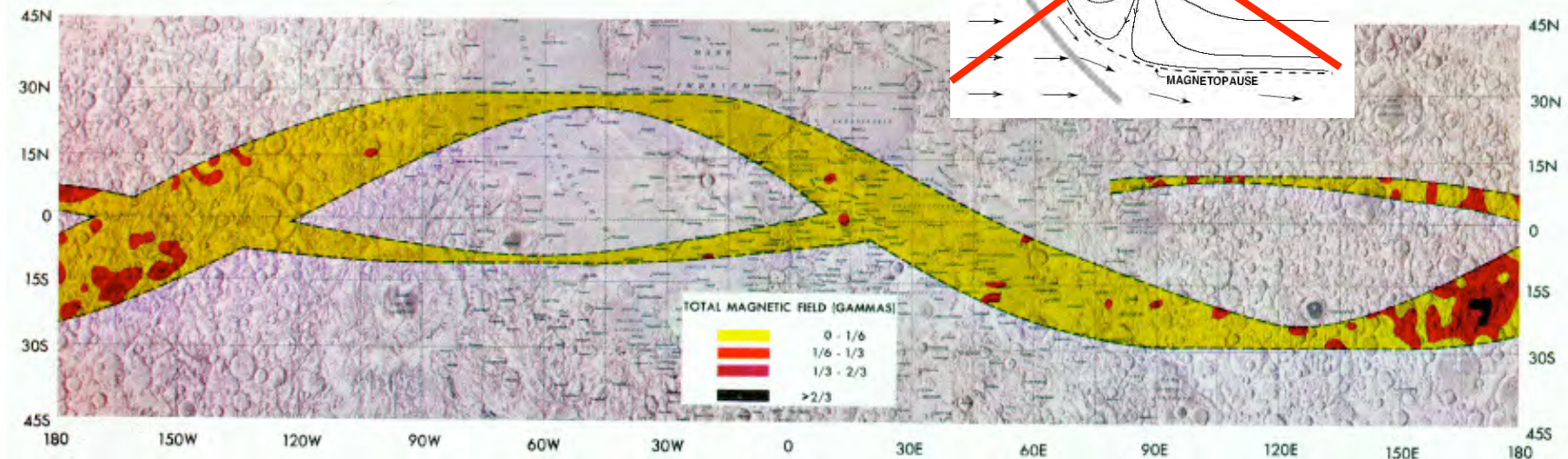
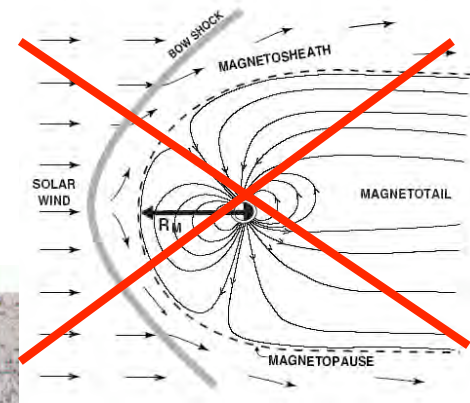
→ corrélation avec la topographie



Composition par spectrométrie γ sur Apollo-15

- Mesures en orbite (3)

- Champ magnétique lunaire : fluctuations très importantes avec la position
- Sources rémanentes de quelques dizaines de km de $\varnothing$ près de la surface
- Limite supérieure à $M_{\text{dipolaire-LUNE}} = 0,5 \times 10^{-6} M_{\text{dipolaire-TERRE}}$
- Champ de surface < 2-3 nT (Vent Solaire ambiant : 3-4 nT, Terre : 30000 nT)
- pas de magnétosphère globale



Contour de champ magnétique total, résolution 1°

- Mesures in situ

- Sondages sismiques actif (mortier, LEM, Saturn-V)

- et passif (marées, contraintes thermiques jour/nuit, impacts)

- Rares séismes proches de la surface, 600-900 km de profondeur

- Structure interne : lithosphère inactive de grande épaisseur (~1000 km = manteau externe et croûte de 50-100 km) [*Terre : lithosphère <100 km*]

- Pas de noyau métallique fondu dense.

- Anomalies magnétiques locales ~100 nT

• Analyses d'échantillons (1)

→ en surface + carottages de plusieurs mètres, jusqu'à plusieurs km du site

d'alunissage (A15+LEM) : évolution de la surface, jusqu'à -2 milliards d'années

→ datation absolue par radioactivité naturelle : histoire globale

- formation + différenciation de la croûte $-4,55 \times 10^9$ ans

- cratérisation intense $-4,4 - 3,8 \times 10^9$ ans

- épanchements de lave basaltique $-3,7 - 3,1 \times 10^9$ ans (rares volcans encore visibles) → formation des mers (pas sur la face cachée du fait de la croûte plus épaisse ?)

- bombardement météoritique résiduel jusqu'à aujourd'hui = processus principal de resurfaçage

- pas d'activité géologique ni d'érosion liquide/atmosphérique depuis plusieurs milliards d'années

Volcan
Lacus Veris
 $\varnothing = 6$ km
LO4



Rides
tectoniques
et coulées
de lave
Mons la Hire
Apollo 15



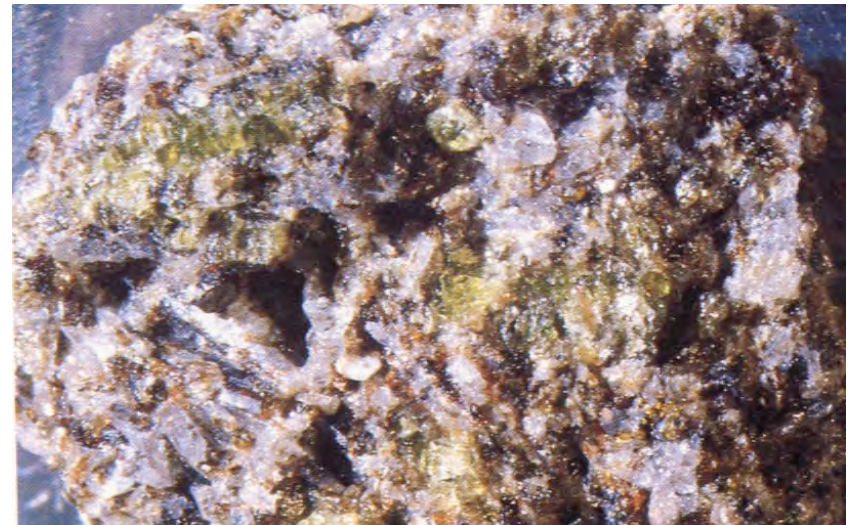
• Analyses d'échantillons (2)

→ minéralogie comparée mers / continents

- mers : laves basaltiques du manteau, ~35% de la surface visible
 - continents : feldspaths (Al, Ca...), ~80% de la surface totale
- ~ manteau terrestre / Si, Mg, Fe, mais très appauvri en éléments légers (volatils), et absence d'eau



Feldspath cristallisé à $-4,4 \times 10^9$ ans,
broyé par impact vers $-3,8/9 \times 10^9$ ans



Basalte (feldspath+olivine+pyroxène) résultant
De la cristallisation du magma primitif

• Analyses d'échantillons (3)

→ criblage des grains par :

- bombardement météoritique

broyage fin → formation du régolite sur quelques m d'épaisseur,
+ gouttelettes fondues par impact = sphérules, éclaboussures,
agrégats vitreux)

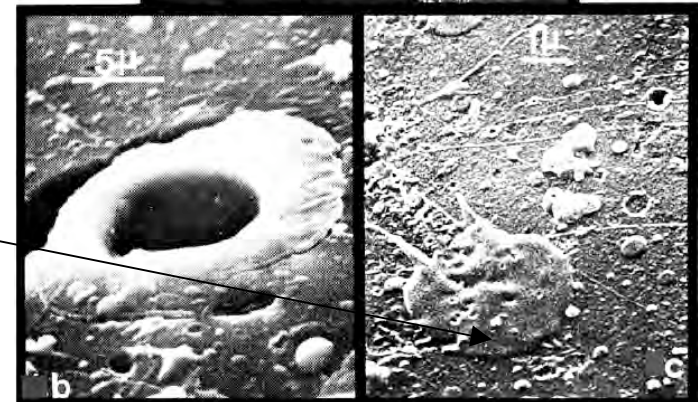
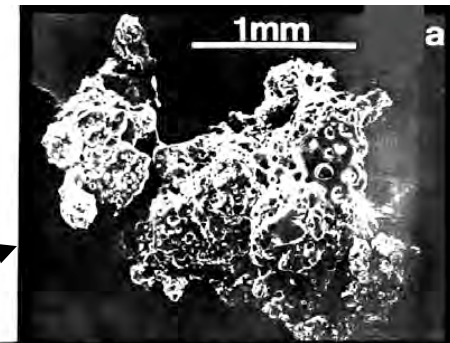


Sphérules

Gouttelette vitrifiée

Micro-cratère

Éclaboussure vitreuse
sur un grain



bêchage → mélange permanent (temps d'exposition à la surface
 $\sim 10^3$ ans pour un grain de $1 \mu\text{m}$, $\sim 10^5$ ans pour un grain de $100 \mu\text{m}$)

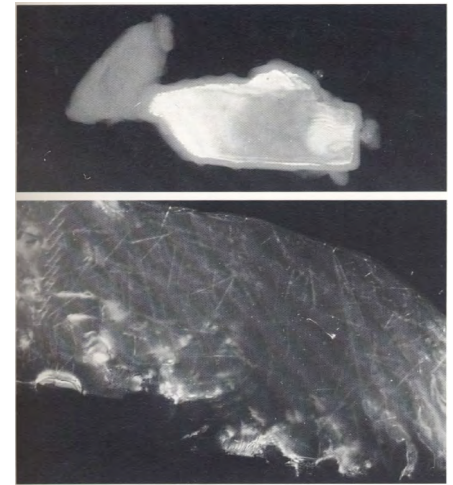
• Analyses d'échantillons (4)

→ criblage des grains par :

- Vent Solaire (10^{12} protons/cm²/s, 350-650 km/s = keV/nucléon)
 - irradiation des grains de surface ($\leq 0,1$ μ m de profondeur)
 - évolution de la composition isotopique de l'azote et de l'énergie moyenne des ions du VS sur 2×10^9 ans
- Rayonnement Cosmique solaire (10^6 protons/cm²/s, MeV/nucléon)
 - irradiation des grains ≤ 10 μ m de profondeur
 - traces d'irradiation des ions lourds (Fe...)
- Rayonnement Cosmique galactique (10^4 protons/cm²/s, GeV/nucléon)
 - irradiation des grains jusqu'à 1 m de profondeur
 - réactions nucléaires sur les atomes constitutifs des grains
 - histoire de la stratification du sol et évolution des RC ($\sim$ nulle sur les derniers 2×10^9 ans)

Globalement, « vieillissement » de la surface : érosion des reliefs (cratères), ~ 1 m/ 10^6 ans, assombrissement progressif de la surface, effacement des contrastes.

***NB :** l'analyse d'échantillons < 1 mg informe sur les propriétés globales des corps planétaires, voire du système solaire et du milieu interplanétaire !*



Après Apollo, arrêt de
l'exploration spatiale de la
Lune durant ~20 ans ...

Argh !

Origine de la Lune ?

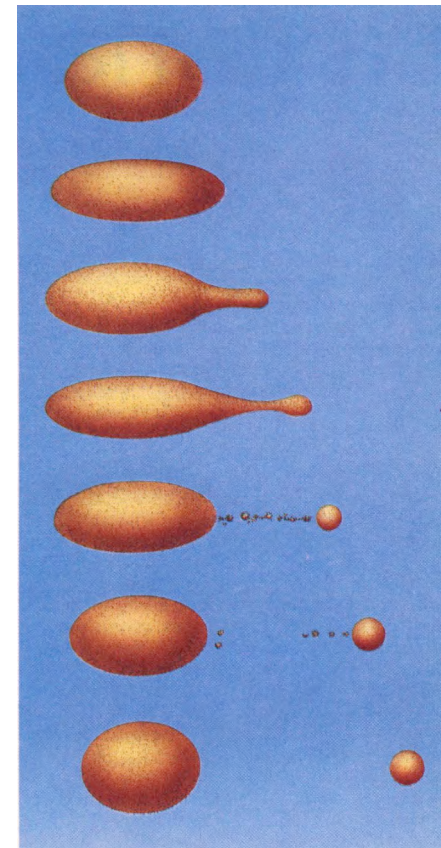
- 3 modèles proposés :

(1) fission du manteau terrestre en rotation rapide ($\sim 2h$)

Pour : densité ($\sim 3,3 \text{ g/cm}^3$) et composition (Si, Mg, Fe) similaires, faible teneur en Fe car concentré dans le noyau terrestre avant la fission

Contre : rapport des masses $1/81$? angle de 5° entre l'orbite lunaire et l'écliptique ($23^\circ 27'$ pour l'équateur terrestre) ?

→ difficiles à expliquer



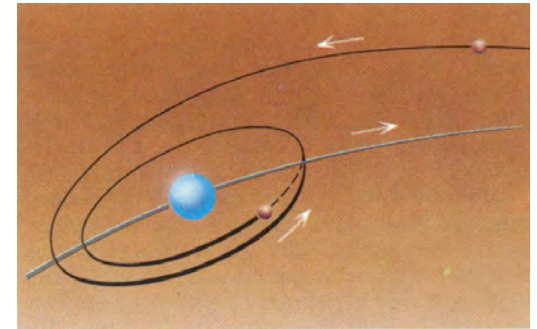
Origine de la Lune ?

- 3 modèles proposés :

(1) fission du manteau terrestre en rotation rapide ($\sim 2h$)

Pour : densité ($\sim 3,3 \text{ g/cm}^3$) et composition (Si, Mg, Fe) similaires, faible teneur en Fe car concentré dans le noyau terrestre avant la fission

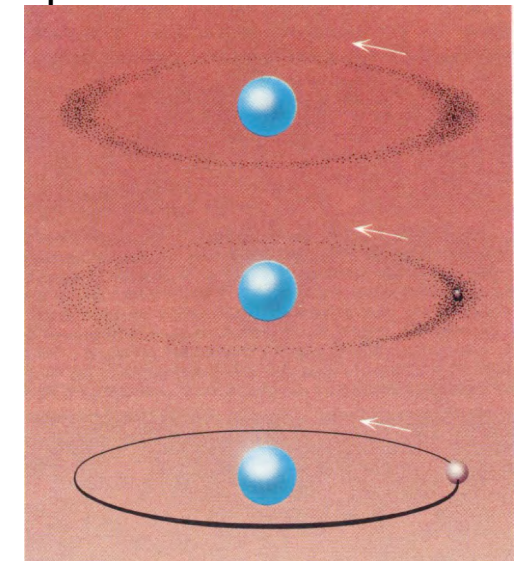
Contre : rapport des masses $1/81$? angle de 5° entre l'orbite lunaire et l'écliptique ($23^\circ 27'$ pour l'équateur terrestre) ?
→ difficiles à expliquer



(2) capture d'un planétoïde par la Terre

Pour : effets de marées → Lune plus proche de la Terre dans le passé

Contre : événement très improbable, orbite initiale du planétoïde $\sim 1 \pm 0,05 \text{ UA}$ → pourquoi une composition globale si différente, sans gros noyau métallique ?



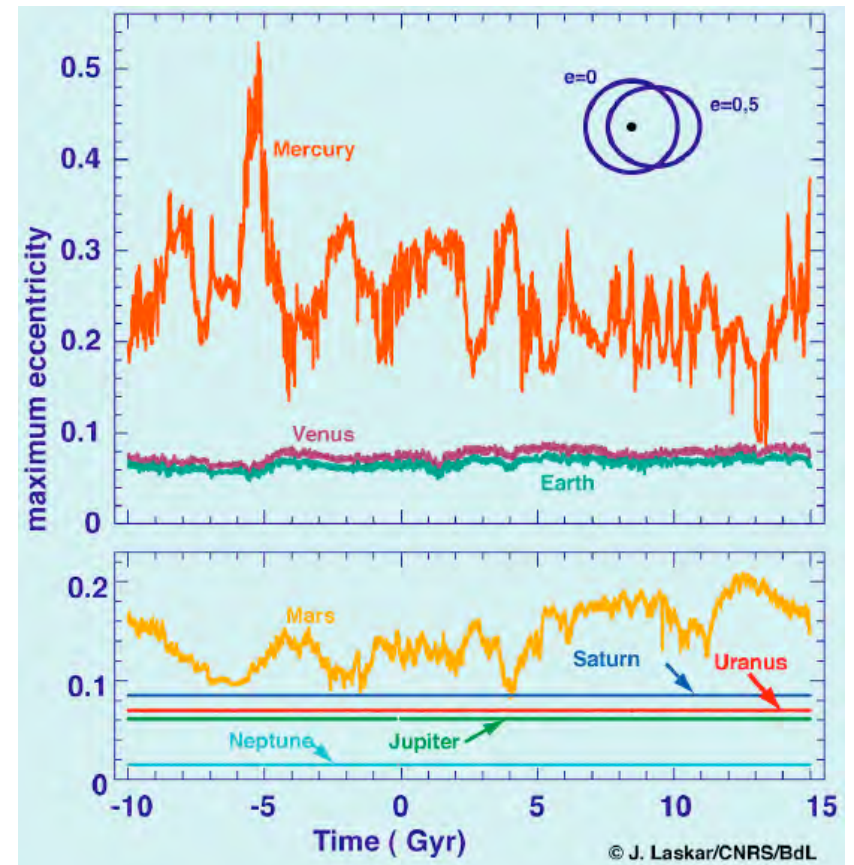
(3) accrétion circumterrestre

Pour : pas d'événement cataclysmique

Contre : pourquoi une composition globale si différente, sans gros noyau métallique ?

Origine de la Lune ?

- 1980's :
 - simulations numériques de dynamique chaotique
 - les orbites planétaires peuvent varier brutalement après des millions d'années de quasi-stabilité, du fait des perturbations dues aux planètes géantes
 - collisions entre planétoïdes + probables



Origine de la Lune ?

- 1980's :

- simulations numériques de dynamique chaotique

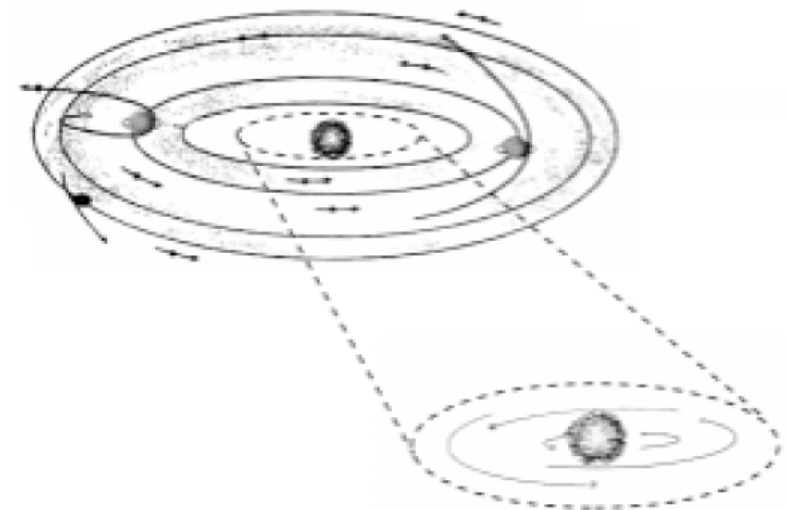
- les orbites planétaires peuvent varier brutalement après des millions d'années de quasi-stabilité, du fait des perturbations dues aux planètes géantes

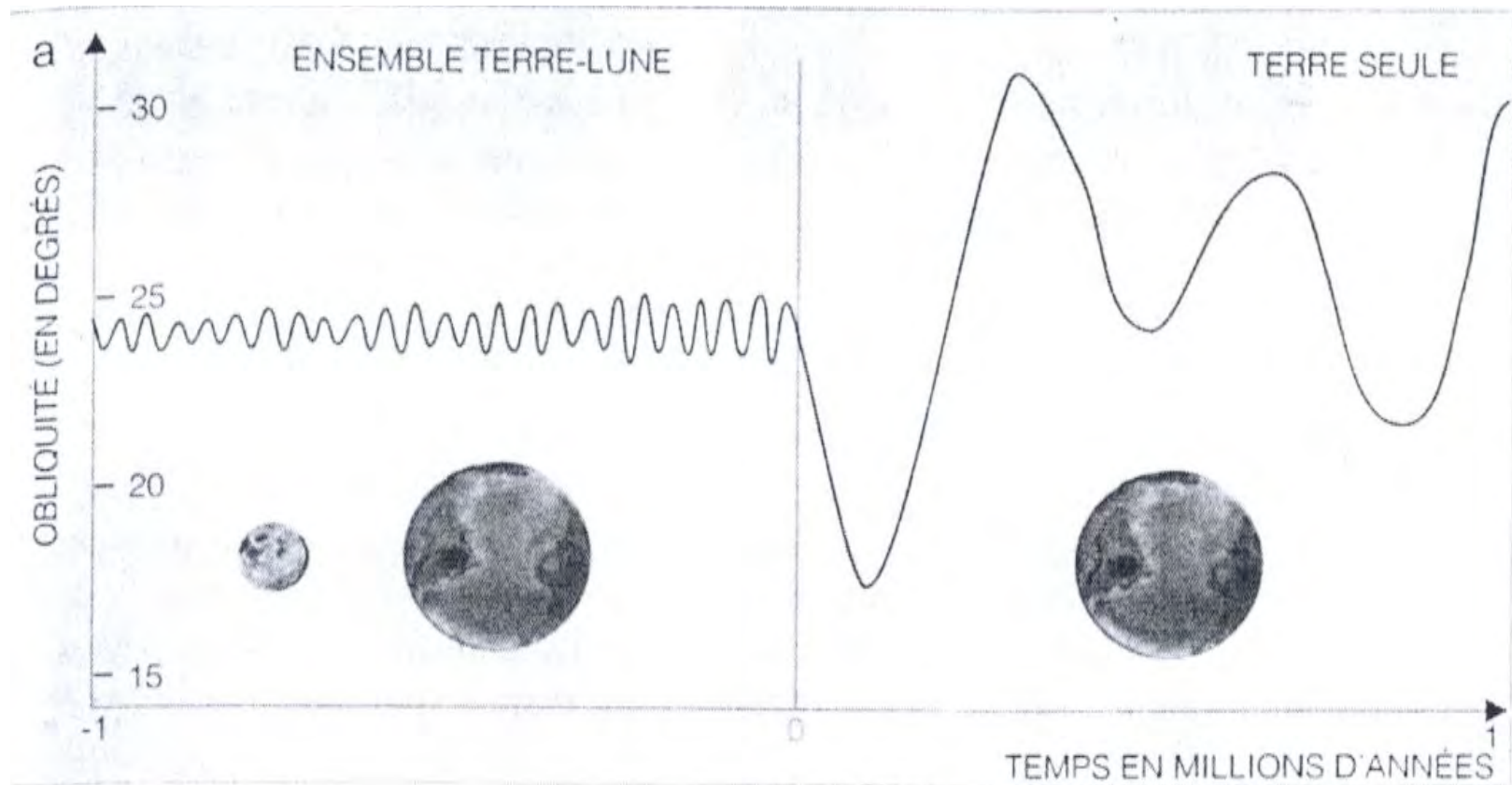
- collisions entre planétoïdes + probables

- simulations de collisions (hydrodynamiques 3D)

- un impact latéral entre un planétoïde (~Mars) et la Terre résulte en une éjection en orbite terrestre elliptique et inclinée d'une partie des manteaux + fusion des noyaux

- le scénario (2) devient le + plausible
(et permet de réduire le nombre de planétoïdes telluriques produits par les simulations de formation du SS de ~20 à 4)





NB : la Lune stabilise aussi l'axe de rotation terrestre
→ cf. conférence de J. Laskar !

Température & Atmosphère

- Equilibre entre rayonnement solaire et rayonnement réémis
 - $T_{\text{TERRE}} \sim 260 \text{ °K}$ (+ 30 °K d'effet de serre)
 - $T_{\text{LUNE}} \sim 280 \text{ K}$ en moyenne
 - $T_{\text{LUNE-subsolare}} \sim 380 \text{ °K}$
 - $T_{\text{LUNE-nuit}} \sim 120 \text{ °K}$
- Gravité lunaire trop faible pour retenir une atmosphère à ces température : temps d'échappement entre $\sim 3000 \text{ s (H)}$ et $3 \times 10^8 \text{ ans (Ar)}$ $\ll$ âge du système
 - pas d'atmosphère lunaire
 - pas d'ionosphère
- Exo-ionosphère temporaire par criblage côté jour

Seules les régions proches de l'équateur avaient
été cartographiées avec une bonne résolution /
minéralogie et composition chimique

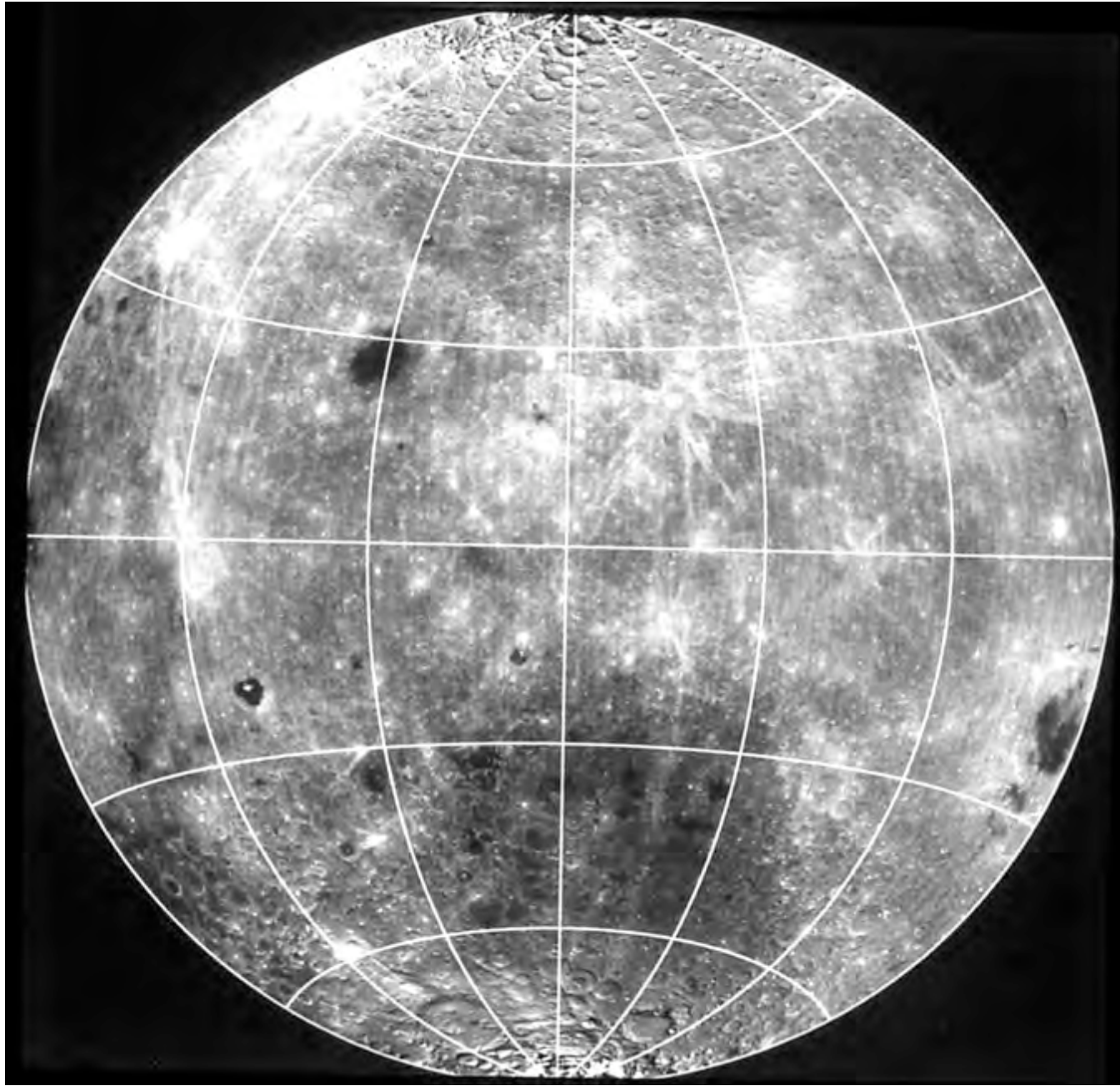
→ Reprise de l'exploration dans les 1990's ...

Aaaaahhhh !

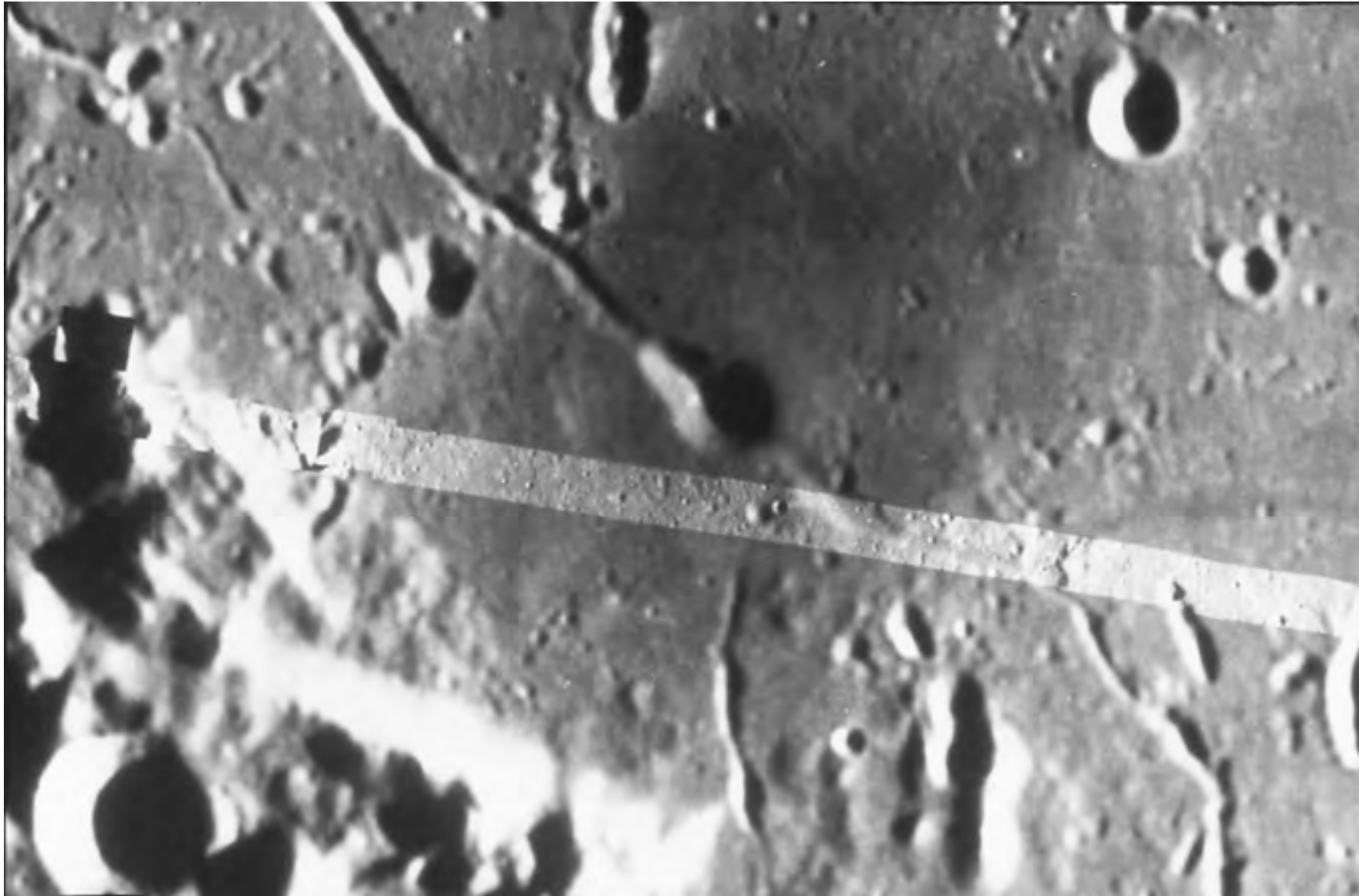
USA :

- Galileo : survols lunaires lointains en 1990 et 1992
(lors de survols de la Terre pour assistance gravitationnelle vers Jupiter)
→ observations multispectrales de la face cachée et des régions polaires
- Clementine (1994) : petit orbiteur lunaire (150 kg)
 - mission NASA/défense US (+ CNES : compression d'images)
 - 71 jours d'opérations en orbites polaires elliptiques)
 - 1^{ère} cartographie complète de la surface (y compris les régions polaires)
 - $2,5 \times 10^6$ images à 11 longueurs d'ondes (UV à IR)
 - résolution <100 m (10-100x > Galileo)
 - caméras, + topographie par altimétrie laser, électrons et protons énergétiques, radar bistatique bande S (+DSN)
 - composition/minéralogie globale 3D (Fe, Mg, Ti)
 - épaisseur de la croûte
 - zones d'ombre éternelle dans les régions polaires
 - glace d'eau au pôle sud dans ces zones ?

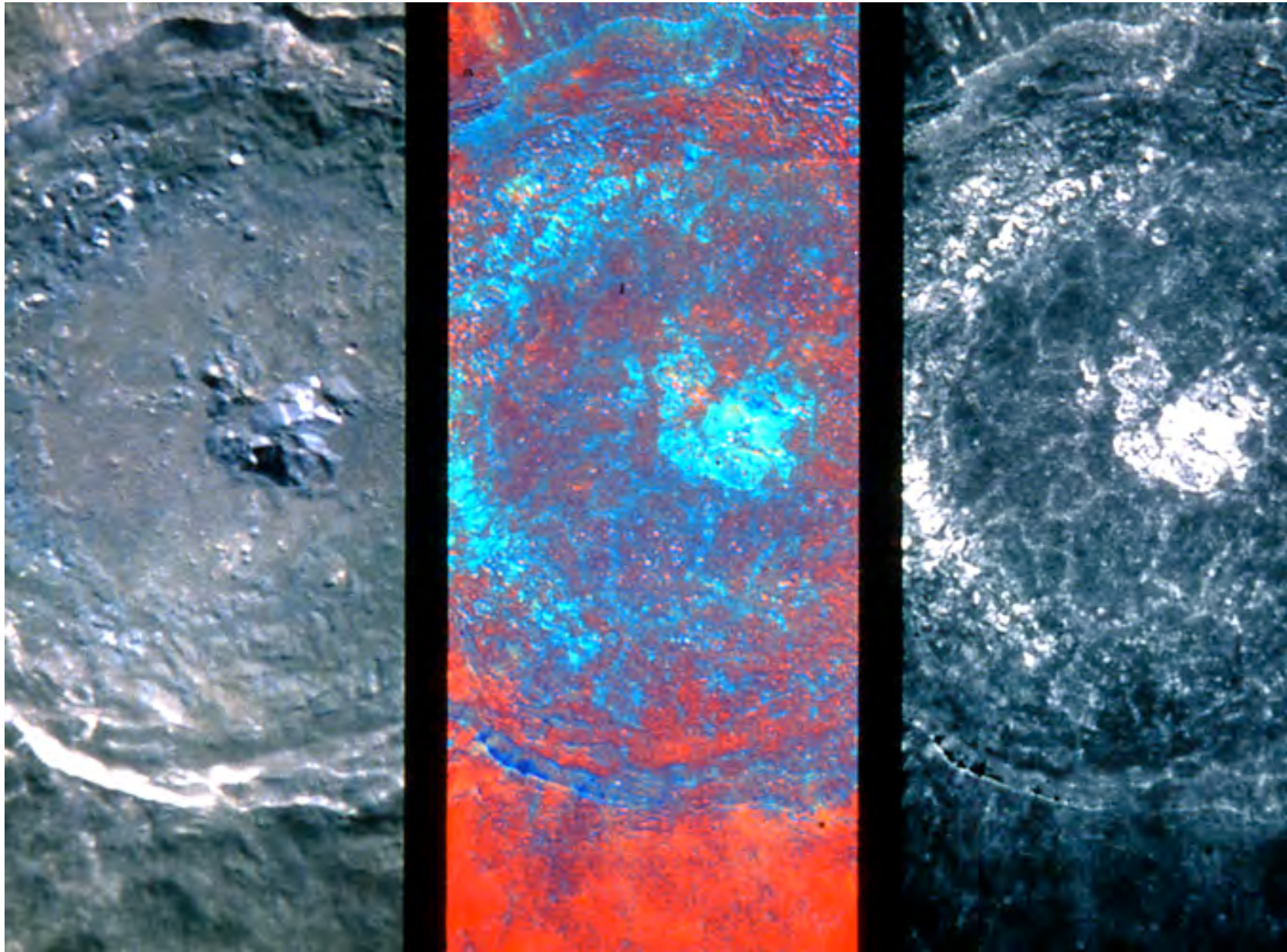




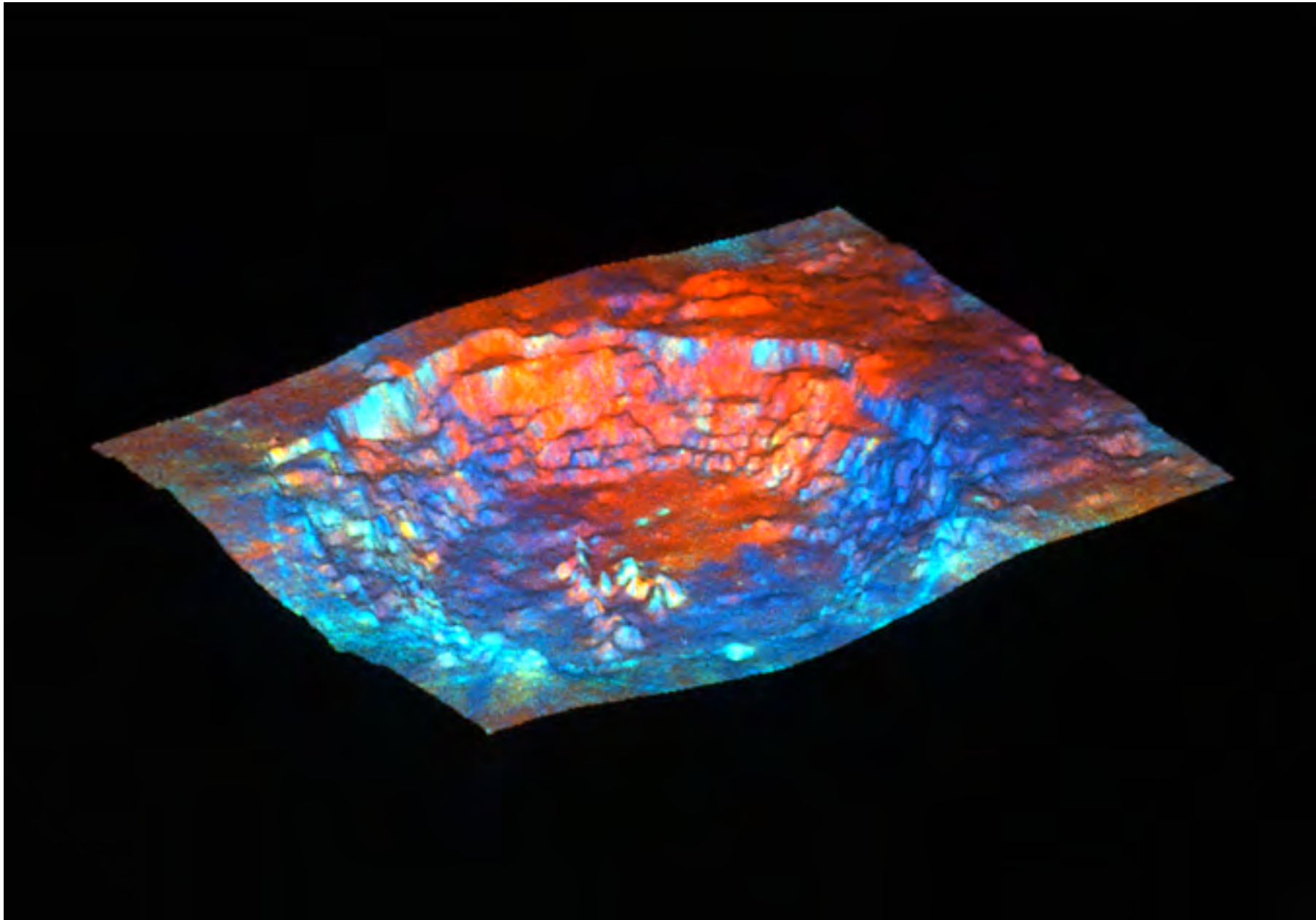
Clementine : albédo (réflectivité) de la face cachée, résolution = 1 km



Clementine : halo sombre en UV (cendres volcaniques) de $3,5 \times 10^9$ ans, dans le bassin Schrödinger



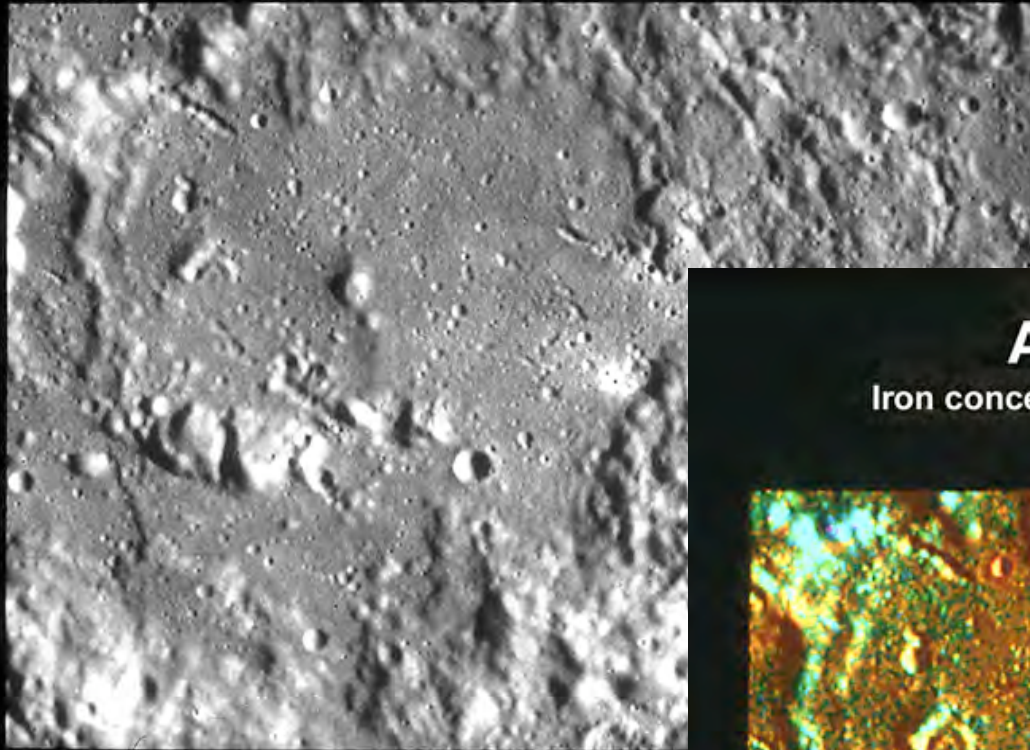
Clementine : mosaïques en fausses couleurs de Tycho,
révélant les natures de roches (ex. riches en Fe & Mg en bleu)



Clementine : vue 3D en fausses couleurs de Copernic,
→ composition/minéralogie et topographie

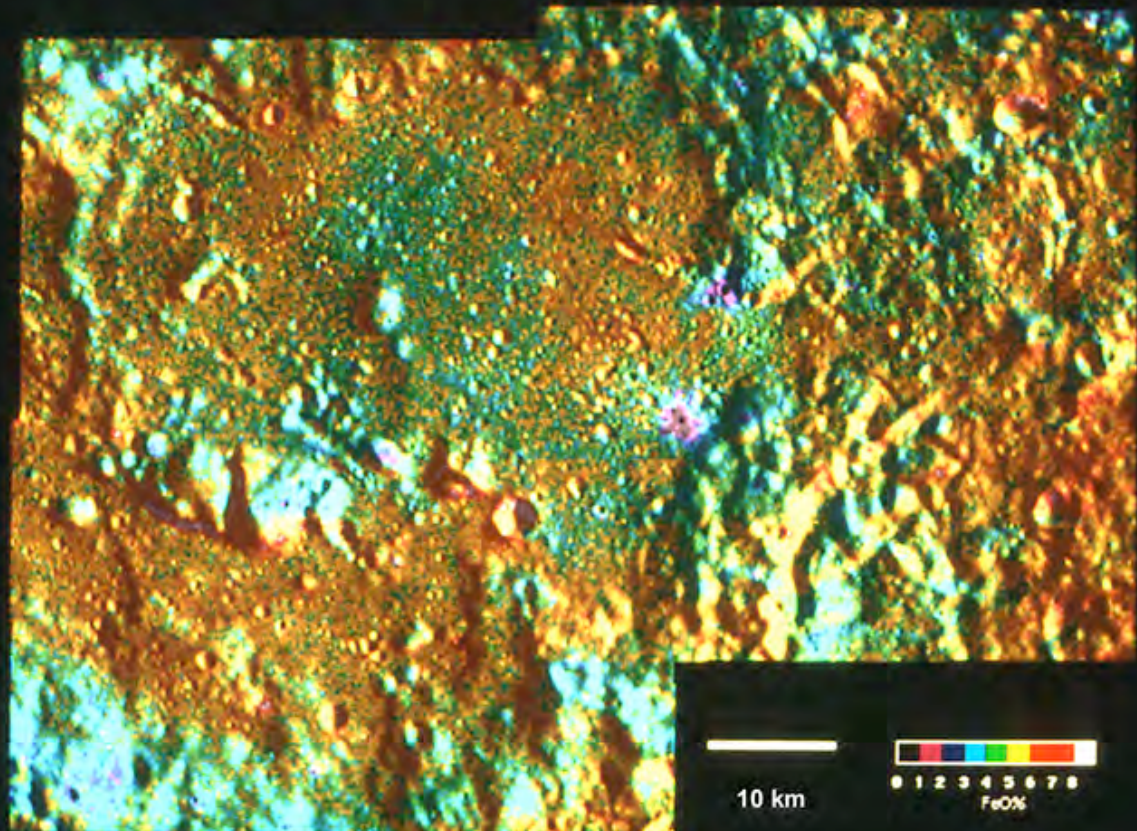
Apollo 16 Landing Site

Apollo Metric Image



Apollo 16 Landing Site

Iron concentration map overlaid on Apollo metric image

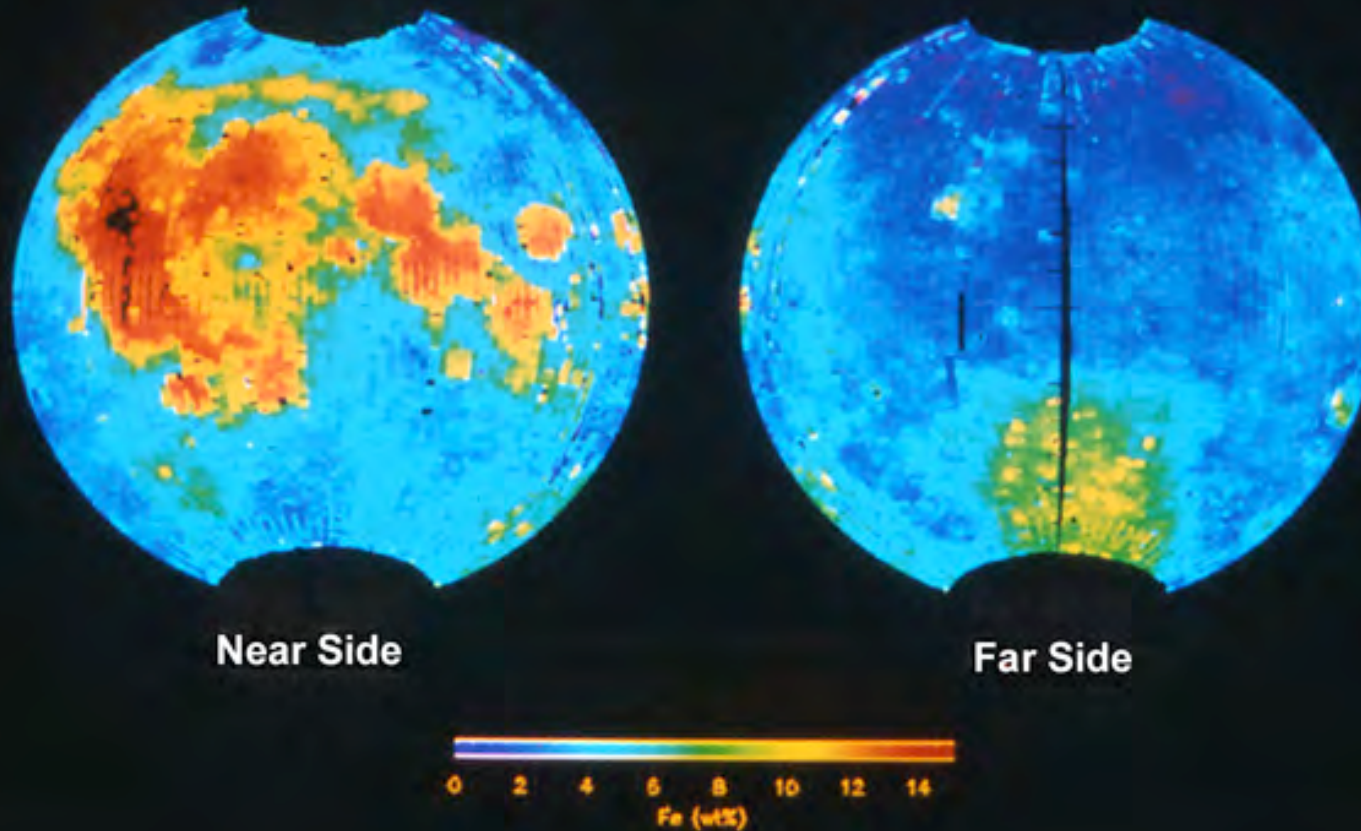


10 km



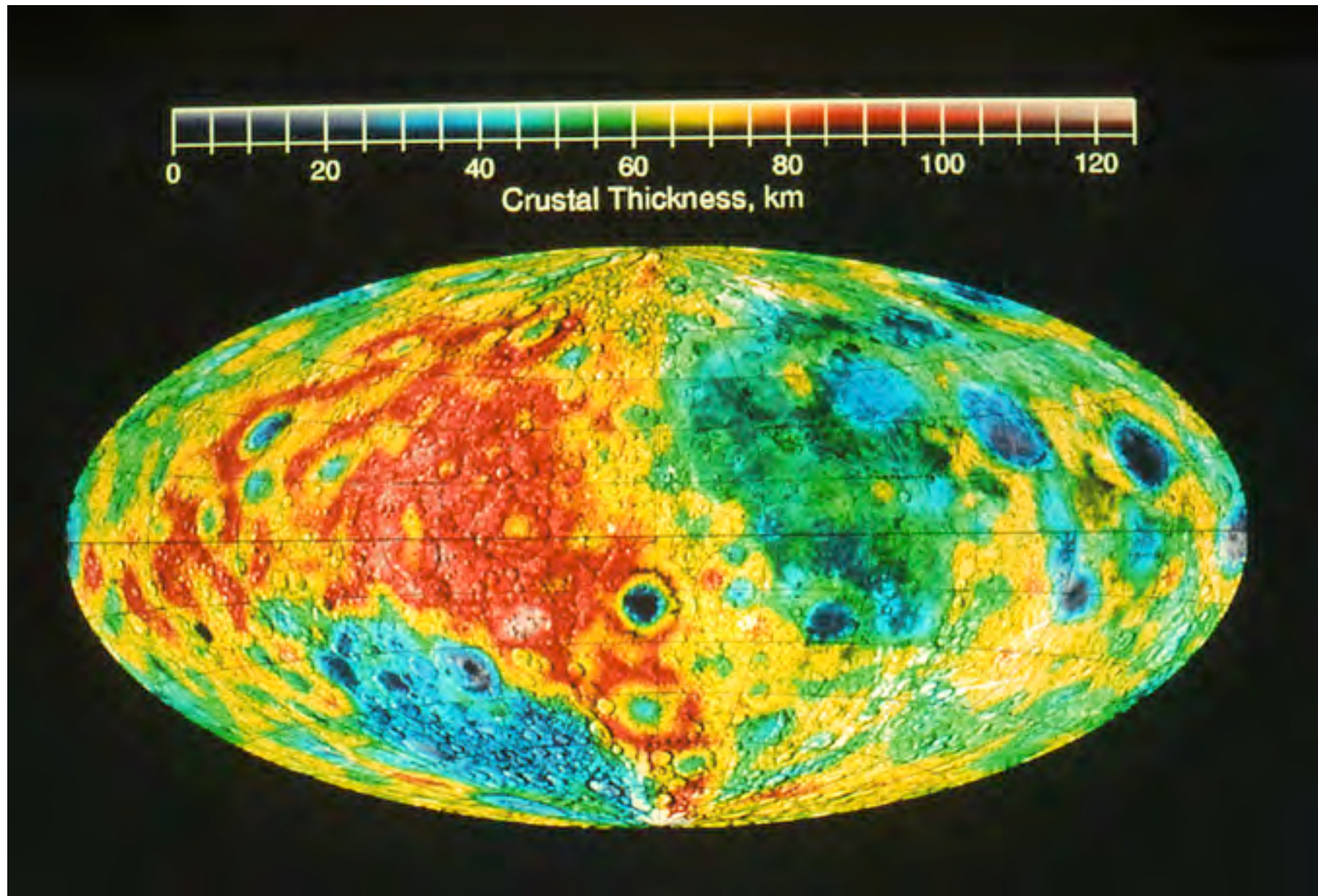
Clementine Iron Map of the Moon

Equal Area Projection



Mers / Bassins riches en Fer

Continents $\sim 0 \rightarrow$ fusion globale de la Lune primitive (différentiation) ?



Clementine : épaisseur de la croûte (*avec hypothèses / RADAR*)

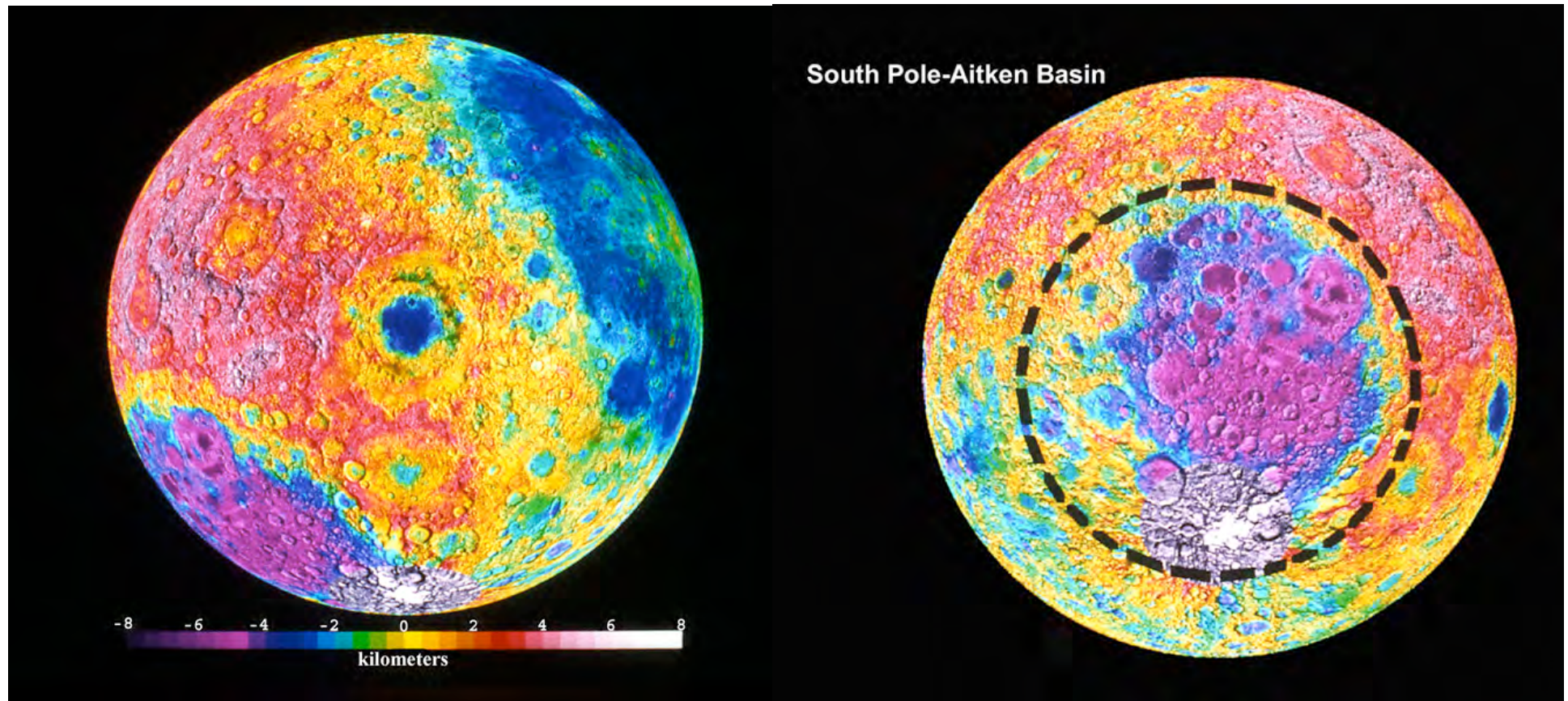
***Clementine* Topographic Map of the Moon**

Equal-area projection



-8 -4 0 +4 +8

kilometers



Clementine : cartes topographiques centrées sur
Mare Orientalis et le bassin d'Aitken

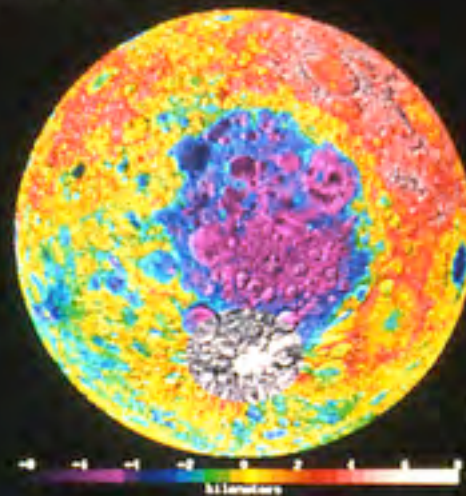
South Pole-Aitken Basin

Orthographic Projections centered at -56, 180

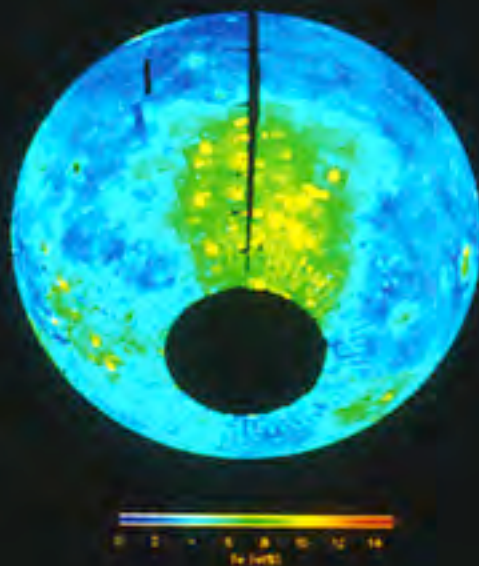
Albedo



Topography

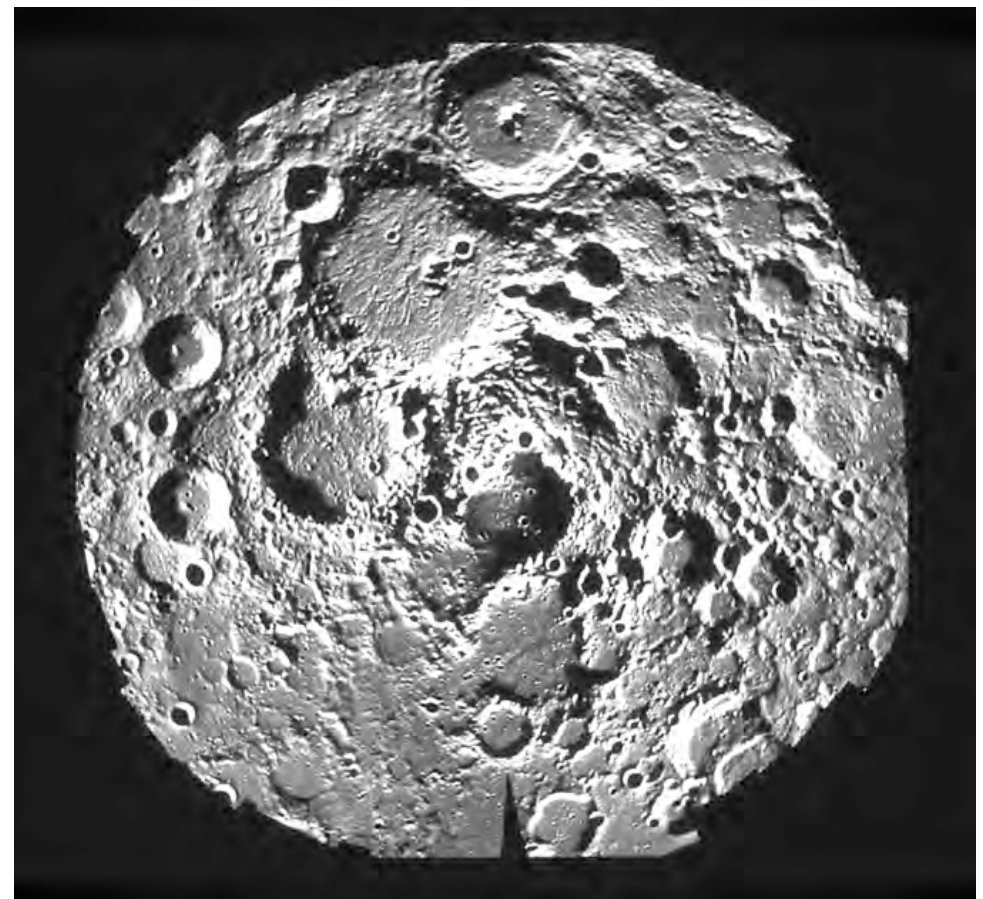
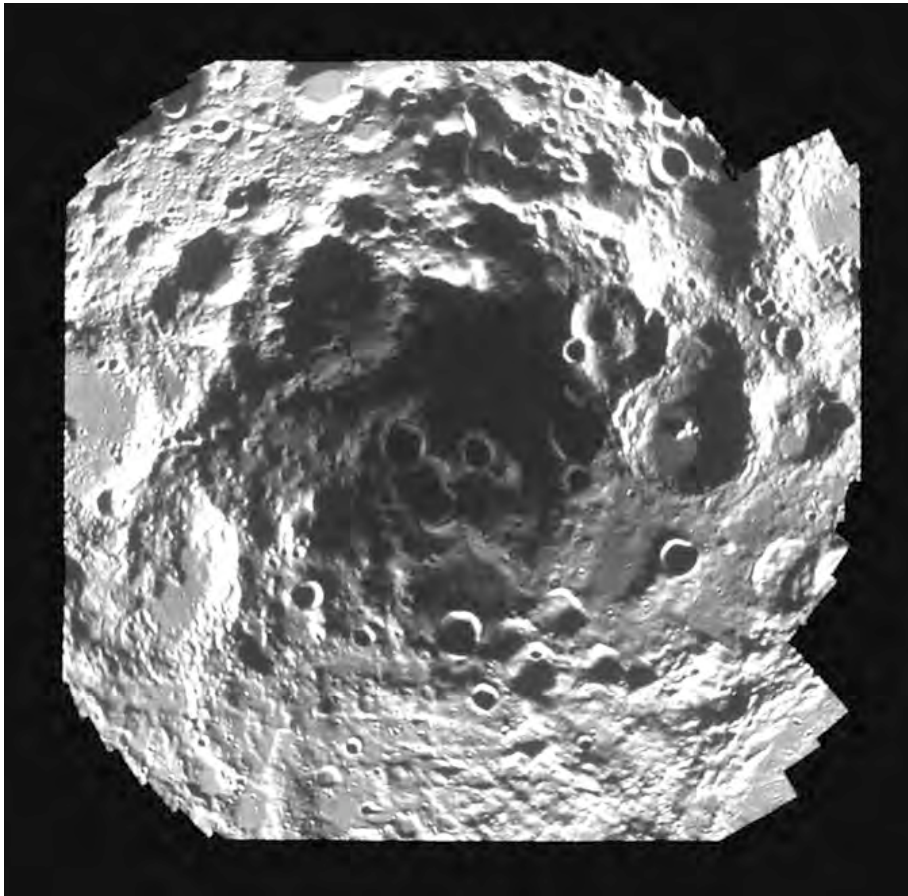


Iron



Titanium





Clémentine : Pôle Sud (6000-15000 km² dans l'ombre)
et Pôle Nord (~500 km²)

First and second month south polar views

Clementine mission - February - April, 1994



First month coverage

February 26, 1994-March 26, 1994

Sun elevation -1.6 to -1.0 degrees



Second month coverage

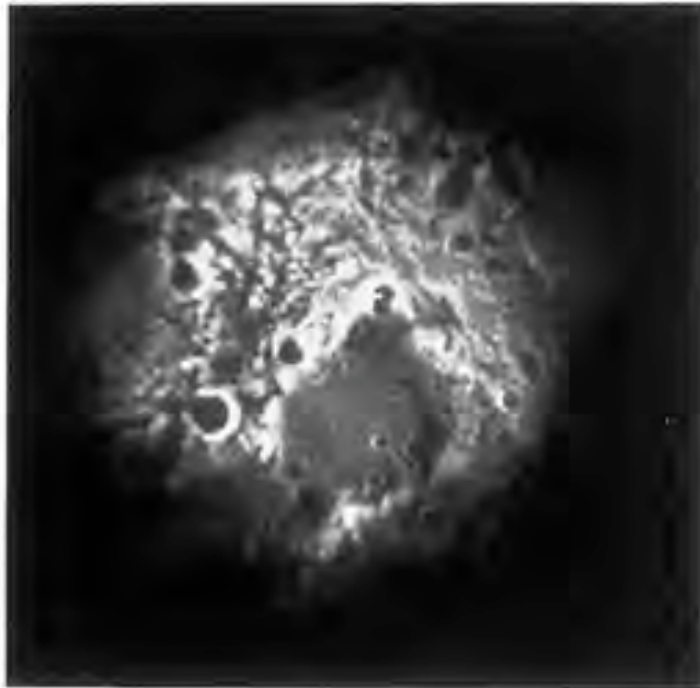
March 26, 1994-April 22, 1994

Sun elevation -1.0 to -0.4 degrees

Zones d'ombre éternelle : cratères Peary, Hermite, Rozhdestvenski, Plaskett
au Nord, bassin d'Aitken au Sud

Lunar Polar Composites

Cumulative images of the pole throughout one lunar day



North polar composite

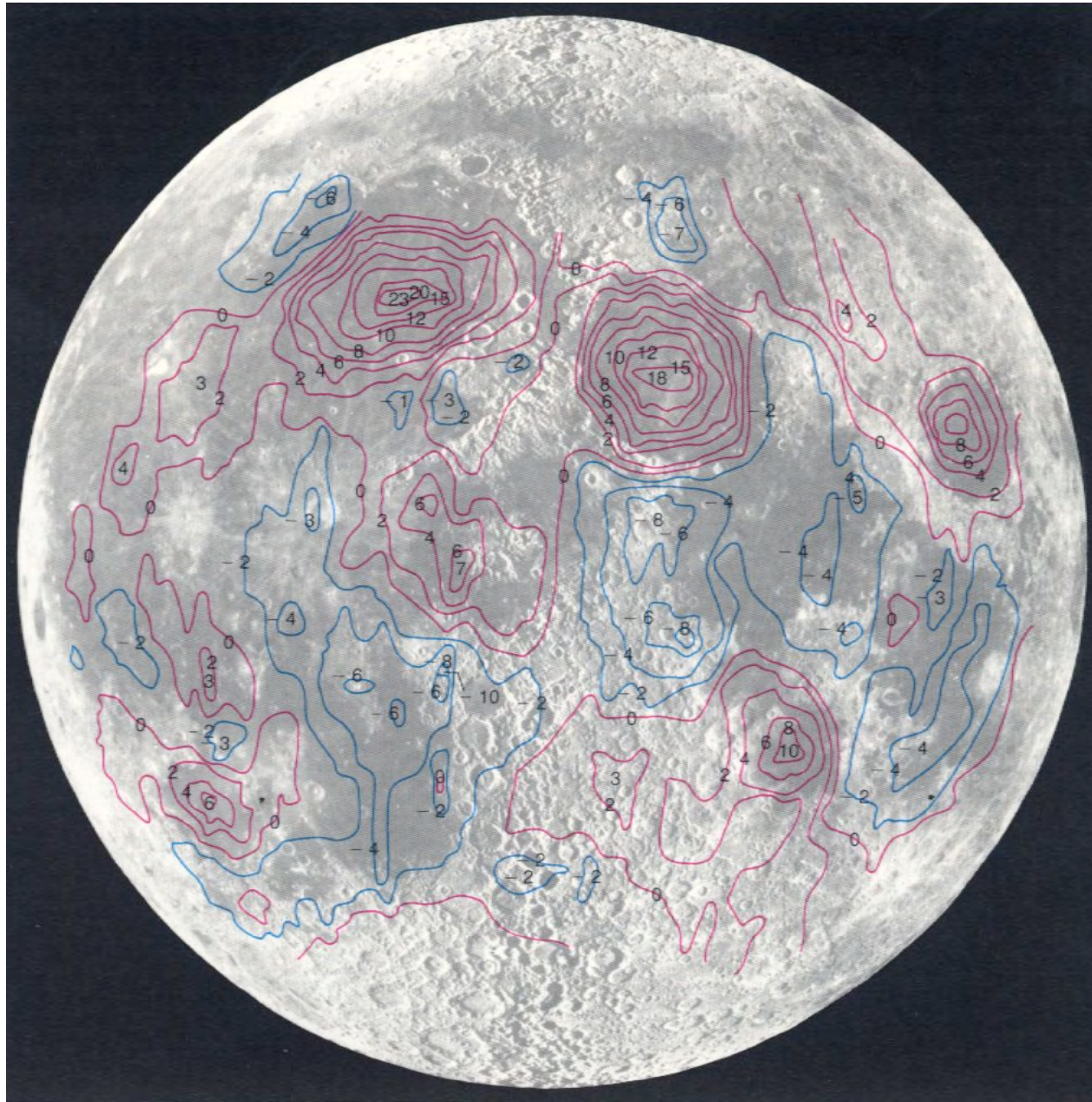


South polar composite

100 km

Clementine : Pics de « lumière éternelle » (d'illumination éternelle)

- Lunar Prospector (1998-99) : orbites basses polaires 100 puis 10 km
 - mission NASA « discovery »
 - 19 mois d'orbites, puis impact final au pôle sud le 31/7/1999
 - spectromètres α , γ et neutrons lents, magnétomètre, détecteur d'électrons, champ de gravité par orbitographie Doppler (pas de caméra)
 - ressources lunaire : eau ? énergie (illumination) ?
- composition surface
- répartition interne des masses
- spectromètre à neutrons : détection très sensible de H (donc de glace d'eau) au pôle sud ?
- dégazages ? pas d'eau détectée au moment de l'impact !
- Clémentine & Lunar Prospector
 - renouveau en géologie/géophysique lunaires !



Anomalies positives de gravité (rouge)
→ concentrations de basaltes denses dans les mers

De l'eau sur la Lune ?

- Clémentine (1996, RADAR) et Lunar Prospector (1998, spectromètre à neutrons lents) ont apparemment détecté la présence de glace d'eau dans les cratères avec ombre éternelle aux pôles N & S
- 0,3% à 1% de glace, mélangée au régolite + glace pure enterrée sous quelques x 10 cm de régolite ?
- Répartition sur quelques x 100 km², majoritairement au pôle N ?
(Total de 6×10^9 tonnes soit 60-120000 m³ ~ petit lac)
- Origine : impacts cométaires/météoritiques (idem Mercure) ?
- Subsistance : pas de sublimation/échappement seulement dans les régions d'ombre éternelle, où $T \sim 100$ K
- Enterrement possible via le criblage/bêchage météoritique

De l'eau sur la Lune ?

- Controverse :

- pas de photo possible en ombre éternelle !
- détection par Clémentine via réflectivité radar élevée (sur des plans inclinés) → interprétation difficile, non unique (variations de rugosité du sol...)
- observations radar à Arecibo (1997, 2003)
 - absence de détection aux pôles (mais sensible à de grandes masses ≤ 1 m de profondeur, idem Mercure)
 - détections occasionnelles de signatures analogues dans des régions illuminées
- pas de détection par impact de Lunar Prospector (malchance ?, glace finement mélangée au régolite → pâte de ciment ?)
- euuuuhhhhhh ???

De l'eau sur la Lune ?

- Importance :

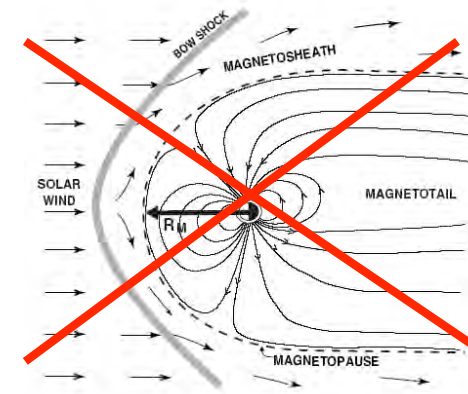
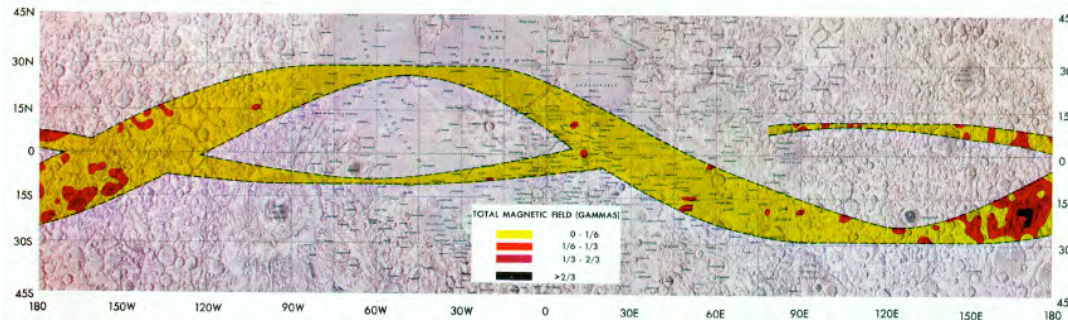
- glace primitive (matière originelle du SS) → retours d'échantillons
- contraintes aux modèles d'impacts, au bêchage météoritique, à la photodissociation, au criblage par le vent solaire
- source potentielle d'eau (H_2O), d'O, de H pour des bases humaines (coût d'emport depuis la Terre = 2000-20000 \$/kg, mais très difficile à extraire si mélangée au régolite)

→ cartographie topographique 3D des zones d'ombre éternelle par le DSN

→ aller effectuer des mesures in-situ ?

Le Champ Magnétique Lunaire

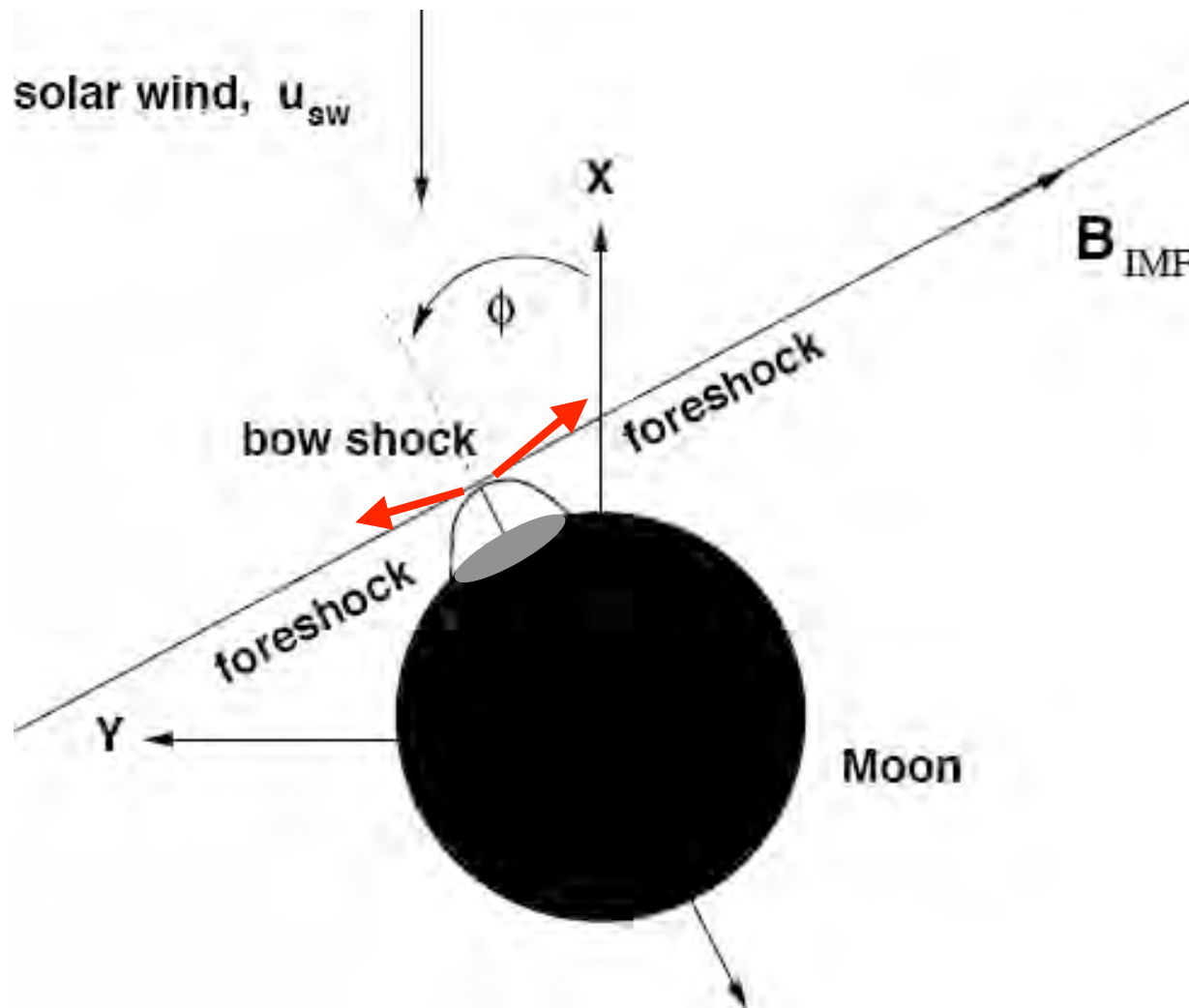
- Apollo : pas de champ magnétique global (la dynamo -3,6 -3,85 x 10⁹ ans est éteinte, le noyau conducteur refroidi)



- Champ crustal rémanent aléatoire, organisation à petite échelle
 - Lunar Prospector : champs intenses (~100 nT) à grande échelle (~200 km) diamétralement opposés aux grands cratères d'impact (Mare Imbrium, Mare Serenitatis)
- confirme/étend les mesures d'Apollo

Le Champ Magnétique Lunaire

- Origine de ces champs intenses ?
 - le nuage vaporisé/ionisé par l'impact converge vers l'antipode de l'impact en « poussant » et concentrant le champ magnétique
 - les débris tombant au même moment aux antipodes pourraient être magnétisés par le choc
- (une roche ou une barre de fer frappée au marteau peut perdre sa magnétisation et adopter celle du milieu ambiant)



→ création de « mini-magnétosphères » de quelques centaines de km de diamètre = écran pour le Vent Solaire

→ terrain plus clair (moins criblé) ?

→ émissions radio localisées près du choc ?

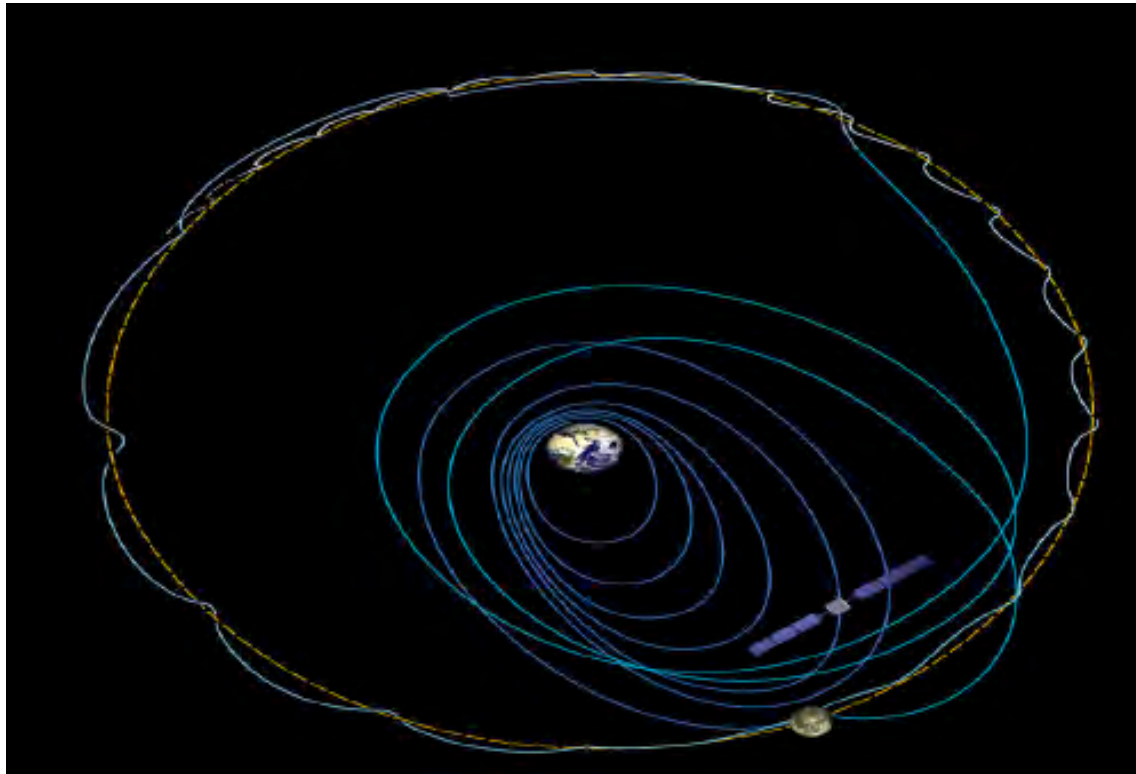
Autres Explorations Spatiales Lunaires

Japon :

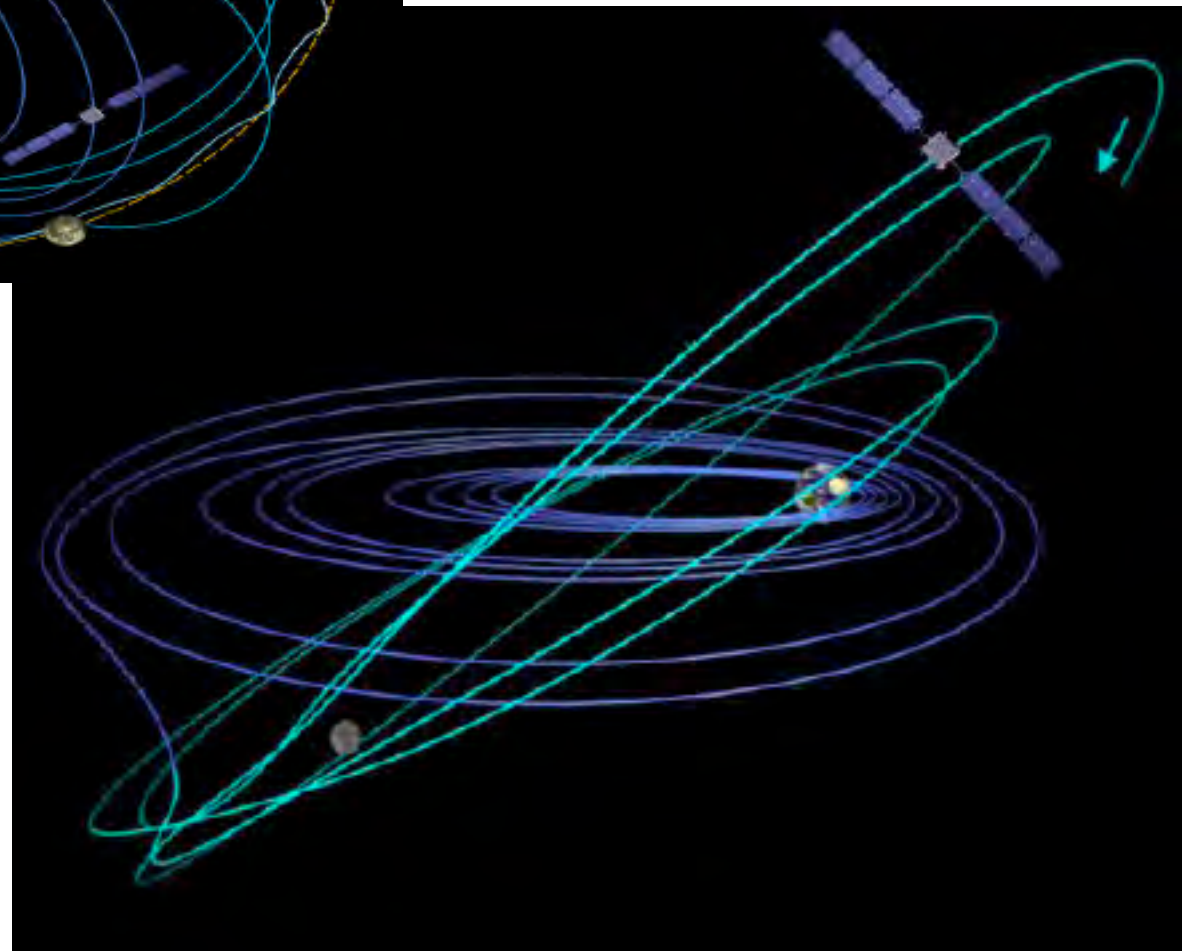
- Muses-A / Hiten (1980) : survol test de la Lune, manœuvres orbitales, injection d'un petit orbiter (Hagomoro), impact sur la Lune le 11/4/1993

Europe :

- Smart-1 (2003-2006): Small Missions for Advanced Research in Technology #1
: orbiter lunaire à propulsion ionique
 - lancement 27/9/2003, Ariane 5 GTO
 - croisière spirale, 14 mois de poussée à 70 mN = 7 g (consommation = 80 kg de Xe)
 - capture lunaire 15/11/2004, orbite lunaire 28/2/2005 → 3/9/2006
 - mission scientifique 2005-6 (orbite 300-3000 km avec PériLune au-dessus du pôle S)
 - impact prévu le 3/9/2006
 - micro-caméra multi- λ , mesures de plasma, lien radio (radio science), spectro-IR et spectro-X miniaturisés
- géologie, morphologie, topographie, minéralogie, géochimie (abondances absolues de Mg, Si, Al, Fe par spectro-X), environnement exosphérique
- formation, accrétion, dichotomie face visible/cachée, activité volcanique & tectonique à long terme, évolution thermique & dynamique, glace d'eau & processus externes de surface, ressources pour exploration future

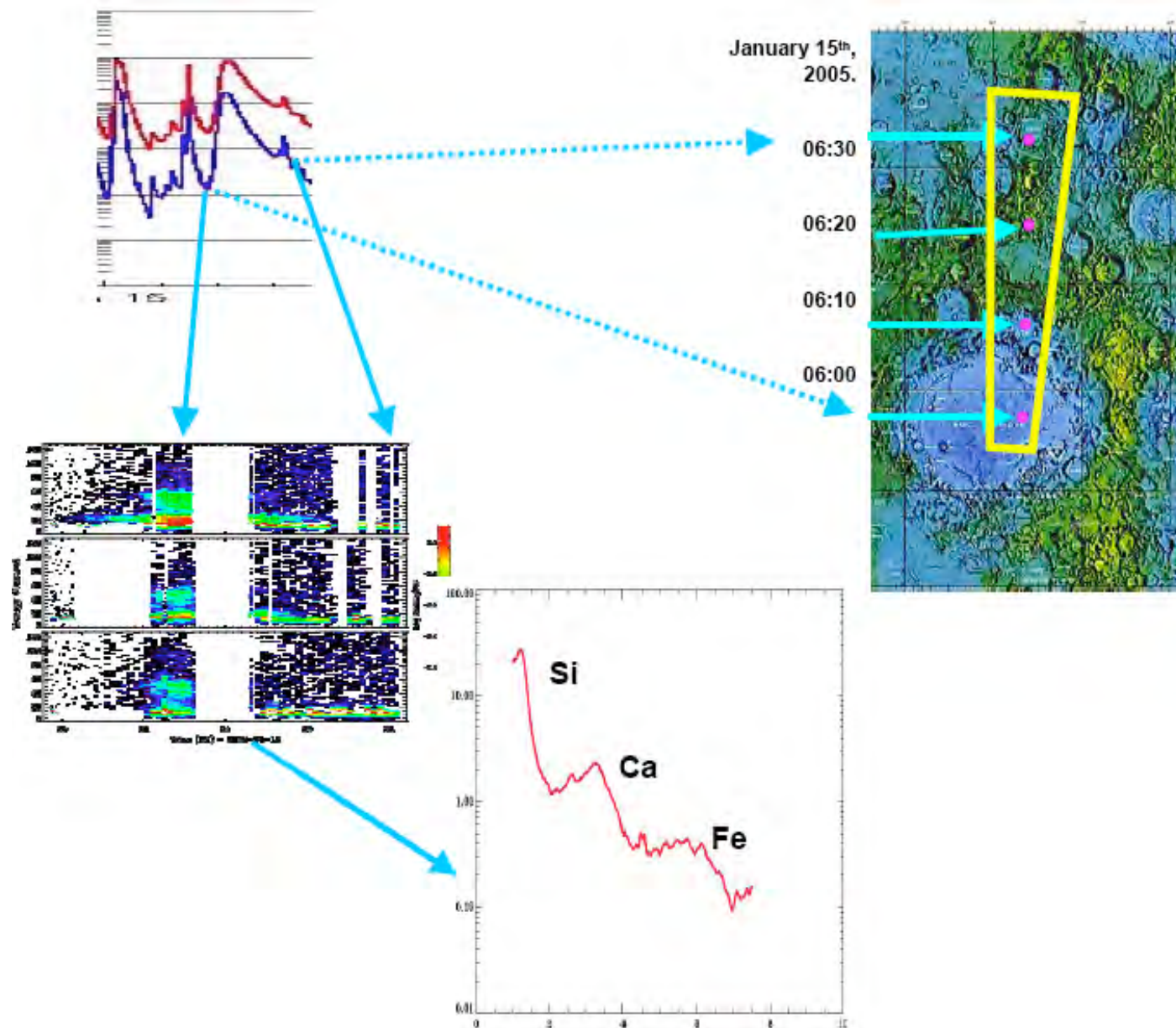


SMART-1 : Trajectoire



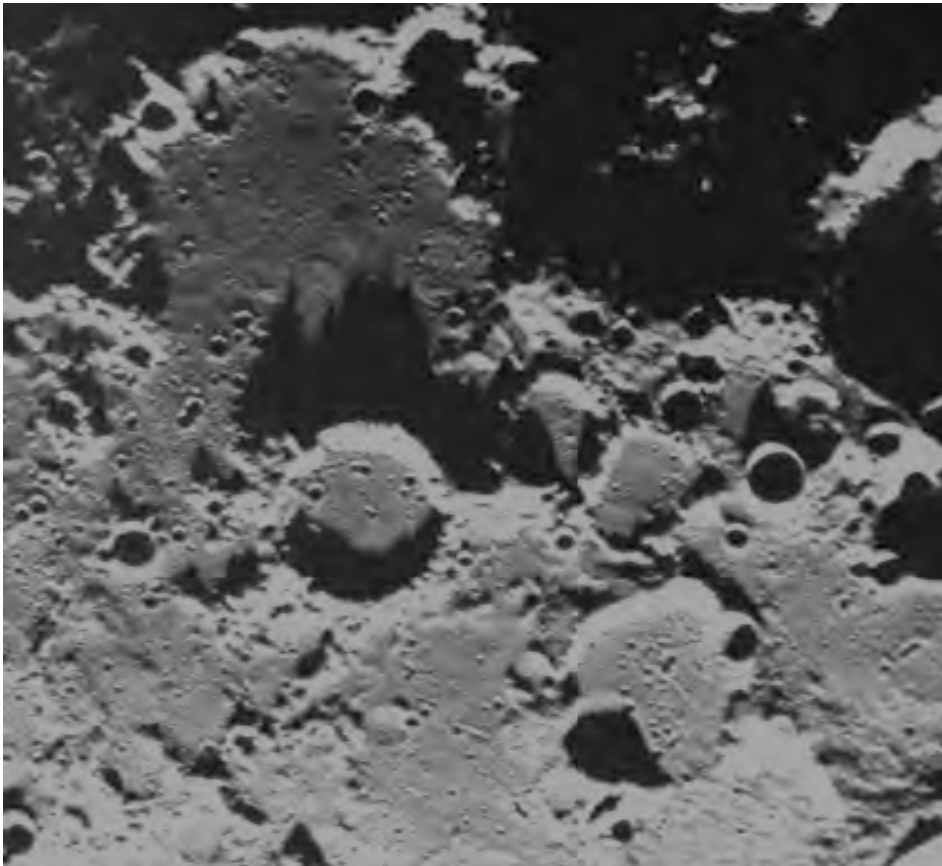


SMART-1 : cratère récent Glushko



SMART-1 : 1^{ère} détection orbitale de Ca & Mg (par fluorescence X)

29/12/2005



19/1/2006



SMART-1 : variations d'ombres au pôle N (cratère Byrd)



SMART-1 : film d'une éclipse de Lune (28/10/2004)

Futures Missions Spatiales Lunaires

- Difficilement prévisibles en temps de budgets comprimés ...
- Nombreuses questions encore ouvertes

Japon :

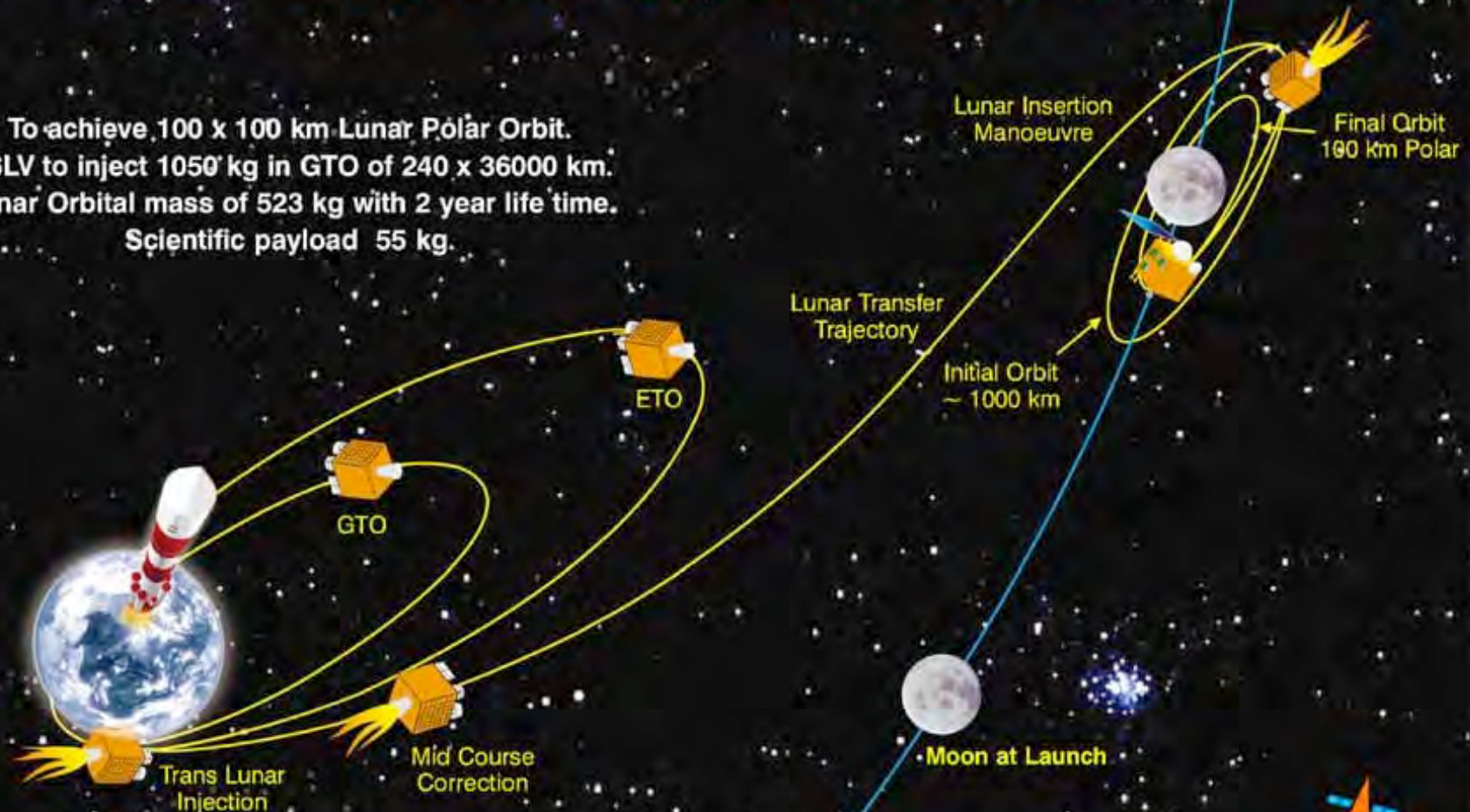
- Lunar-A (?) : orbiteur + pénétrateurs
→ sismologie, structure interne, noyau, propriétés thermiques, flux de chaleur
- SELENE (2007) : SELenological and Engineering Explorer = satellite principal (3 tonnes) + 2 secondaires (50 kg)
→ origine, évolution, tectonique, positionnement VLBI, technologie pour exploration future

Inde :

- Chandrayaan-1 (9/2007) : « Voyage vers la Lune » en Hindi
orbiteur polaire 100 km + pénétrateur, (500 kgs) collaboration avec ESA+NASA
→ exploration scientifique + préparation de la « colonisation »

INDIA'S FIRST MISSION TO MOON CHANDRAYAAN-1

To achieve 100 x 100 km Lunar Polar Orbit.
PSLV to inject 1050 kg in GTO of 240 x 36000 km.
Lunar Orbital mass of 523 kg with 2 year life time.
Scientific payload 55 kg.



Expanding the scientific knowledge about the moon, upgrading India's technological capability
and providing challenging opportunities for planetary research for the younger generation



Futures Missions Spatiales Lunaires

Chine :

- Chang'e-1 (2007) : légende / déesse de la Lune, orbiteur
→ exploration scientifique, cartographie, environnement.

USA :

- Lunar Reconnaissance Orbiter (2008) : cartographie, sites d'alunissage

Et Encore ...

Projets abandonnés :

- LunarSat (microsatellite, européen)
- Lunar Orbiting Observatory Mission (LOOM, Japonais)
- Lunar European Demonstration Approach (LEDA, ESA)
- EuroMoon 2000 (ESA)

Projets privés / commerciaux :

- Lunar Ice Discovery Mission
- Lunar TrailBlazer Mission ...

Projets d'Homme sur la Lune :

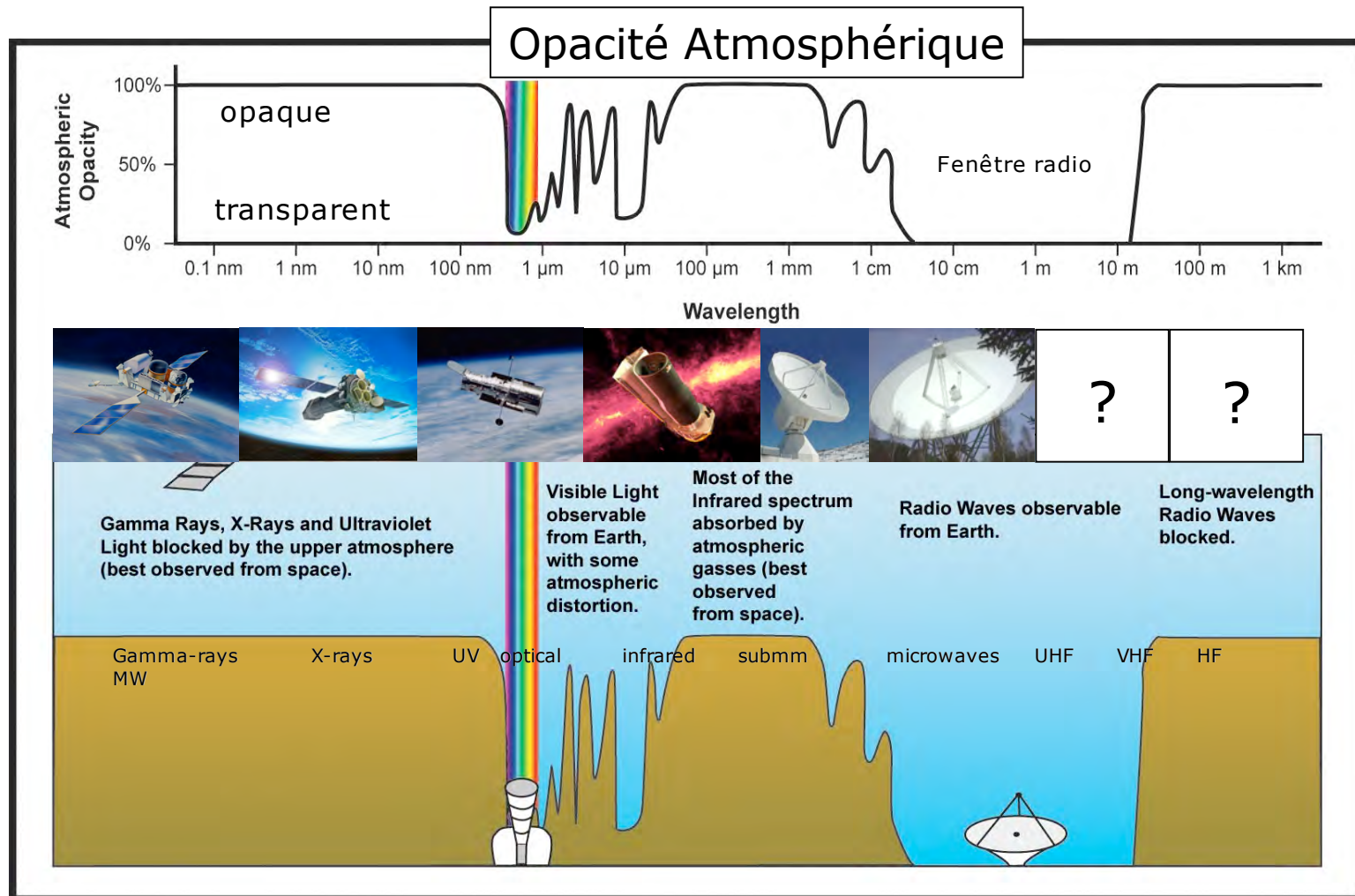
- Space Studies Institute
- Artemis Project
- Lunar Institute of Technology ...

Coordination Internationale :

- ILEWG (Int'l Lunar Exploration Working Group) : échange d'informations
- Déclaration de Beatenberg (1994) pour une exploration soutenue et pacifique de la Lune et l'établissement de bases scientifiques lunaires ...

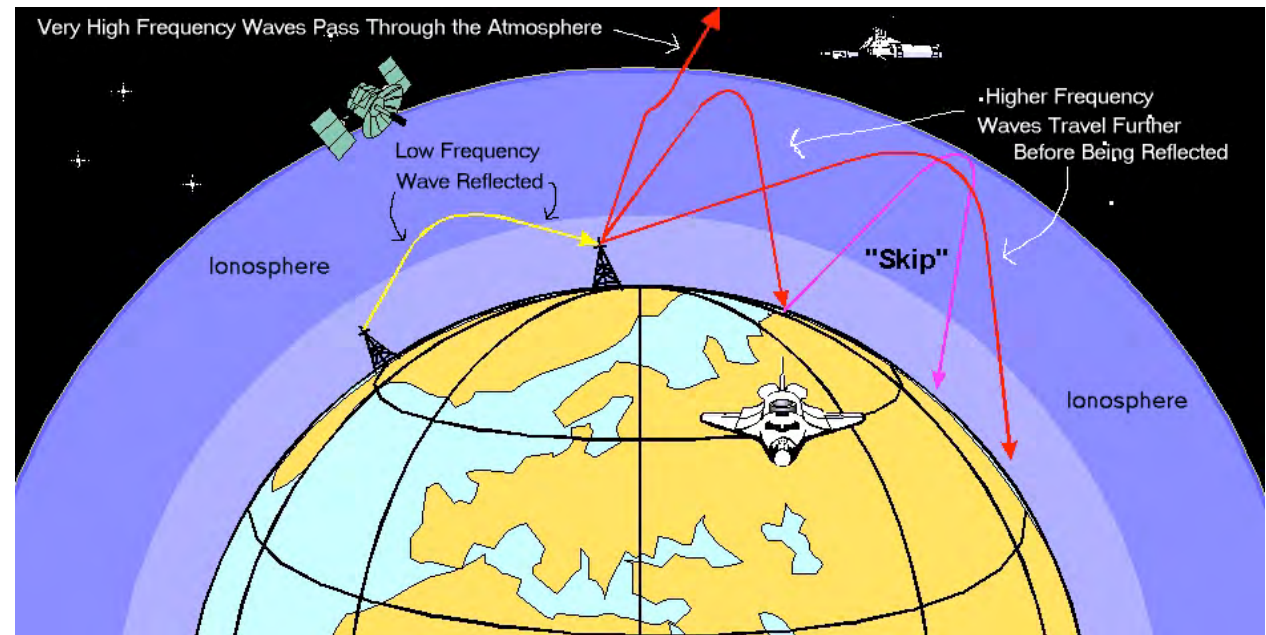
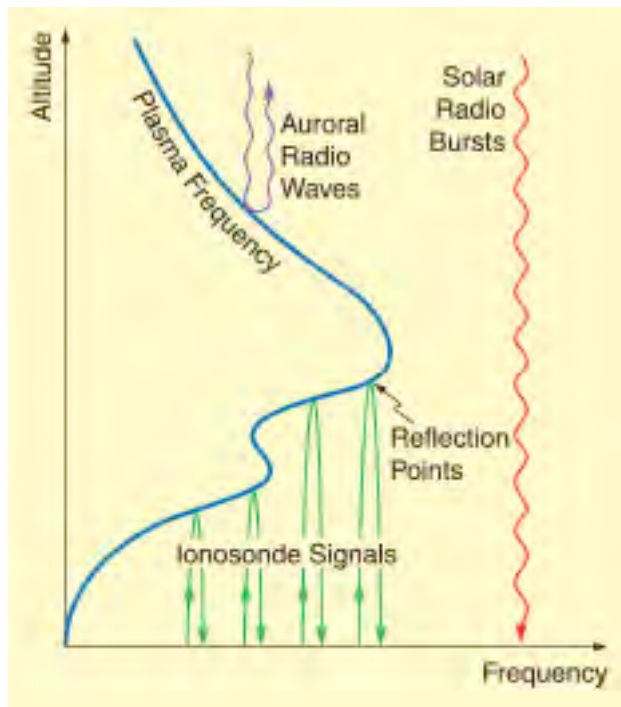
Retourner sur la Lune : Pour Quoi Faire ?

- Basses Fréquences Radio (≤ 10 MHz) = dernière « fenêtre » électromagnétique
~ inexplorée (observations spatiales sans sensibilité)



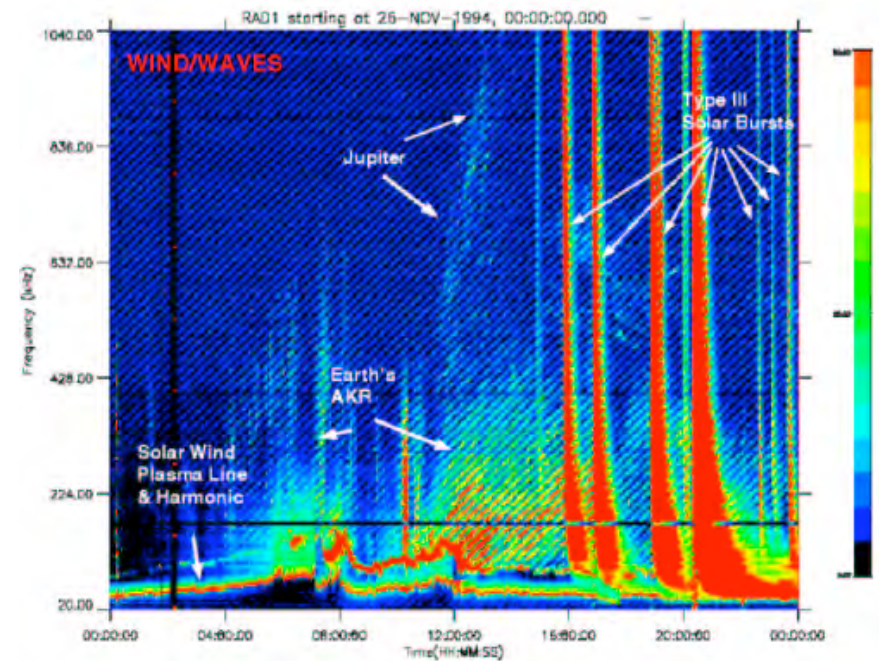
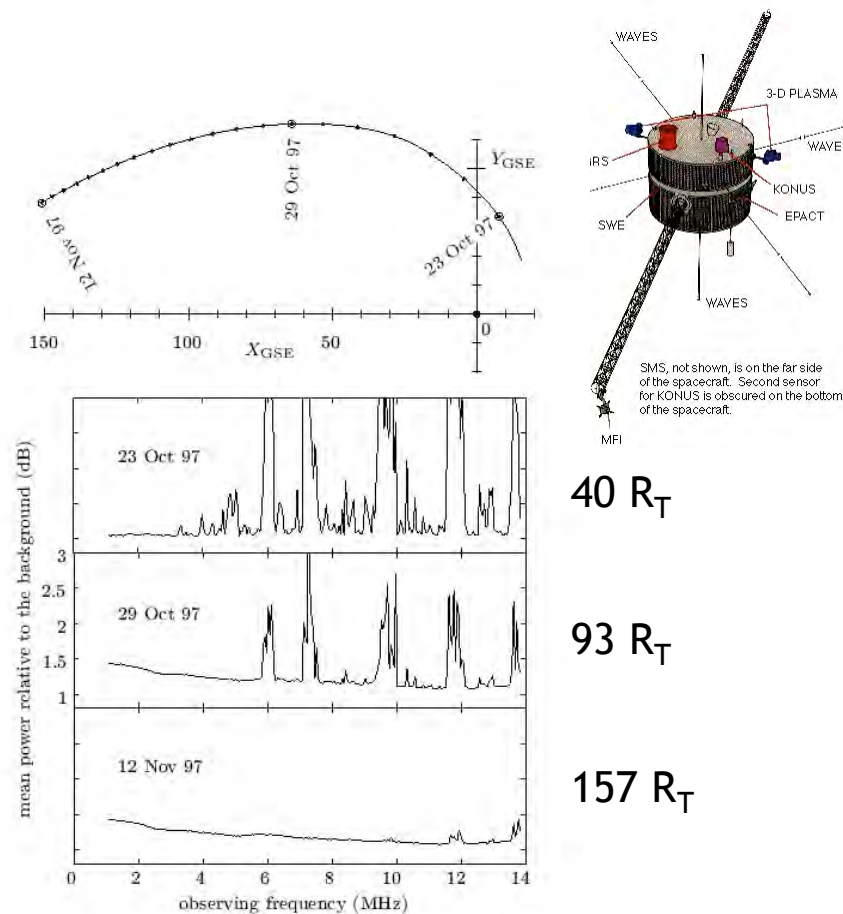
Retourner sur la Lune : Pour Quoi Faire ?

- Ionosphère terrestre réfléchissante ≤ 10 MHz



Retourner sur la Lune : Pour Quoi Faire ?

- Parasites naturels (éclairs) et artificiels (rayonnements de la couronne solaire, de la magnétosphère terrestre) très intenses



Retourner sur la Lune : Pour Quoi Faire ?

- La Lune n'a pas d'ionosphère (notamment la nuit), et est un très bon écran électromagnétique

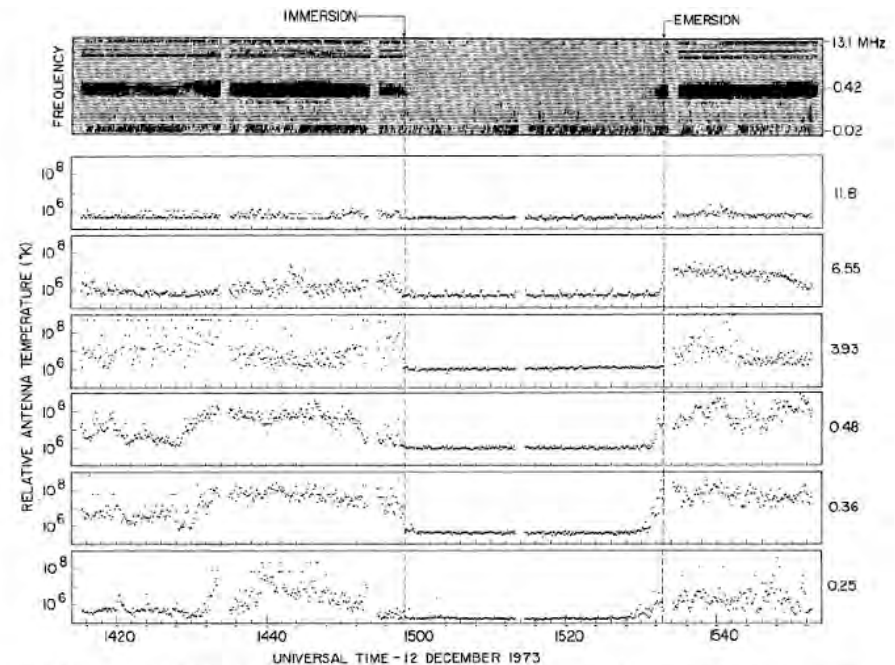
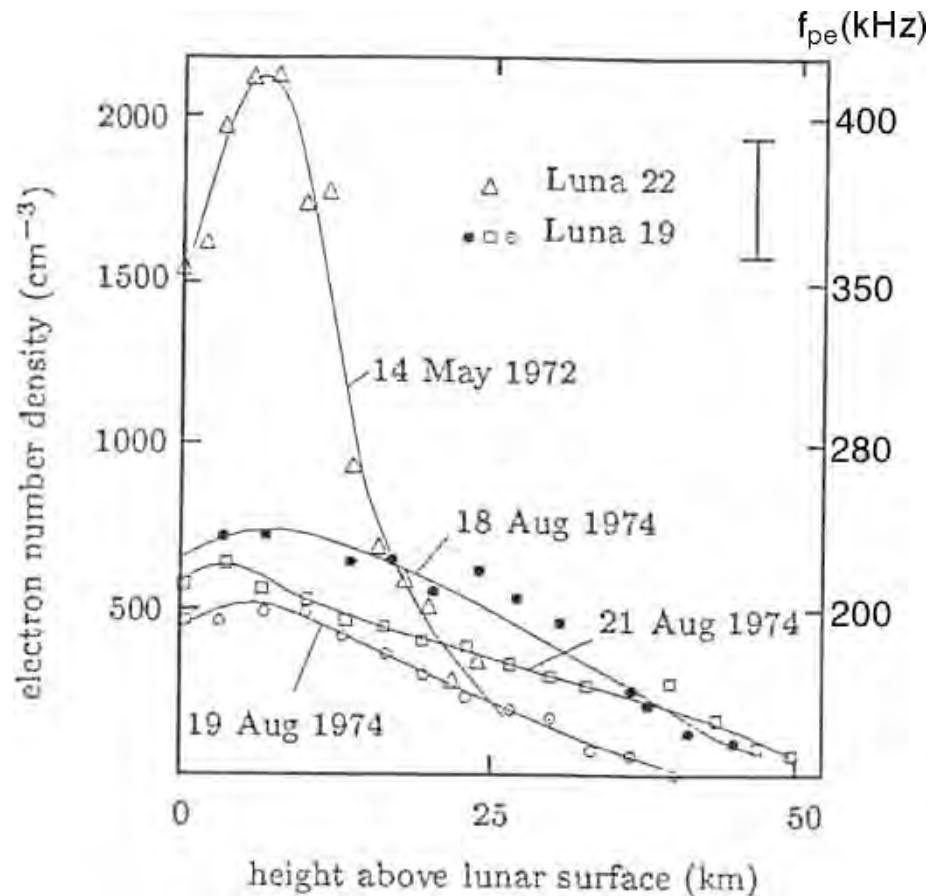


Fig. 5. Example of a lunar occultation of the Earth as observed with the upper-V burst receiver. The top frame is a computer-generated dynamic spectrum; the other plots display intensity vs. time variations at frequencies where terrestrial noise levels are often observed. The 80-s data gaps which occur every 20 min are at times when in-flight calibrations occur. The short noise pulses observed every 144 s at the highest frequencies during the occultation period are due to weak interference from the Ryle-Vanberg receiver local oscillator on occasions when both that receiver and the burst receiver are tuned to the same frequency.

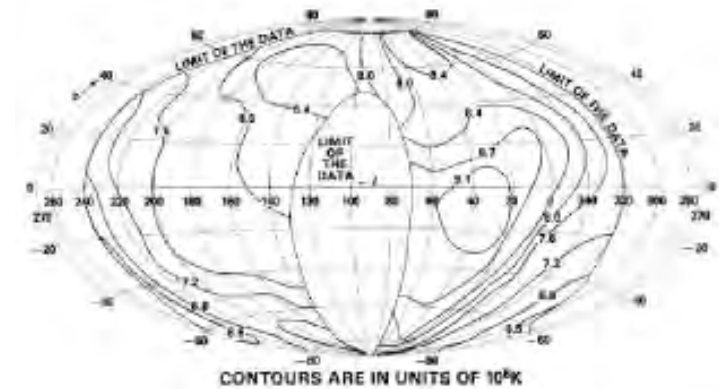
Retourner sur la Lune : Pour Quoi Faire ?

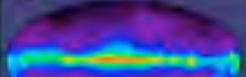
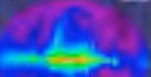
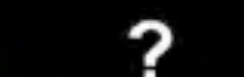
- La face cachée de la Lune a été déclarée « radio quiet » par l'instance de régulation radio de l'ONU
- Possibilité de synthétiser un grand collecteur radio avec de petites antennes simples (~ 100 + calcul $\sim$ parabole de 300 m)



Retourner sur la Lune : Pour Quoi Faire ?

- Plusieurs études NASA & ESA (dernière = ESA 1997)
 - nombreux sujets d'études scientifiques
 - Univers très primordial ($z > 50$)
 - Cartographie du ciel
 - Radio-exoplanètes
 - Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie
 - Météorologie de l'espace ...



	γ			X			UV		Vis	IR		MW			RADIO		VLF			
wavelength (m)	10^{-15}	10^{-14}	10^{-13}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4
frequency (Hz)	10^{23}	10^{22}	10^{21}	10^{20}	10^{19}	10^{18}	10^{17}	10^{16}	10^{15}	10^{14}	10^{13}	10^{12}	10^{11}	10^{10}	10^9	10^8	10^7	10^6	10^5	10^4
energy (eV)	10^5	10^7	10^6	10^5	10^4	10^3	10^2	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-10}	10^{-11}
observatory	CGRO			ROSAT			EUVE		HST	IRAS		COBE			Earth-based		Moon-based array?			
View of the Universe																				

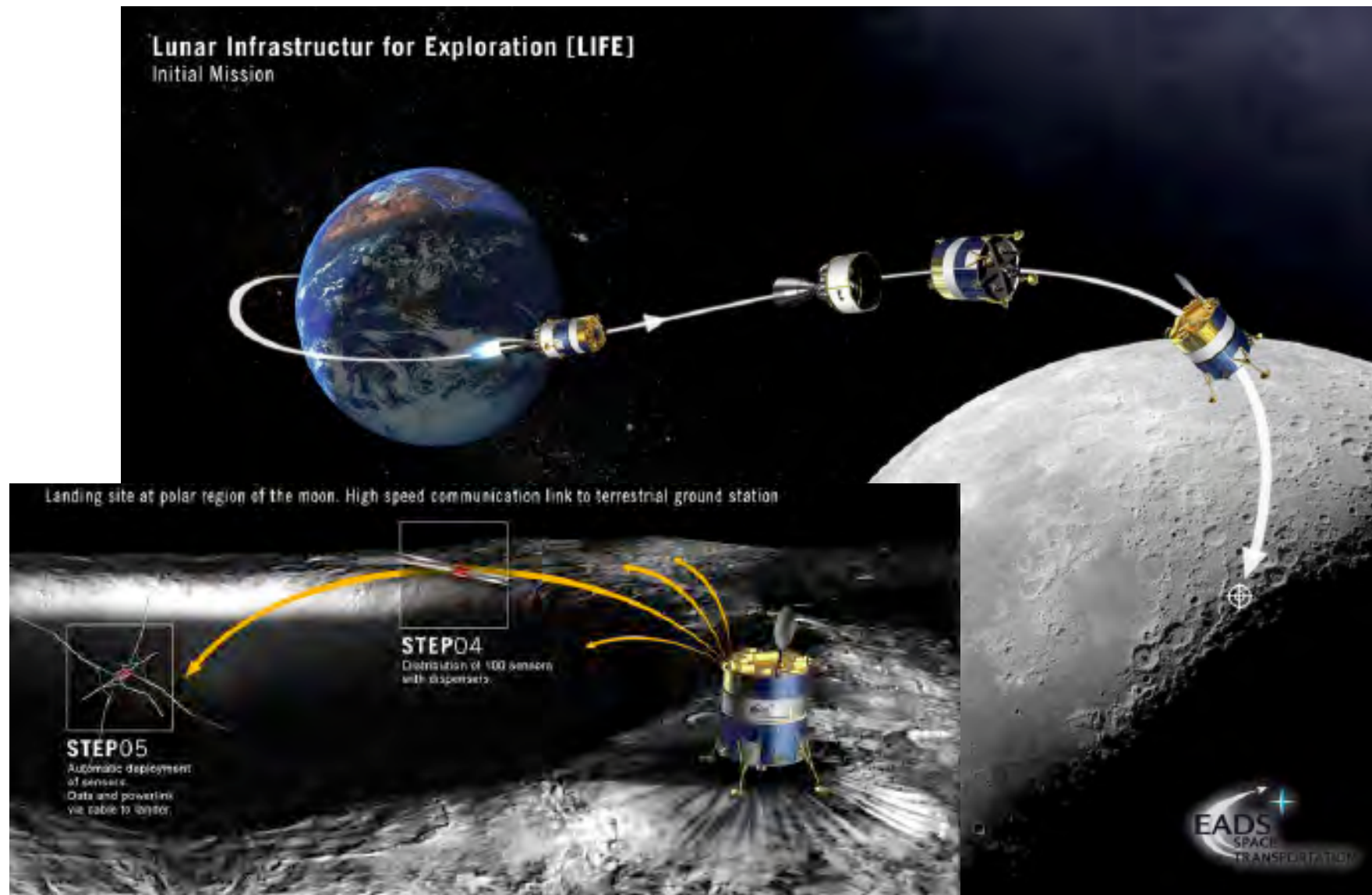
Retourner sur la Lune : Comment Faire ?

- LOFAR : un réseau d'antennes Radio BF en cours de réalisation en Europe



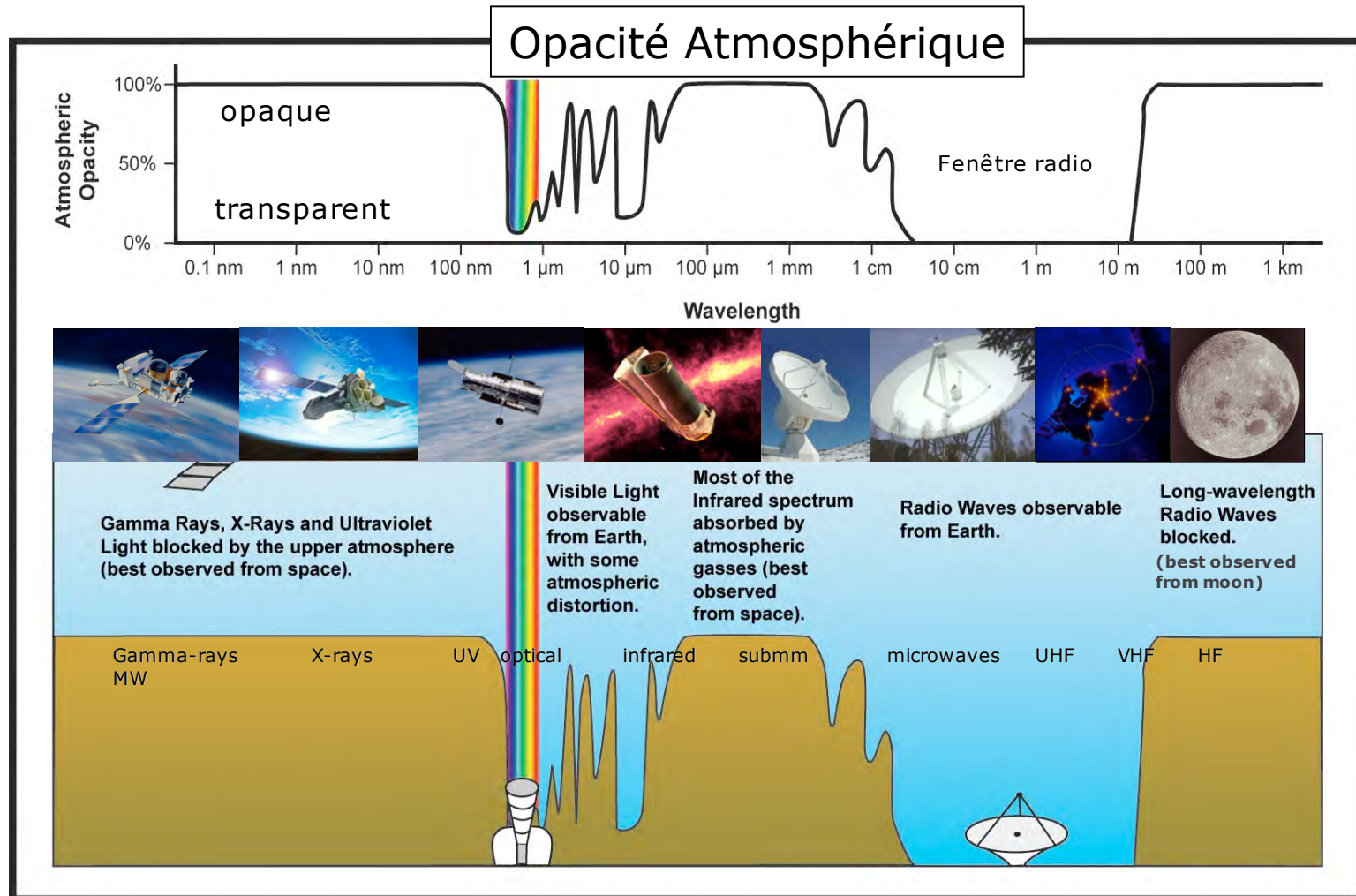
Retourner sur la Lune : Comment Faire ?

- Emport possible d'une tonne par Ariane V (~100 antennes + électronique associée)



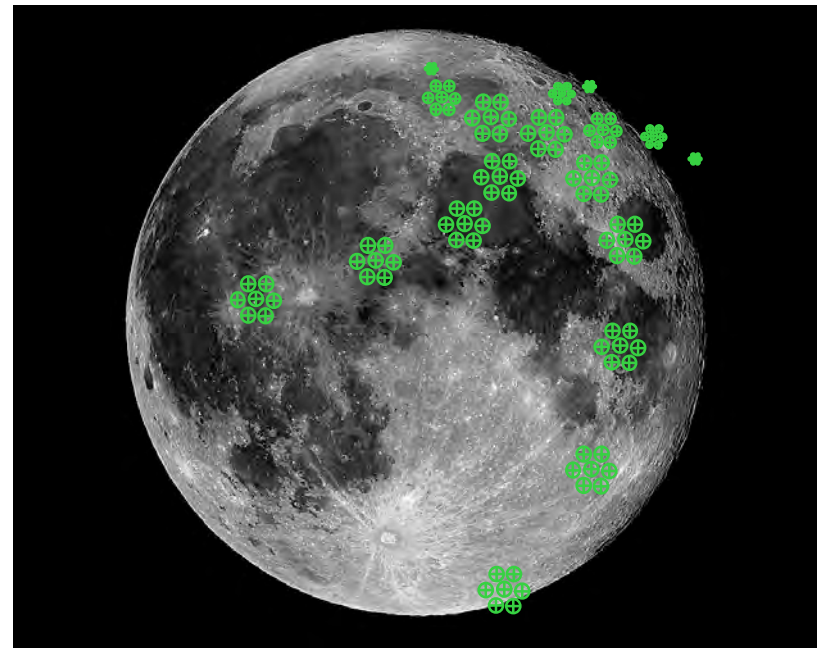
Retourner sur la Lune : Comment Faire ?

- LOFAR : un réseau d'antennes Radio BF en cours de réalisation en Europe
- Emport possible d'une tonne par Ariane V (~100 antennes + électronique associée)
→ techniquement faisable aujourd'hui



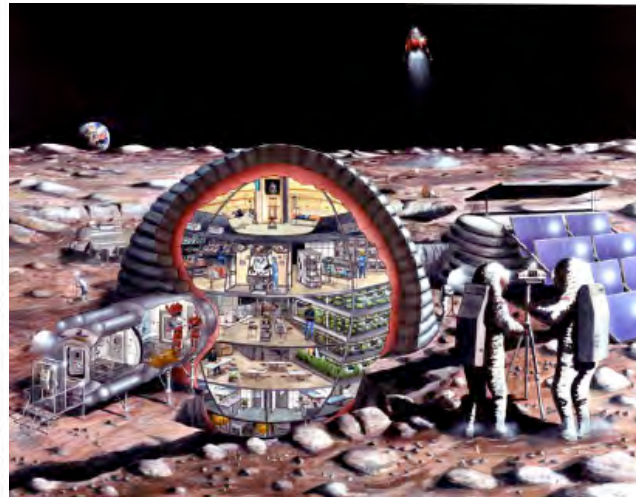
Retourner sur la Lune : Comment Faire ?

- Occasion de développer une infrastructure lunaire
(LIFE = Lunar Infrastructure For Exploration, ASTRON, EADS, DGLR ...)
- Site : cratère abrité près du pôle Sud ?
- Énergie : pic d'illumination éternelle ?
- Moyens de calcul, internet lunaire, connection haut débit vers la Terre, ressources locales
- Extensions futures : réseaux de sismomètres, télescope IR, surveillance robotisée des NEO, détecteurs d'ondes gravitationnelles, de rayons cosmiques ...



Retourner sur la Lune : Comment Faire ?

- Vers une présence humaine (permanente ?)
- Leadership européen possible pour la 1ère phase
(visibilité, symbole, motivation) puis collaboration USA, Chine...
- Préparation aux missions habitées vers la Lune puis Mars (2030 ?)
- Applications commerciales, industrielles, culturelles, collaboration (pacifique) internationale ?



A suivre...



Références :

- Encrenaz, T., J. -P. Bibring, M. Blanc, A. Barucci, F. Roques, and P. Zarka, *Le système solaire (3ème édition)*, Savoirs Actuels, EDP-Sciences / CNRS-Éditions, Paris, 2003
- Le grand Atlas de l'Astronomie, Encyclopedia Universalis
- Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics, IOP publishing, Londres
- Une (quasi-)infinité de sites internet (à vos moteurs !)
*[un conseil : privilégiez les gros sites professionnels :
NASA, ESA, labos, NSSDC ...]*