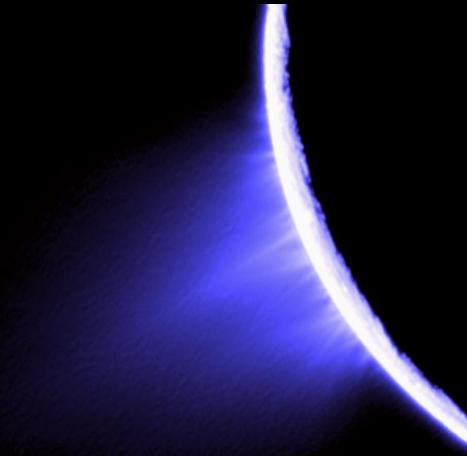
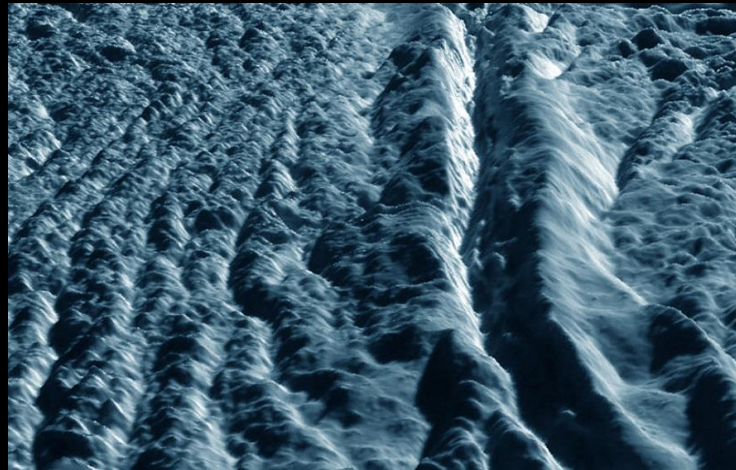
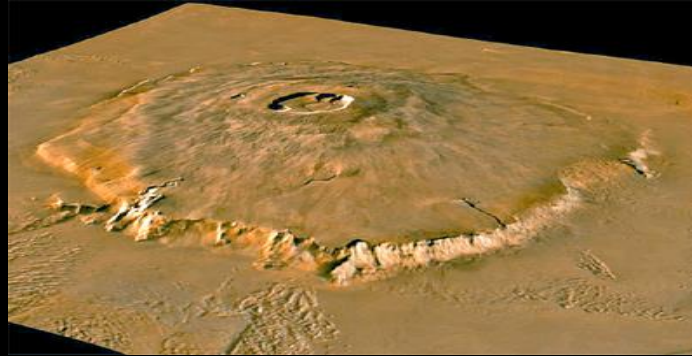
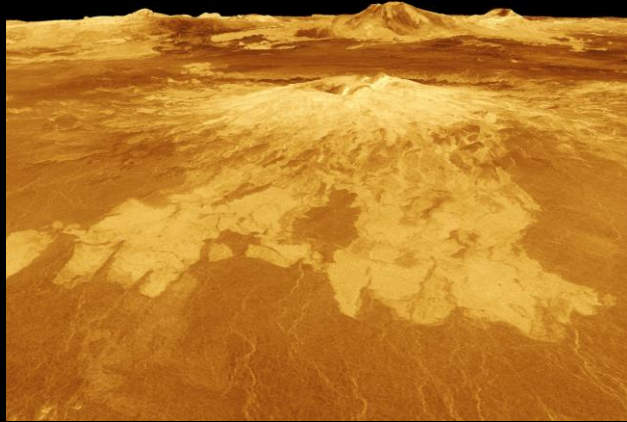
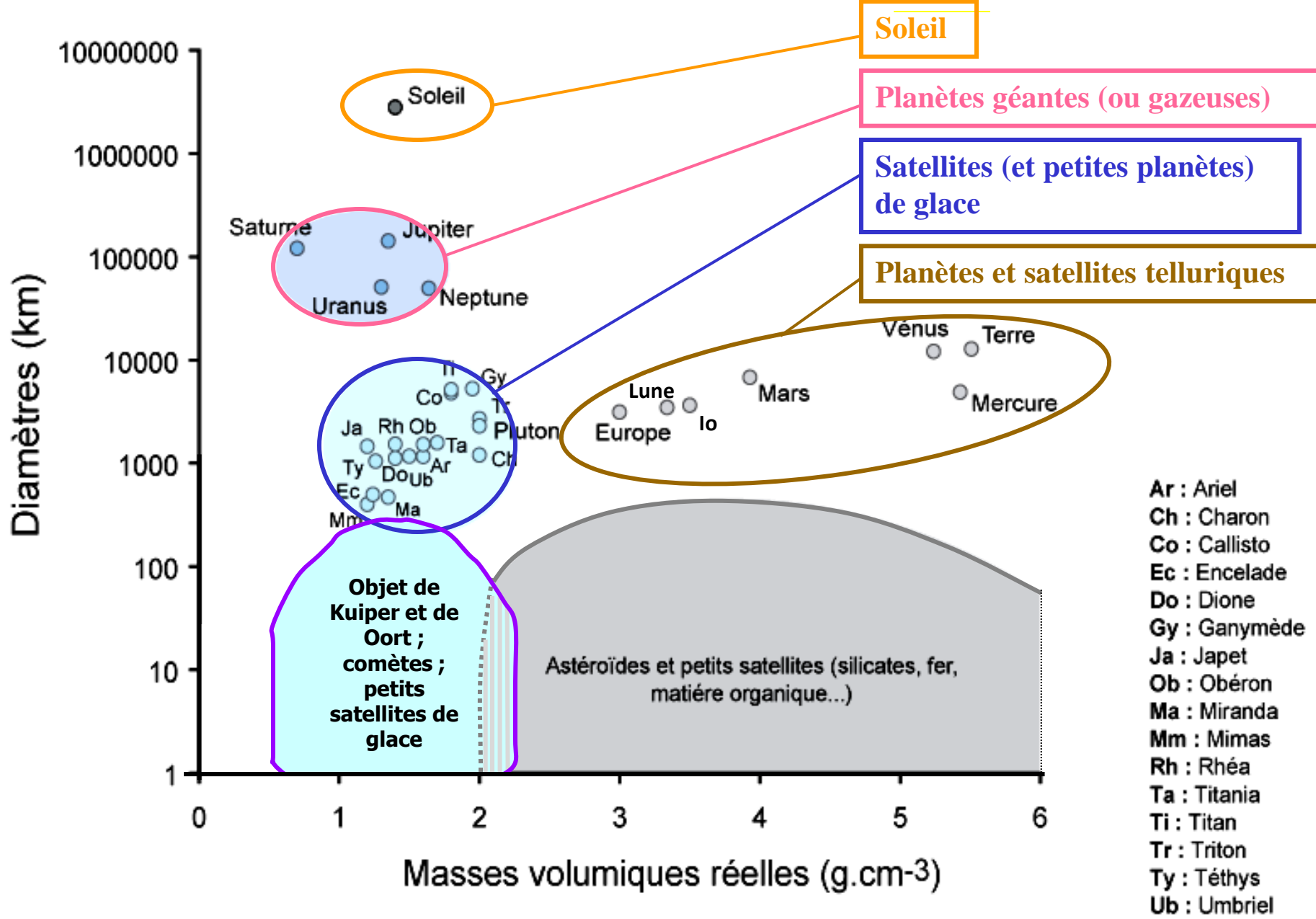


# Le Volcanisme dans le système solaire

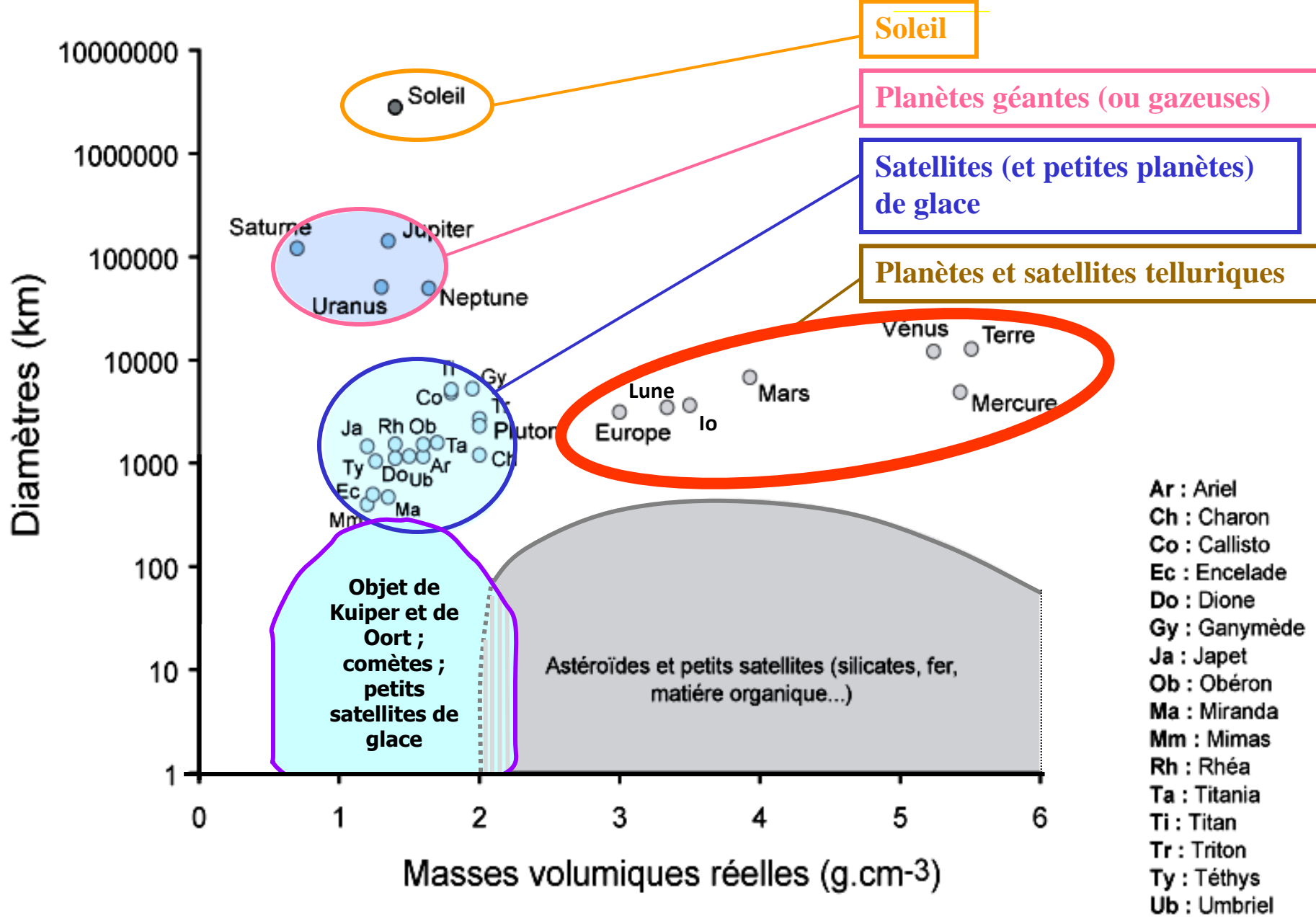




**Le système solaire des astronomes, avec le soleil, 8 planètes, leurs satellites, des astéroïdes (CA) et des objets trans-neptuniens (CK), des comètes ....**



# La classification géologique du système solaire



# La classification géologique du système solaire



# La structure interne de la Terre

En marron, la croûte

?  
Roche solide, nommée péridotite

Noyau de fer fondu

5000°

2500°

2000°

1500°

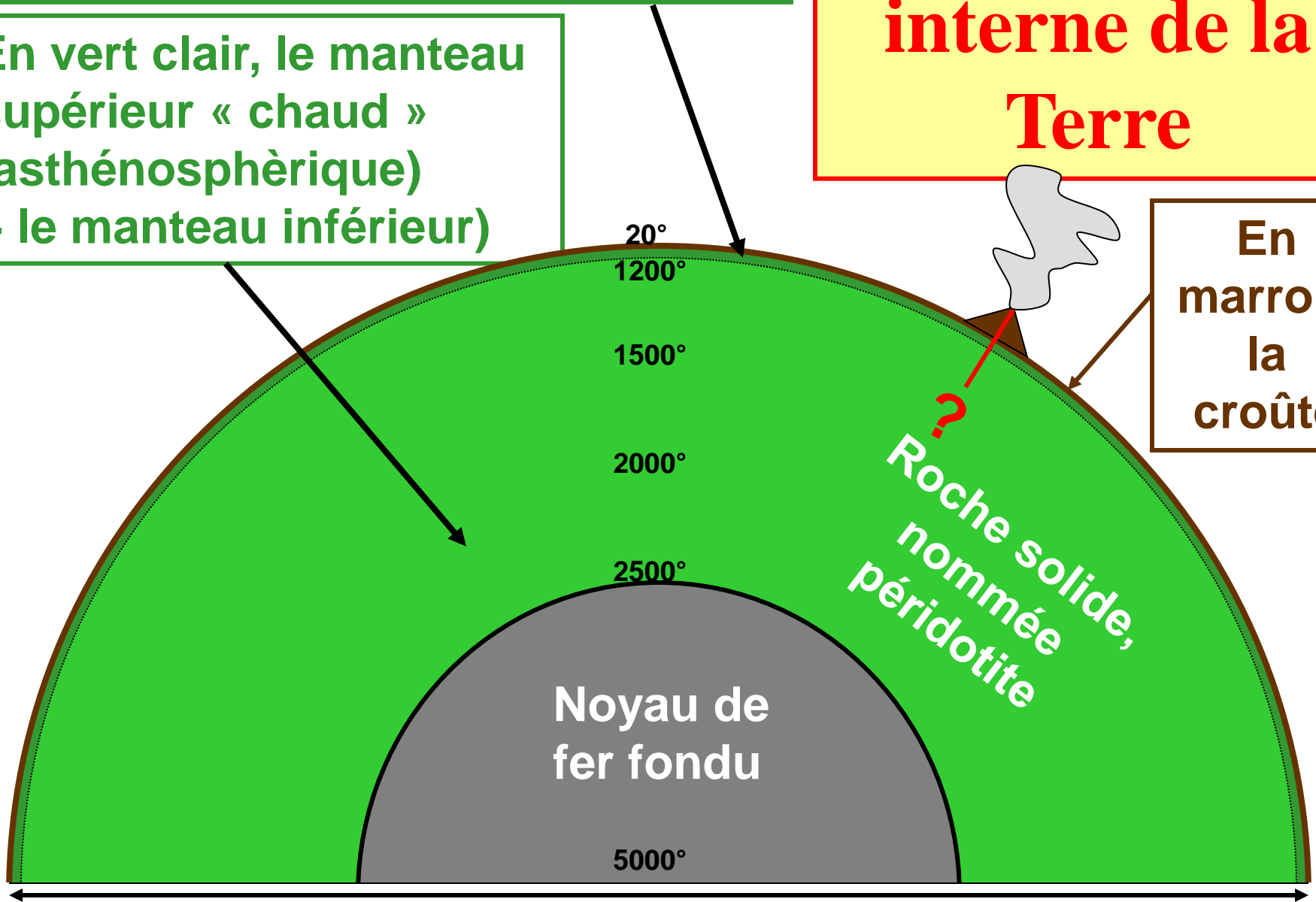
1200°

20°

12 760 km

En vert foncé, le manteau supérieur « froid » (lithosphérique)

En vert clair, le manteau supérieur « chaud » (asthénosphérique) + le manteau inférieur





**Un morceau de manteau (terrestre)**

# La structure interne de la Terre

En marron, la croûte

En vert foncé, le manteau supérieur « froid » (lithosphérique)

En vert clair, le manteau supérieur « chaud » (asthénosphérique) + le manteau inférieur

?  
Roche solide, nommée péridotite

Le manteau est solide malgré sa très haute température. Pourquoi ?

5000°

2500°

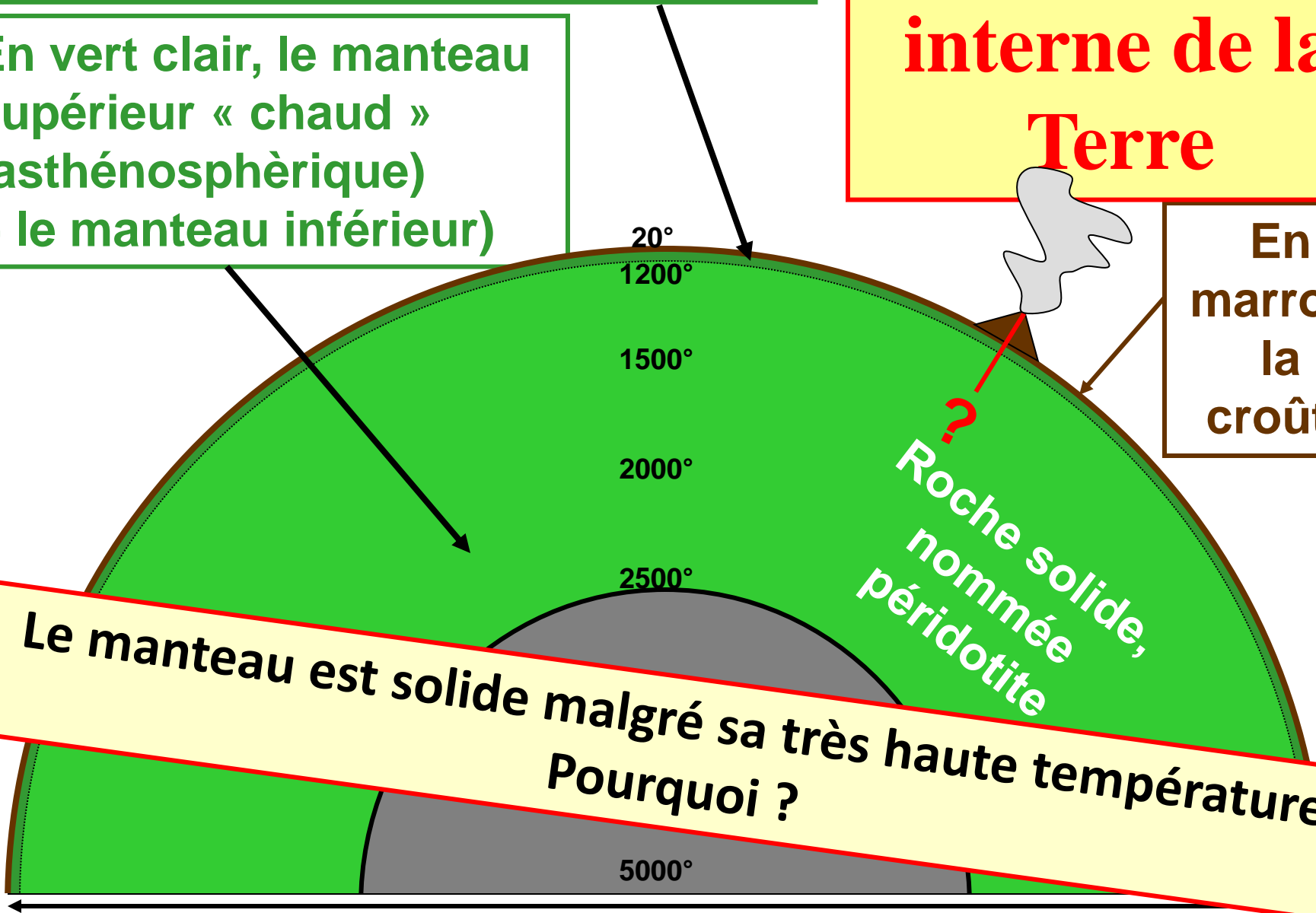
2000°

1500°

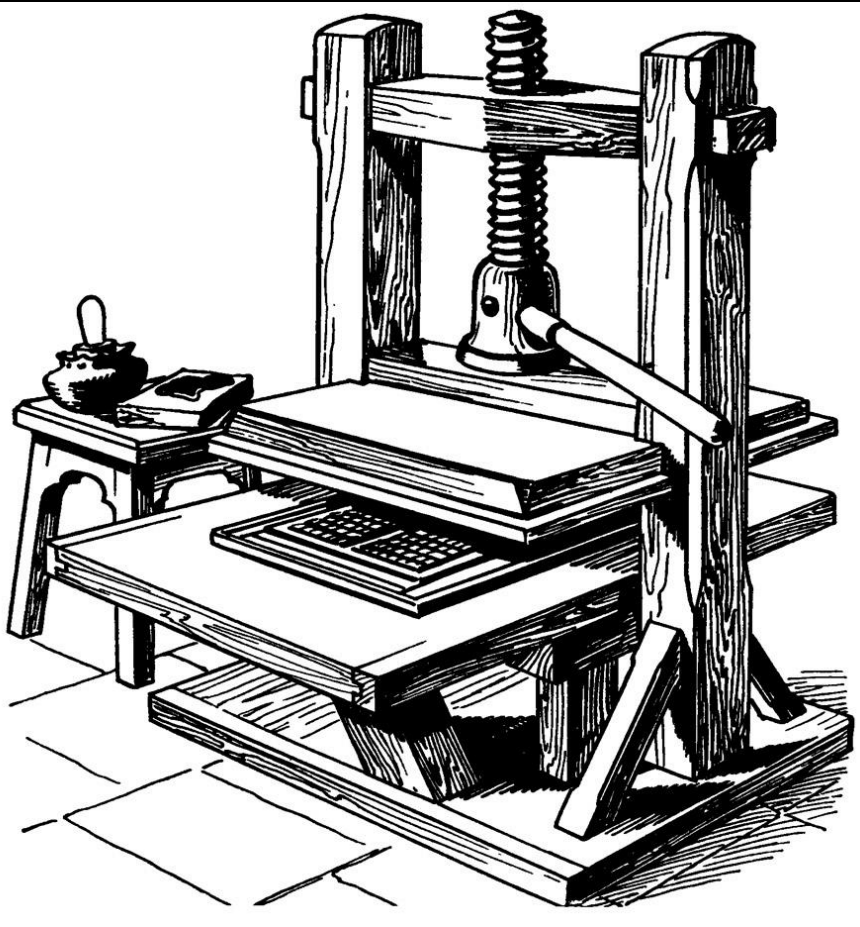
1200°

20°

12 760 km



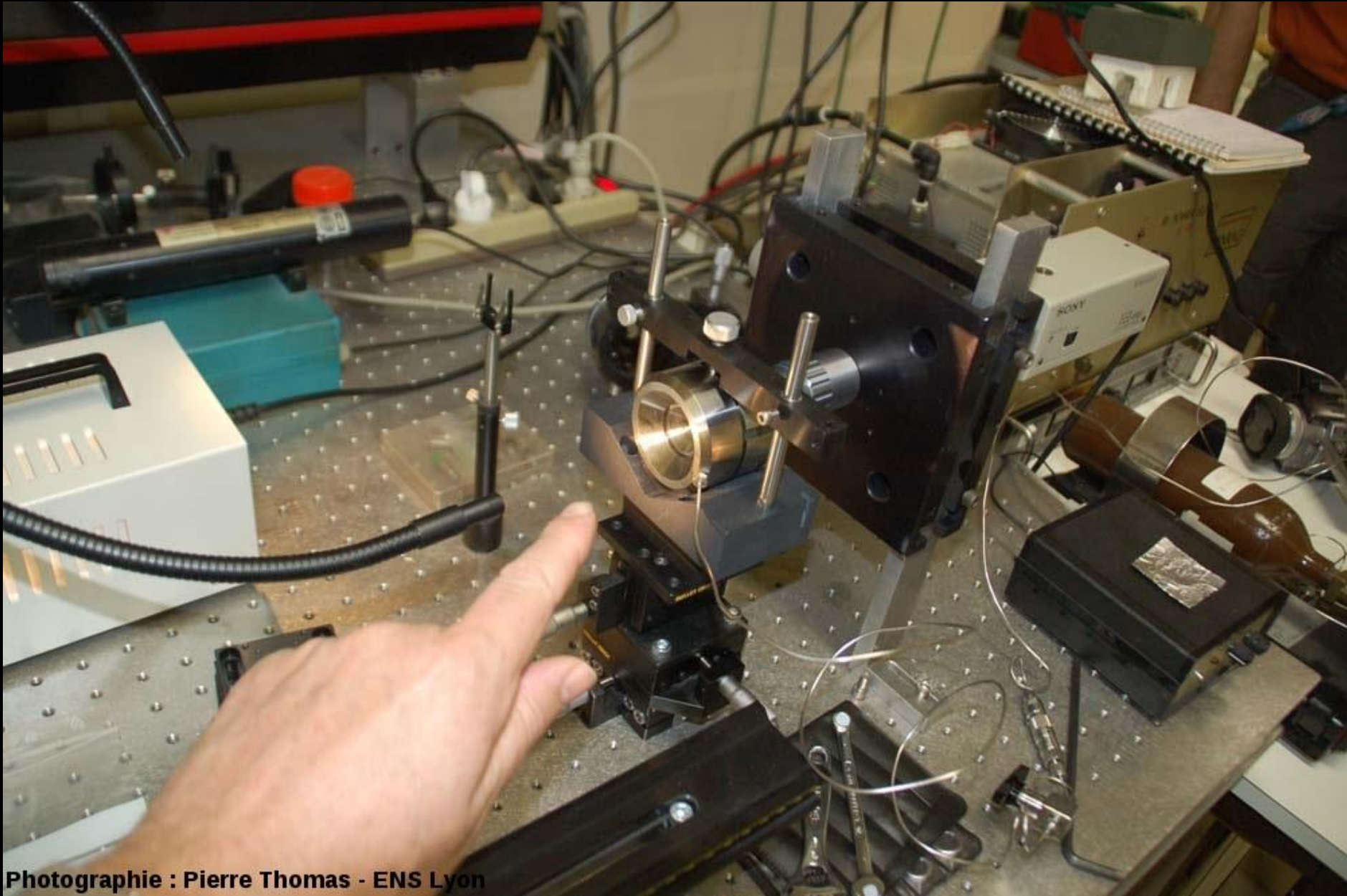




Pourquoi le manteau est-il solide malgré la très haute température qui y règne ? Prenez une péridotite, un chalumeau puissant et chauffez à  $1500^{\circ}\text{C}$ . La péridotite fondra ! Alors pourquoi ?

A cause de la pression exercée par les roches sus-jacentes ! Pour étudier les effets de la pression, on utilise une cellule à enclumes de diamant.





Photographie : Pierre Thomas - ENS Lyon

**Une cellule à enclumes de diamant en situation**

Photographies : Pierre Thomas - ENS Lyon



Capot

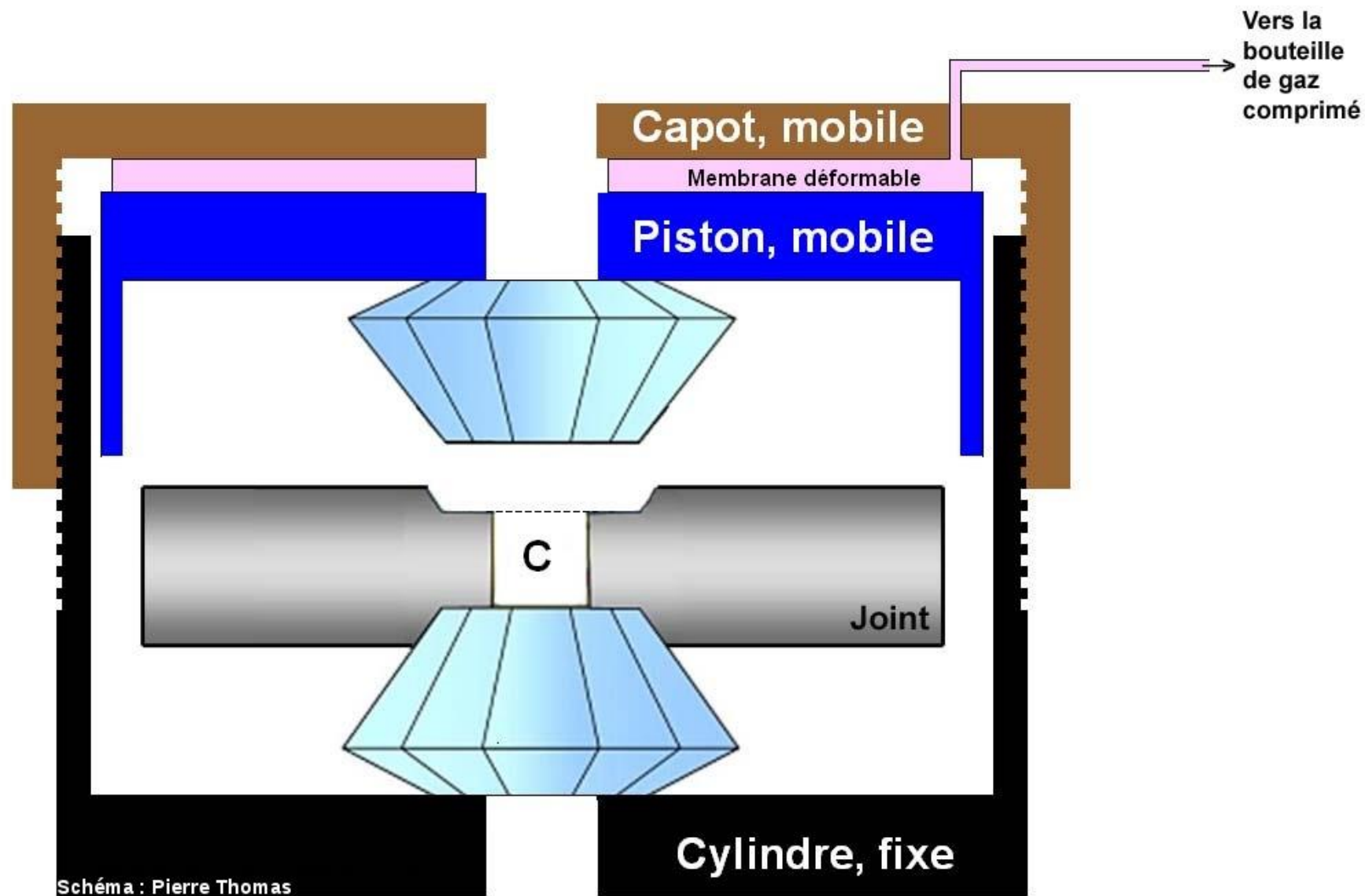


Piston



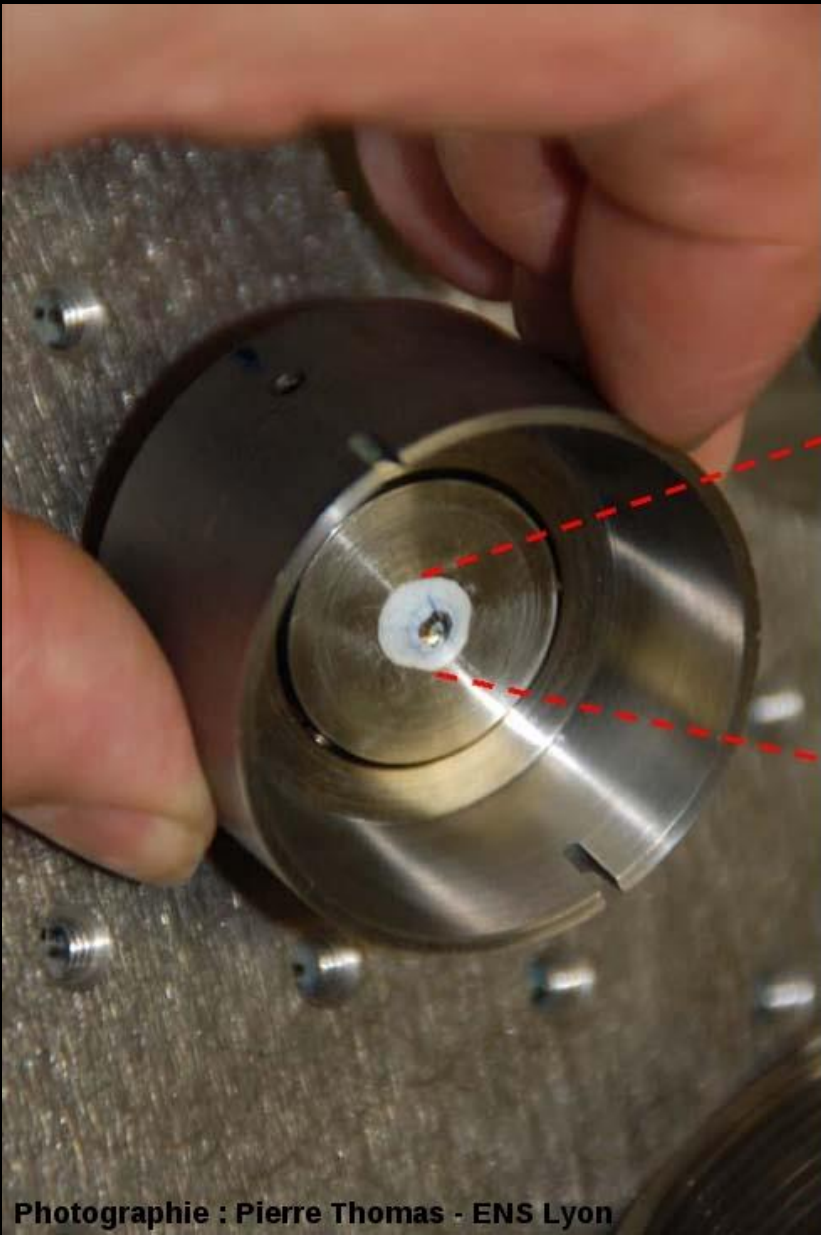
Cylindre

**Une cellule à enclumes de diamant en « éclaté »**

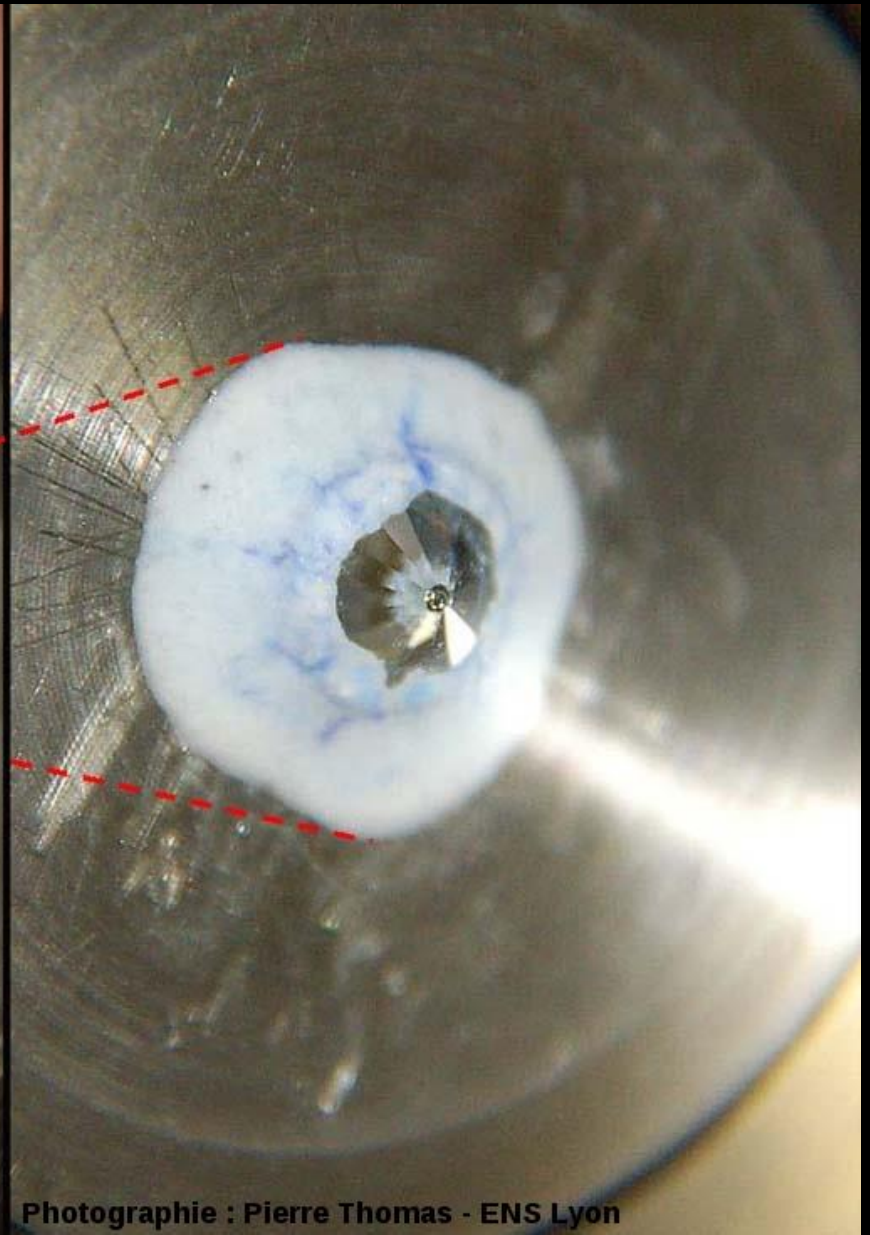


**Le principe du fonctionnement d'une cellule à enclumes de diamant**





Photographie : Pierre Thomas - ENS Lyon



Photographie : Pierre Thomas - ENS Lyon

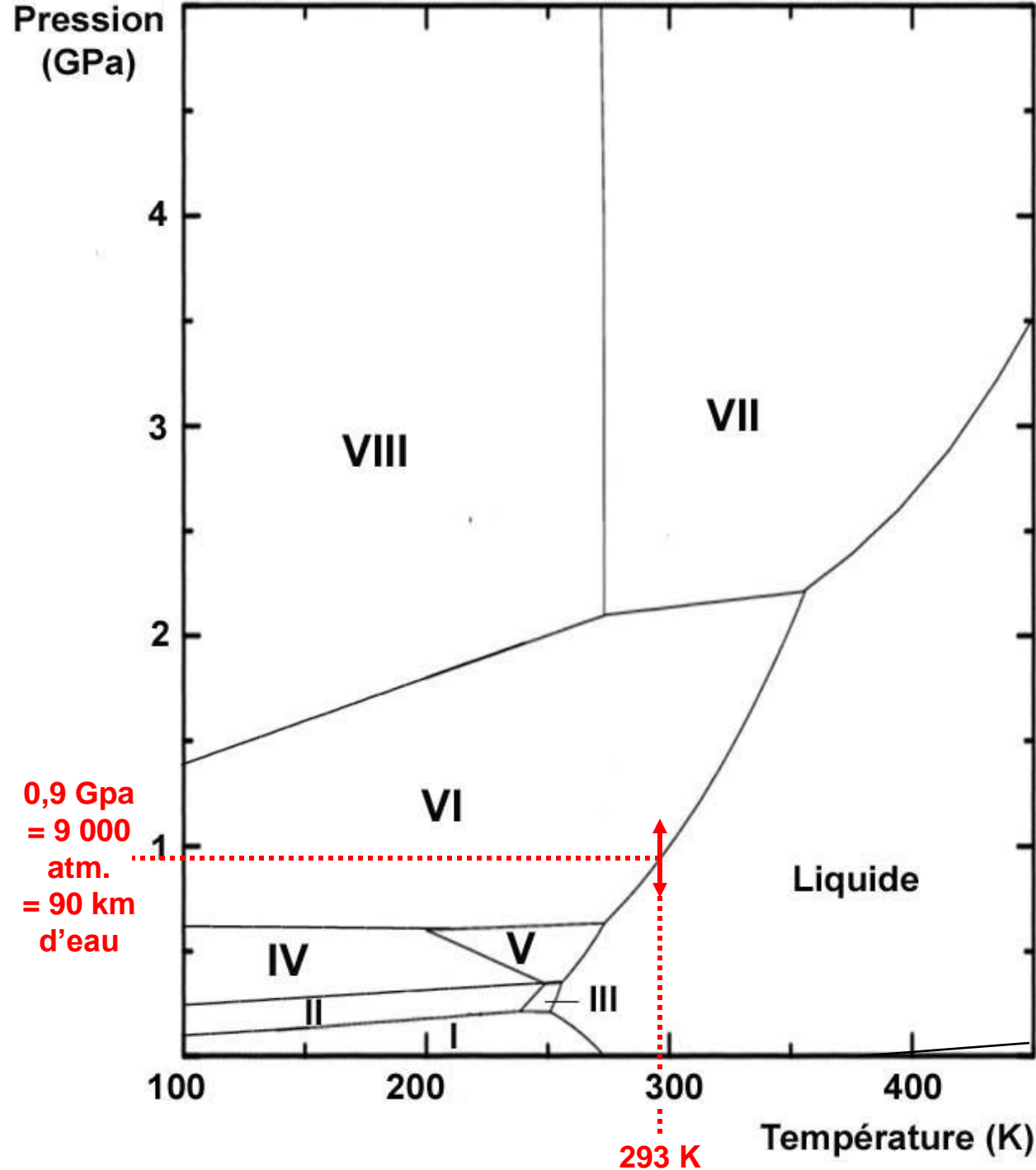
**Gros plan sur le diamant du piston**



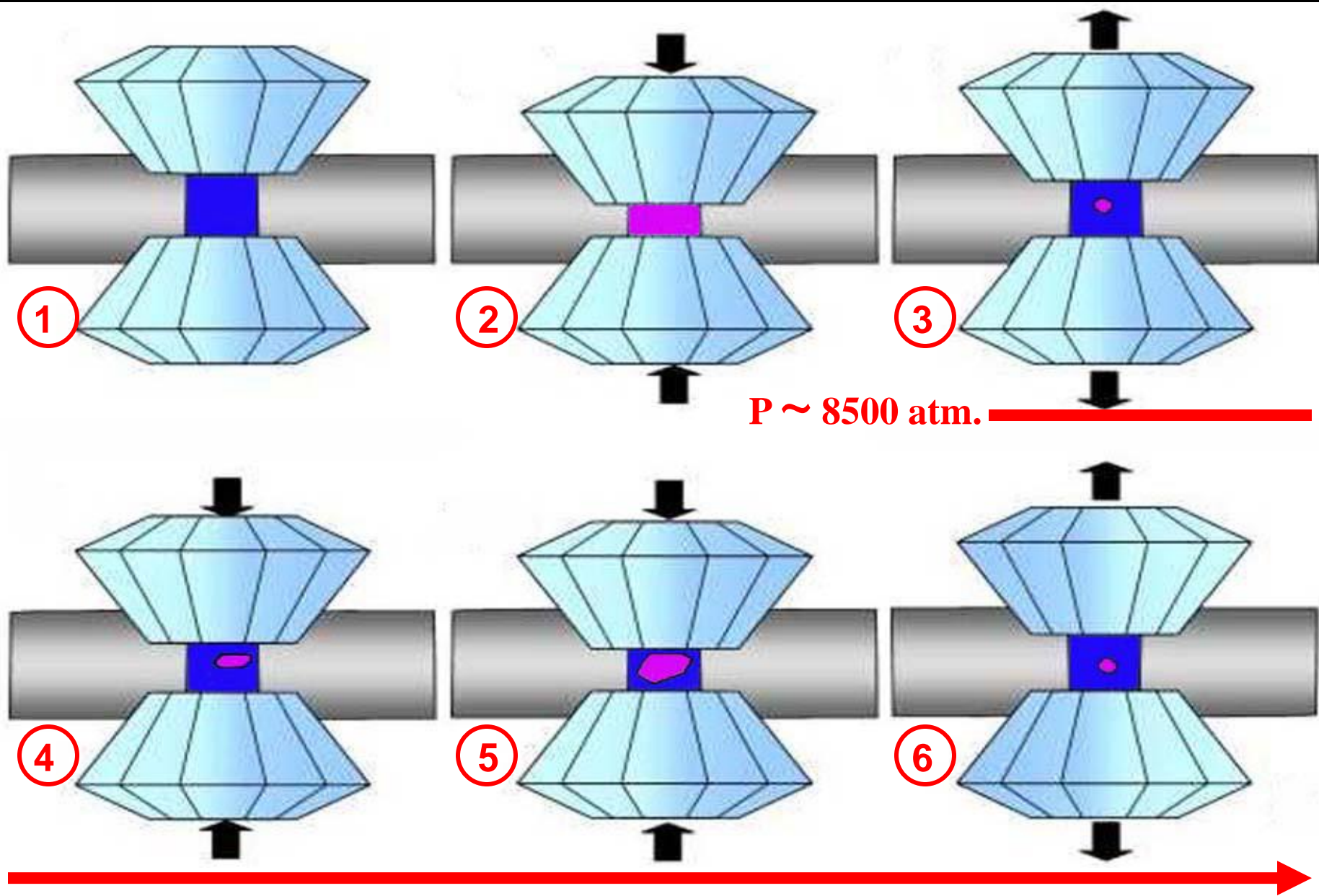


D'après photographie de Philippe Gillet

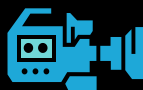
**Vue latérale d'une cellule à enclume de diamant**

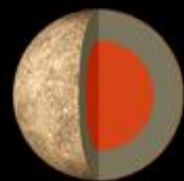


Quand on comprime un liquide, en général, il se solidifie, il « gèle ». C'est le cas de l'eau qui gèle (même) à +25°C si on la comprime à 9000 atmosphère (0,9 Giga Pascal).



Principe du film sur la cristallisation de la glace sous pression. Le film concerne les étapes 3 et suivantes.



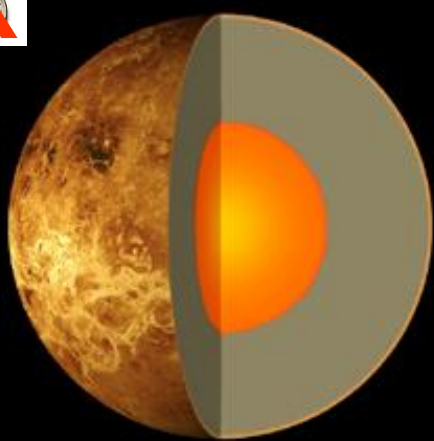


MERCURY

$\rho = 5,42 \text{ g/cm}^3$

$\rho_c = 5,3 \text{ g/cm}^3$

Spectres de surface :  
olivine,  
pyroxène

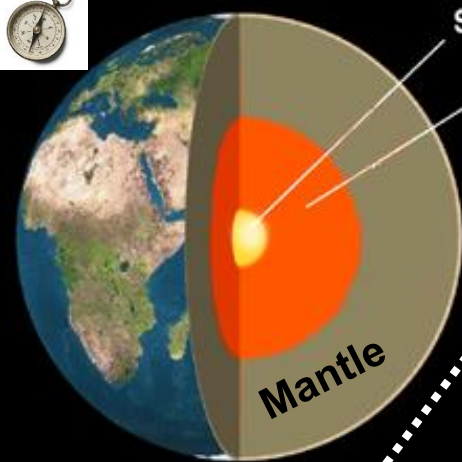


VENUS

$\rho = 5,25 \text{ g/cm}^3$

$\rho_c = 3,95 \text{ g/cm}^3$

Analyses in situ (sondes Venera) :  
basaltes



EARTH

$\rho = 5,52 \text{ g/cm}^3$

$\rho_c = 4,03 \text{ g/cm}^3$

Basaltes,  
granites,  
sédiments ...

Solid inner core  
Liquid outer core

Mantle



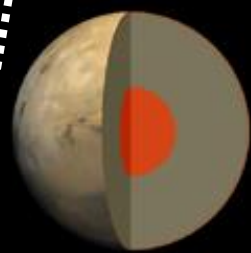
Core (small)

MOON

$\rho = 3,34 \text{ g/cm}^3$

$\rho_c = 3,3 \text{ g/cm}^3$

Basaltes et  
anorthosite



MARS

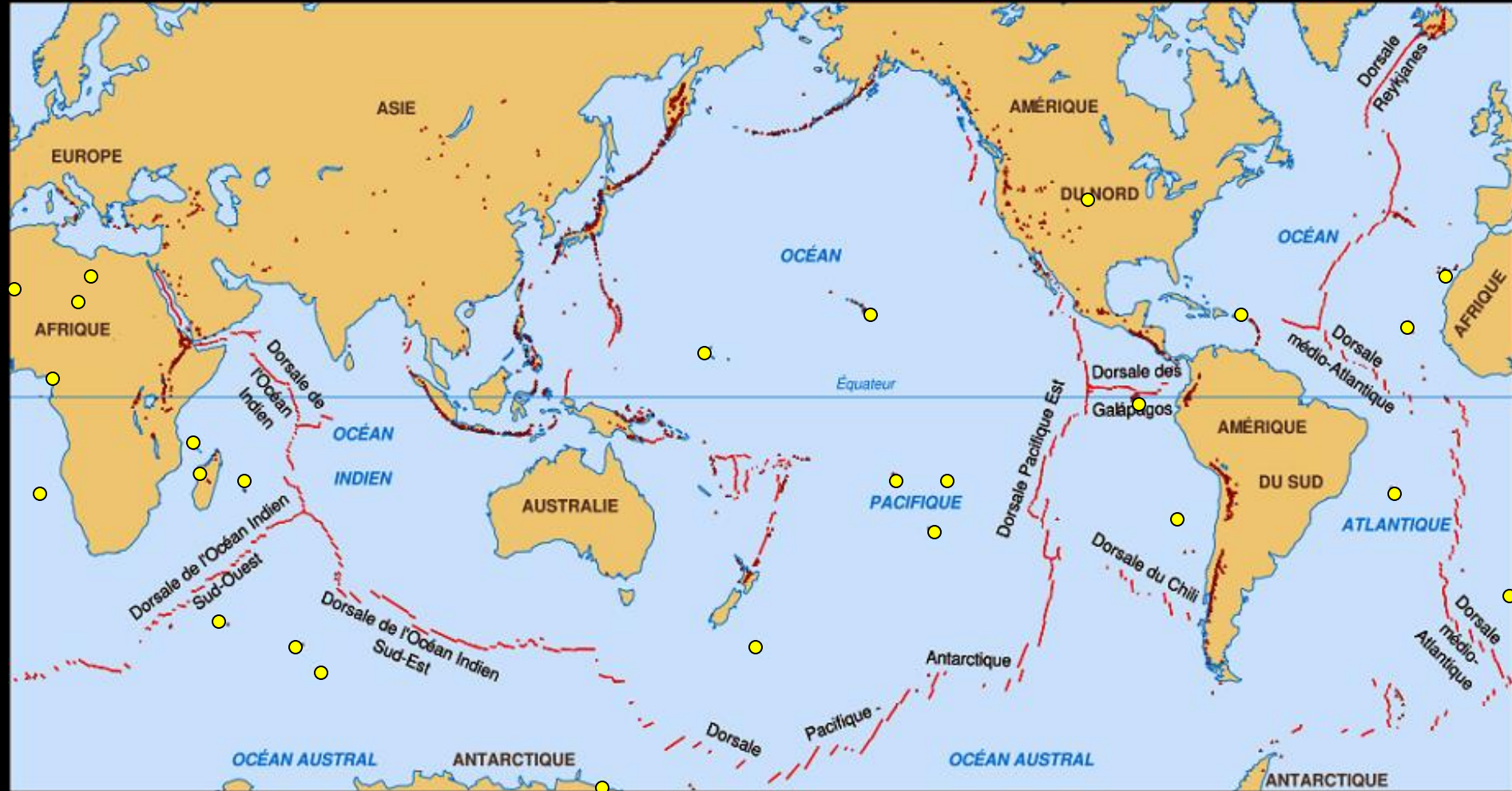
$\rho = 3,94 \text{ g/cm}^3$

$\rho_c = 3,7 \text{ g/cm}^3$

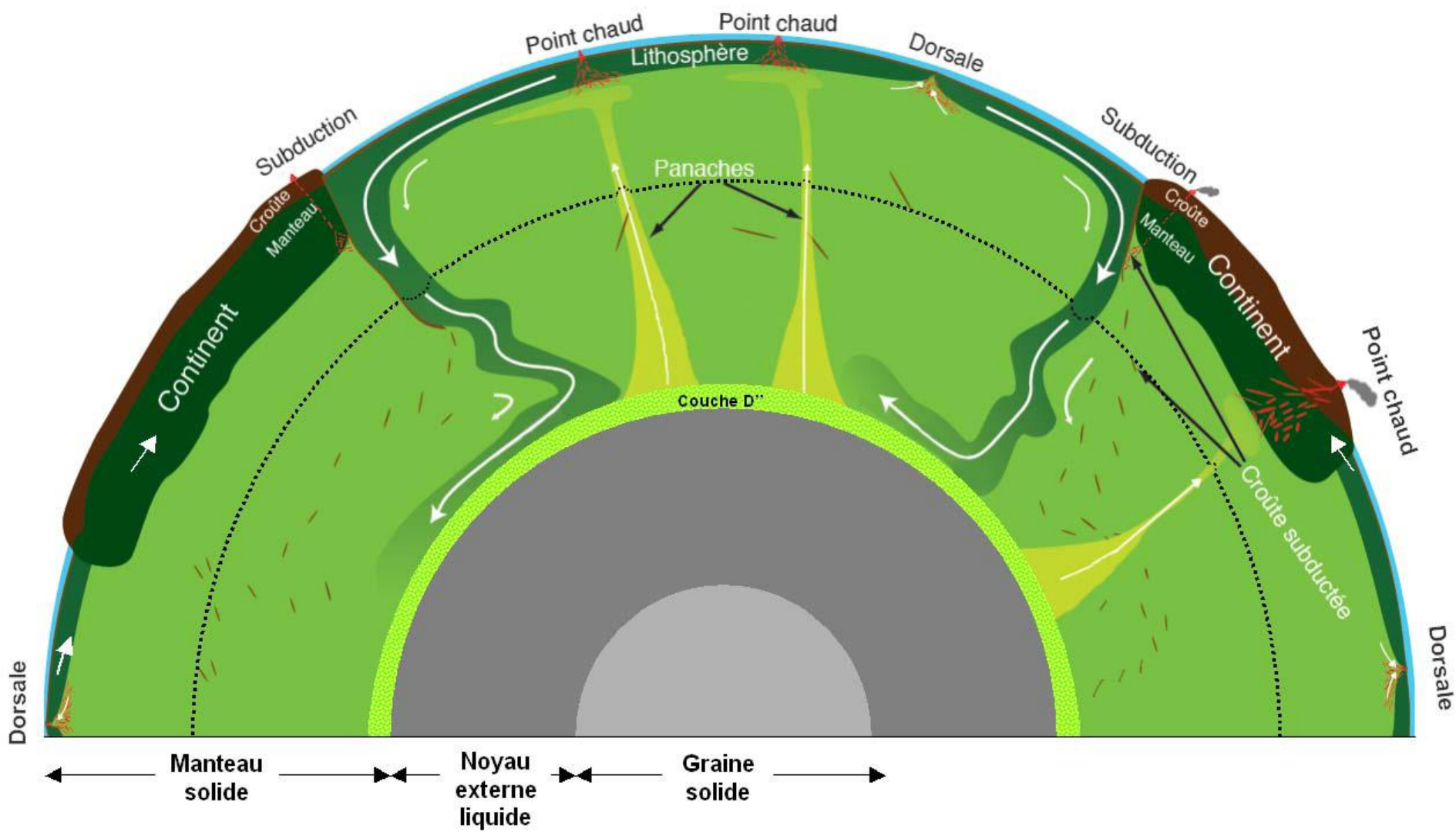
Analyse in situ :  
basaltes,  
argiles,  
sulfates....  
Météorites :  
gabbro,  
pyroxénites,  
dunites

**Les compositions minéralogiques superficielles et chimiques globales des planètes telluriques**





Sur Terre, la majorité des volcans forment des alignements ou des regroupements (petits points ou traits rouges), signature volcanique de la tectonique des plaques (seuls quelques uns sont « hors logique plaque »). Et la tectonique des plaque, plus ces volcans ponctuels, c'est la signature de la convection mantellique.



**La convection mantellique se fait à l'état solide, à des vitesses (des lenteurs !) de quelques cm / an. La part de magma (en rouge) est infime, et superficielle. Le magma provient d'une fusion partielle très localisée du manteau, fusion due à une décompression ou à une hydratation.**

**La Lune. Dès 1609, Galilée voit des étendues plates et sombres, qu'il appelle « mer » et d'autres montagneuses et claires qu'il appelle « continents ».**





**La Lune. Dès 1609, Galilée voit des étendues plates et sombres, qu'il appelle « mer » et d'autres montagneuses et claires qu'il appelle « continents ».**

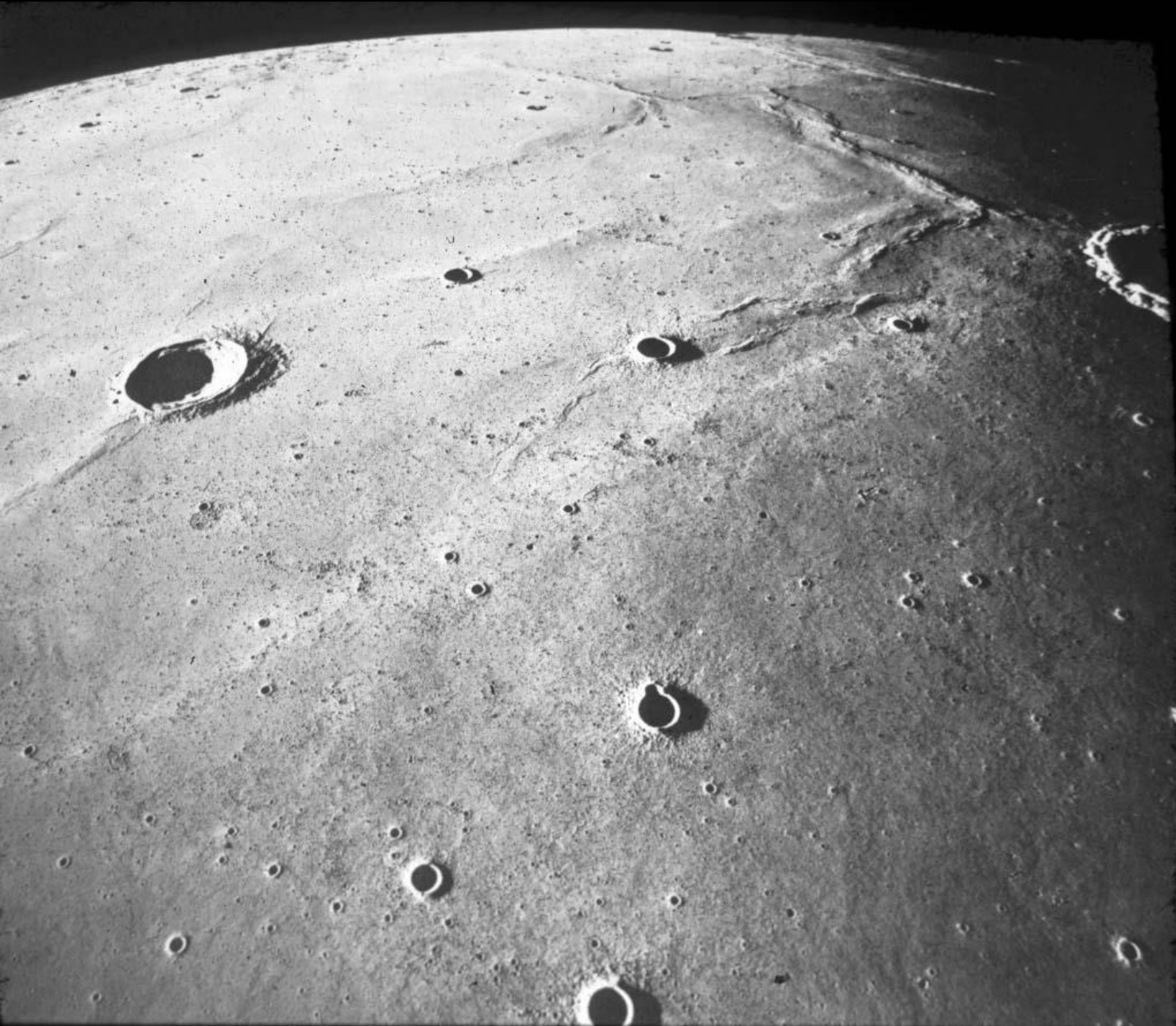






**Ce qu'on appelle les « mers » lunaires (qui ne sont pas liquides) : des grandes plaines. Regardons les en détail.**

# Les mers, de mornes plaines



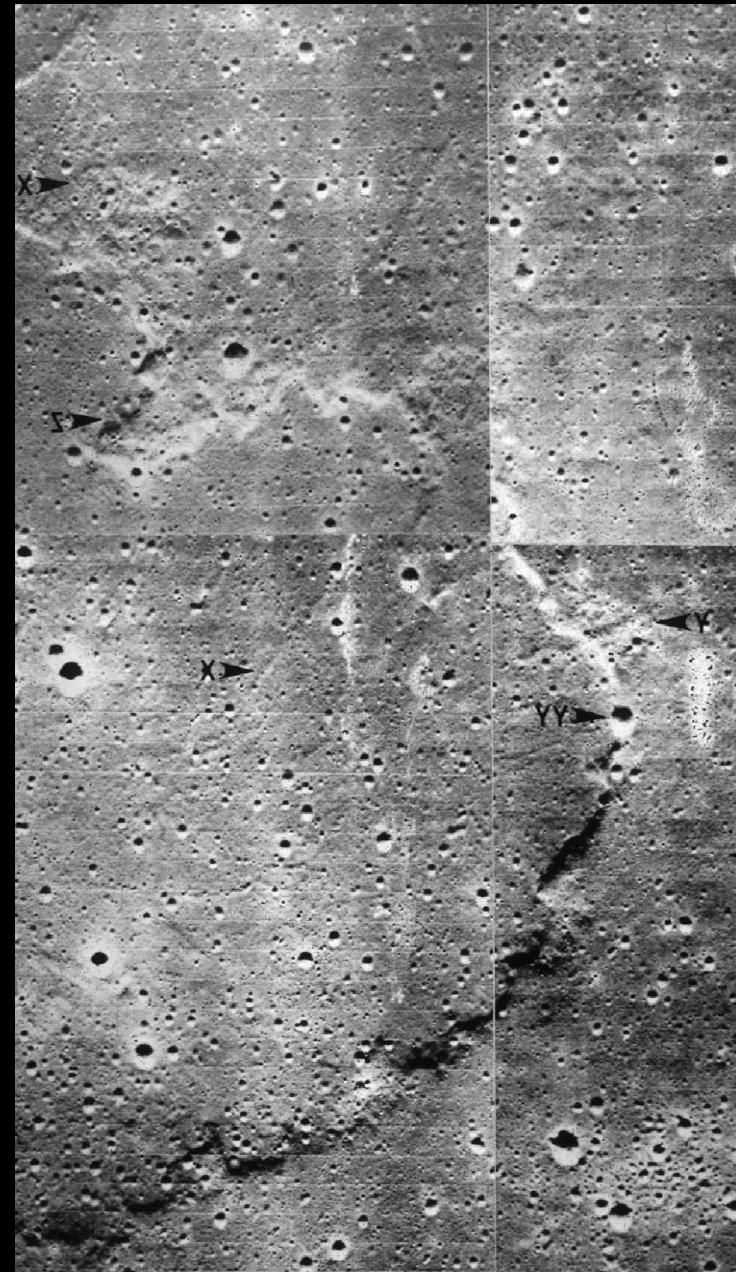


**Dans ces mers, on voit  
des figures qui font  
irrésistiblement penser à  
d'anciennes coulées de  
lave**





# Un détail





# Une analogie terrestre



Photo Pierre Thomas





**Qu'est ce que c'est ? Des vallées ; mais il n'y a pas d'eau sur la Lune !**



**En voilà d'autres.**





# Une analogie terrestre (plateau de la Snake River, Idaho) : un tunnel de lave effondré







**Comment se font ces étranges vallées ?**



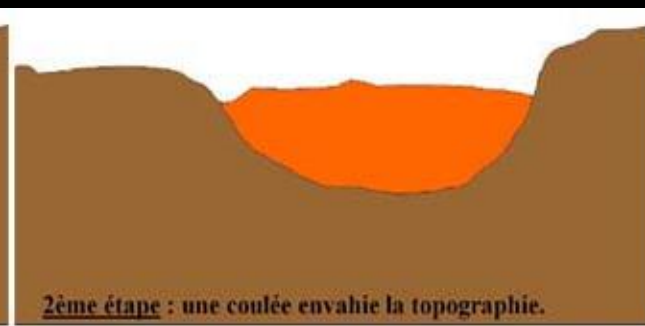


Photo Parc national d'Hawaii





**C'est ce qu'on appelle des « tunnels de lave » effondrés**



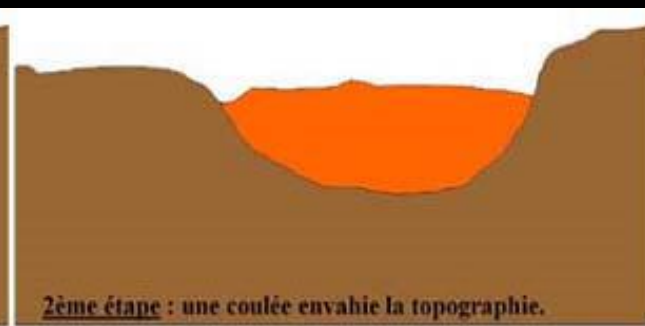
**Sept étapes de la formation d'un tunnel de lave et d'une lucarne**

Schéma Pierre Thomas





1ère étape : une topographie préexistante.



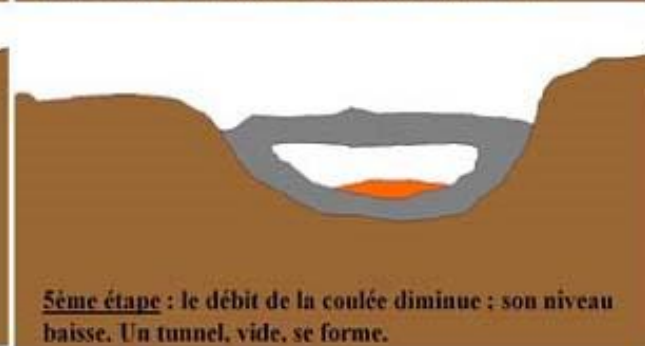
2ème étape : une coulée envahie la topographie.



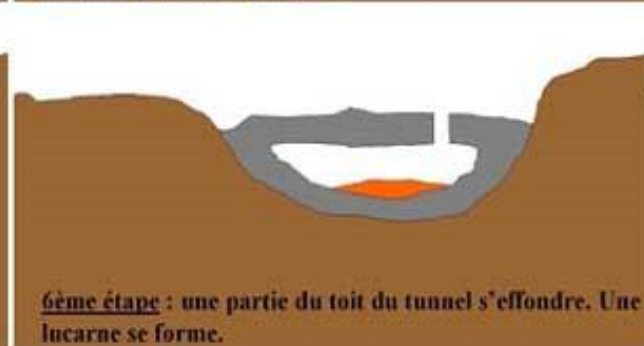
3ème étape : la coulée se solidifie sur les bords mais continue à couler au centre.



4ème étape : La coulée se solidifie à son sommet mais reste liquide et continue à couler en son centre. Il se forme un « tube » plein de lave.



5ème étape : le débit de la coulée diminue ; son niveau baisse. Un tunnel, vide, se forme.



6ème étape : une partie du toit du tunnel s'effondre. Une lucarne se forme.



7ème étape : la lave résiduelle se solidifie. Le tunnel de lave a sa morphologie définitive.

Sept étapes de la formation d'un tunnel de lave et d'une lucarne.  
Si le tunnel s'effondre, cela donne ces espèces de vallées.



Photo Pierre Thomas

**Une lucarne et un petit « tunnel de lave » effondré  
(1 m de large)**





Photo Pierre Thomas

**Un grand tunnel de lave effondré (large comme une route)**





Photo Pierre Thomas

**Au bout de l'effondrement, l'entrée du tunnel.**





Photo Pierre Thomas

**On rentre dedans !**





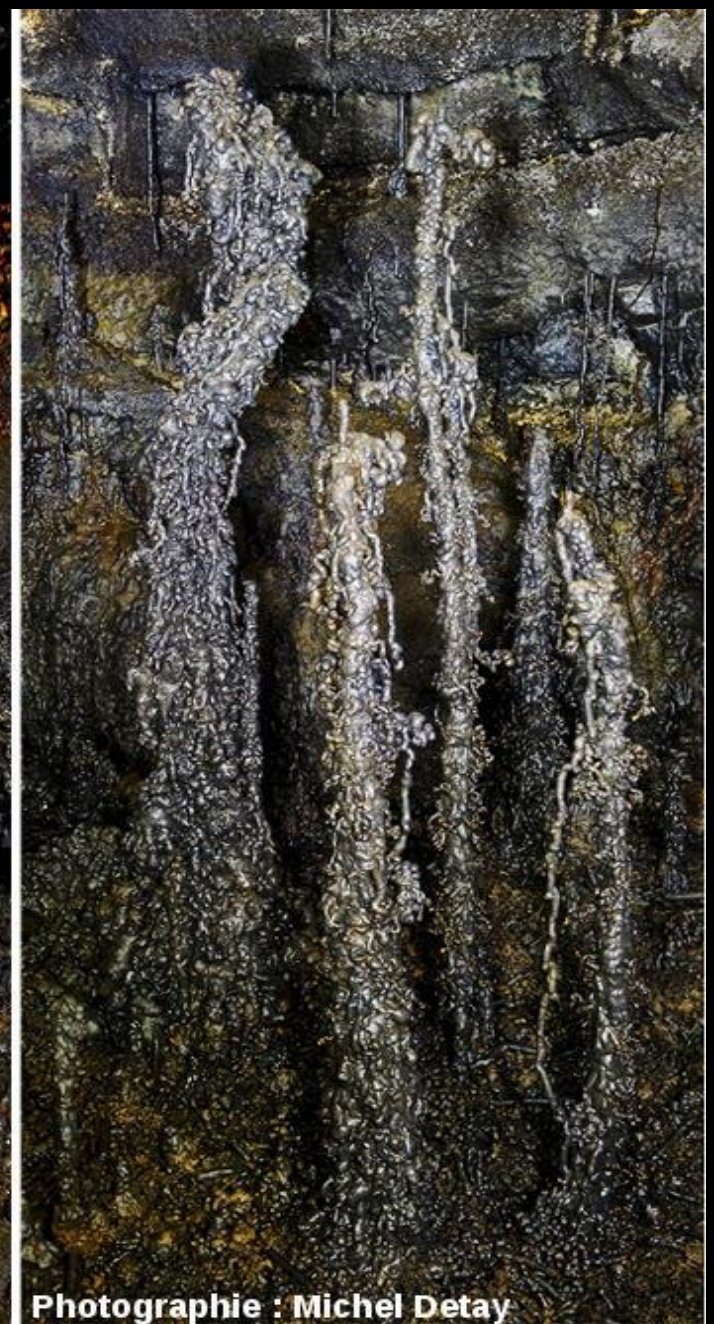
Photo Pierre Thomas

**Petits stalactites de basalte !**





Photographie : Michel Detay

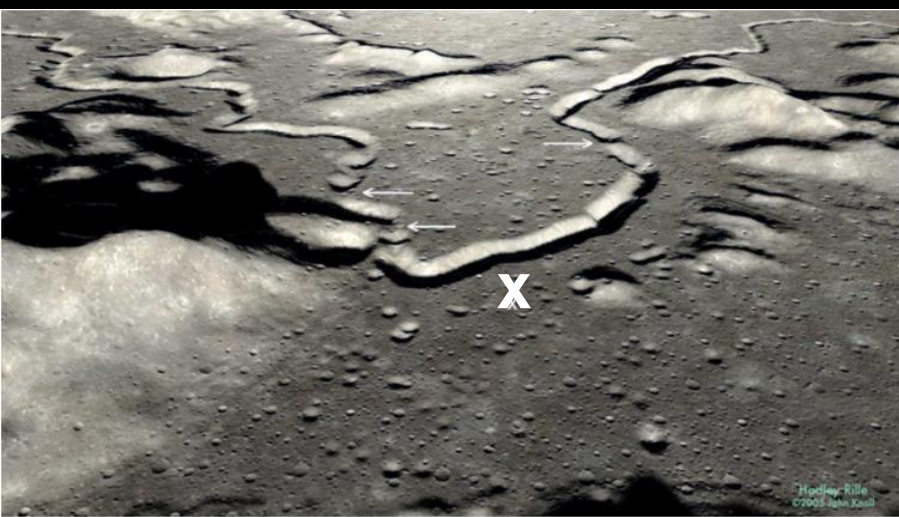


Photographie : Michel Detay

**Un enchantement basaltique !**



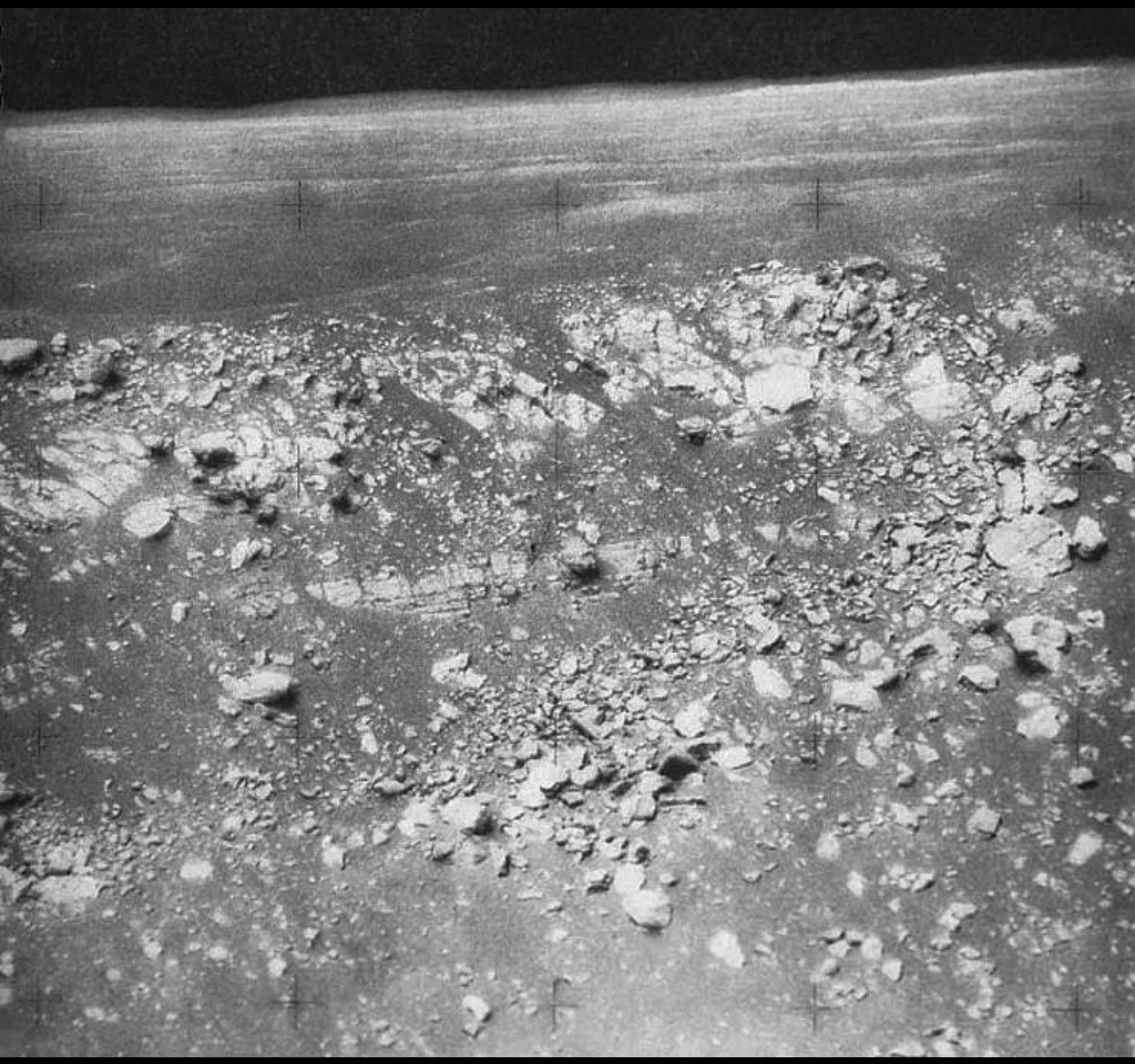
# Retour sur La Lune où Apollo 15 s'est posé près du « sillon Hadley », un tunnel de lave lunaire effondré





**Dave Scott et la jeep lunaire devant le sillon Hadley**

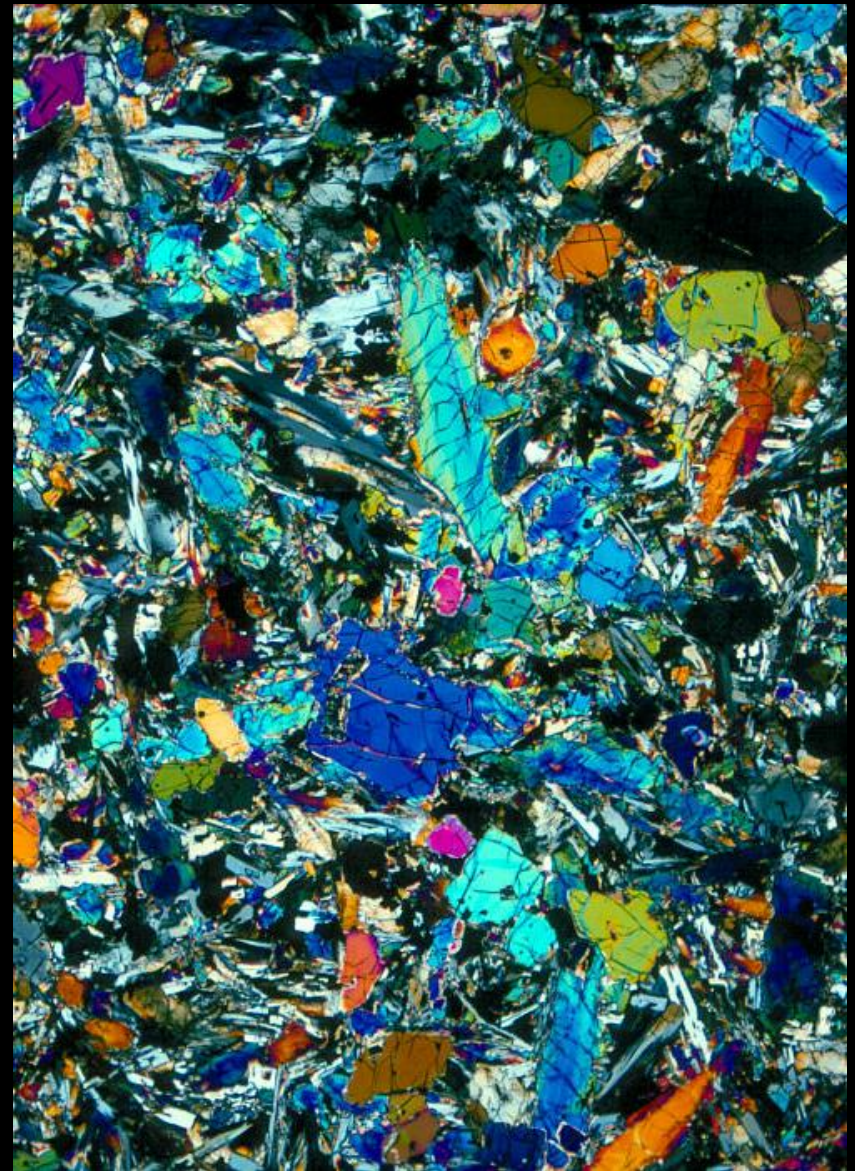
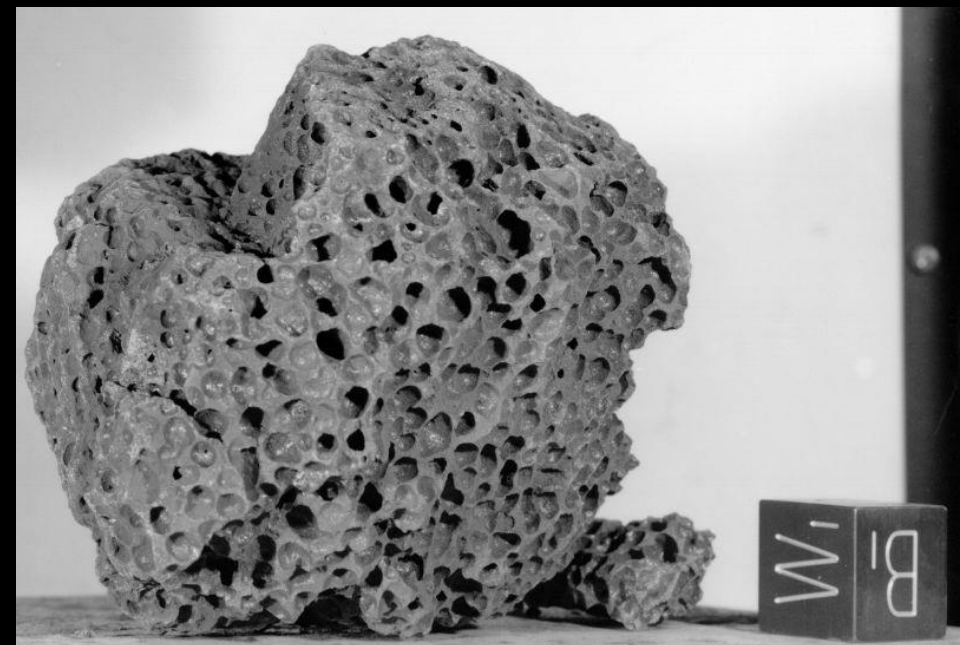




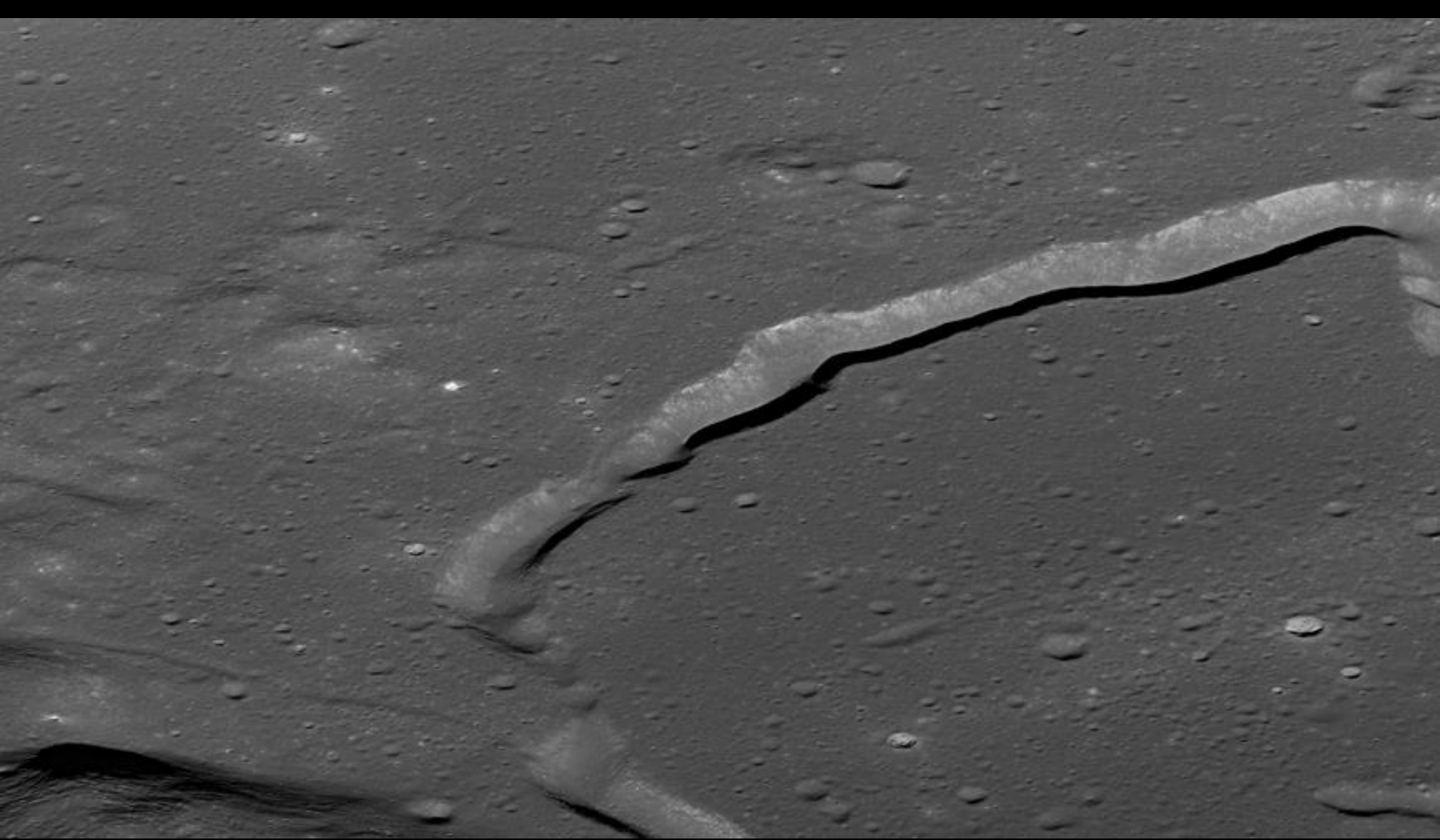
**Rochers  
photogra-  
phiés et  
échantil-  
lonnés en  
1971 par les  
astronautes  
d'Apollo 15**



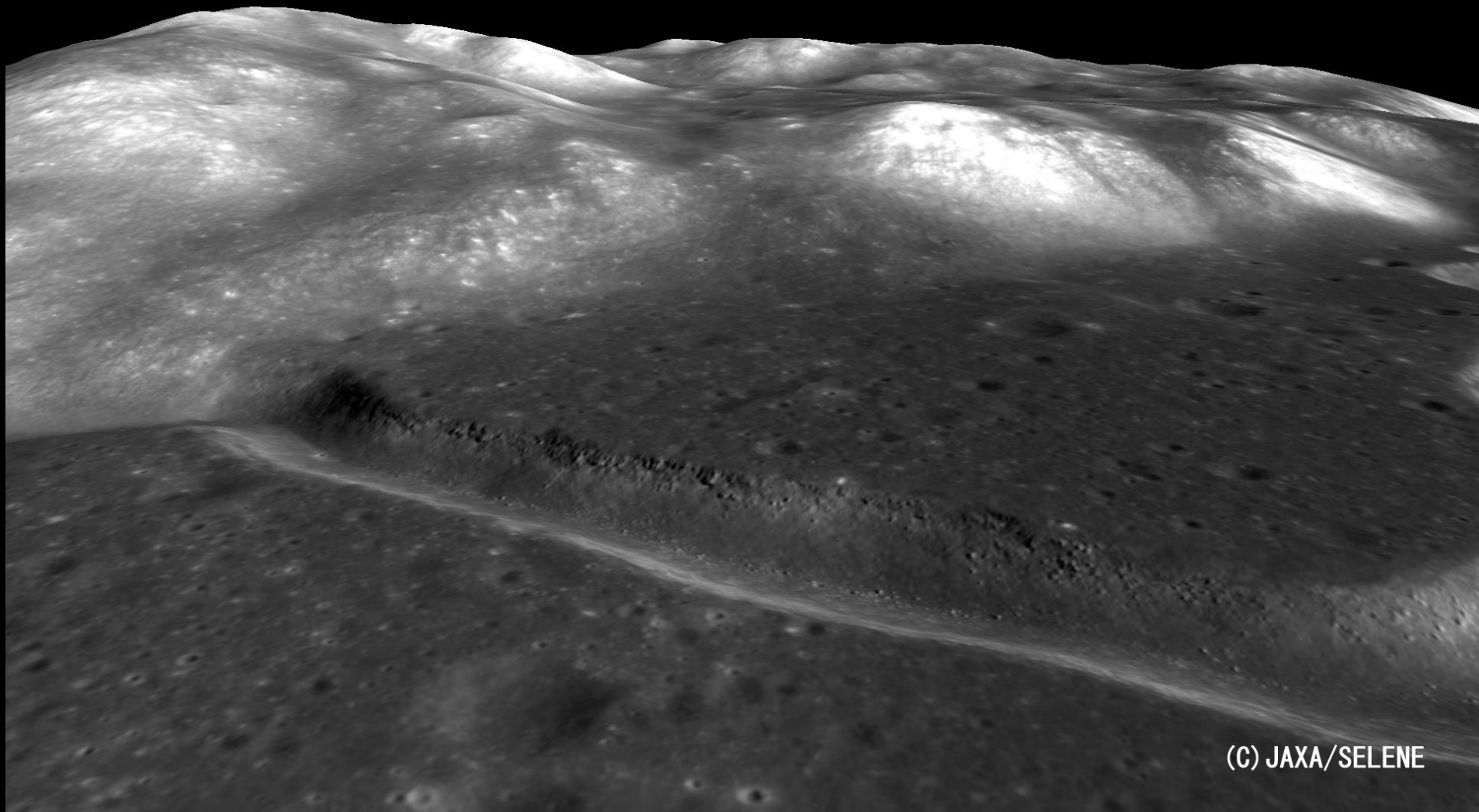
On y ramasse du ...  
basalte







**Il y a des fragment du sillon Hadley où il n'y a pas eu d'effondrement. Il doit y rester des grottes (intéressant pour les futures stations)**



(C) JAXA/SELENE

**Le même sillon Hadley vu par la sonde japonaise Sélène (Kaguya) en mai 2008. On voit les rochers en haut de la falaise**



**Mais y-a-t-il de « vrais » volcans ?**





# Une analogie terrestre ...



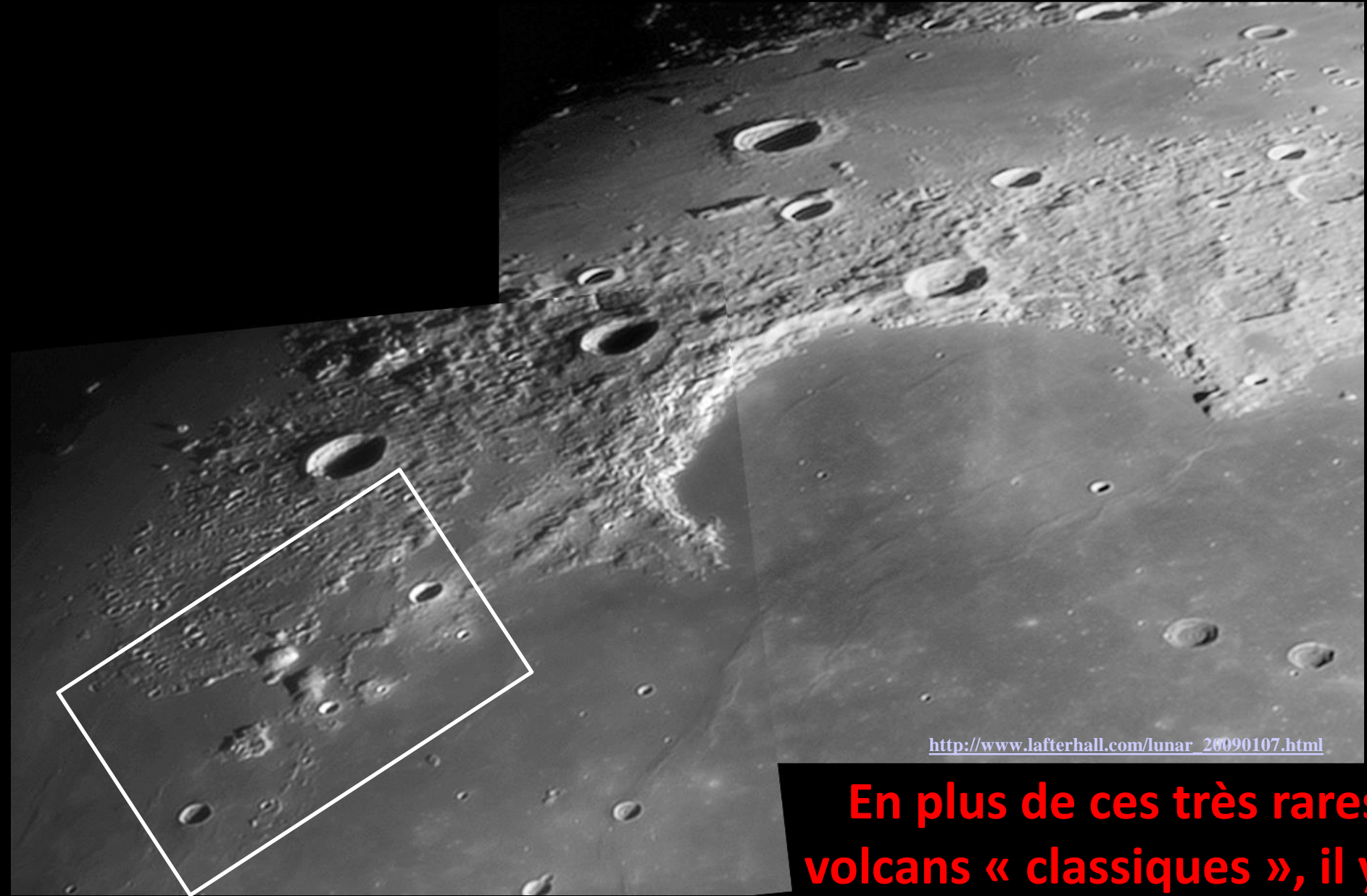
Photo Pierre Thomas



... dans son contexte géologique



Photo Pierre Thomas



[http://www.lafterhall.com/lunar\\_20090107.html](http://www.lafterhall.com/lunar_20090107.html)

**En plus de ces très rares  
volcans « classiques », il y  
a des « dômes », sans doute résultats de laves plus siliceuses.  
Ici, vue « télescopique » des monts de Gruithuisen**





<http://www.astronet.ru:8105/db/msg/1200605>

**Détail des des monts de Gruithuisen, des dômes volcaniques siliceux**



[http://wms.lroc.asu.edu/lroc\\_browse?page=1](http://wms.lroc.asu.edu/lroc_browse?page=1)

**Les mêmes dômes volcaniques vus par  
Lunar Reconnaissance Orbiter**





[http://wms.selene.darts.isas.jaxa.jp/selene\\_viewer/en/observation\\_mission/hdtv/hdtv\\_027.html](http://wms.selene.darts.isas.jaxa.jp/selene_viewer/en/observation_mission/hdtv/hdtv_027.html)



<http://lpod.wikispaces.com/September+20,+2010>

**Et ces « dômes » (les Collines de Marius) seraient peut-être aussi des édifices de laves très siliceuses**

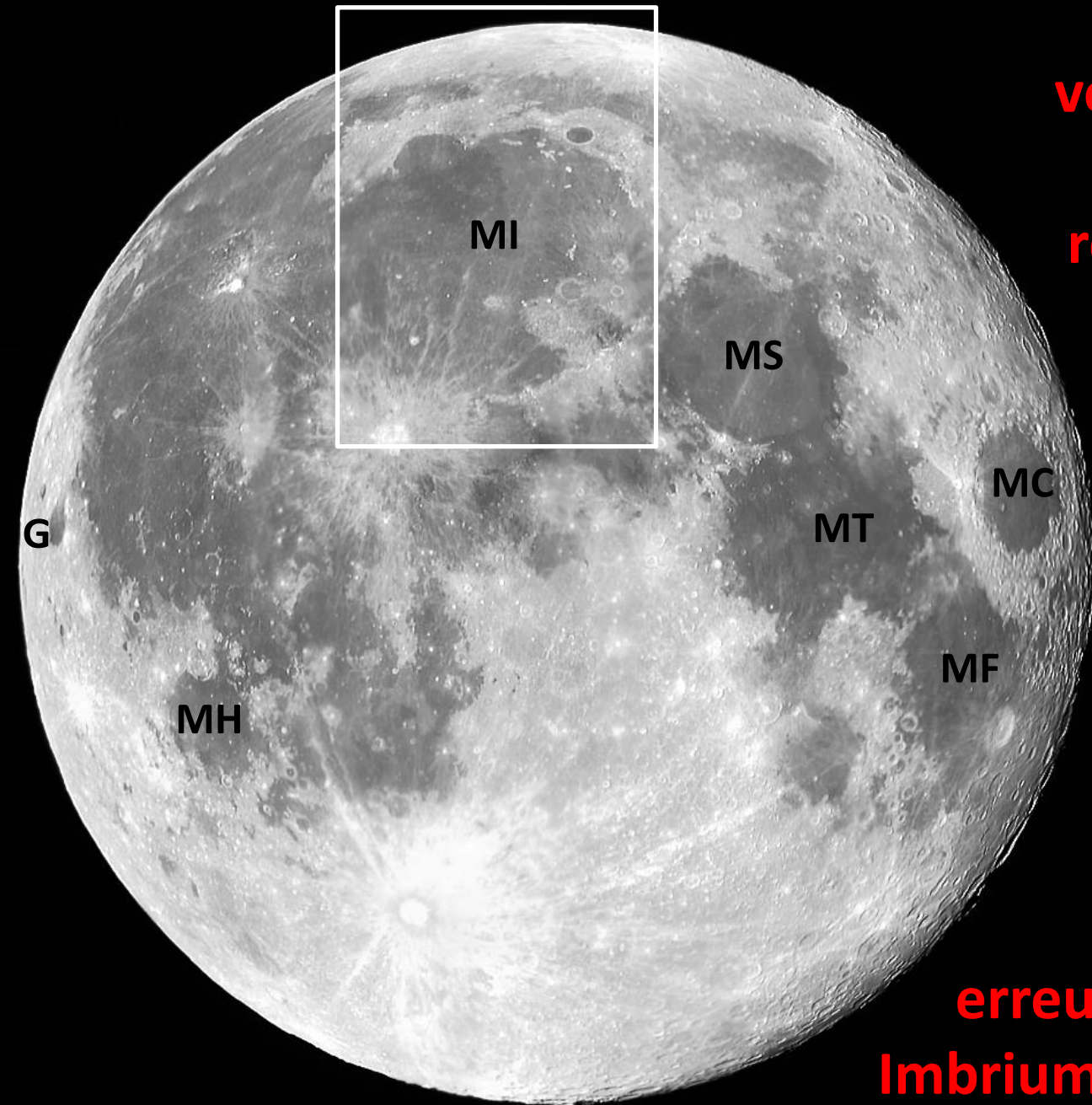


**Pour comparer, des  
dômes volcaniques  
en Californie,**

**dans l'état de  
Washington**

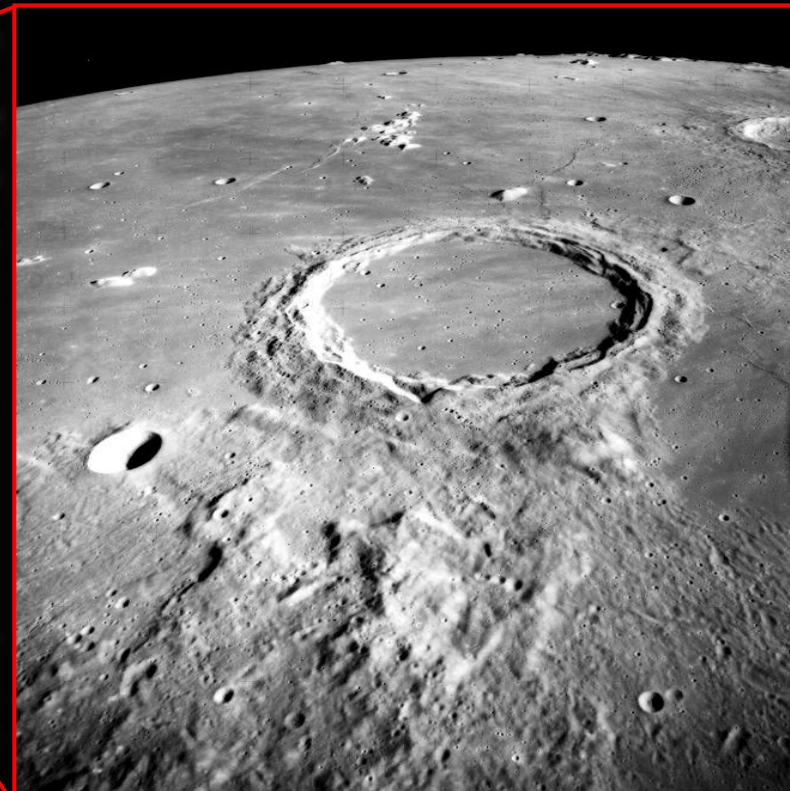
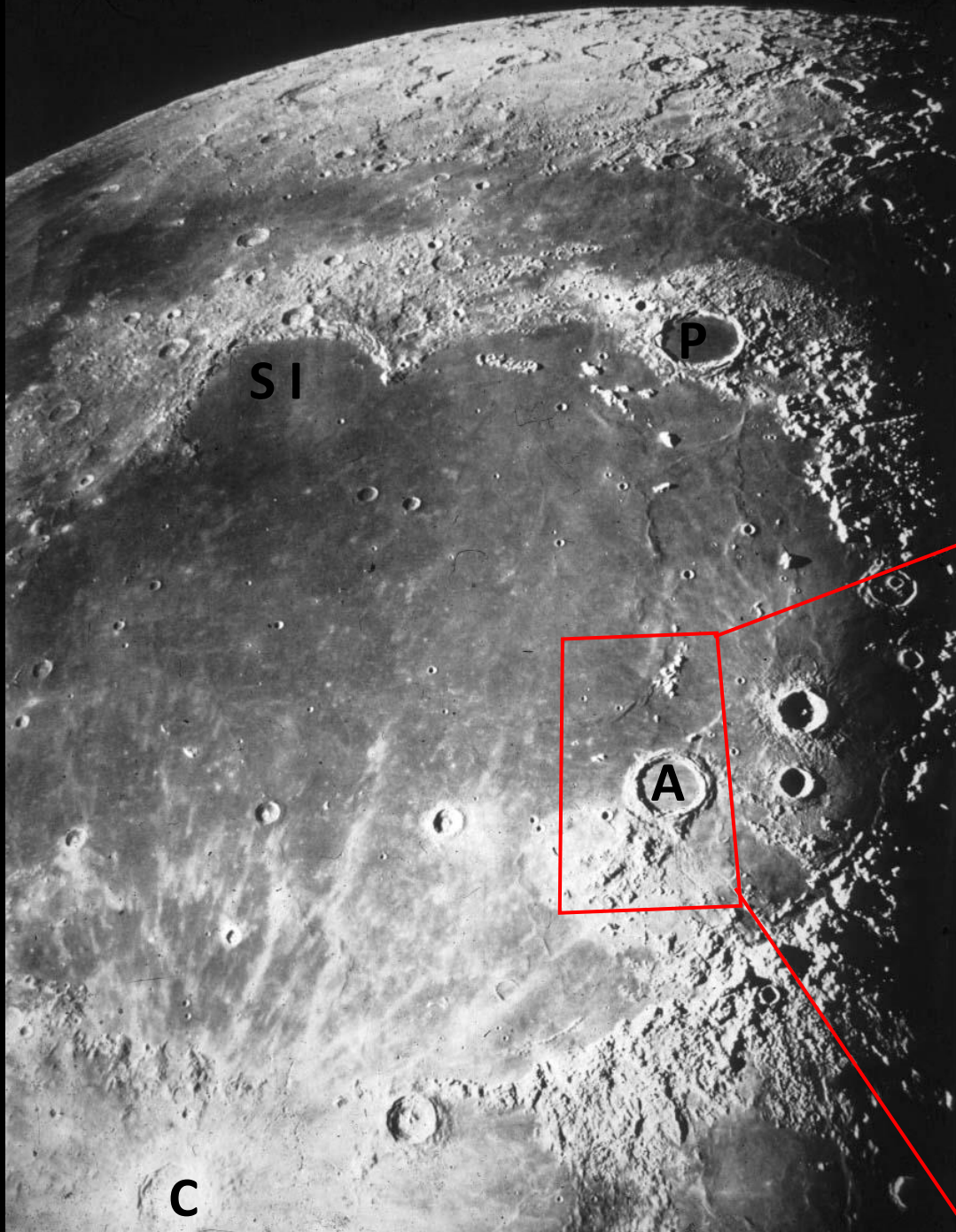






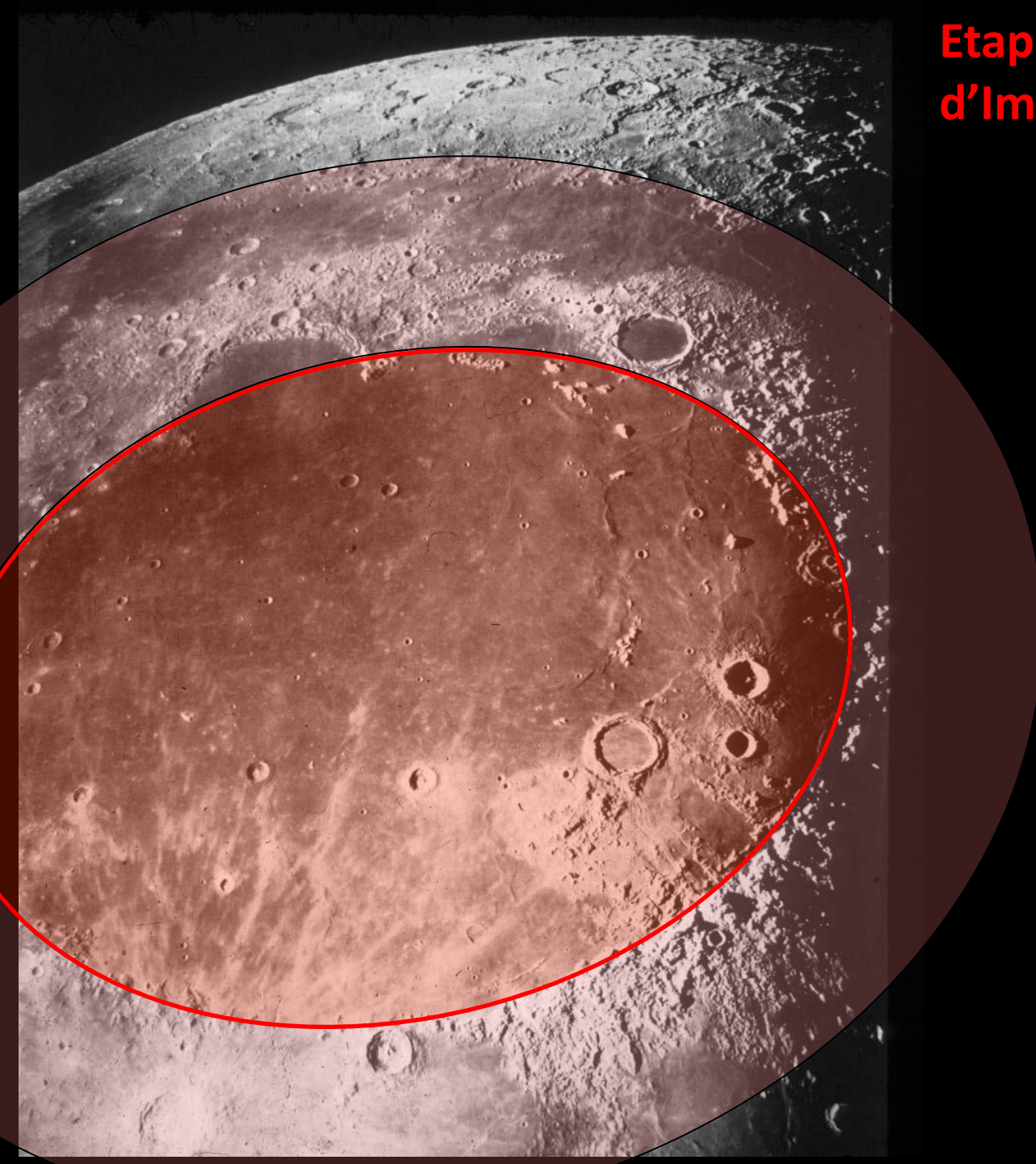
**Quel est l'âge de ce volcanisme des mers lunaires ? Elles remplissent souvent d'anciens très grands cratères d'impact (les bassins). Et souvent le volcanisme est présenté comme conséquence de l'impact. C'est une erreur ! Regardons Mare Imbrium (la mer des Pluies)**

**Regardons le cratère Archimède dans Mare Imbrium. Il y a un grand espace de temps entre les impact d'Archimède (et de Sinus Iridium, de Plato) avec celui d'Imbrium.**

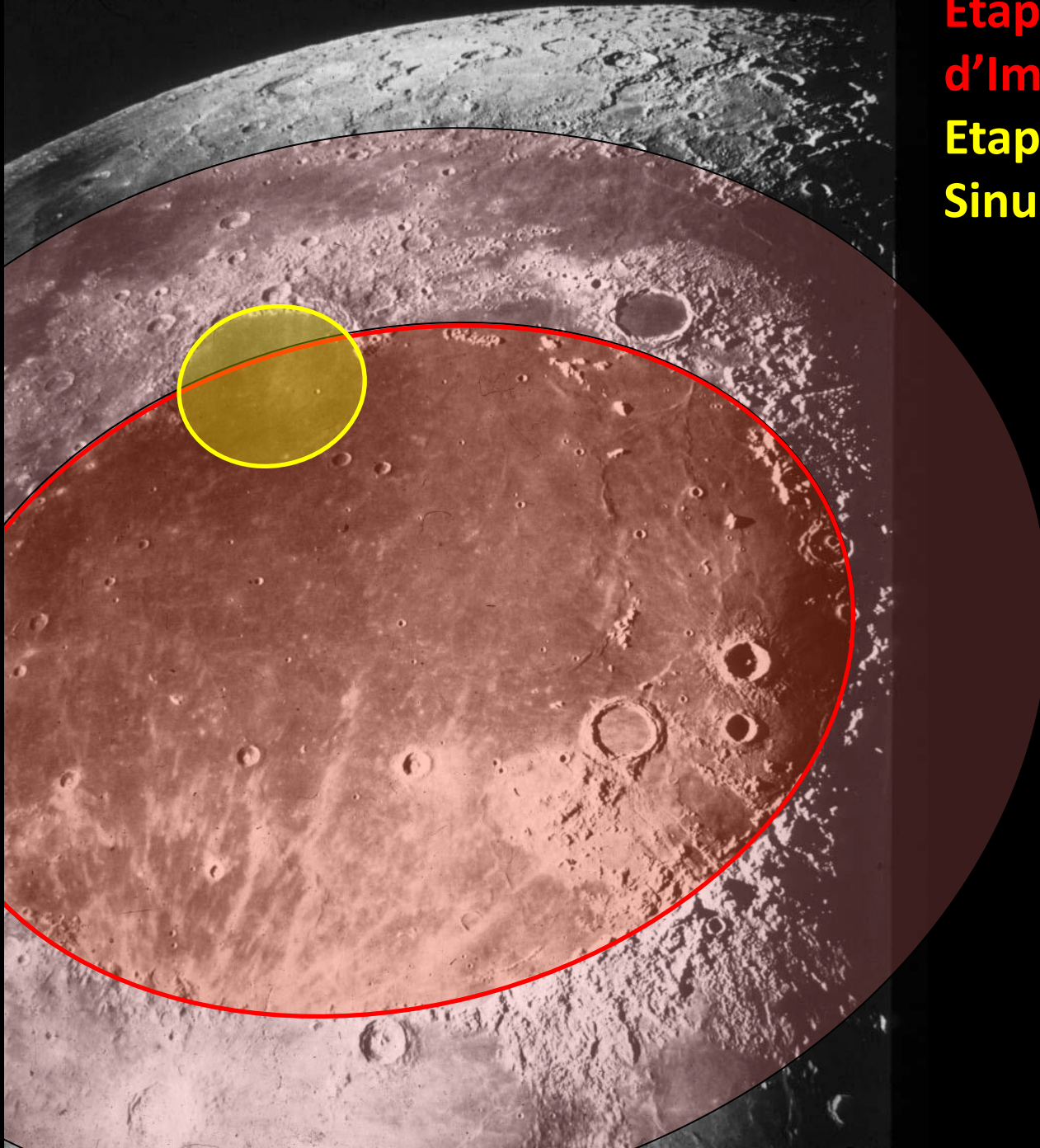




**Etape 1 : l'impact géant  
d'Imbrium (bassin + ejecta)**

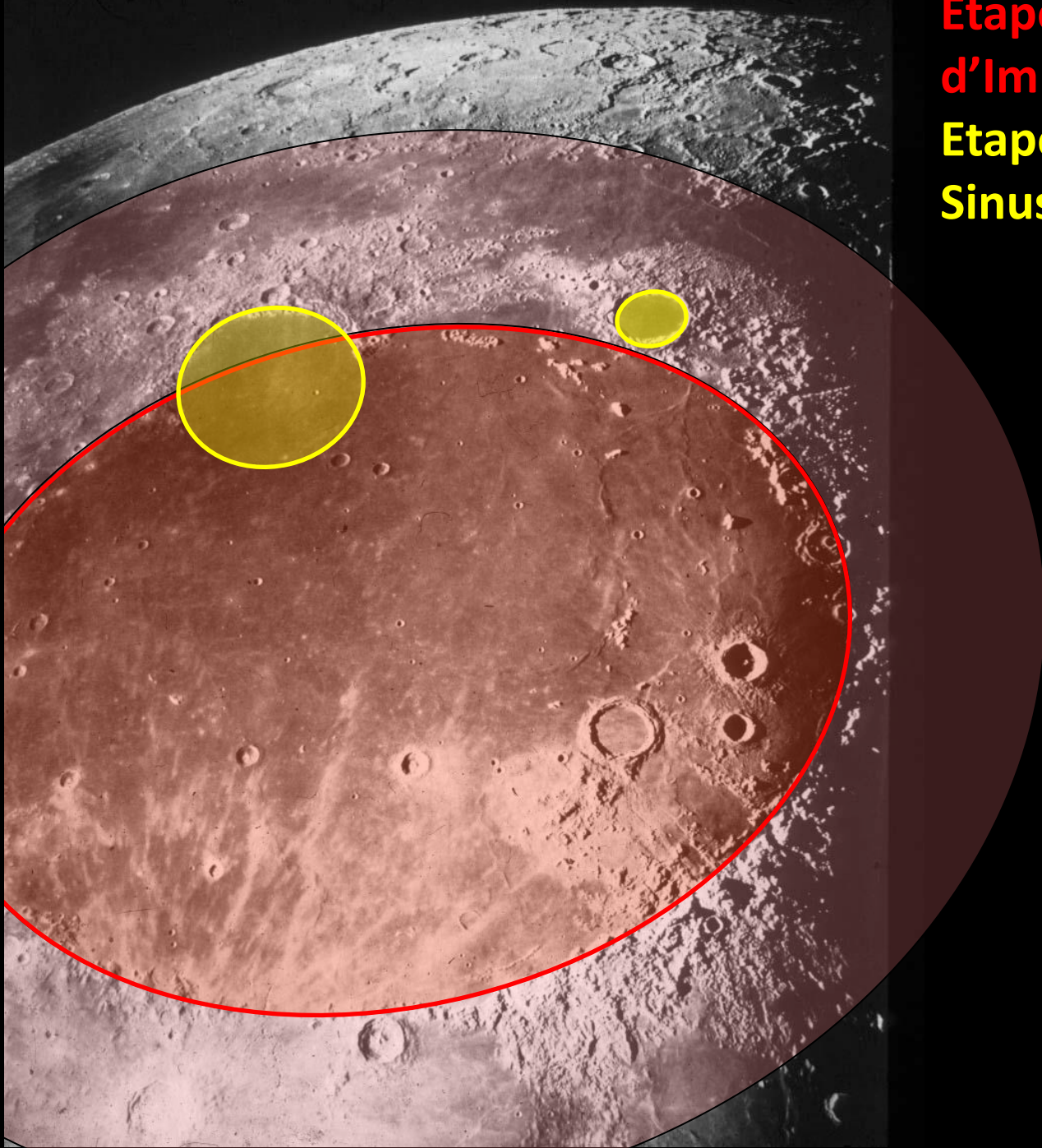


**Etape 1 : l'impact géant  
d'Imbrium (bassin + ejecta)**  
**Etape 2-3-4-5 : impacts de  
Sinus Iridium**



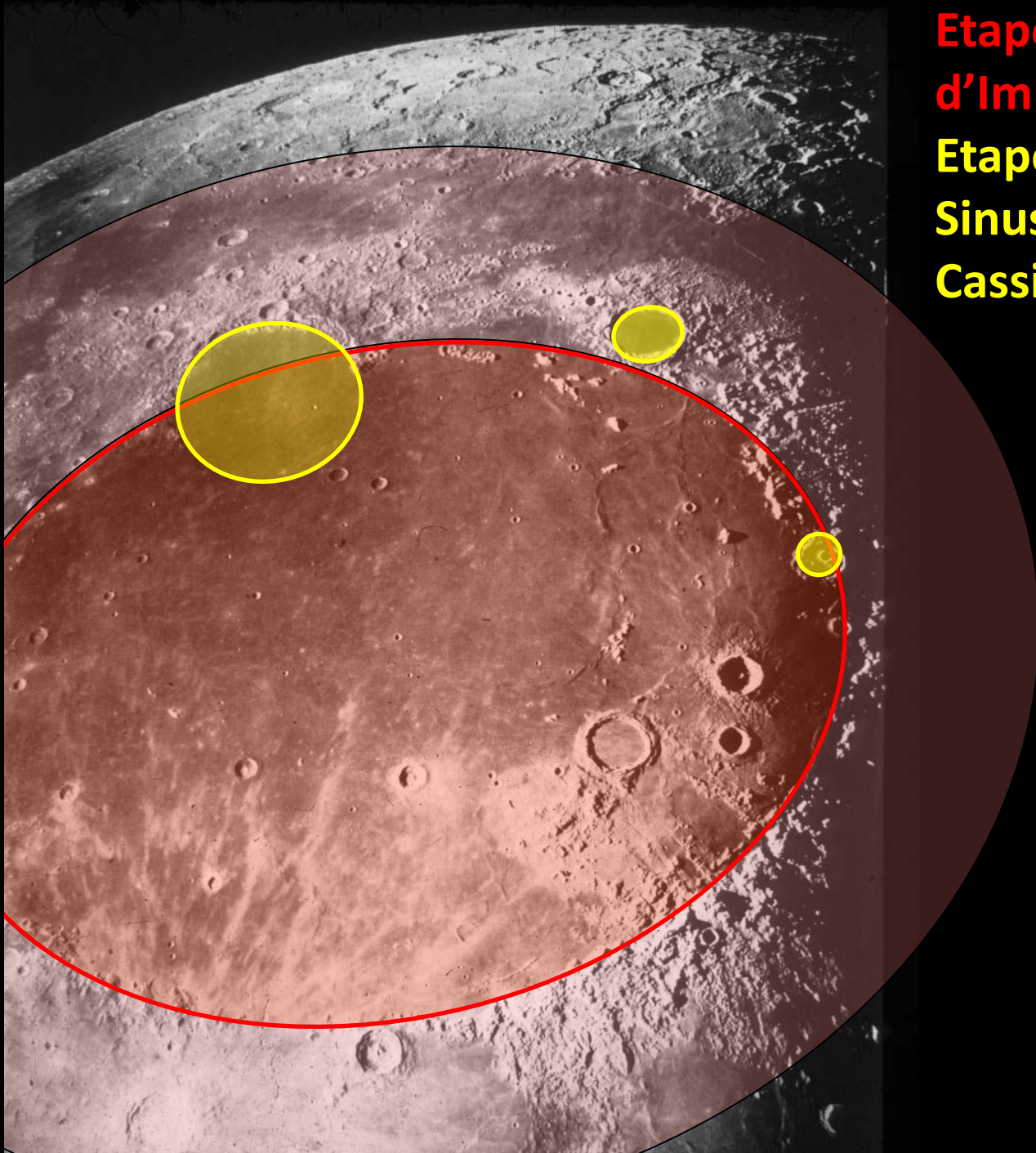


**Etape 1 : l'impact géant  
d'Imbrium (bassin + ejecta)**  
**Etape 2-3-4-5 : impacts de  
Sinus Iridium, Plato**



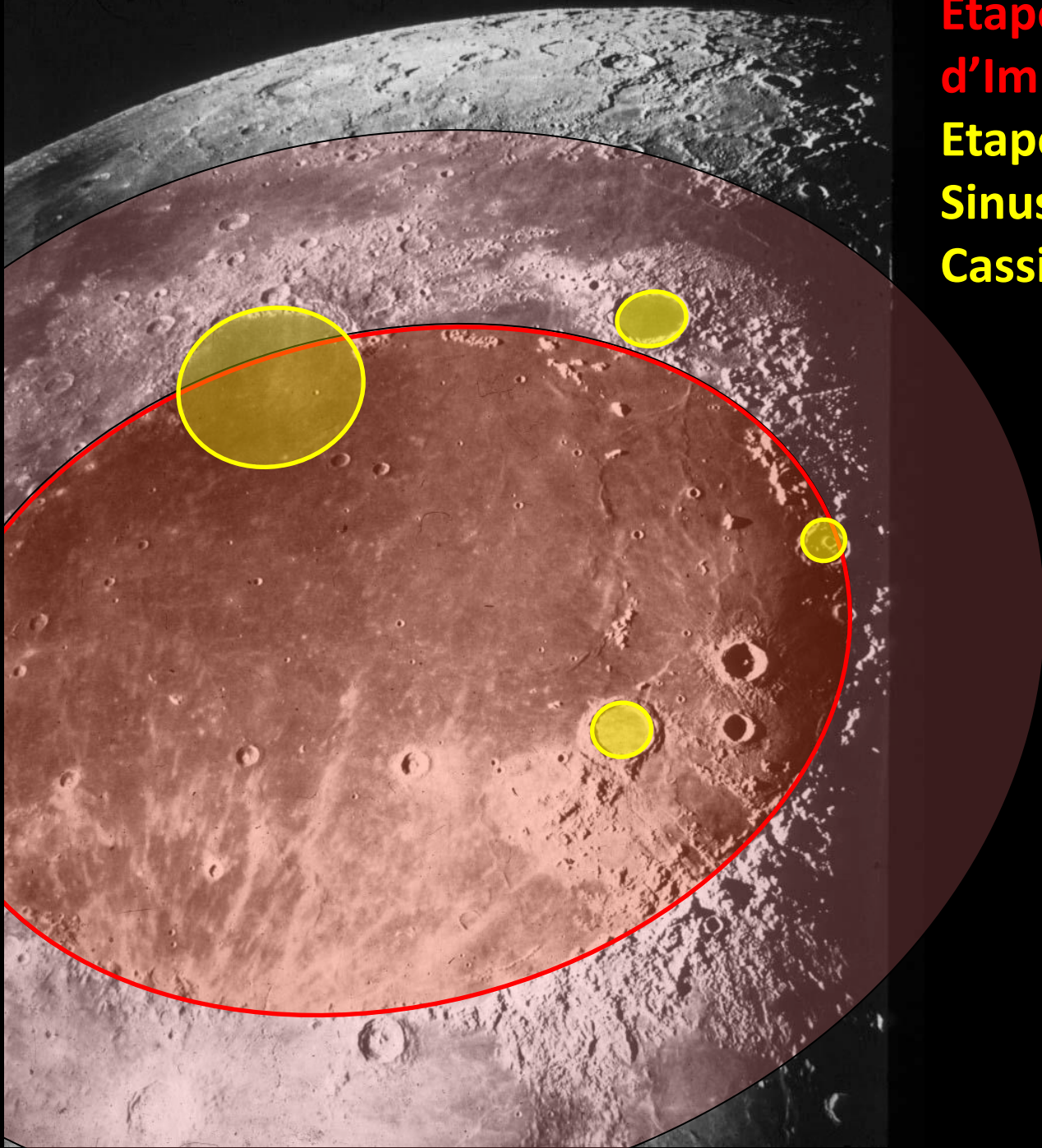
**Etape 1 : l'impact géant  
d'Imbrium**

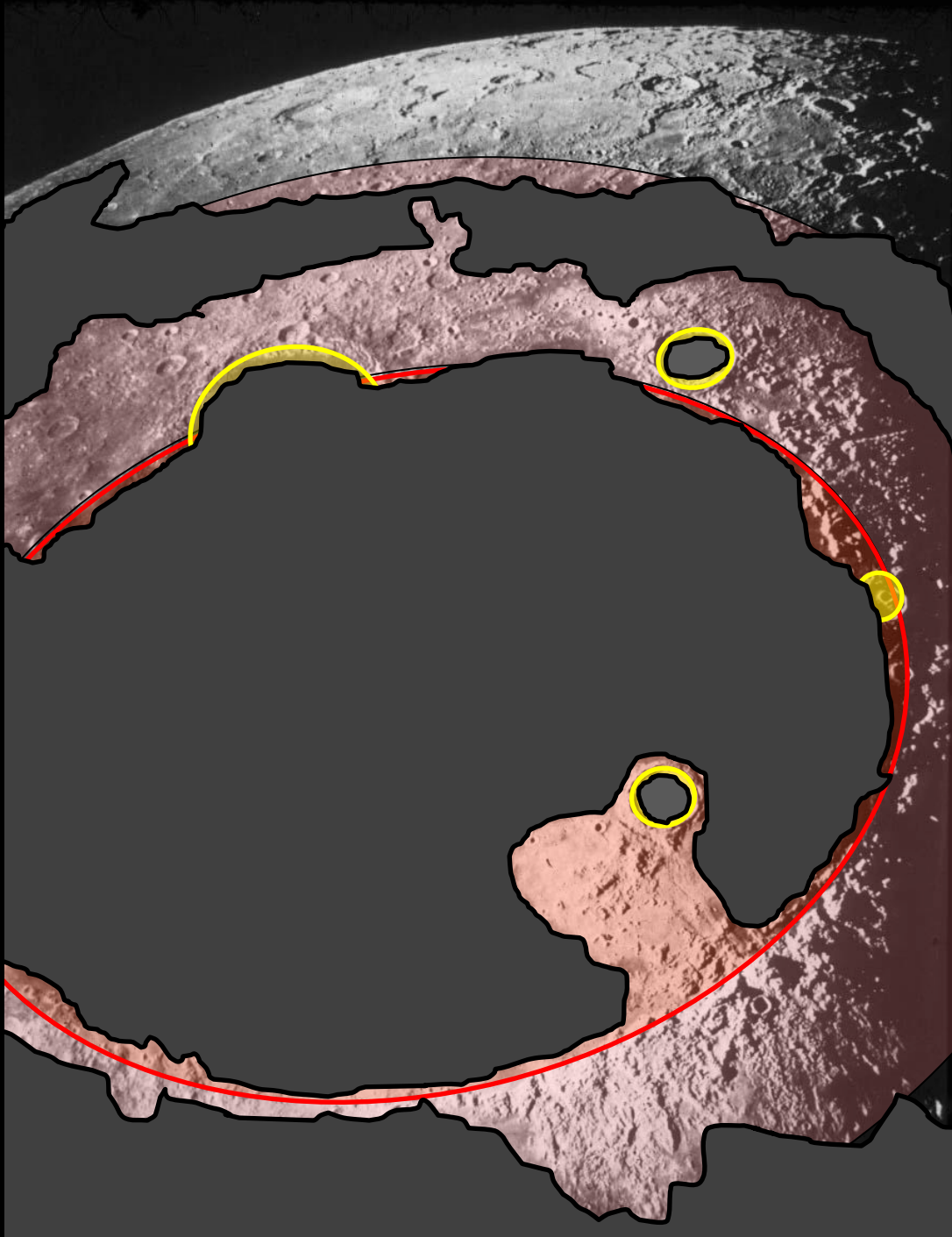
**Etape 2-3-4-5 : impacts de  
Sinus Iridium, Plato,  
Cassini**





**Etape 1 : l'impact géant  
d'Imbrium (bassin + ejecta)**  
**Etape 2-3-4-5 : impacts de  
Sinus Iridium, Plato,  
Cassini et Archimède**



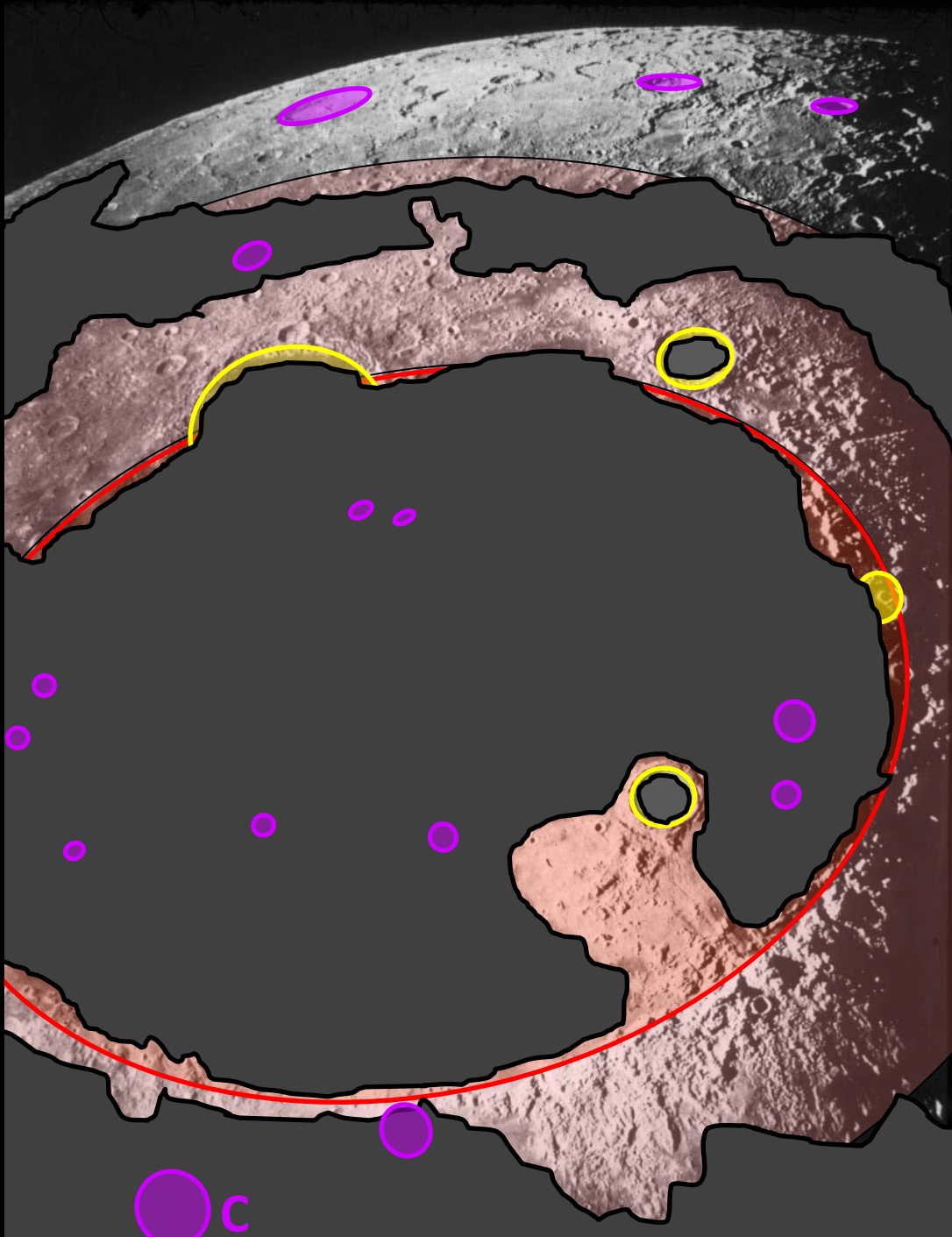


**Etape 1 : l'impact géant d'Imbrium (bassin + ejecta)**  
**Etapes 2-3-4-5 : impacts de Sinus Iridium, Plato, Cassini et Archimède ...**

Etape 6 : volcanisme des mers lunaires qui remplit-recouvre les 4 cratères SI, P, C et A. Entre les étapes 1 et 6, il a fallu du temps, assez de temps pour qu'il se produise au moins 4 impacts majeurs.







**Etape 1 : l'impact géant d'Imbrium (bassin + ejecta)**

**Etapes 2-3-4-5 : impacts de Sinus Iridium, Plato, Cassini et Archimède ...**

Etape 6 : volcanisme des mers lunaires qui remplit-recouvre les 4 cratères SI, P, C et A. Entre les étapes 1 et 6, il a fallu du temps, assez de temps pour qu'il se produise au moins 4 impacts majeurs.

**Etapes 7 et suivantes : impacts post-volcanisme, dont Copernicus**








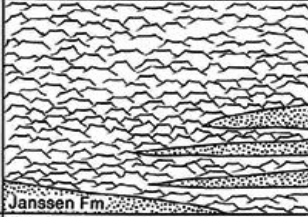
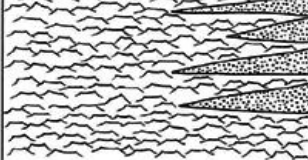


**C'est confirmé  
par la  
radiochronologie**

**Age du basalte :  
3,30 Ga  
(Apollo 15)**

**Age des éjectas,  
donc de l'impact  
d'Imbrium :  
3,85 Ga (Apollo 14)**



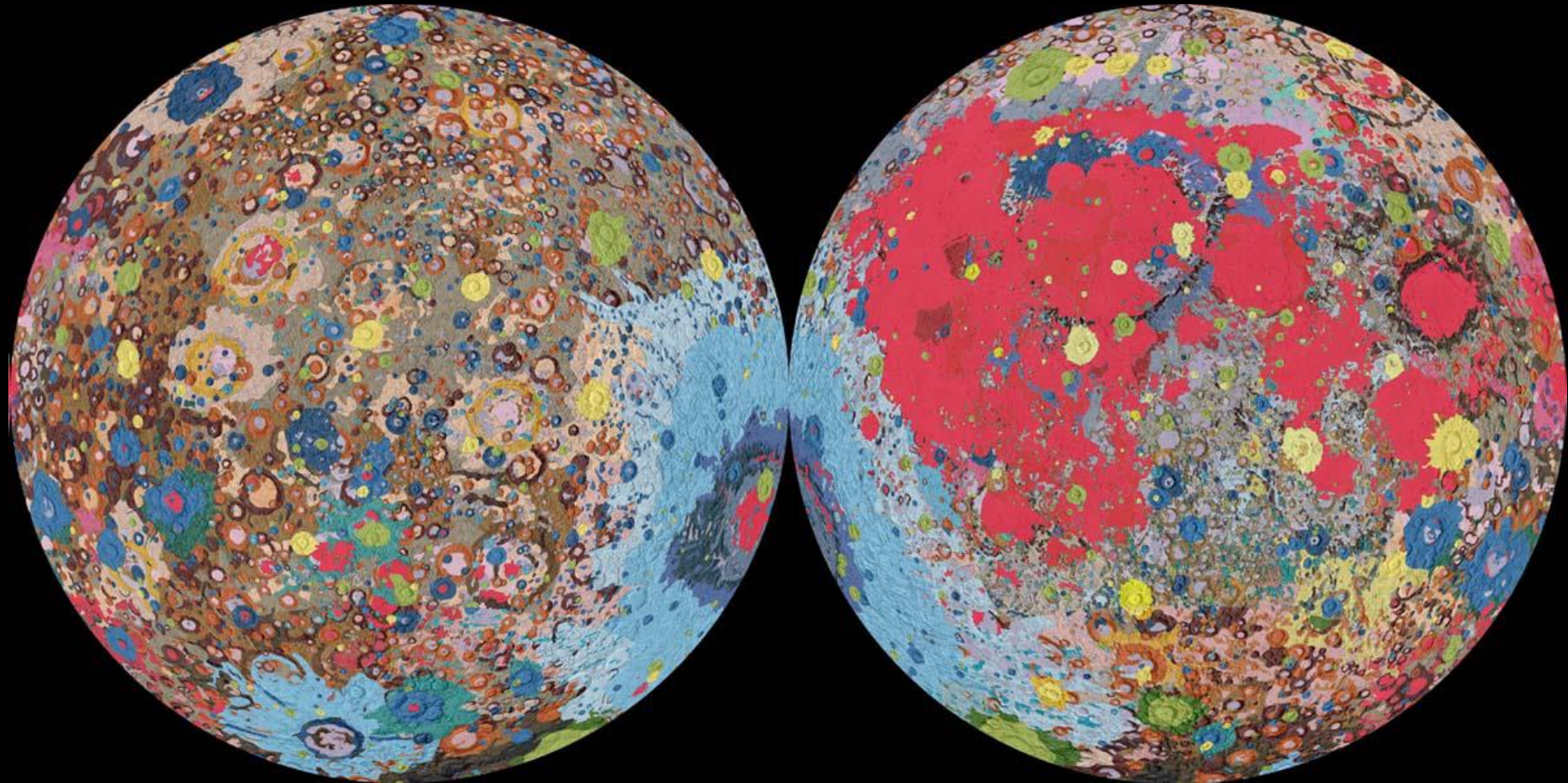
Time-stratigraphic Units	Date (years)	Rock Units	Events	Notes
Copernican System		Few large craters 	Tycho Aristarchus	Craters with bright rays and sharp features at all resolutions (e.g., Tycho, Aristarchus)
		Few large craters 	Copernicus	Craters with bright rays and sharp features but now subdued at meter resolutions (e.g., Copernicus)
Eratosthenian System	3.2 × 10 <sup>9</sup> 3.3 × 10 <sup>9</sup>	? Few large craters 	Eratosthenes	Craters with Copernican form, but rays barely visible or absent
		Apollo 12 lavas Apollo 15 lavas 	Imbrium lavas	Few lavas with relatively fresh surfaces
Imbrian System	3.42 × 10 <sup>9</sup>	Luna 16 lavas 	Eruption of widespread lava sheets on nearside; few eruptions on farside	Extensive piles of basaltic lava sheets with some intercalated impact crater ejecta sheets
	3.6 × 10 <sup>9</sup> 3.8 × 10 <sup>9</sup>	Mare lavas Apollo 11 lavas Apollo 17 lavas 		
	3.9 × 10 <sup>9</sup>	Cayley Formation? Hevelius Fm. Fra Mauro Fm. 		
Nectarian System			Imbrium Basin Crisium Muscoviense Humorum Nectaris Serenitatis Smythii Tranquillitatis Nubium	Numerous overlapping, large, impact craters and associated ejecta sheets together with large basin ejecta
Pre-Nectarian	4.1 × 10 <sup>9</sup>	Janssen Fm. 	Basins	
	4.6 × 10 <sup>9</sup>		Formation of Moon	"Crystalline" rocks formed by early igneous activity

Une colonne stratigraphique lunaire. Le volcanisme s'est arrêté vers - 3 Ga.

Depuis, il ne se passe plus rien, si ce n'est quelques impacts !

Face cachée

face visible

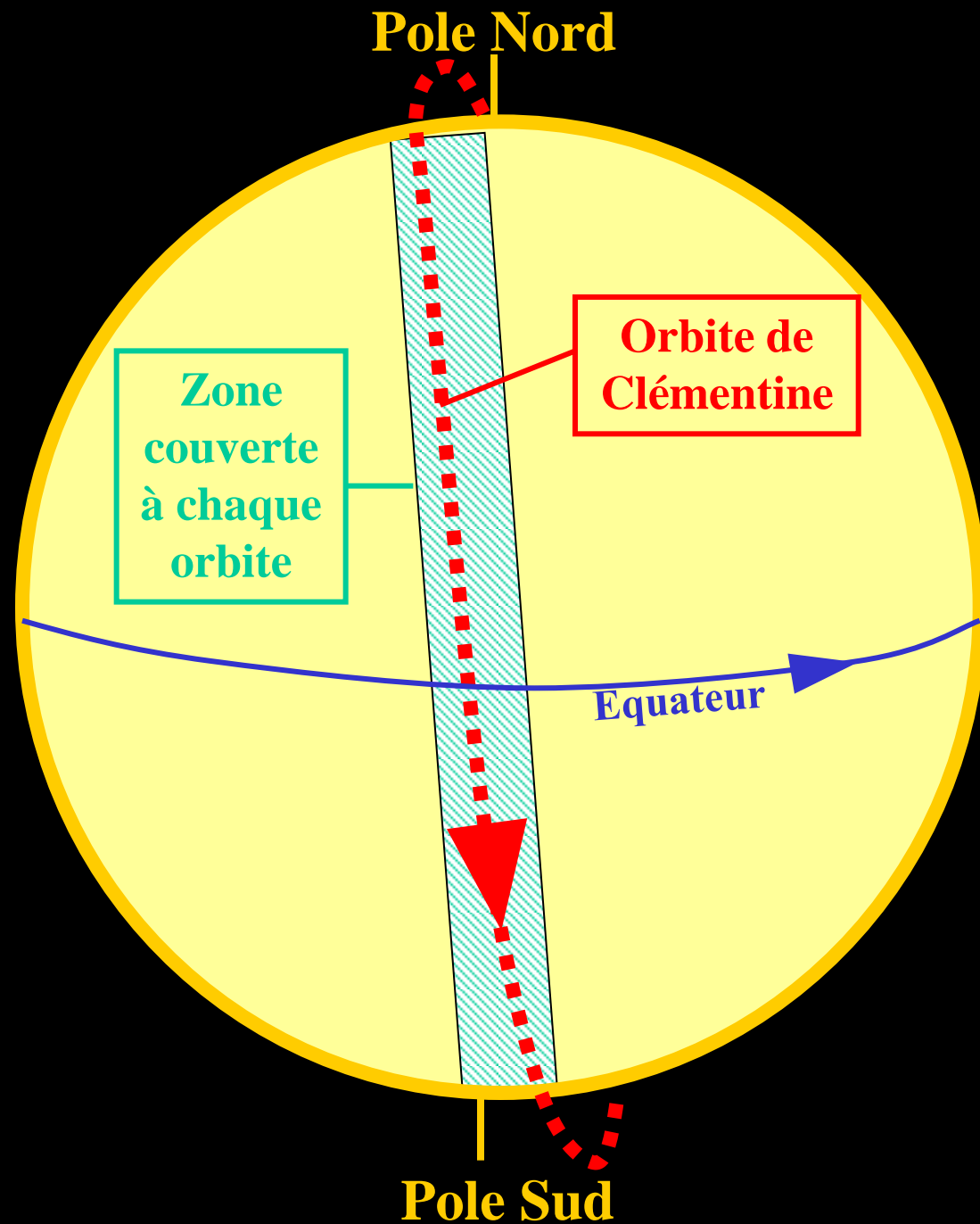


 Continents lunaires

 Mers lunaires

**Les mers lunaires, basaltiques, ne représentent que 17% de la surface de la Lune. Elles sont très majoritairement sur la face visible. Pourquoi ?**





Voici les résultats de la mission Clémentine, ancienne sonde Nasa en orbite polaire autour de la Lune. Ces résultats ont été confirmés depuis. Elle était munie d'un laser altimètre, et de tout ce qu'il faut pour déterminer la gravité en chaque point survolé.

**La sonde, contenant  
accéléromètre,  
gyroscope ...**

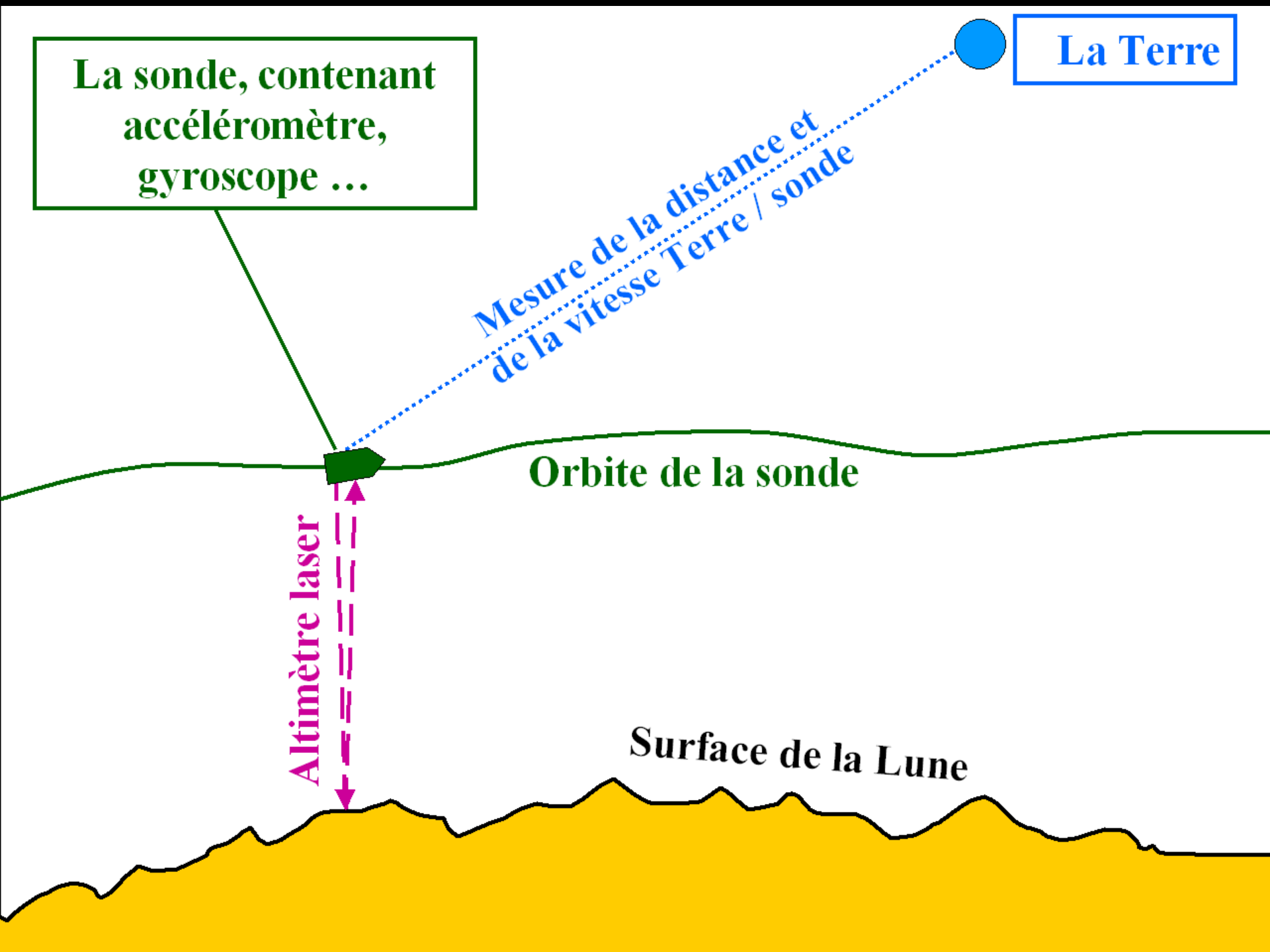
**La Terre**

*Mesure de la distance et  
de la vitesse Terre / sonde*

**Orbite de la sonde**

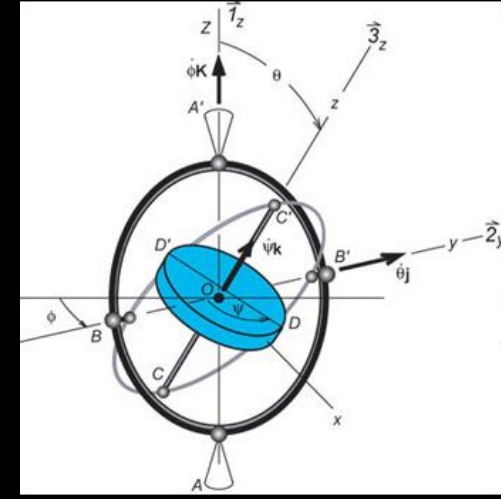
*Altimètre laser*

**Surface de la Lune**





On mesure la distance Terre / sonde grâce au temps mis par un « top » radio pour faire le trajet. On mesure la vitesse Terre/sonde par effet Doppler. Accéléromètre et gyroscope mesurent accélération et changement d'orientation de la sonde



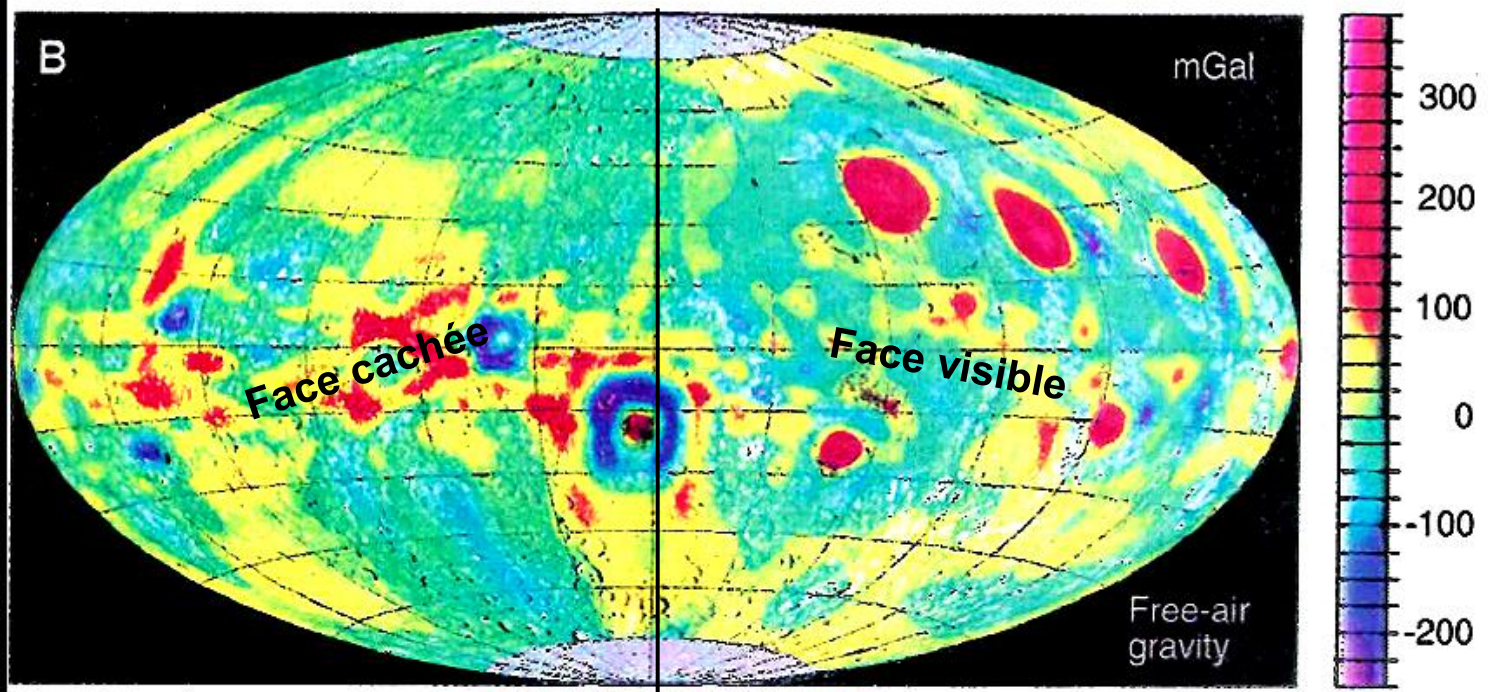
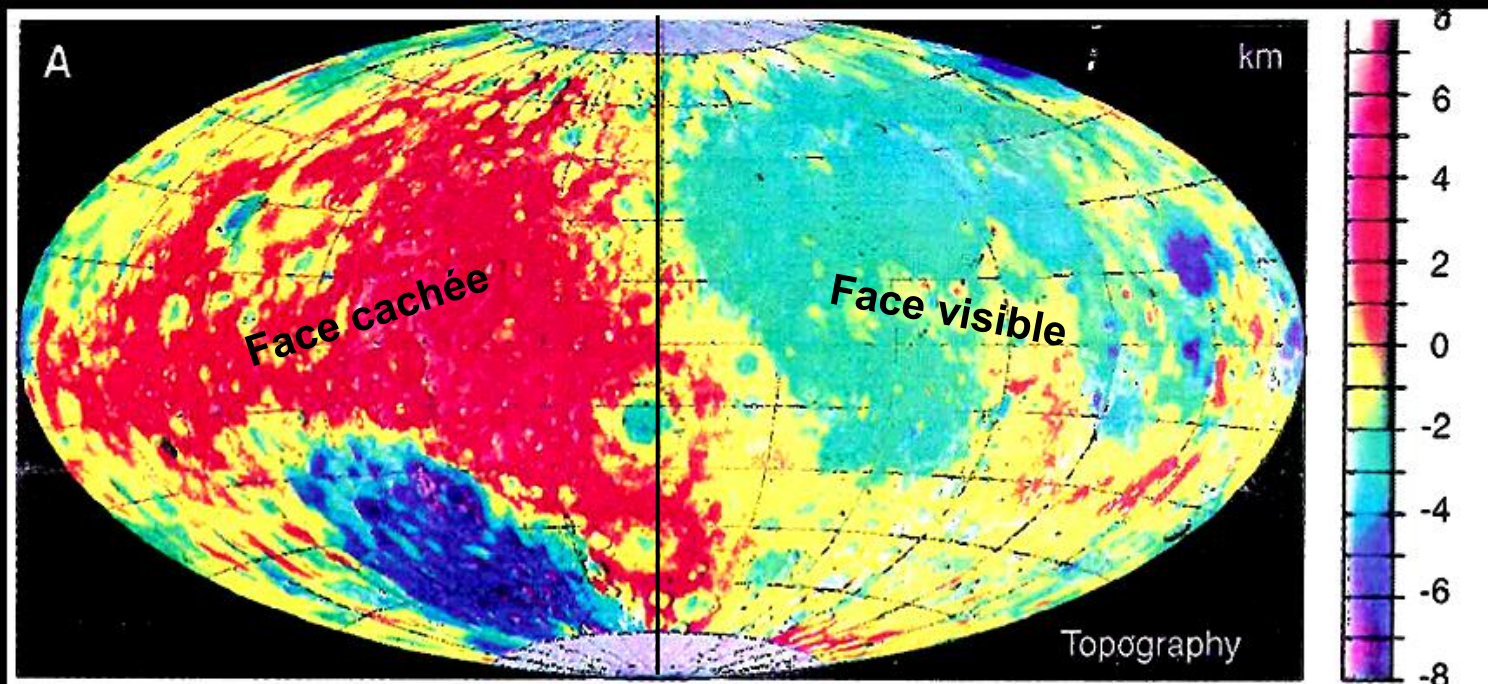
→ On calcule la géométrie exacte de l'orbite de la sonde, et on en déduit la gravité lunaire en tout point de l'orbite.

L'altimètre laser mesure en tout point la distance sonde / sol lunaire

Géométrie de l'orbite + distance sonde / sol

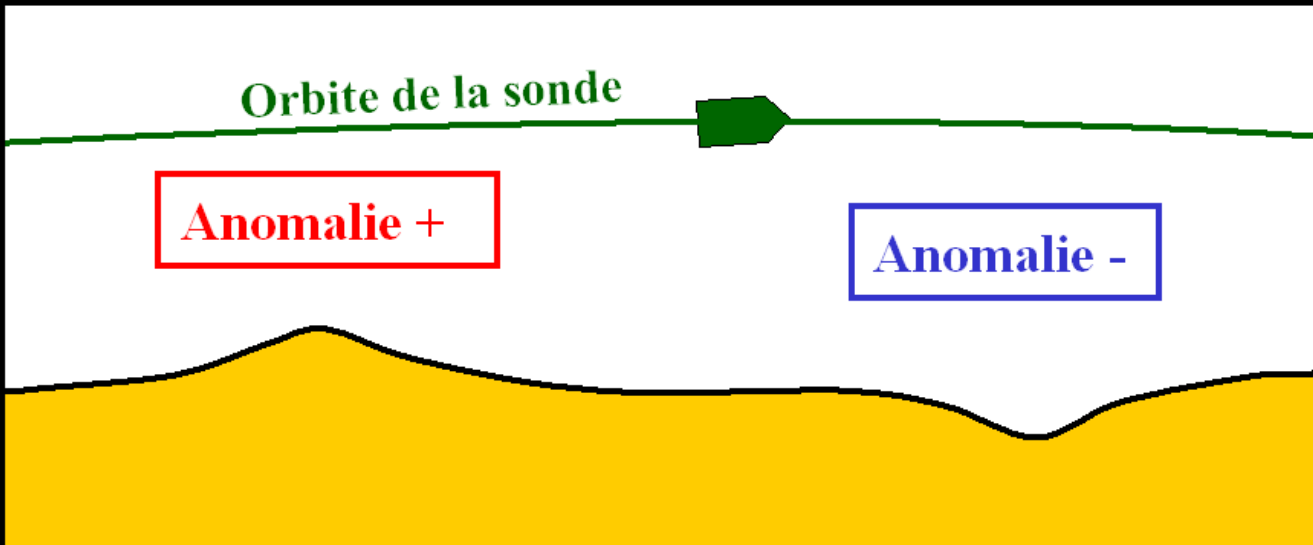
→ on calcule la topographie du sol lunaire

# Les résultats de Clémentine pour la Lune

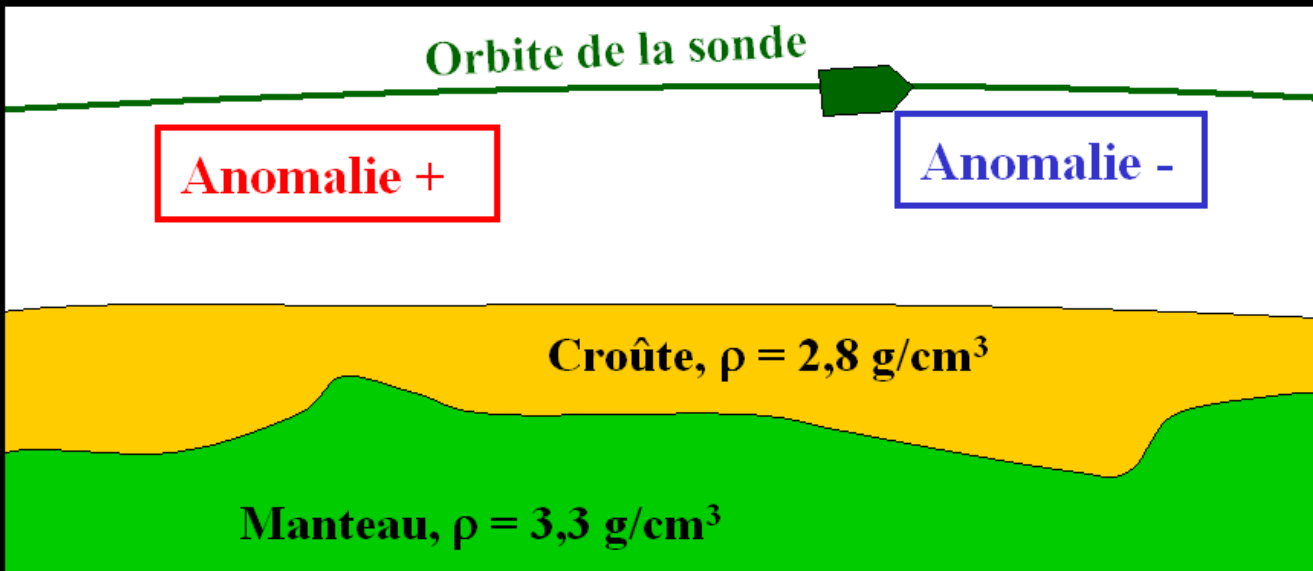




# Qu'est-ce qui peut faire varier la gravité ?

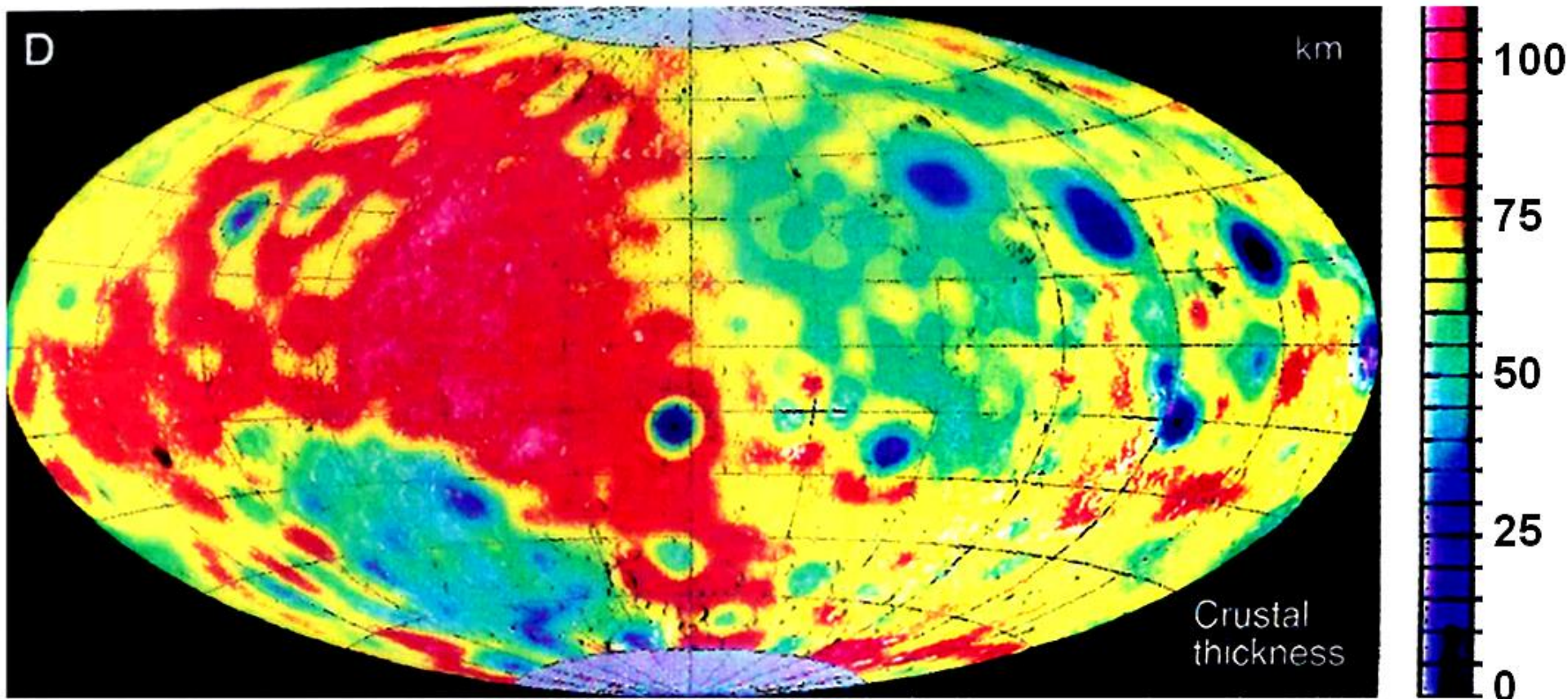


Des reliefs (masses supplémentaires ou déficitaires).



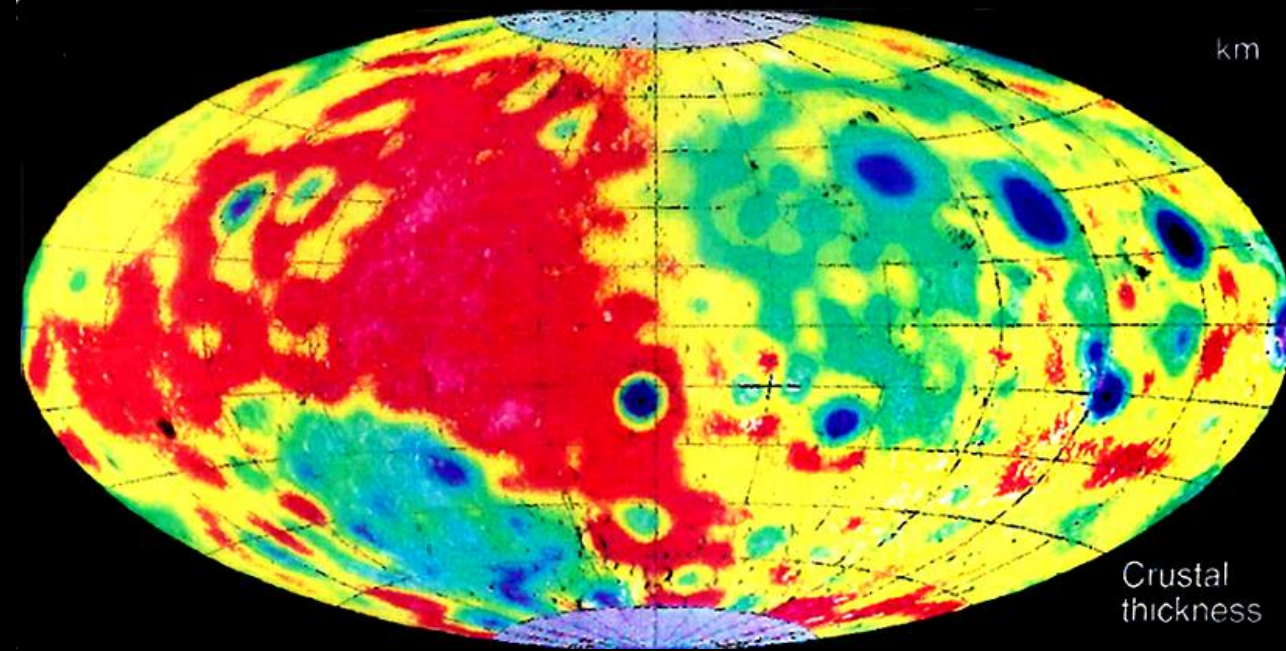
Des variations internes de densités (variation d'épaisseur de la croûte par exemple)

Quand on connaît la topographie, on calcul son effet sur la gravité. On enlève cet effet aux anomalies mesurées, que l'on peut alors interpréter en terme de variation de l'épaisseur de la croûte.



Le résultat pour la Lune

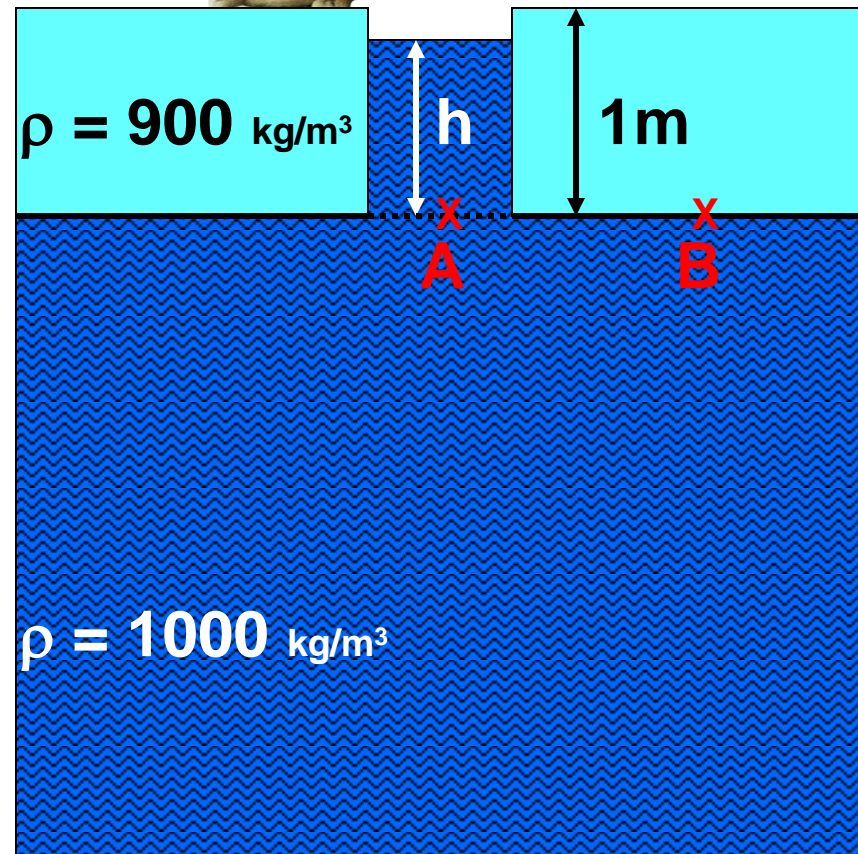




**Il y a une  
bonne  
corrélation  
entre  
l'épaisseur de  
la croûte et la  
présence de  
mers.**

**Pourquoi ?**

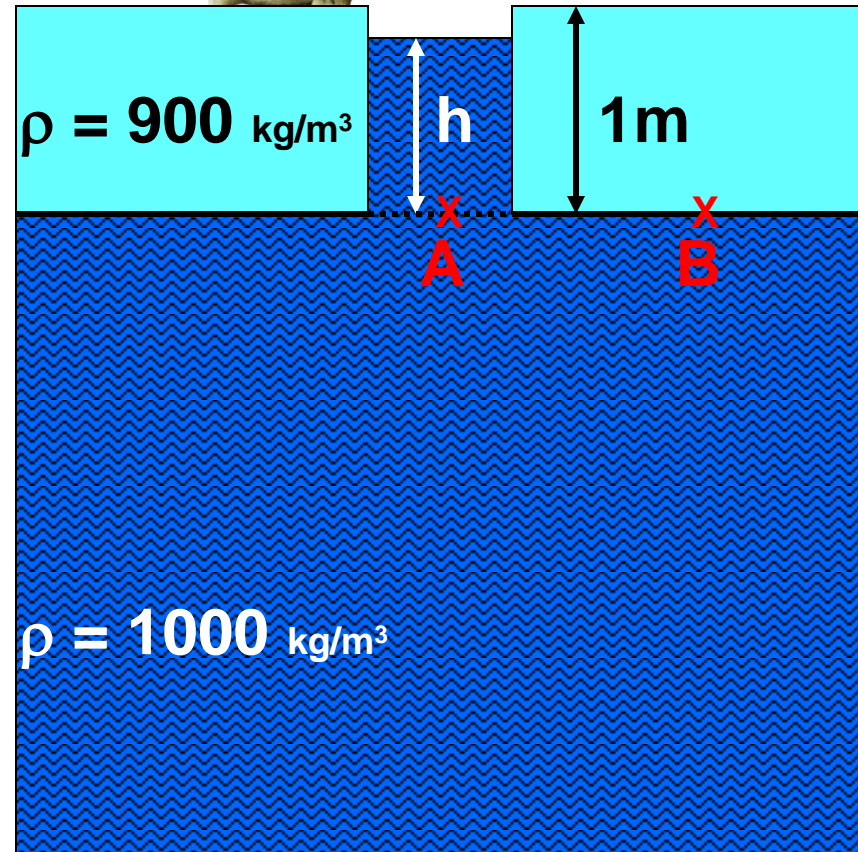




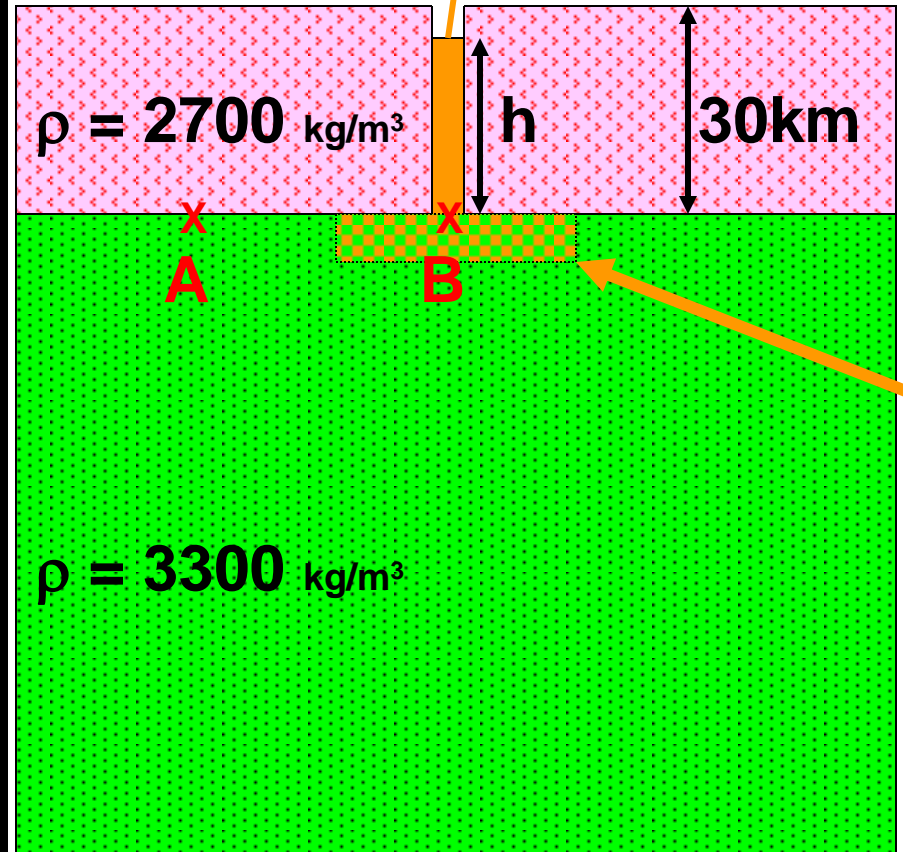
$$P_A = P_B$$
$$\rightarrow 900 \times 1 = 1000 \times h$$
$$\rightarrow h = 900/1000 = 0,9\text{m}$$

Une grande question en passant : pourquoi du magma basaltique ( $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$ ) remonte-il à travers de la croûte continentale ( $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ ) et sort en surface ? Il ne devrait pas plus sortir que de l'eau de mer à travers un « trou de phoque » dans la banquise.





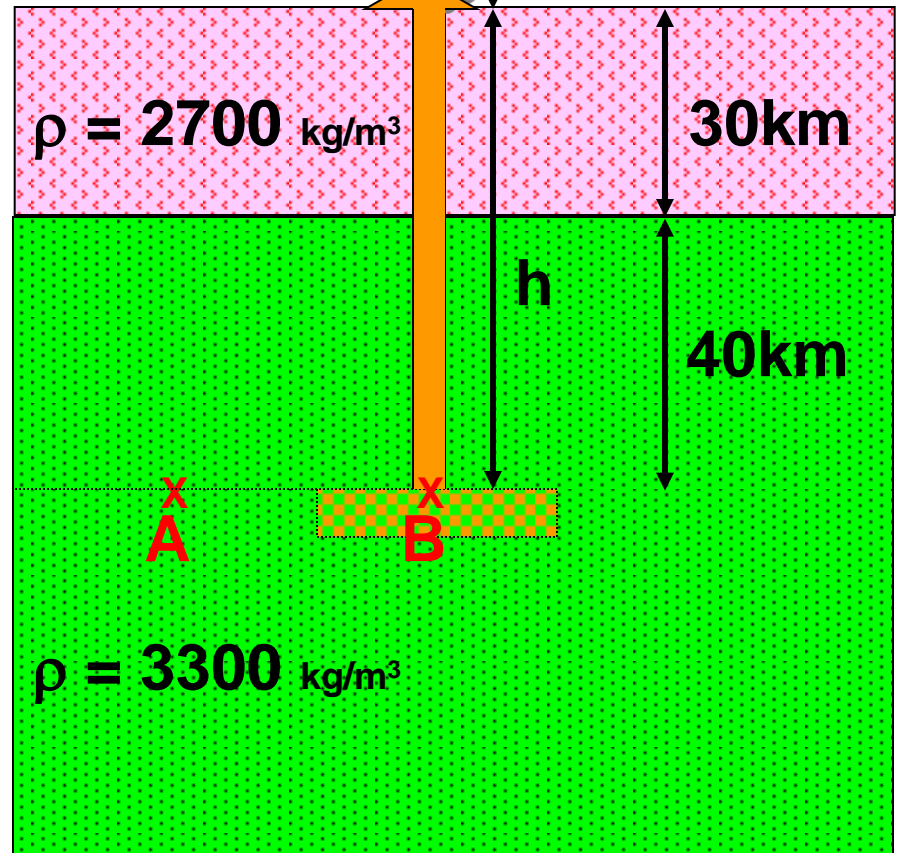
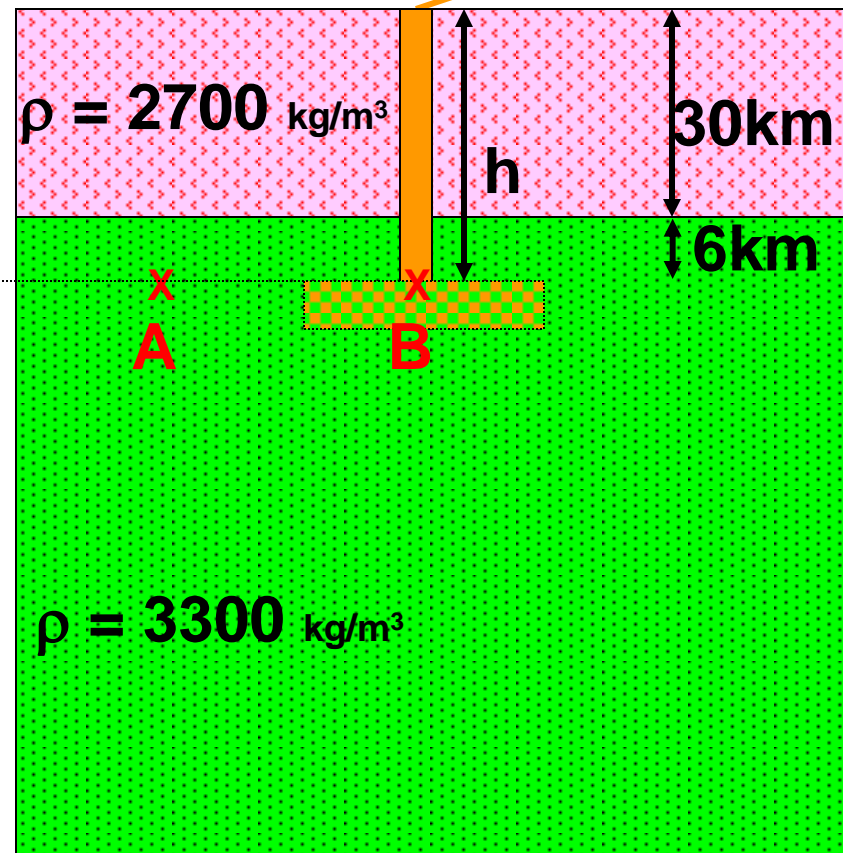
$$P_A = P_B$$
$$\rightarrow 900 \times 1 = 1000 \times h$$
$$\rightarrow h = 900/1000 = 0,9\text{m}$$



$$P_A = P_B$$
$$\rightarrow 2700 \times 30 = 2800 \times h$$
$$\rightarrow h = 2700 \times 30 / 2800$$
$$\rightarrow h = 28,9 \text{ km}$$

$$\rho = 2800$$

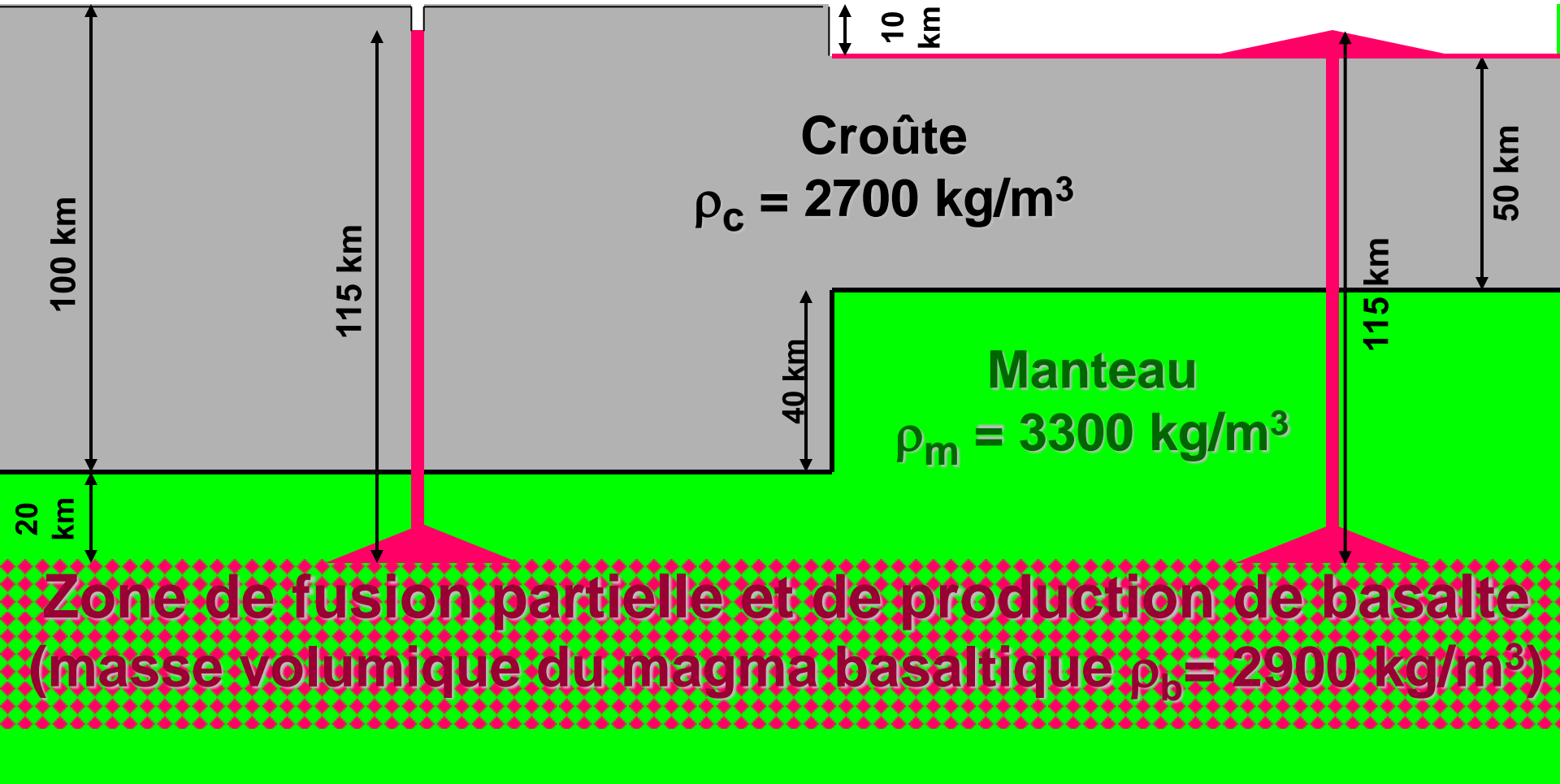
6 km



$$\begin{aligned} P_A &= P_B \\ \rightarrow 30 \times 2700 + (h-30) \times 3300 \\ &= h \times 2800 \\ \rightarrow h &= 36 \text{ km} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_A &= P_B \\ \rightarrow 30 \times 2700 + (h-30) \\ &\times 3300 = (h+6) \times 2800 \\ \rightarrow h &= 70 \text{ km} \end{aligned}$$





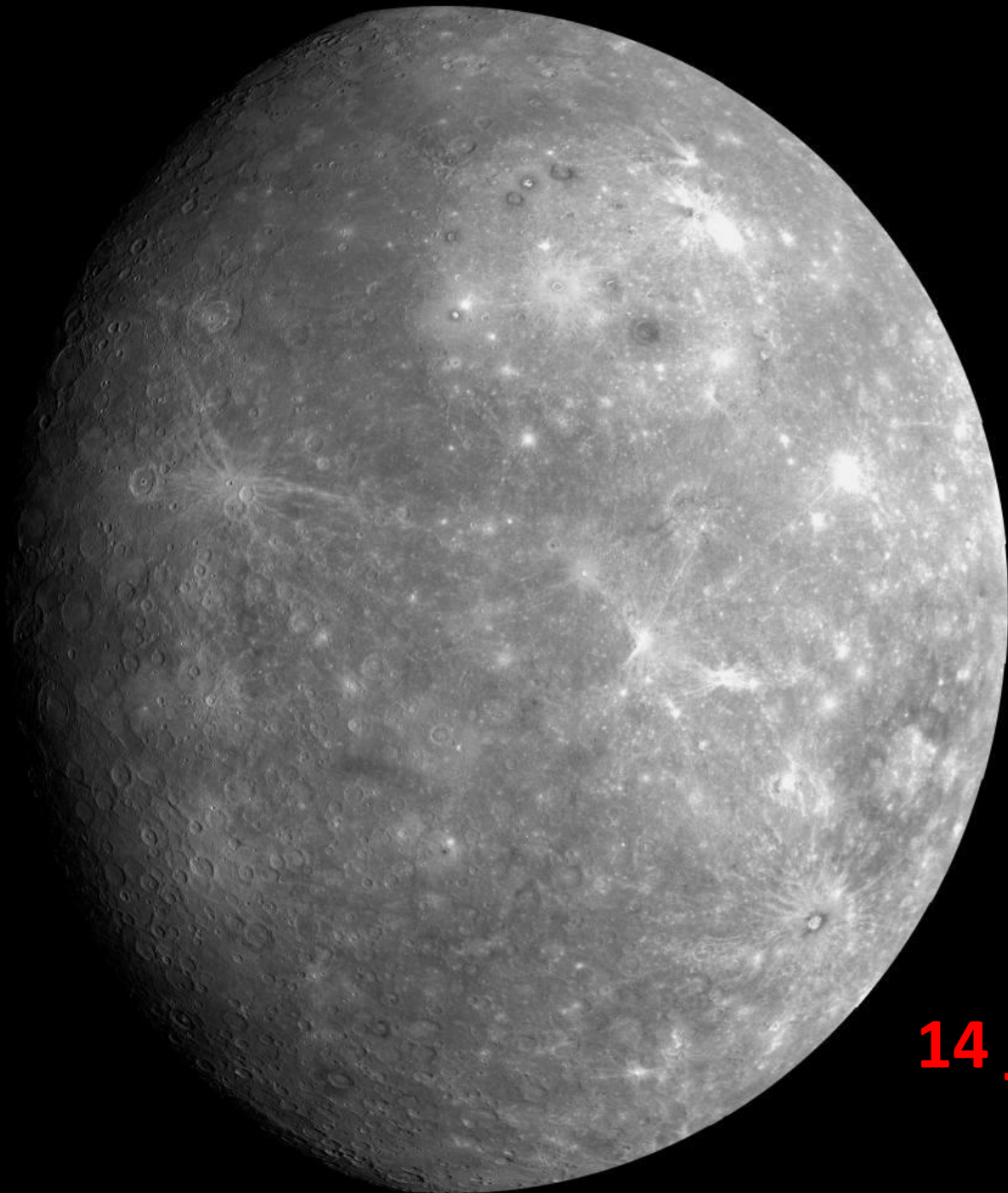
**Le simple équilibre hydrostatique (isostatique) explique pourquoi une croûte épaisse est un obstacle à l'arrivée du basalte en surface**



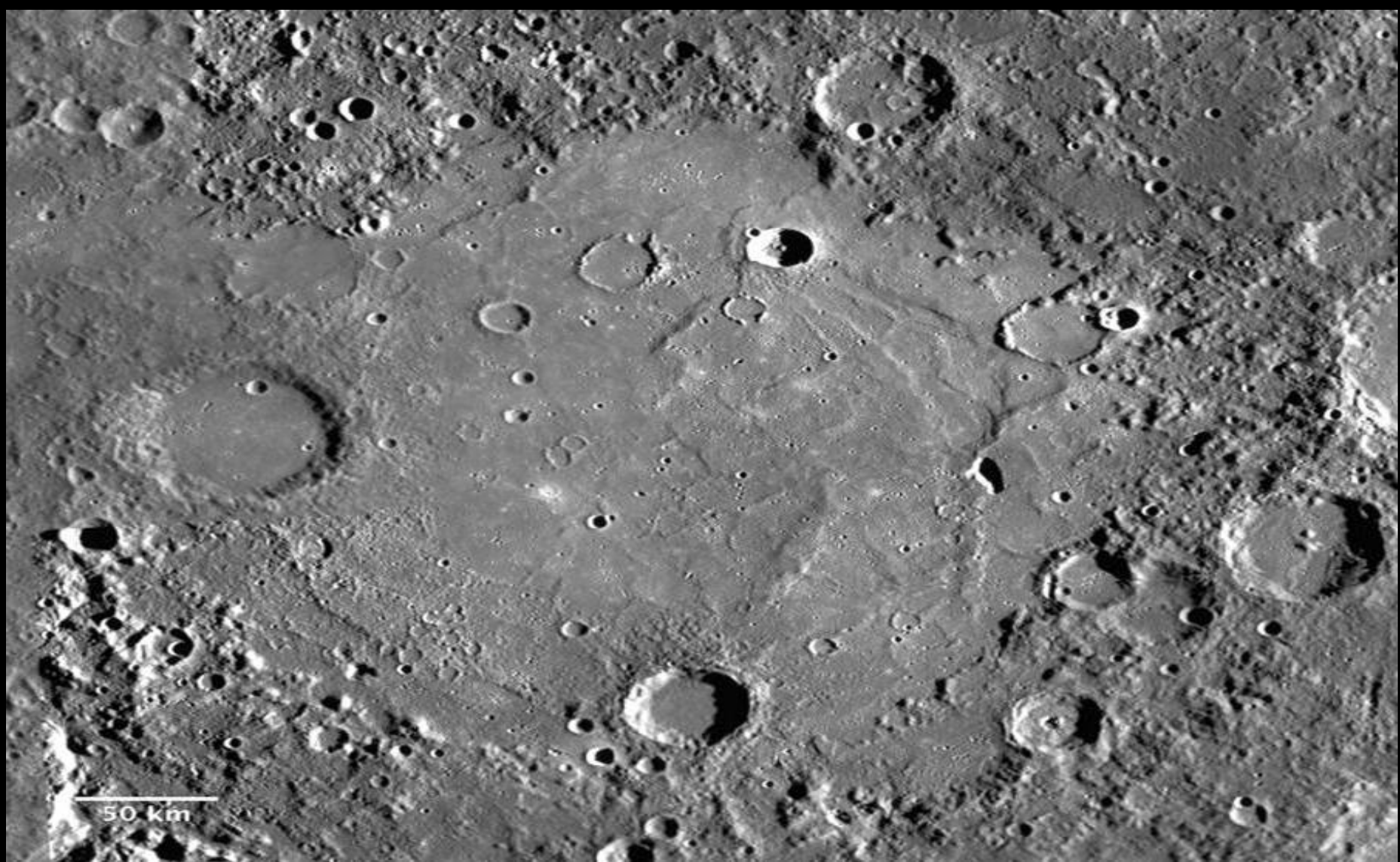
**Age du volcanisme lunaire :  
éteint depuis longtemps  
(~ 3 milliards d'années).**

**Mercure, même chose (ou  
presque) !**





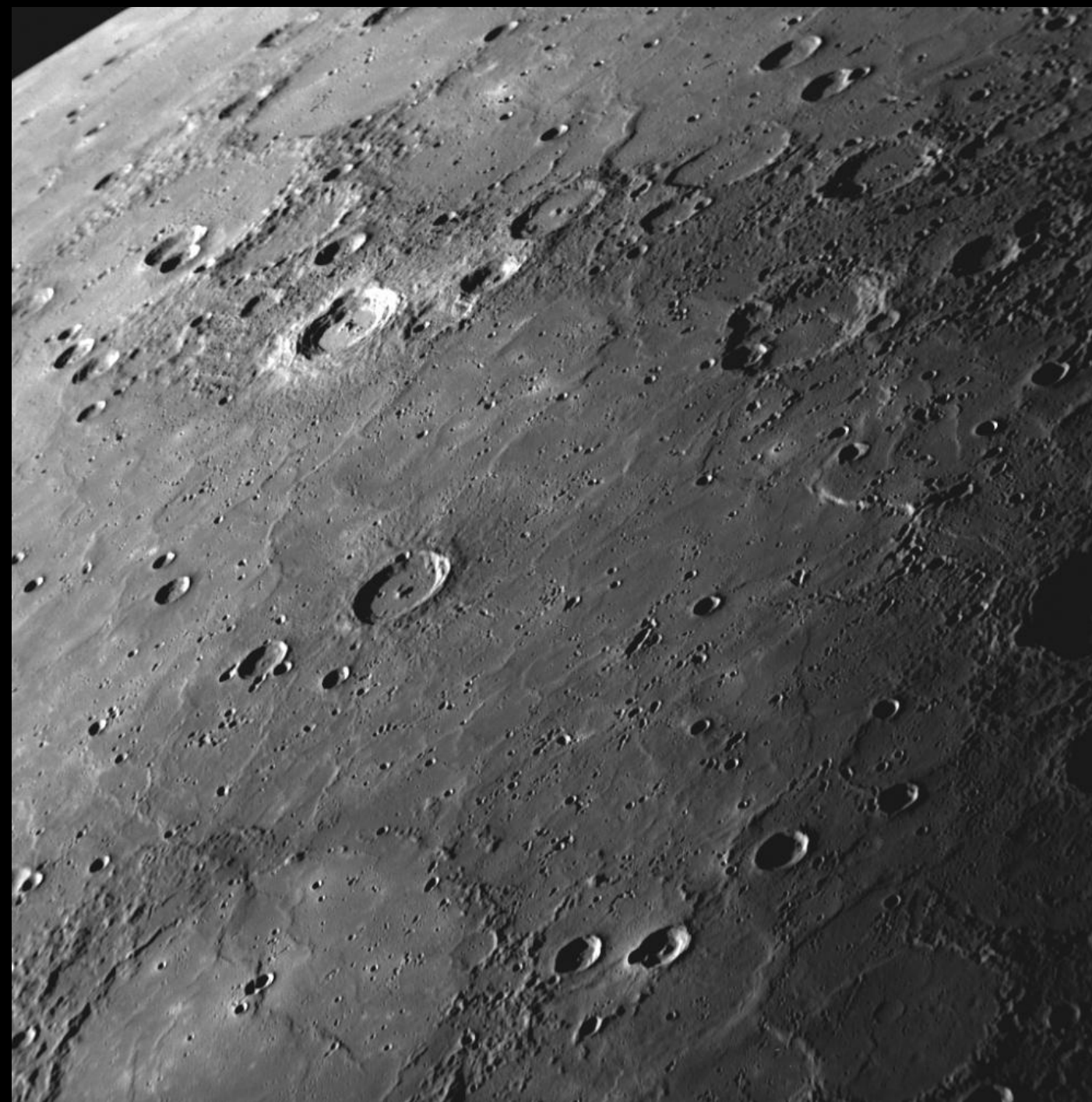
**Mercure,  
photographié le  
14 janvier 2008 par la  
sonde Messenger**



**Mercure, comme la Lune.**

**Des grandes plaines de laves recouvrant des  
terrains très cratérisés**

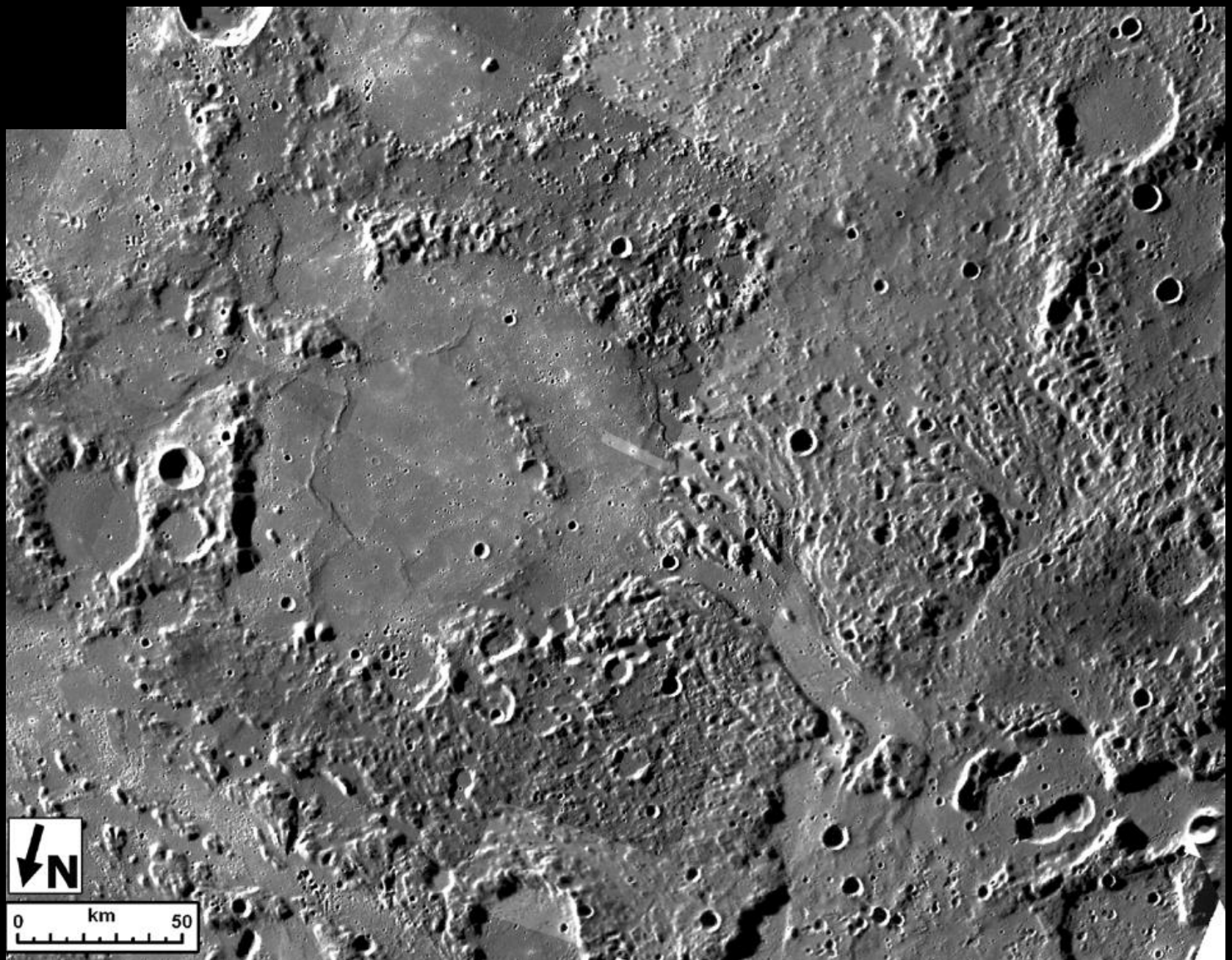




**Mercure,  
comme la  
Lune.**

**Des grandes  
plaines de  
laves  
recouvrant  
des terrains  
très  
cratérisés**





**Mercurre : des figures d'écoulement de lave**



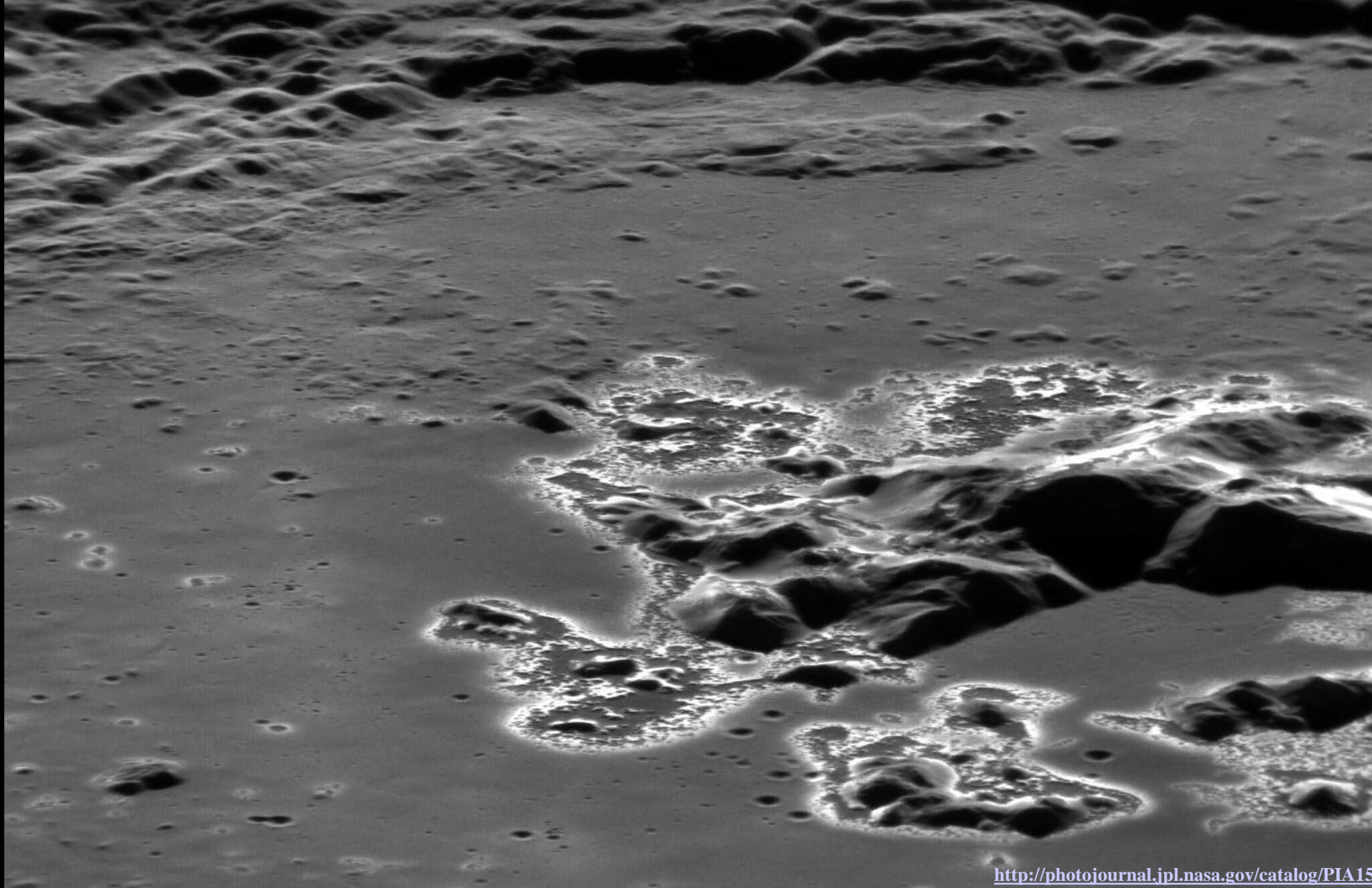


Le cratère d'impact Eminescu,  $D = 125$  km



Sur Mercure, en plus de ces « banalités », des figures bien énigmatiques : les *Hollows* (= dépressions)

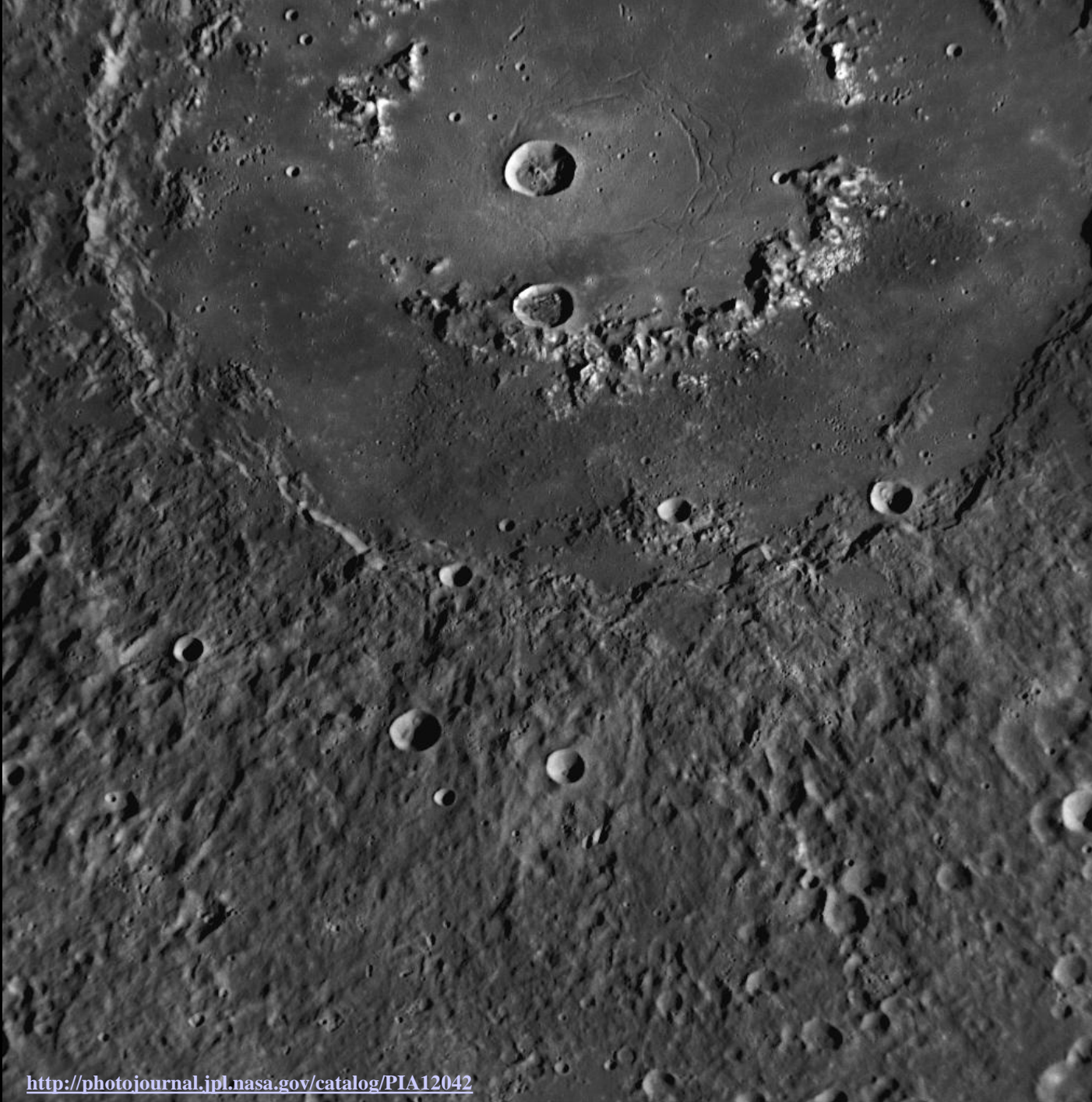




<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA15>

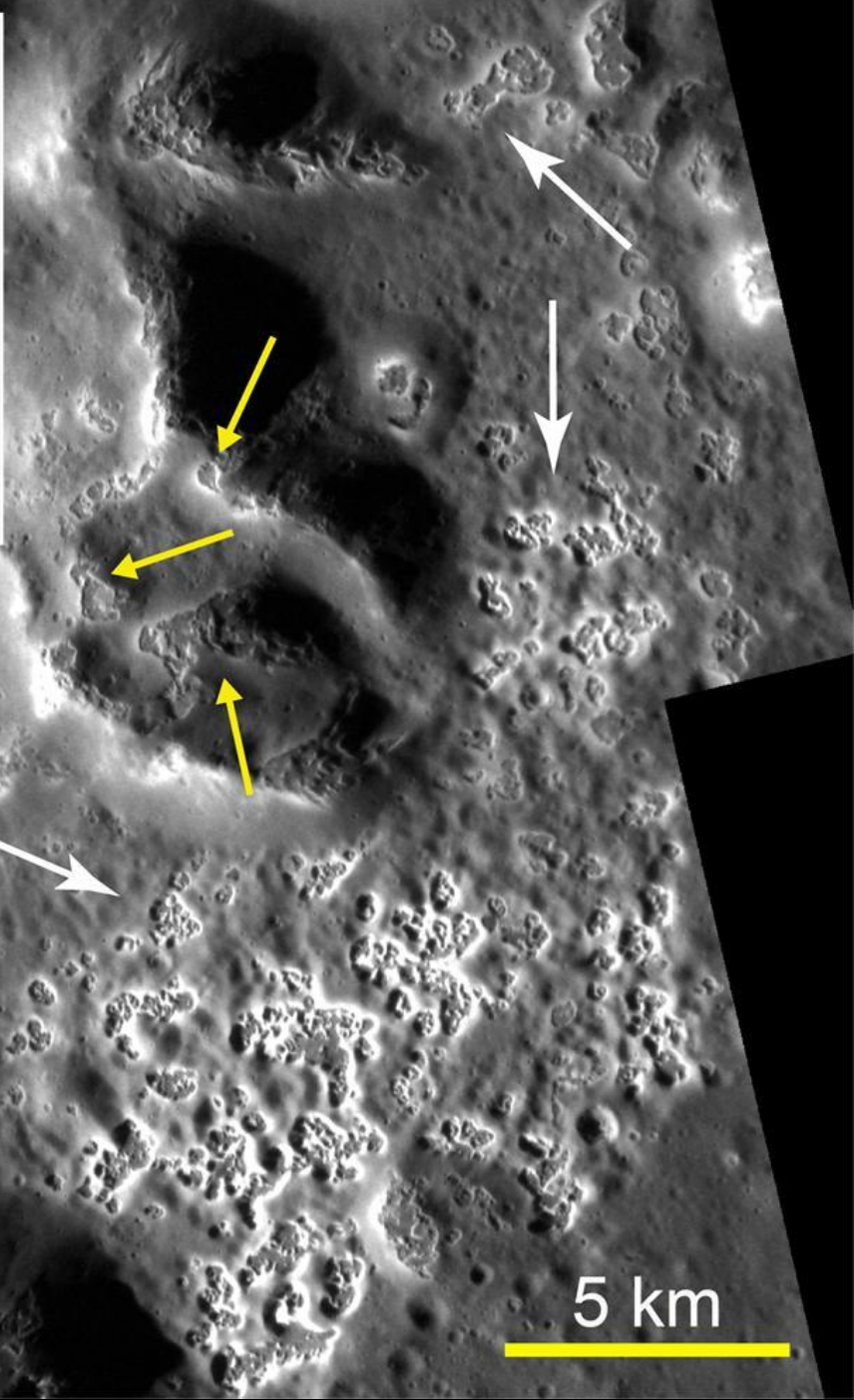
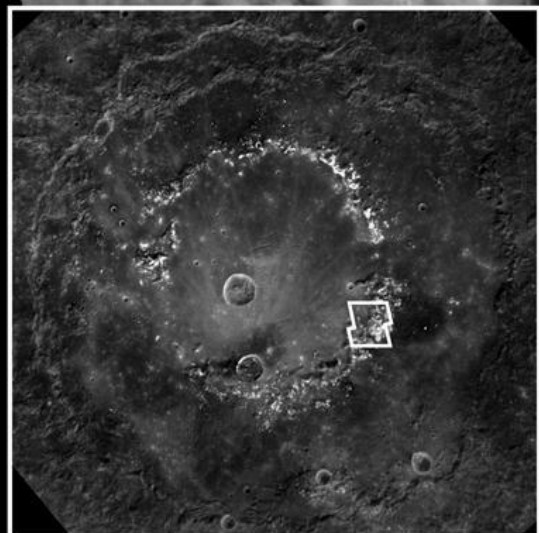
46

**Des dépressions fermées, associées au bord ou au piton central de certains cratères de météorites, et bordées de dépôts clairs**



**Même chose  
près de  
l'anneau  
central du  
Bassin  
d'impact  
nommé  
Raditladi  
(D = 260 km),  
dont on  
connaissait  
déjà les  
fractures  
internes**

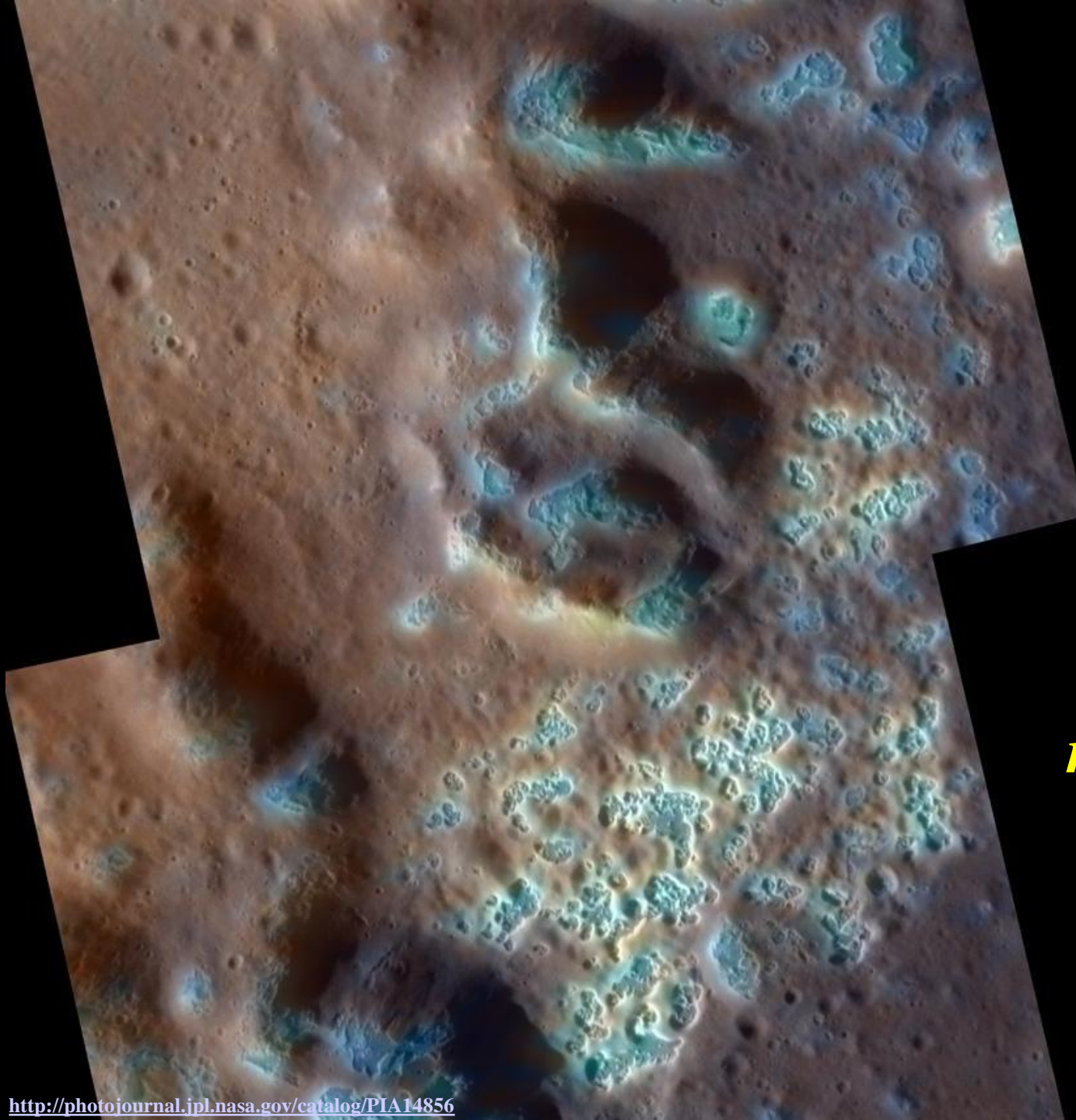




**Détail de  
l'anneau  
central  
du bassin  
d'impact  
Raditladi**

5 km

<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA14847>



**Le même  
secteur en  
quasi-vraie-  
couleur.  
Origine ??**

*These bright,  
shallow  
depressions  
may have been  
formed by the  
loss of volatile  
materials,  
Nasa dixit*





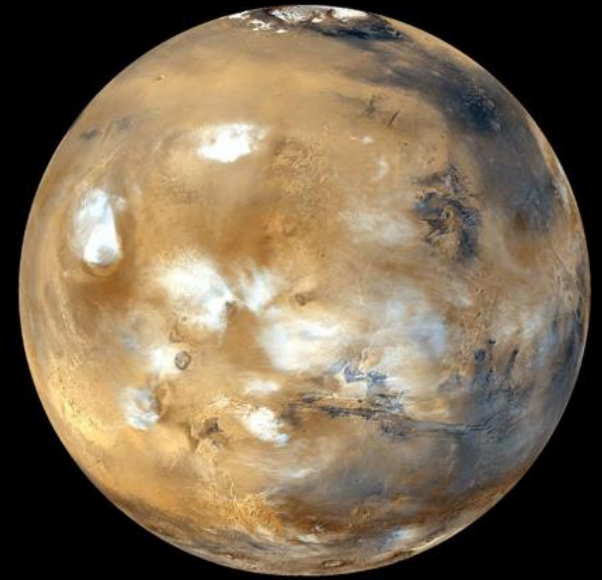
**Fantasmons un peu ! Peut-être un Mercurien aurait-il assisté à un spectacle similaire en se promenant dans un cratère d'impact quelques années à quelques millénaires après la chute de la météorite. C'est pas du volcanisme, mais ça y ressemble un peu !**



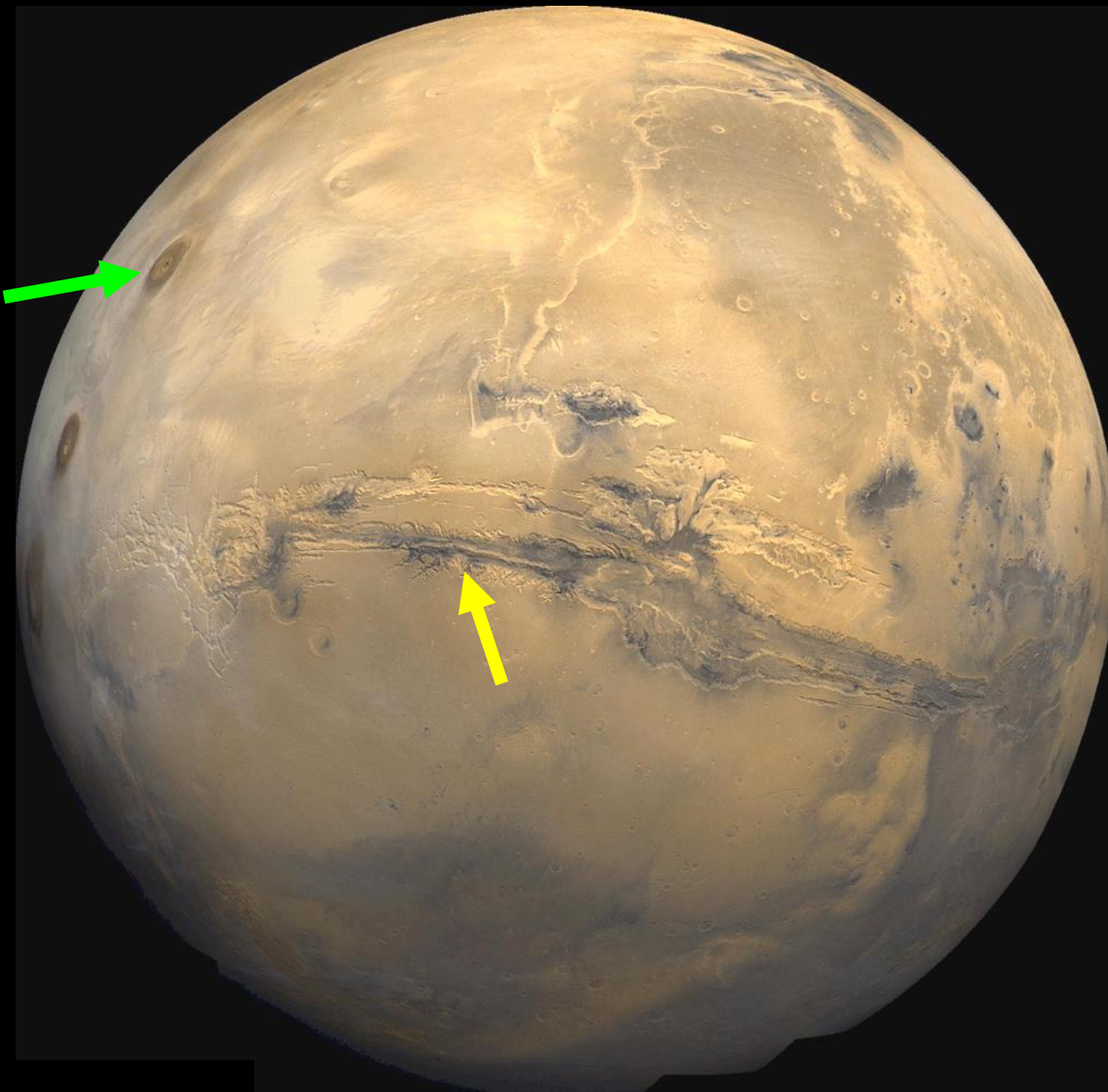
**Age du volcanisme  
mercurien :  
éteint depuis longtemps  
(~ 3 milliards d'années).**



**Mars**



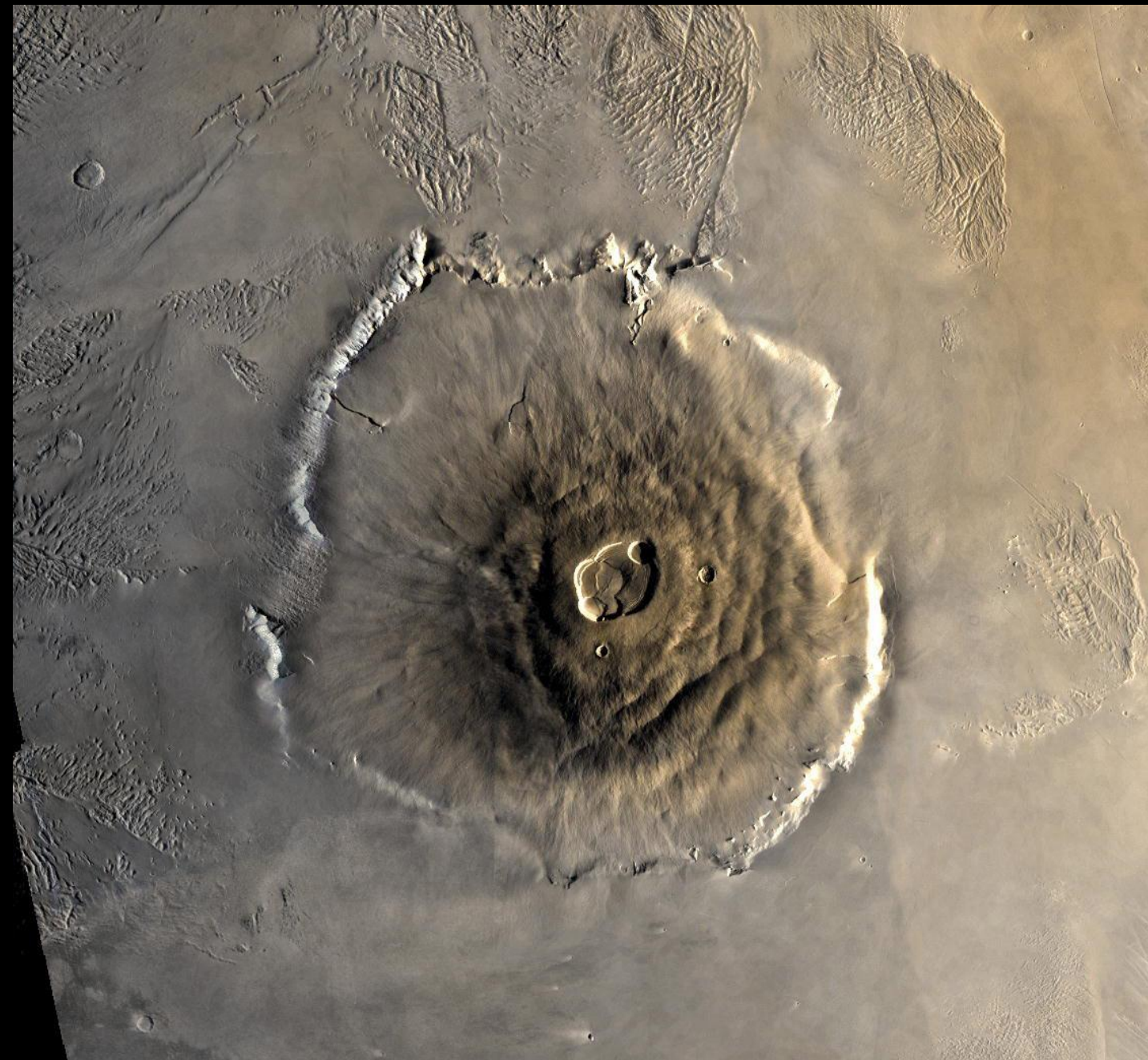
**Taille comparé Terre / Mars (montage) :  
1/2 du diamètre, 1/10 de la masse)**



**Mars vu par Viking, en 1976. On y voit :**

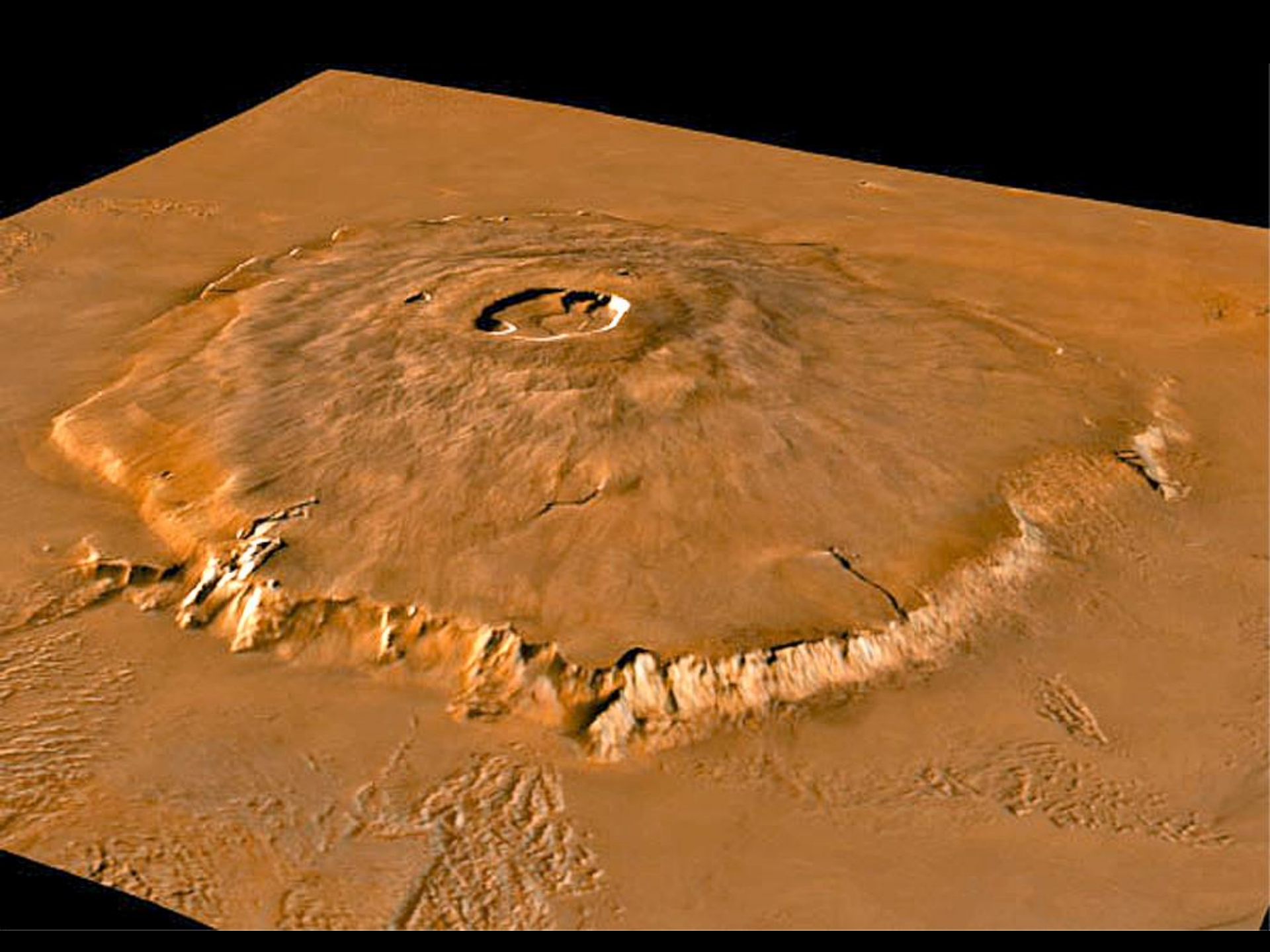
- des failles**
- des volcans**





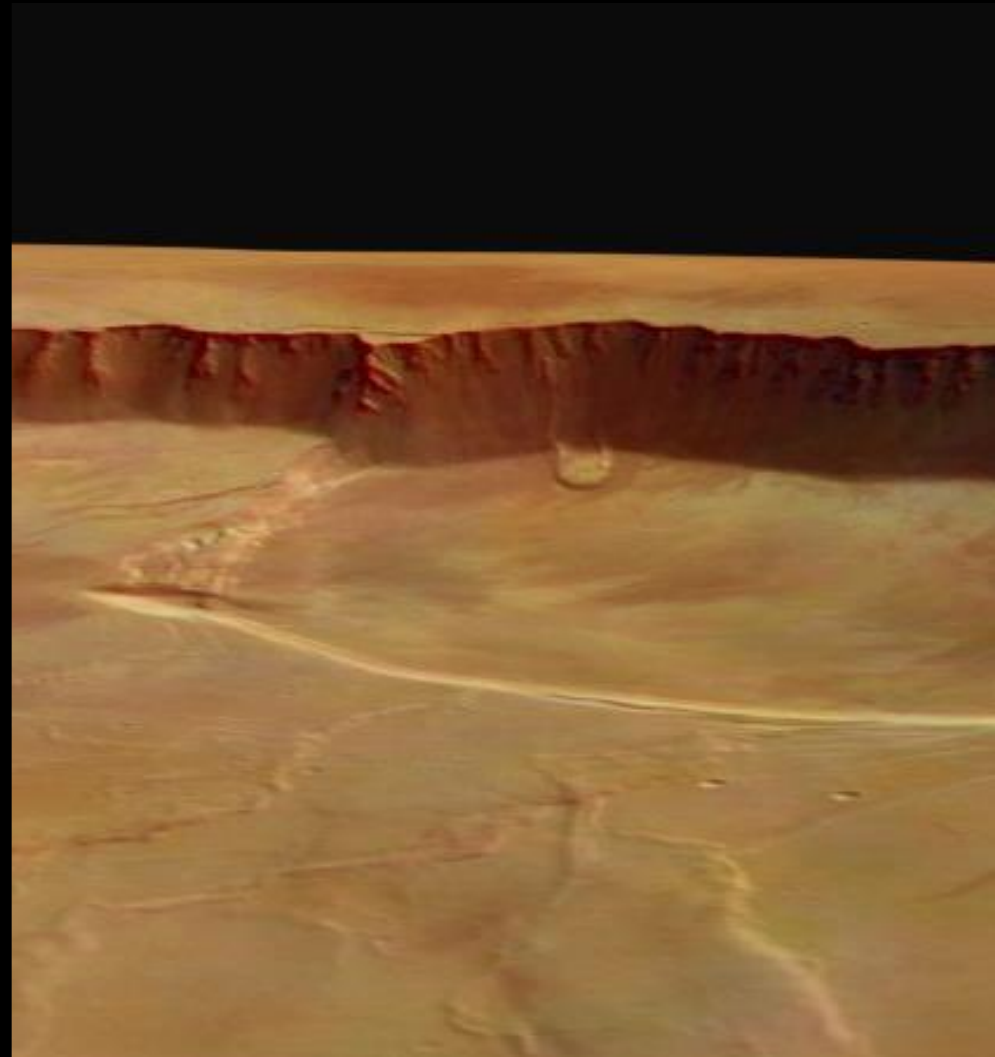
**Mars, la  
planète  
aux volcans  
géants.  
Voici  
Olympus  
Mons, le  
plus grand  
volcan du  
système  
solaire  
(D = 600 km,  
H = 26 km)**



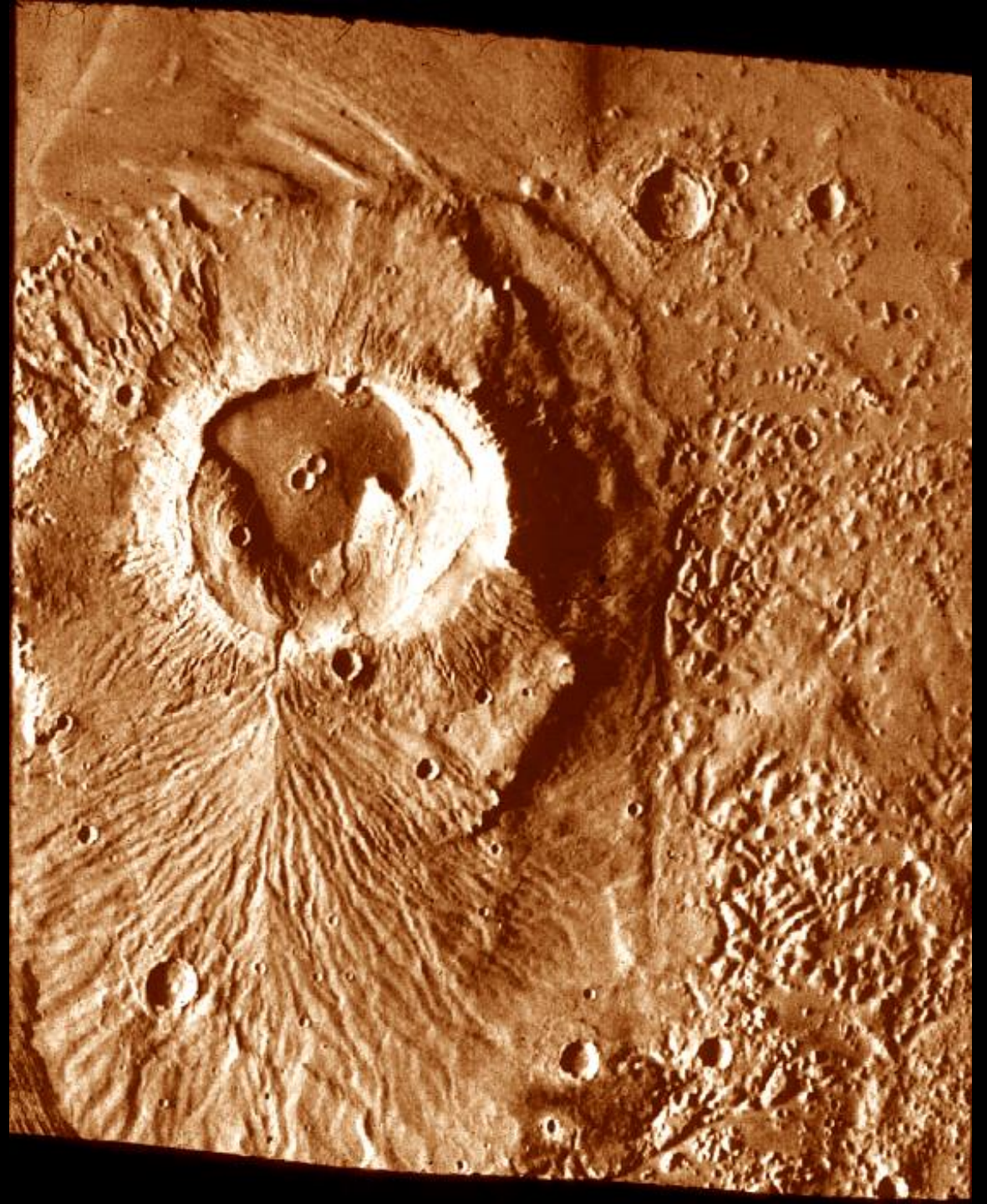




**De très belles caldeiras  
sommitales emboîtées**

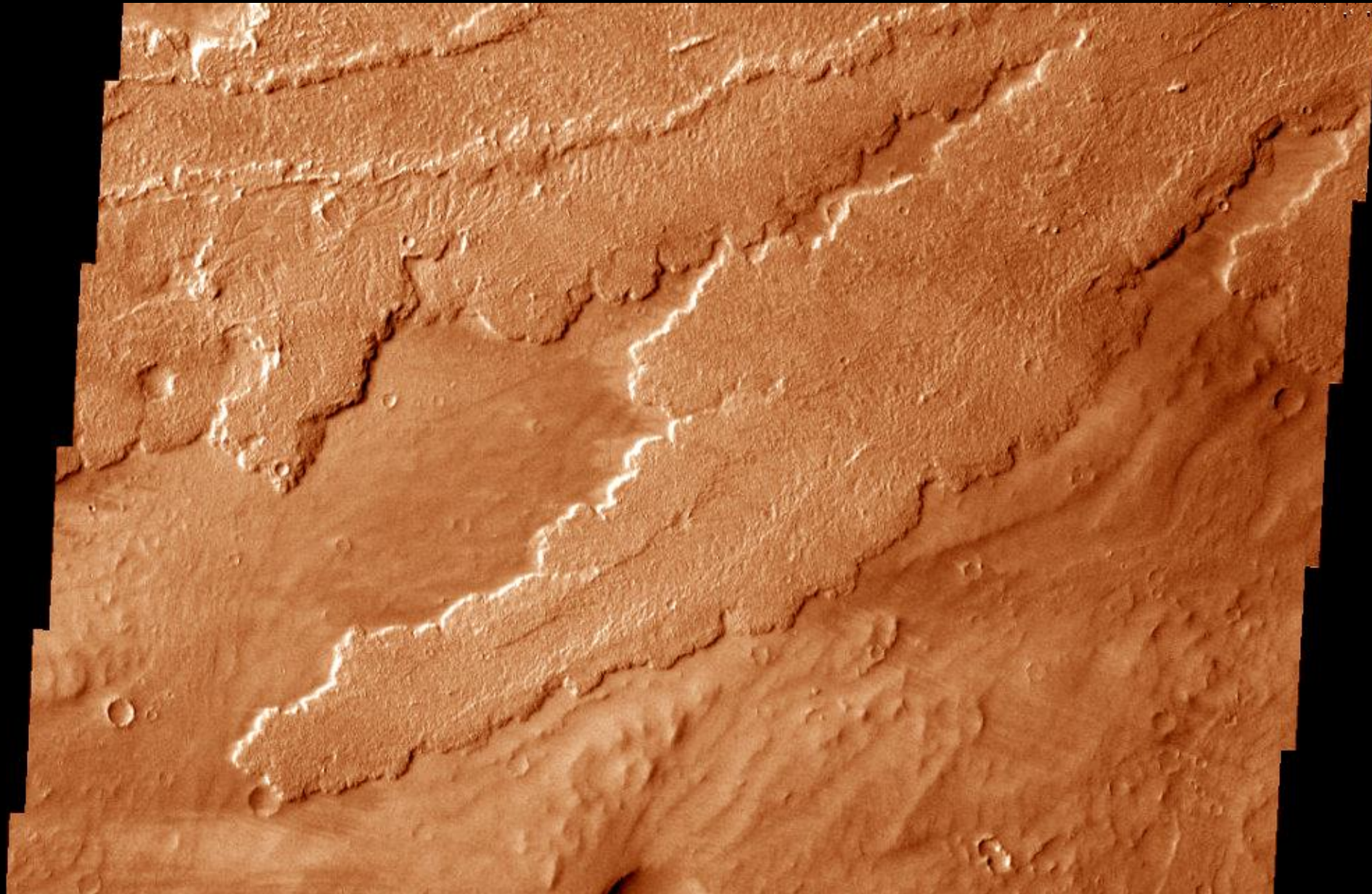


**D'autres  
volcans**



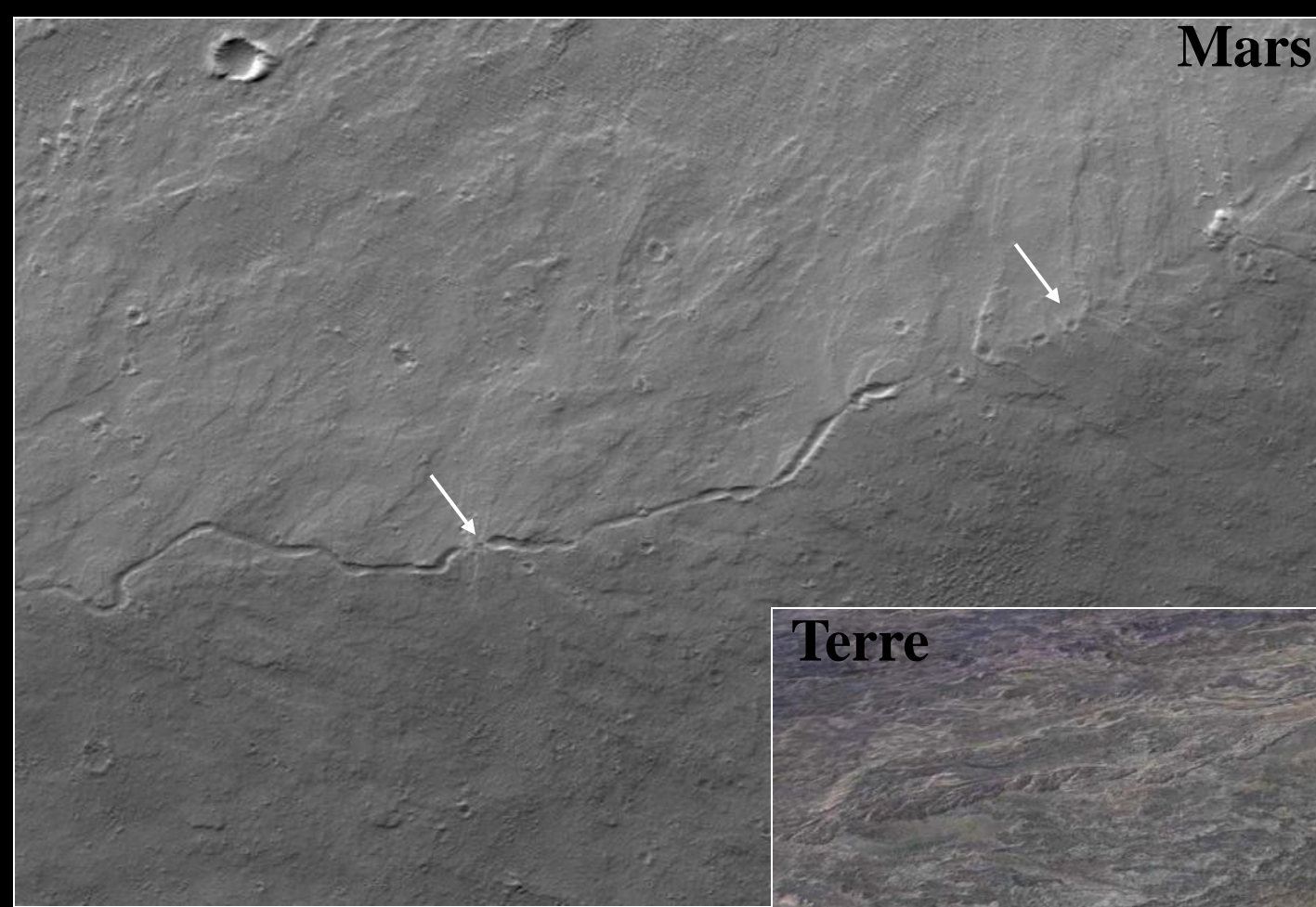


# Belles coulées de laves ...





Mars



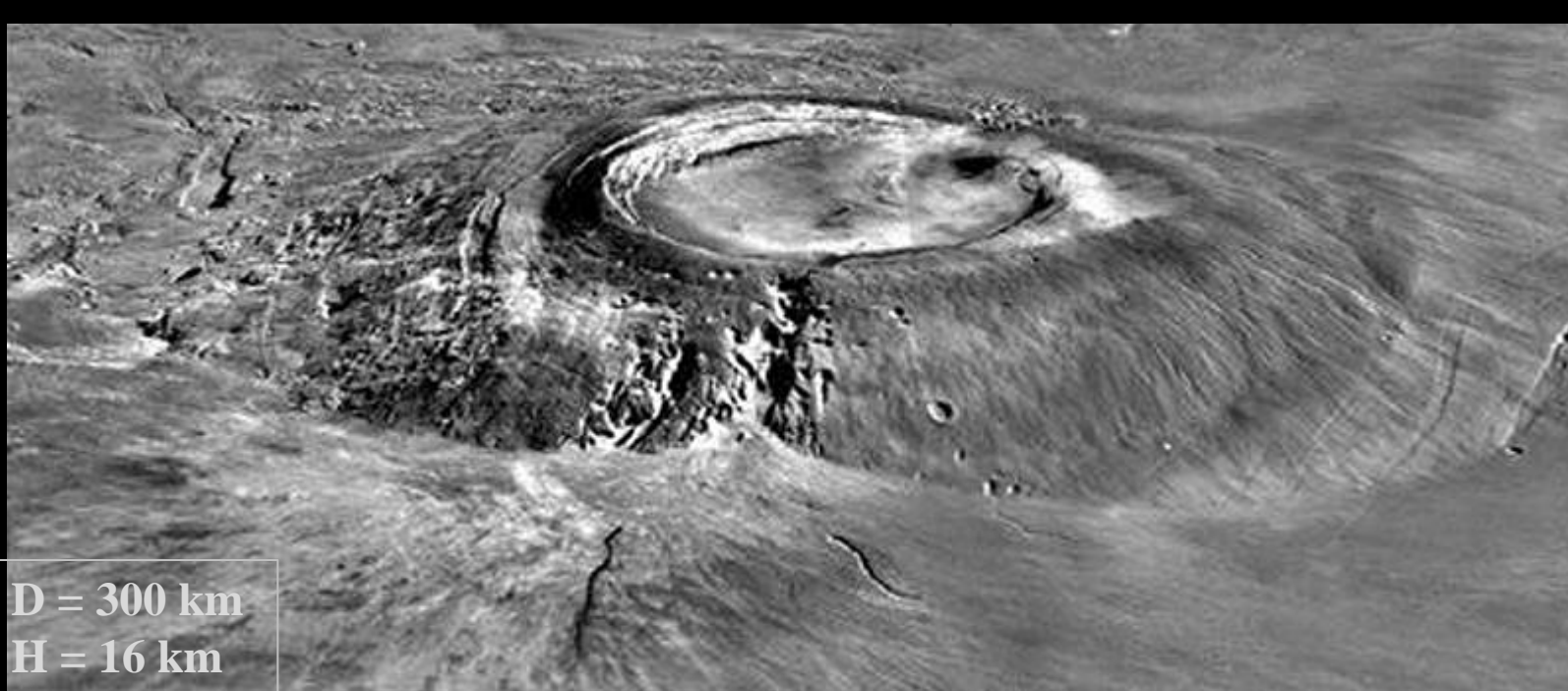
Terre



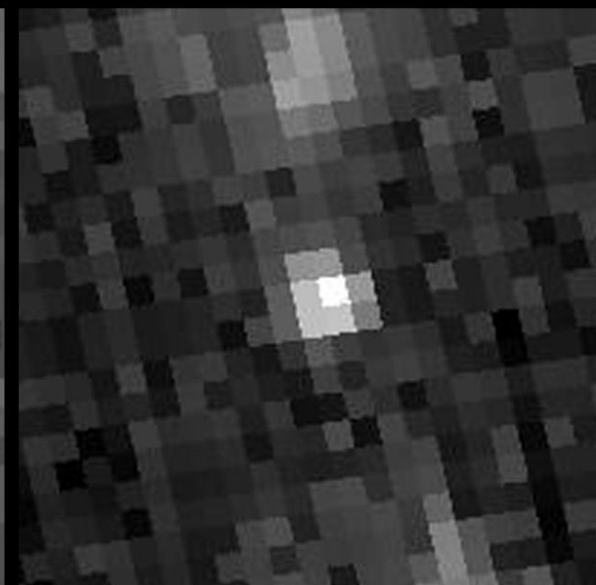
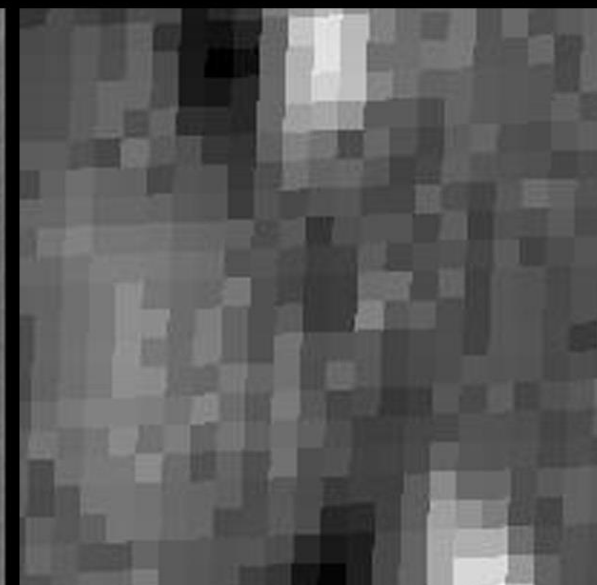
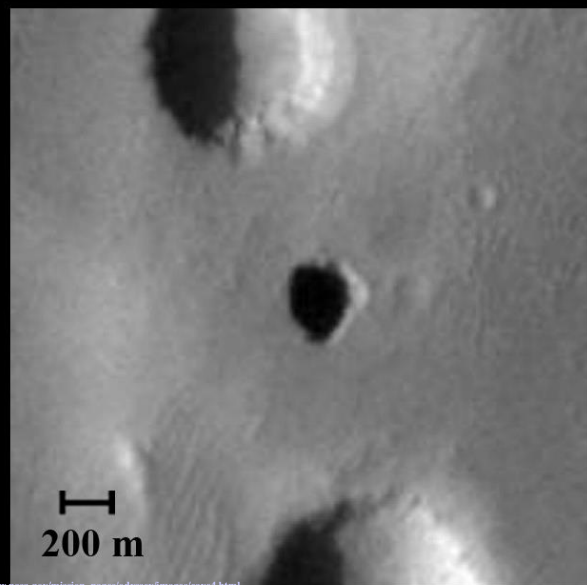
... avec tunnel de  
lave effondré (parfois  
partiellement, cf  
bases martiennes)



**L'entrée  
d'une  
grotte  
sur les  
flancs  
d'Arsia  
Mons**



**D = 300 km  
H = 16 km**

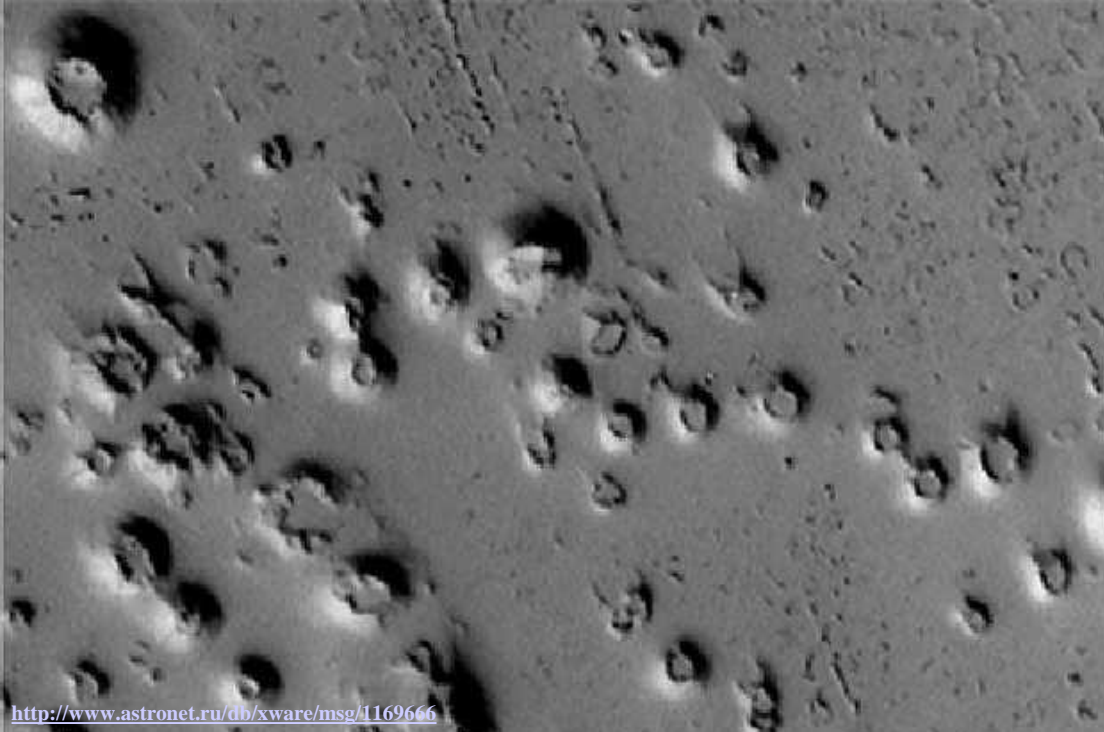


**Lumière visible,  
milieu d'après midi**

**Infra-rouge thermique,  
milieu d'après midi**

**Infra-rouge thermique,  
fin de nuit**

<http://www.nasa.gov/mision/mars/odyssey/images/0004.html>

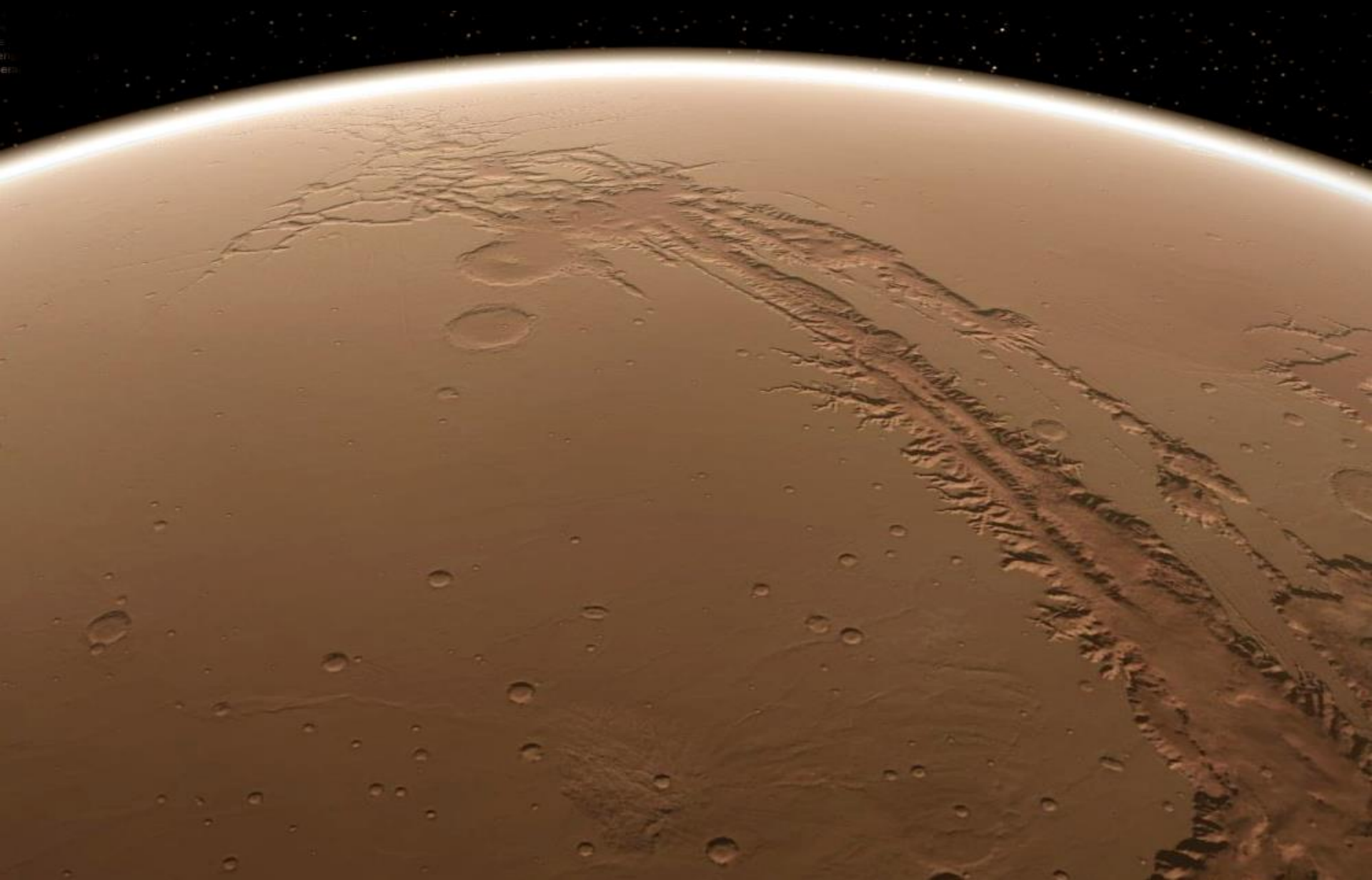


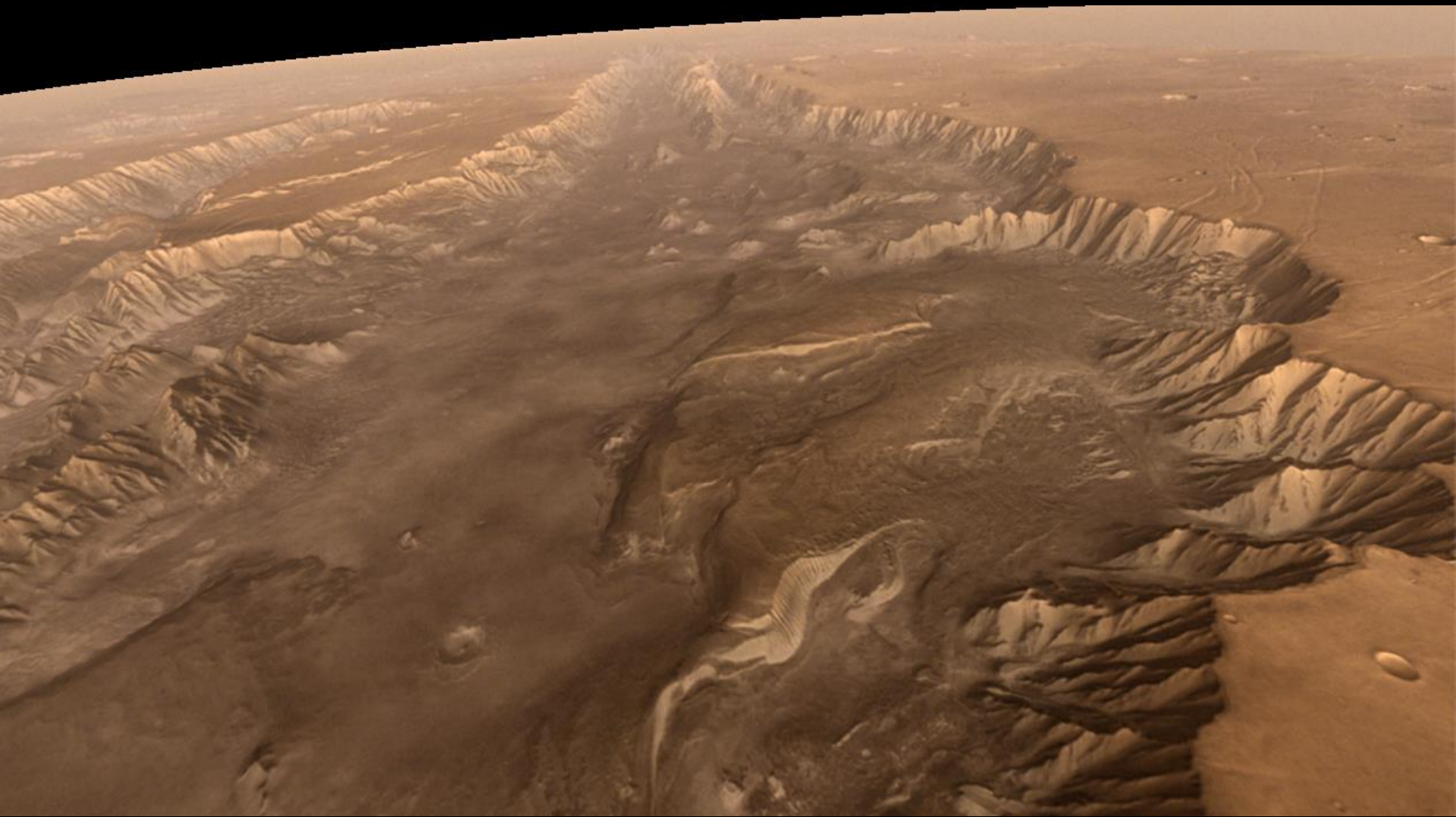
Ici, des rootless cones  
(volcans sans racine)  
martiens et islandais  
produits quand une  
coulée de lave coule  
sur de la glace ou un  
sol gorgé d'eau.  
Une preuve  
« volcanologique » de  
la présence d'eau sur  
Mars.





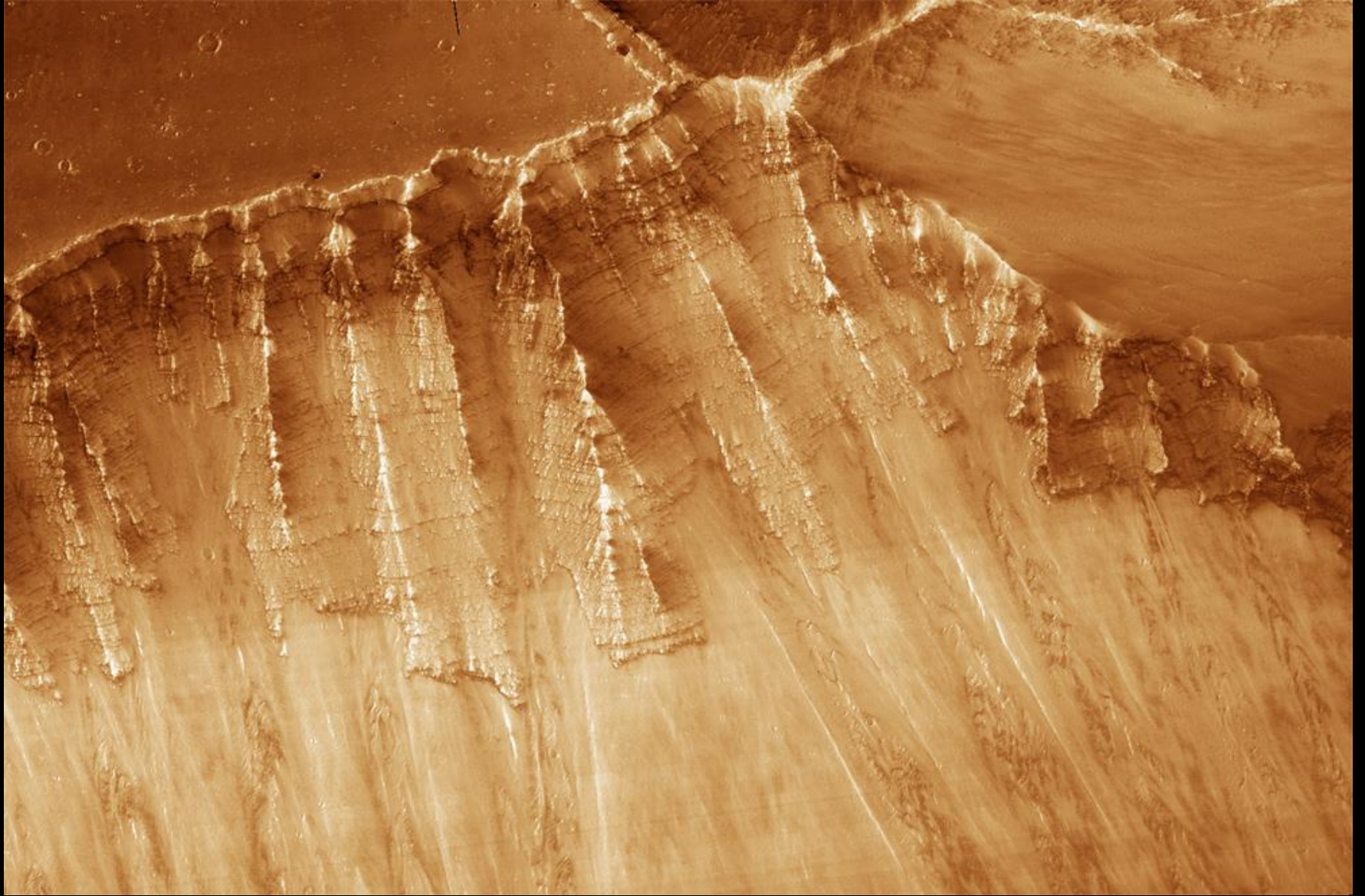
# Valles Marineris, le « grand rift » de Mars





**Grand comme 2 fois le Grand Rift Africain  
(plusieurs milliers de km de long, 100 km de large,  
5000 m de hauteur)**





**A haute résolution, les parois du canyon se révèlent constituées d'un empilement de couches, avec les spectres (IR) de l'olivine et du pyroxène.**



Photographie : Pierre Thomas

**Analogie terrestre : les trapps, ici ceux d'Islande, au climat plus « martien » que ceux du Dekkan.**





**Mais sur Mars, l'Homme a envoyé des « robots ».  
Qu'ont-ils découvert vis à vis du volcanisme ?**

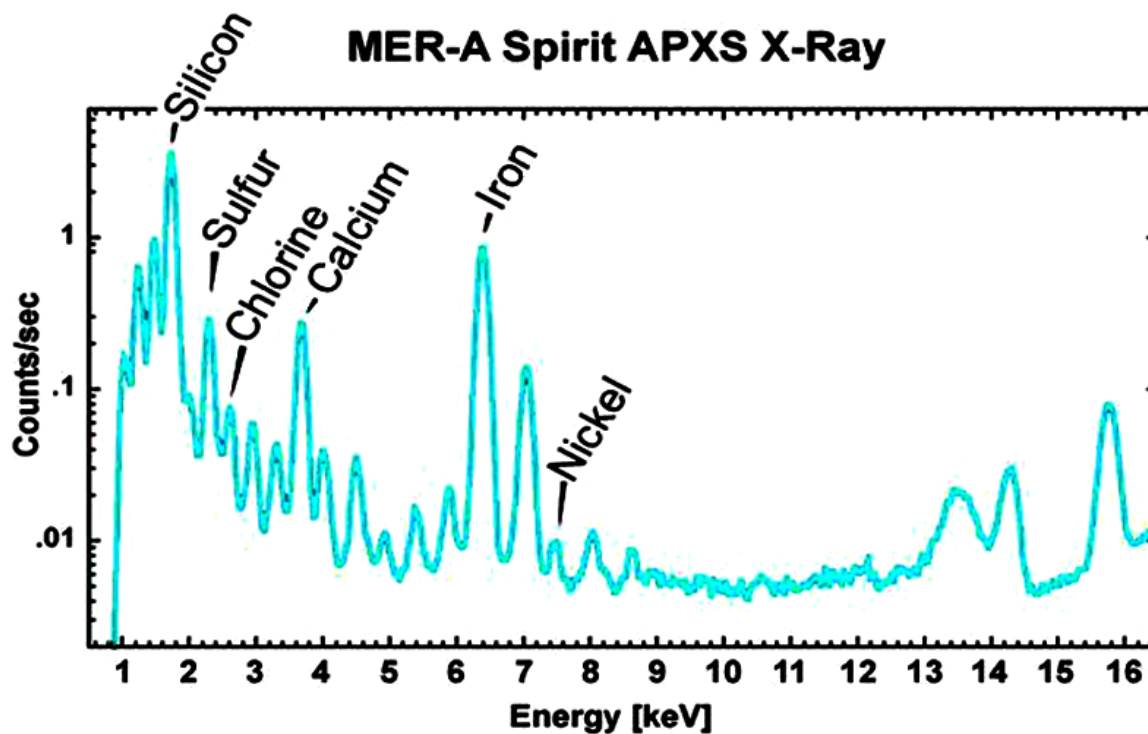


**Pour ses analyses, les robots disposent de spectro IR, de fluo X, de spectro Mossbauer, et de « l'œil du géologue ». Spirit n'a trouvé que du basalte.**





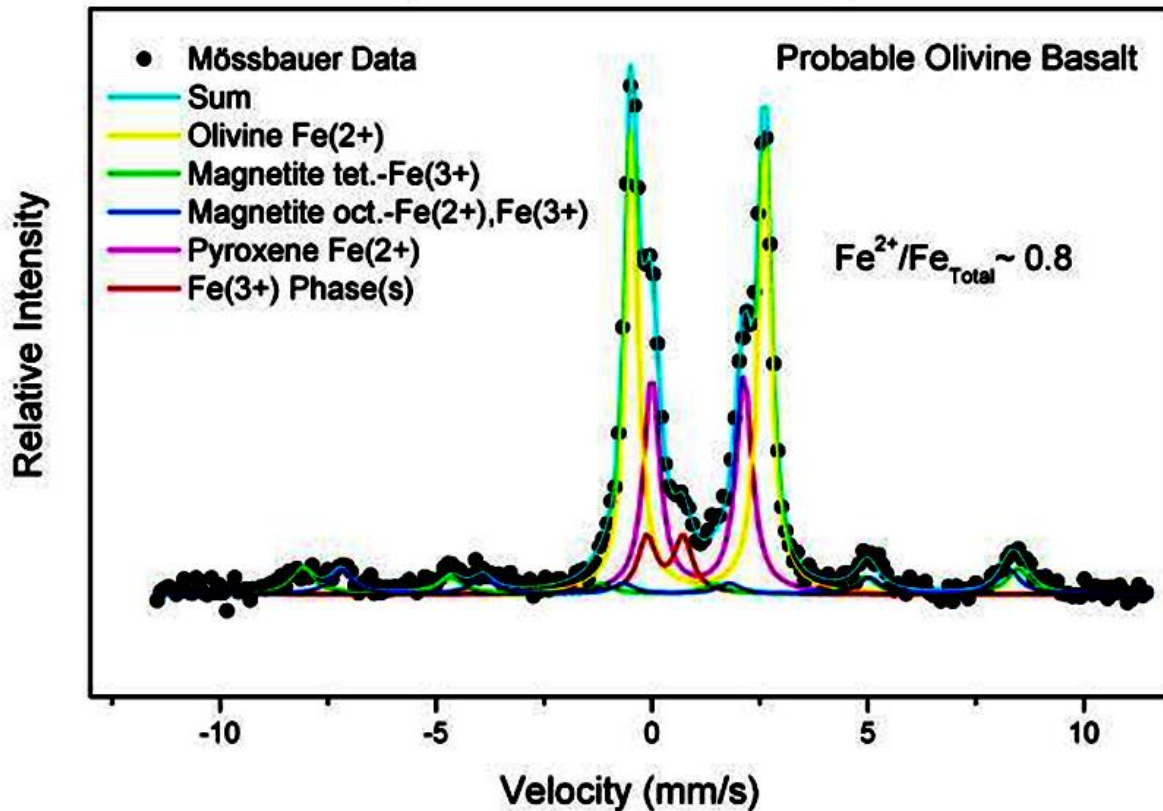
MER-A Spirit APXS X-Ray



**Pour ses analyses, les robots disposent de spectro IR, de fluo X, de spectro Mossbauer, et de « l'œil du géologue ». Spirit n'a trouvé que du basalte.**

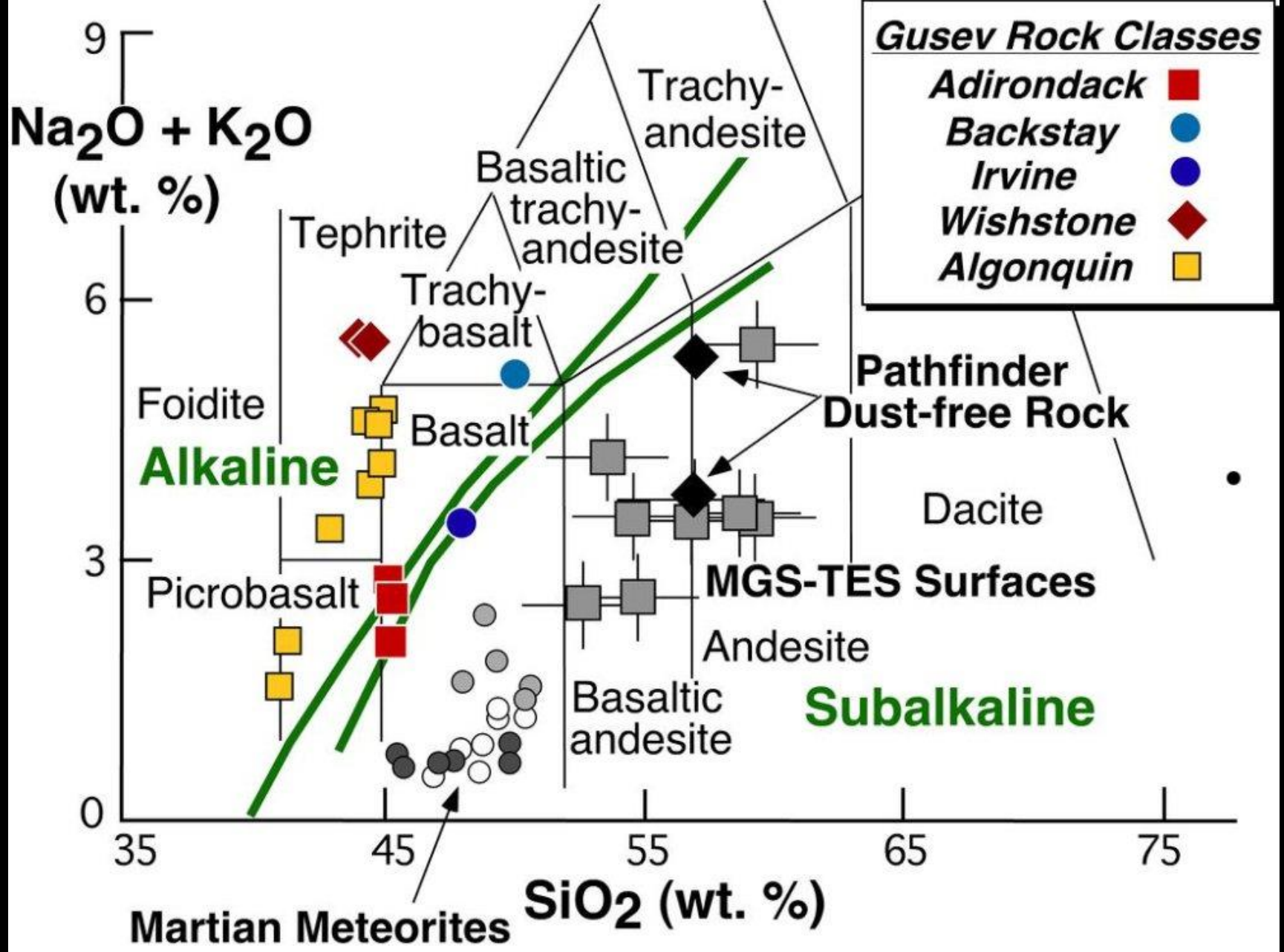


Mössbauer Spectrum of Adirondack Rock  
(Sol 18, Gusev Crater, Mars)

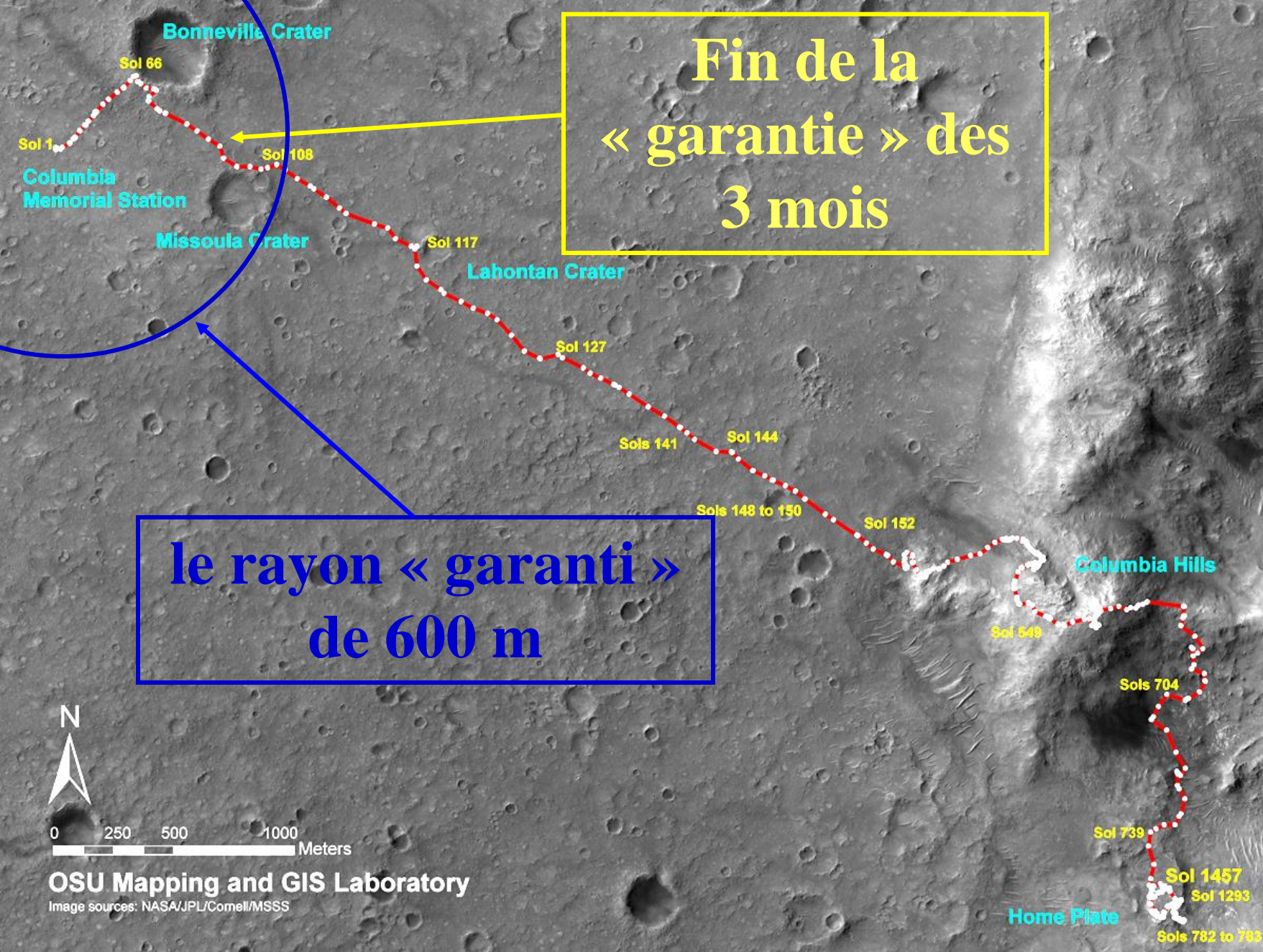


Pour ses analyses, les robots disposent de spectro IR, de fluo X, de spectro Mossbauer, et de « l'œil du géologue ». Spirit n'a trouvé que du basalte.



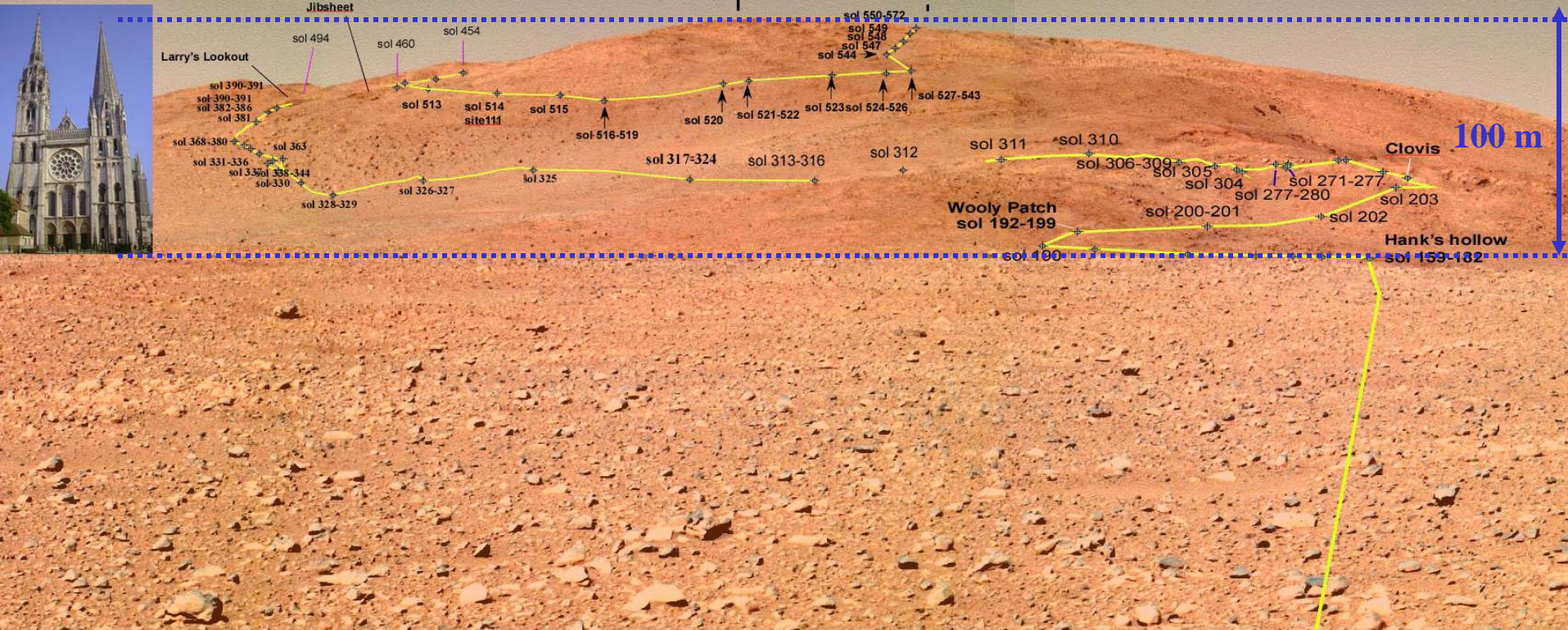


**Ce volcanisme est bien basaltique, assez peu différencié**



**Le trajet de Spirit (état en octobre 2008, coincé depuis cette date)**



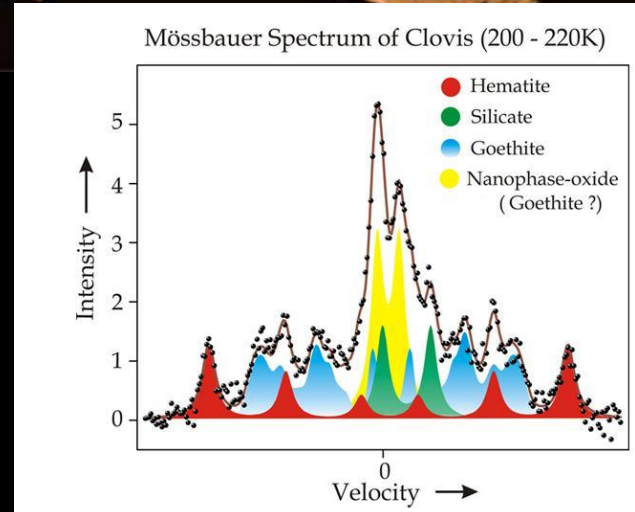


**En janvier 2004, Spirit s'est posé dans une plaine (1er plan) avec rien que du basalte. Cruelle déception ! A 3 km, des collines. Il essaye d'y aller pour y chercher autre chose. Et il y arrive. Il monte même jusqu'au sommet (août 2005) et est redescendu de l'autre côté où il se trouve (et fonctionne) toujours, mais est « coincé » .**

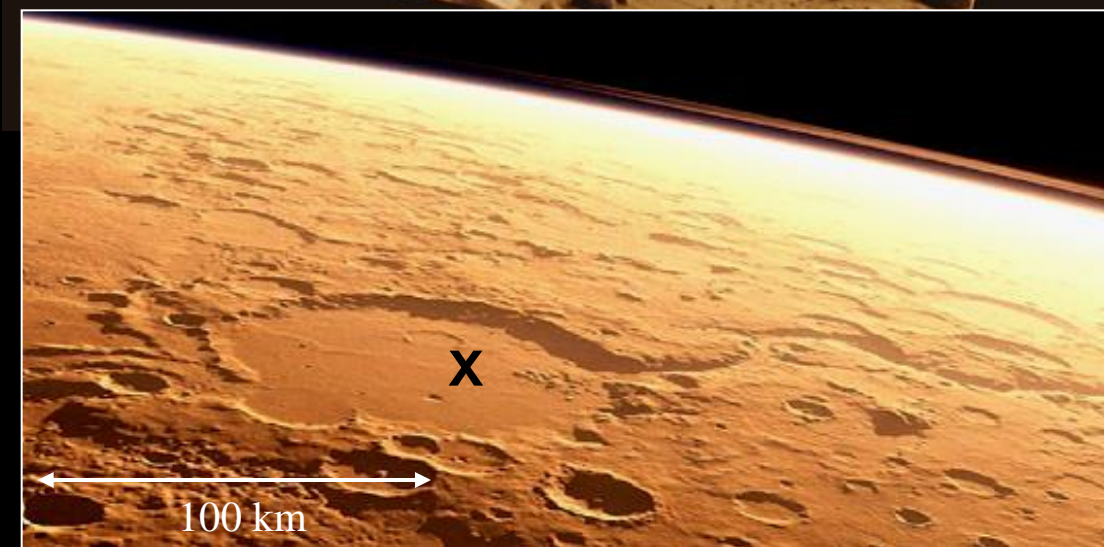




**En gros, quand il analyse, il trouve du basalte ! Quelle déception (bis) . Parfois, il y a des preuves que ce basalte a été altéré par de l'eau (on se console comme on peut).**



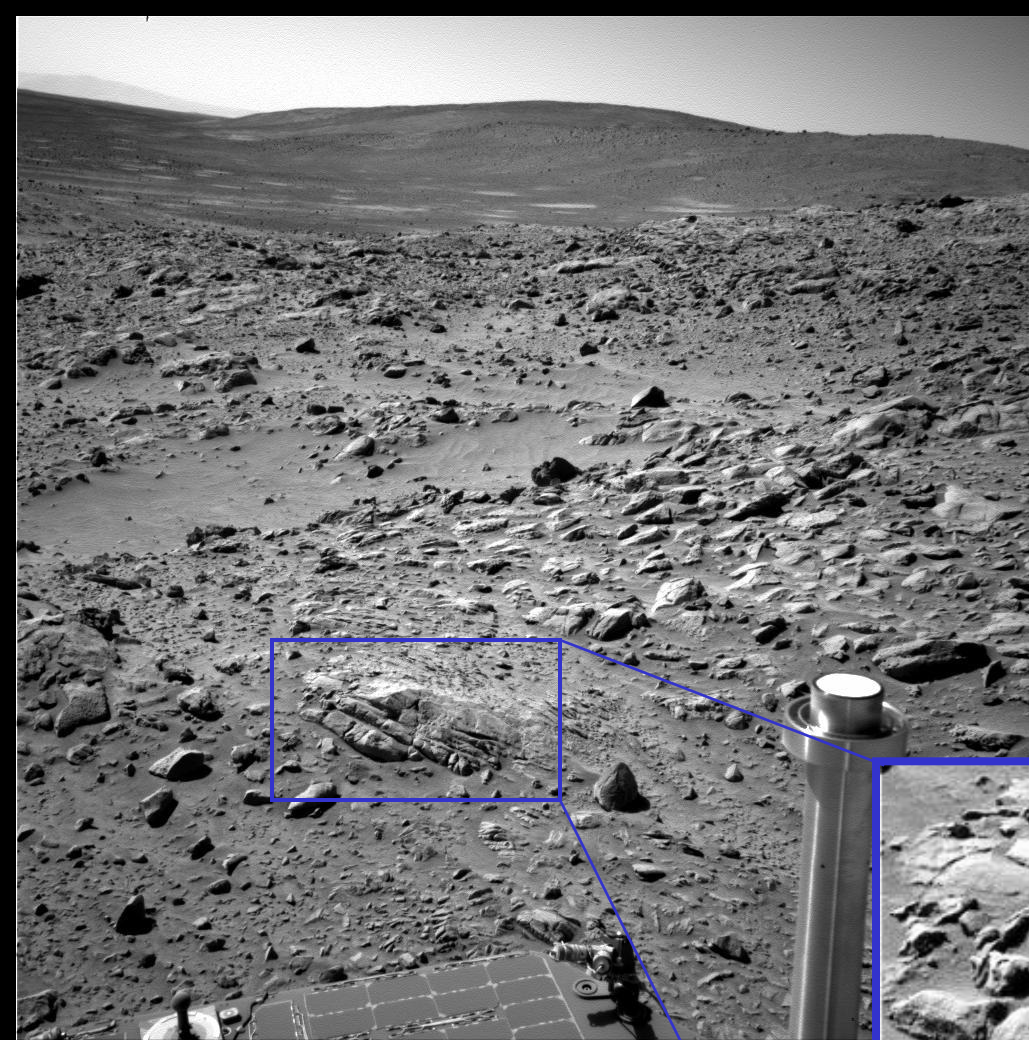




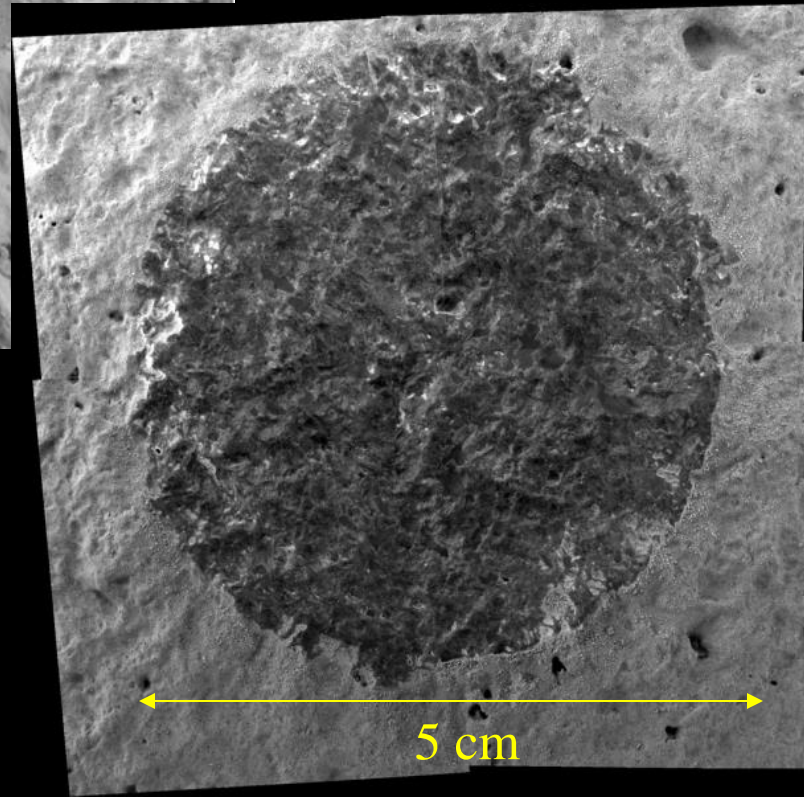
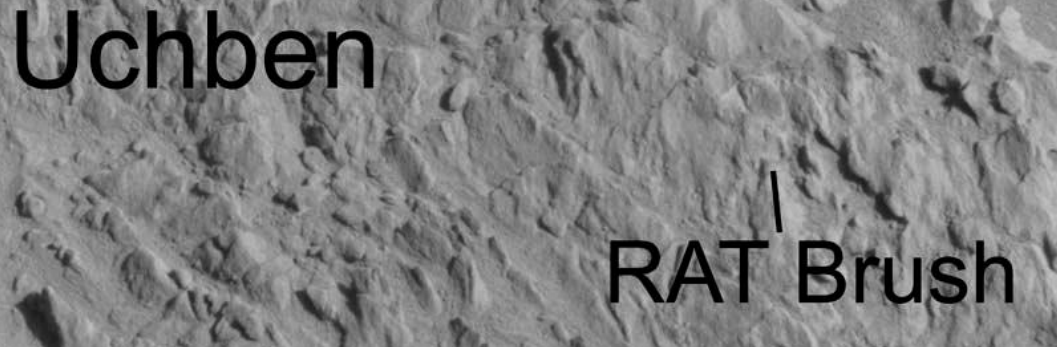
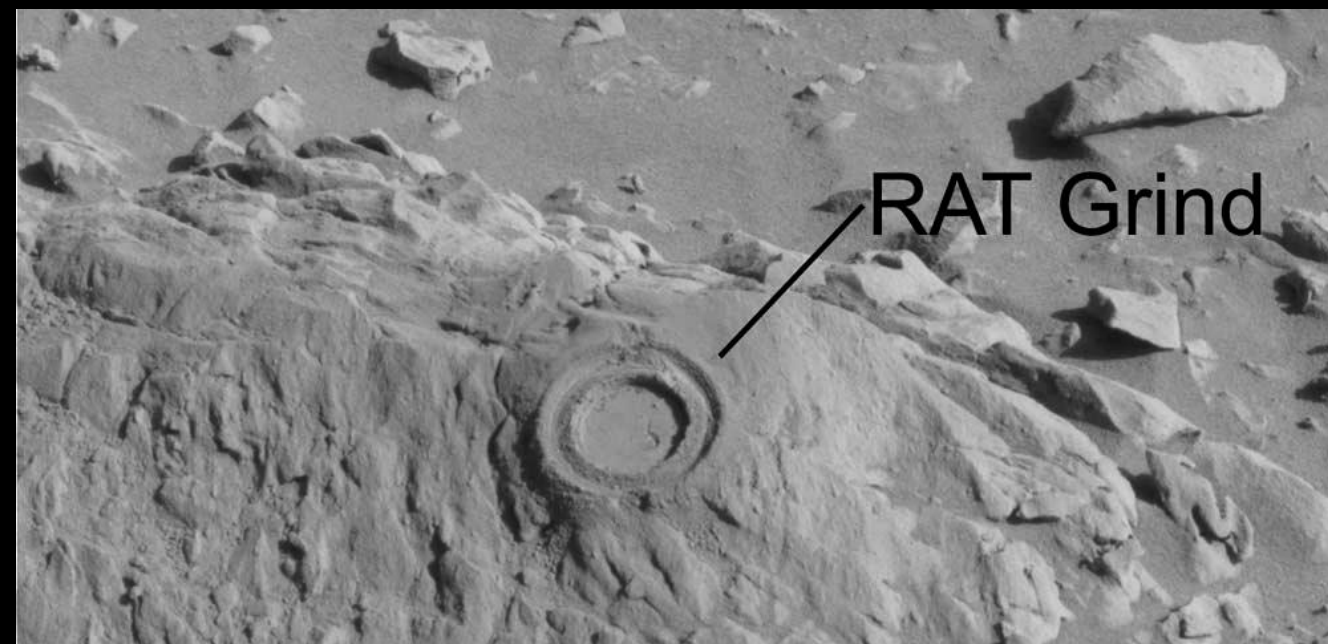
**Avant de parler  
volcanisme, un  
paysage : quand il fait  
clair, on découvre les  
bords du cratère  
Gusev, à 50 km de là.**



**Vers le sommet, il trouve  
des roches stratifiées.  
Sédiments, cendres  
volcaniques ?  
Chimiquement, ça  
ressemble à des cendres  
volcaniques altérées par  
de l'eau**

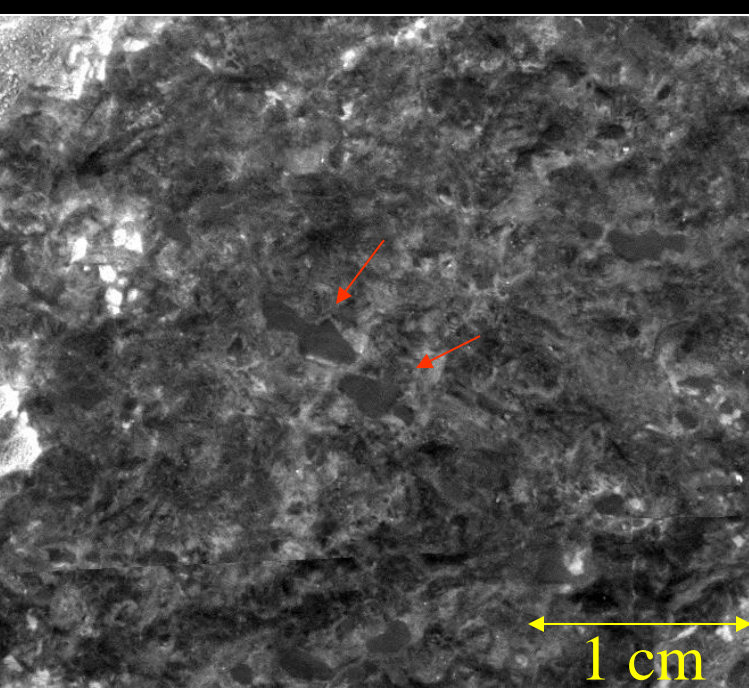




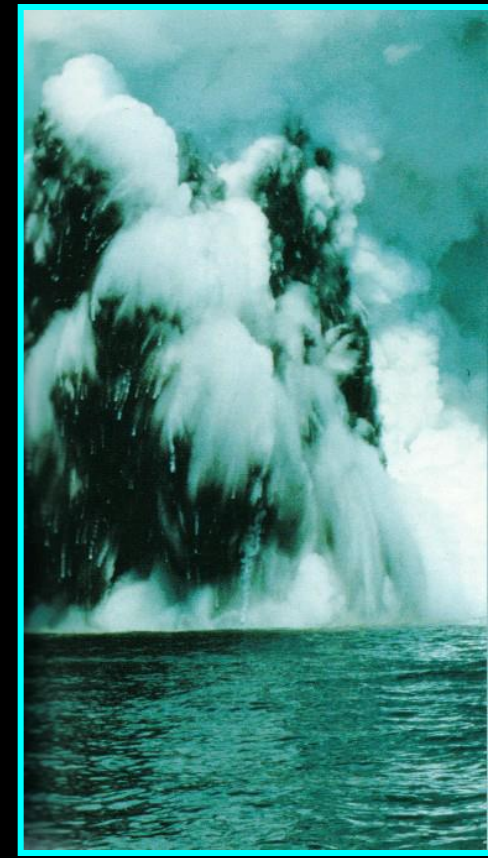


**Contournons ce rocher ;  
polissons sa surface  
supérieure ; époussetons ;  
regardons.**

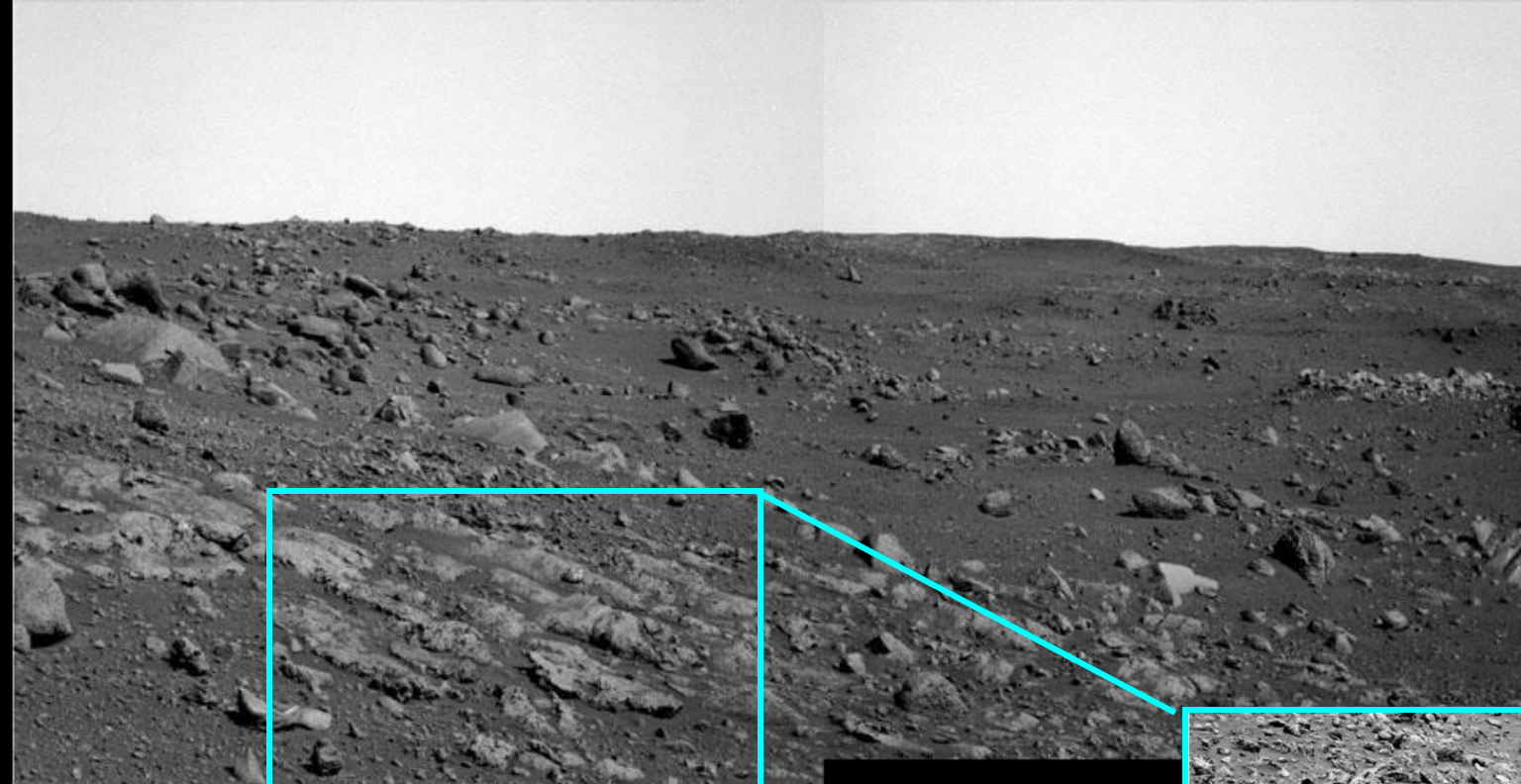
# En regardons au « microscope », on découvre des formes géométriques (cristaux ?)



Sur Terre, tous ces affleurements stratifiés, avec cristaux automorphes, à chimie de basalte altéré ... feraient penser à des dépôts phréatomagmatiques (éruption volcanique en eau peu profonde ou dans une nappe phréatique)

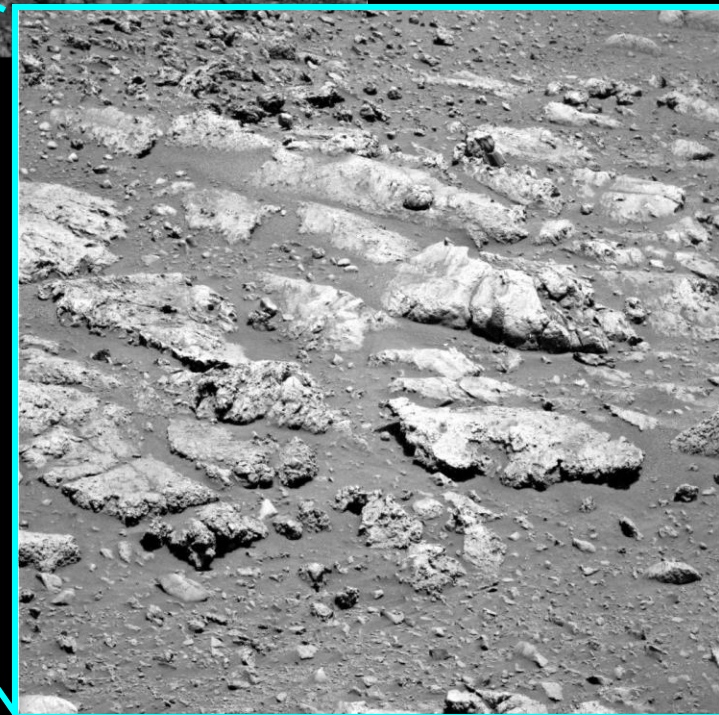






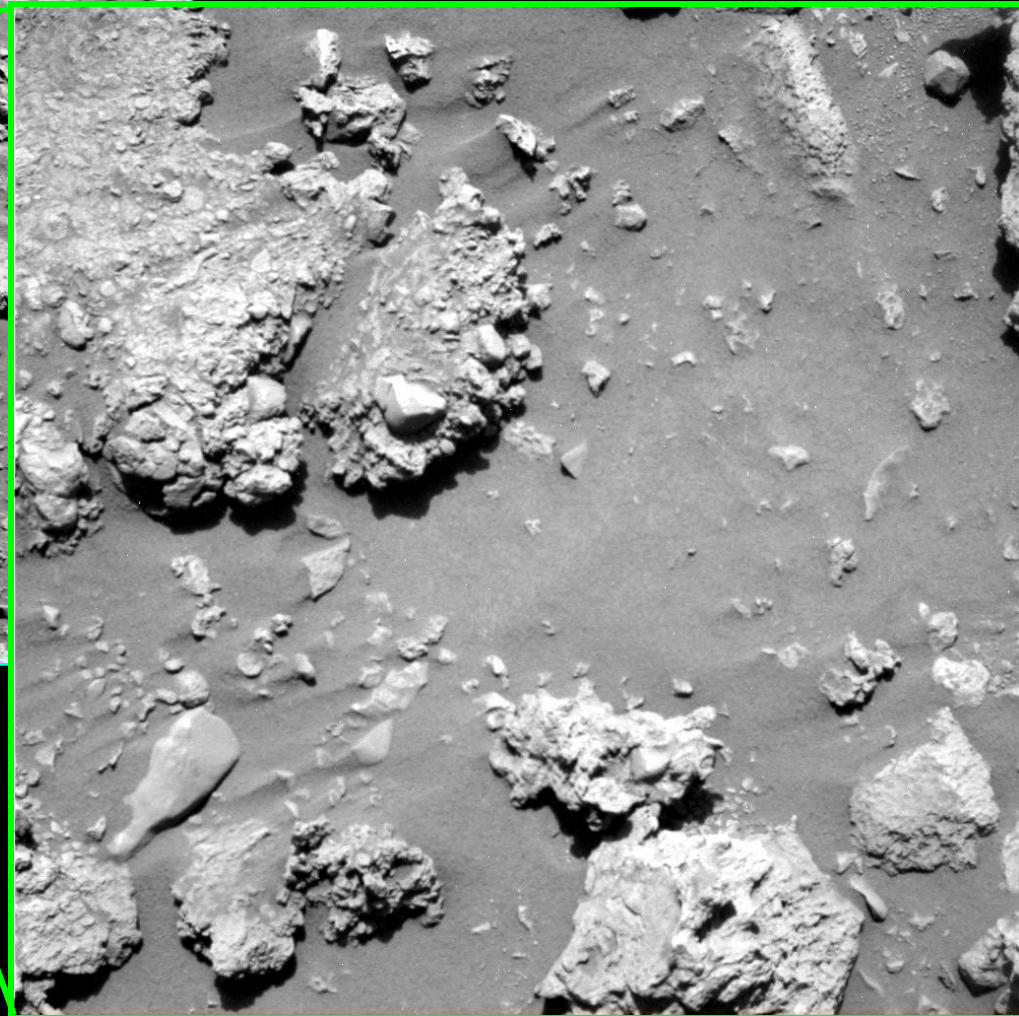
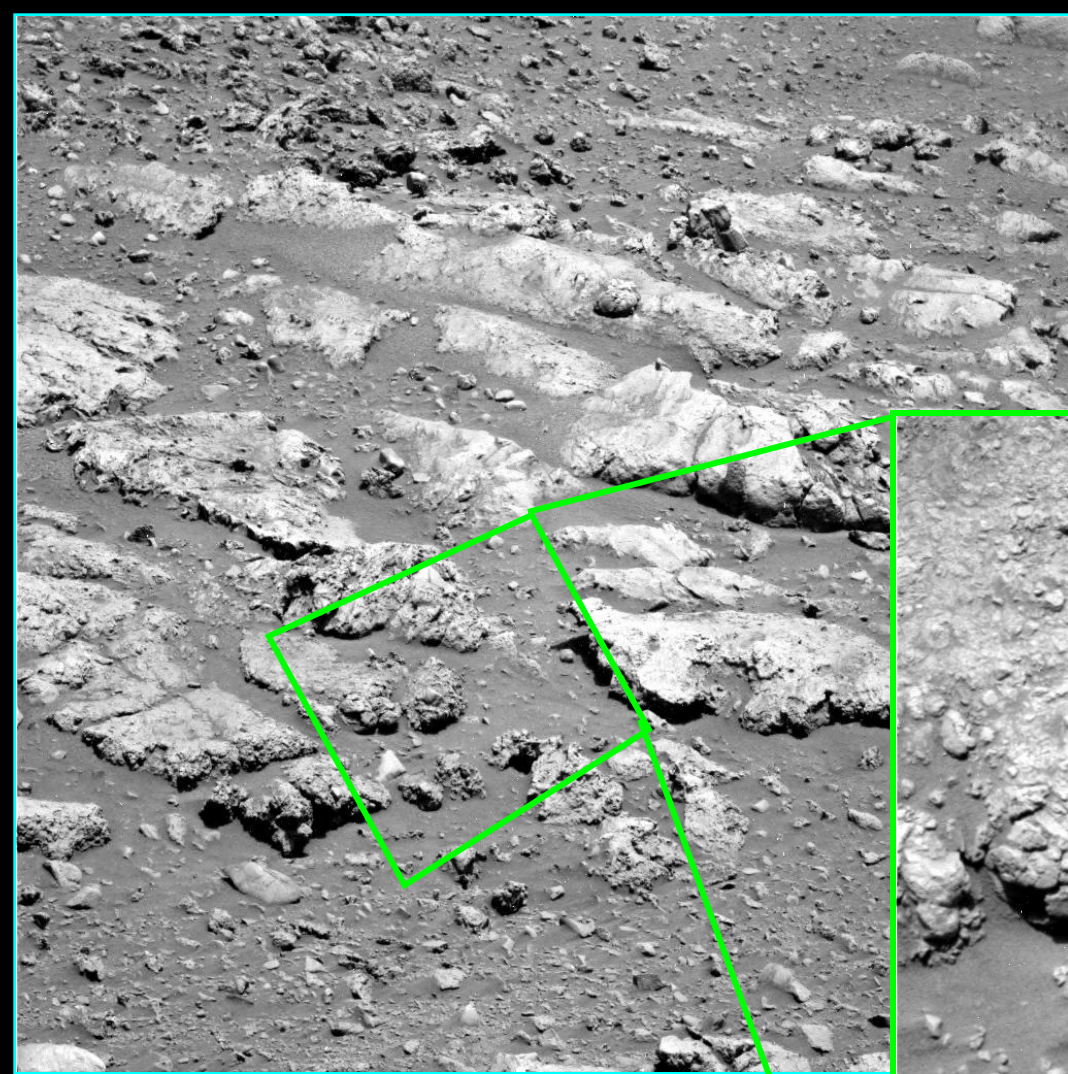
**Tout près du sommet, de nouveaux affleurements**

**Détaillons cet affleurement vaguement stratifié**



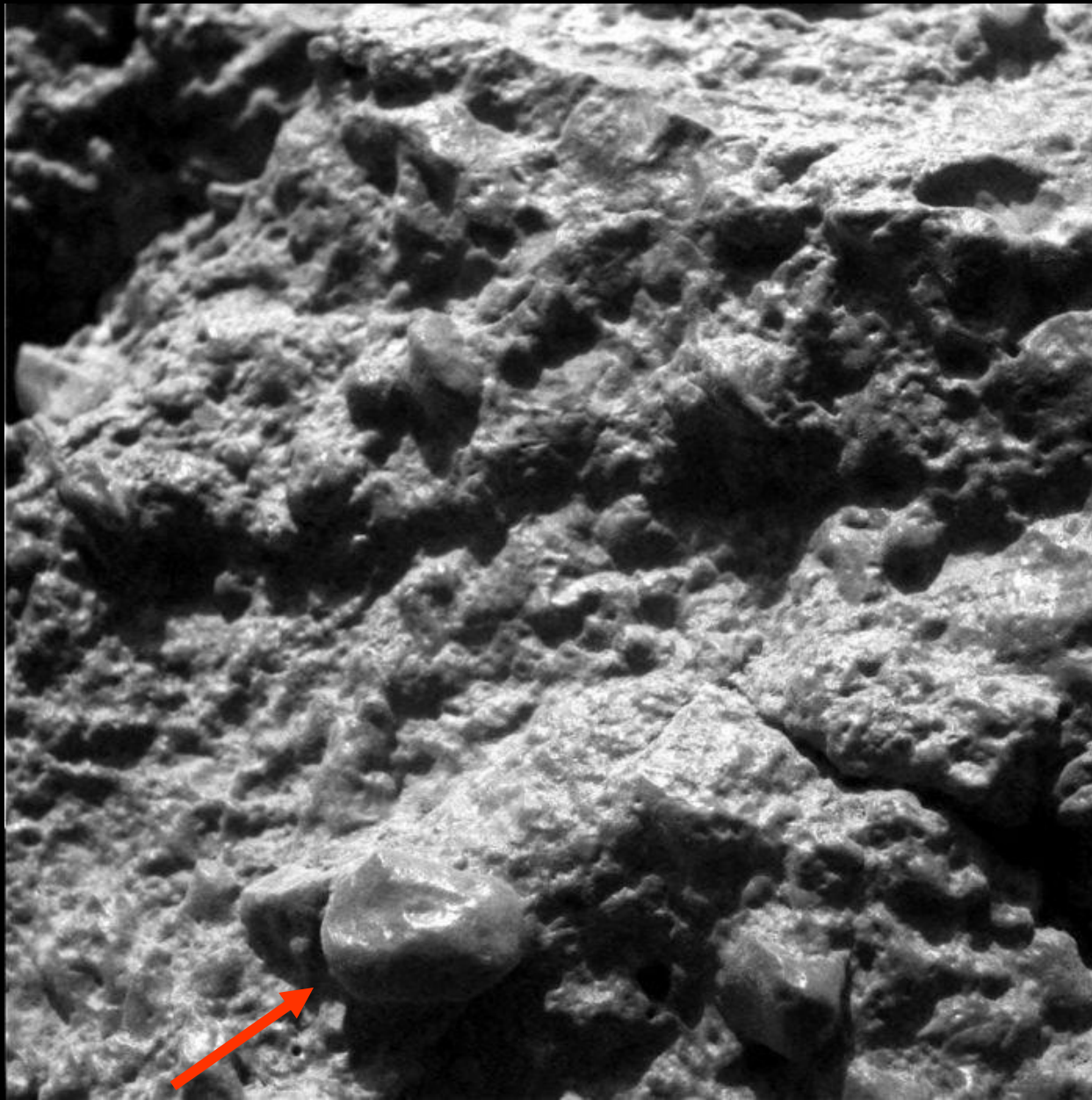


**Approchons-nous !  
Les strates sont  
faites de brèches !**



**Brèches sédimentaires,  
brèches volcaniques,  
brèches d'impact ?**





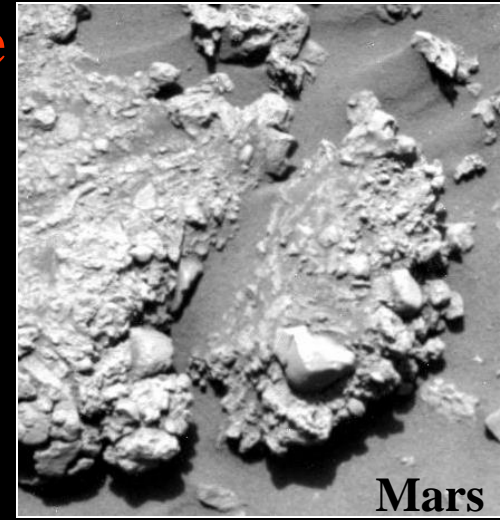
**Certains  
« galets » de  
la brèche  
sont  
arrondis. Ils  
ont été  
« roulés » par  
de l'eau ou  
dans du  
matériel  
« boueux »**





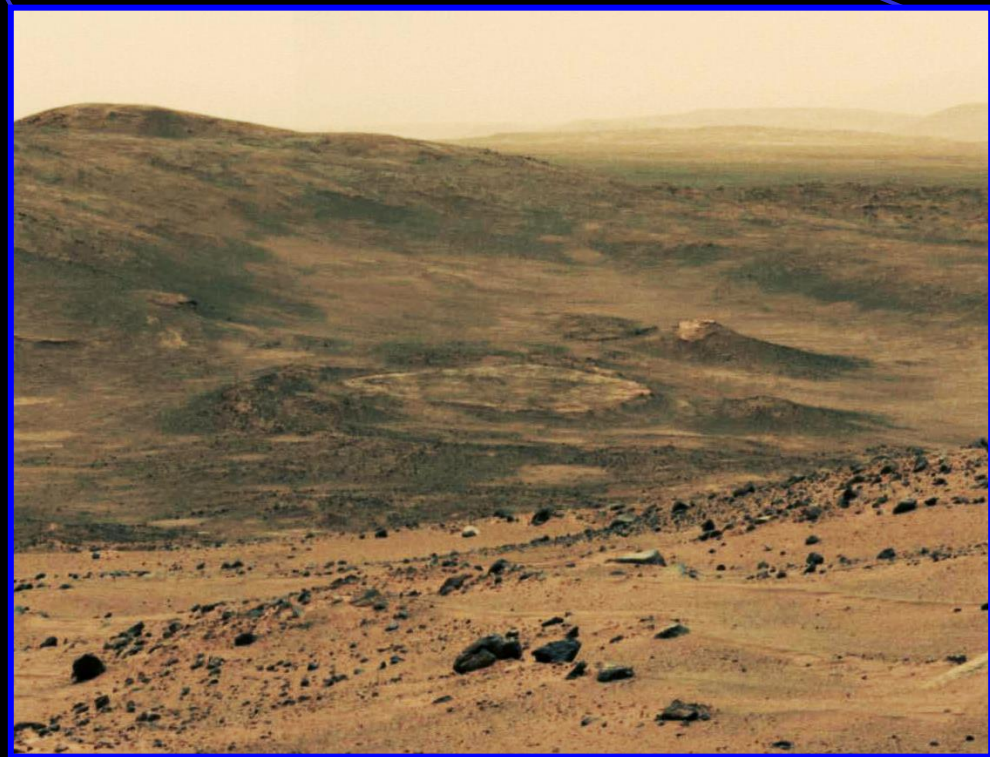
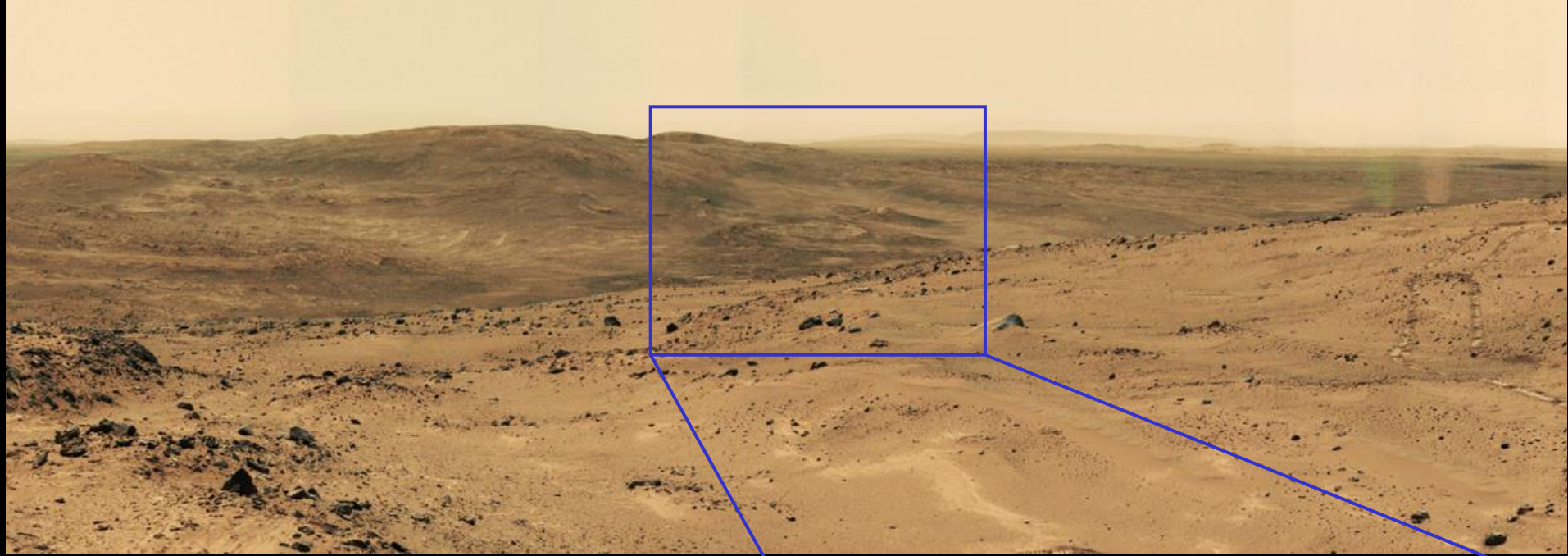
Terre

**Ici, un exemple de brèches volcaniques terrestres, genre coulées boueuses, ce qui semble le plus représentatif du contexte géologique des Columbia Hills**

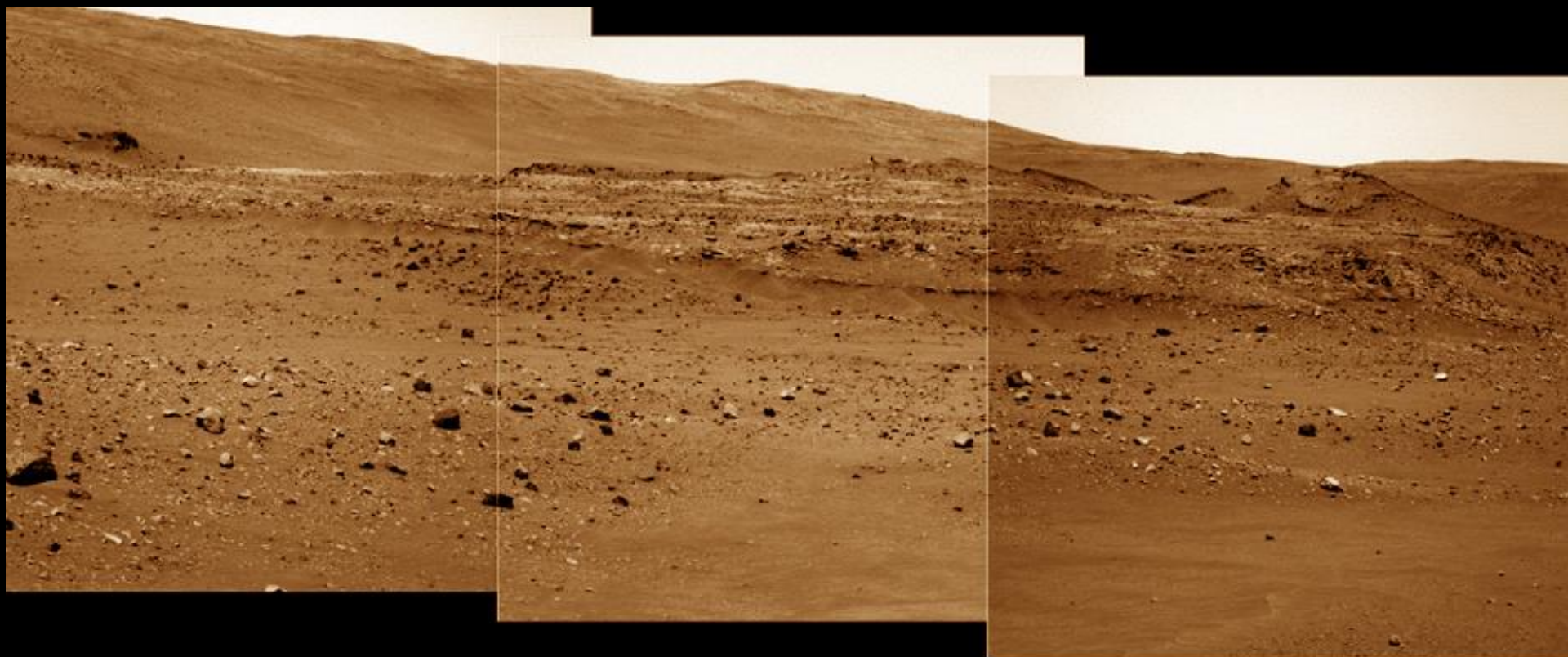


Mars



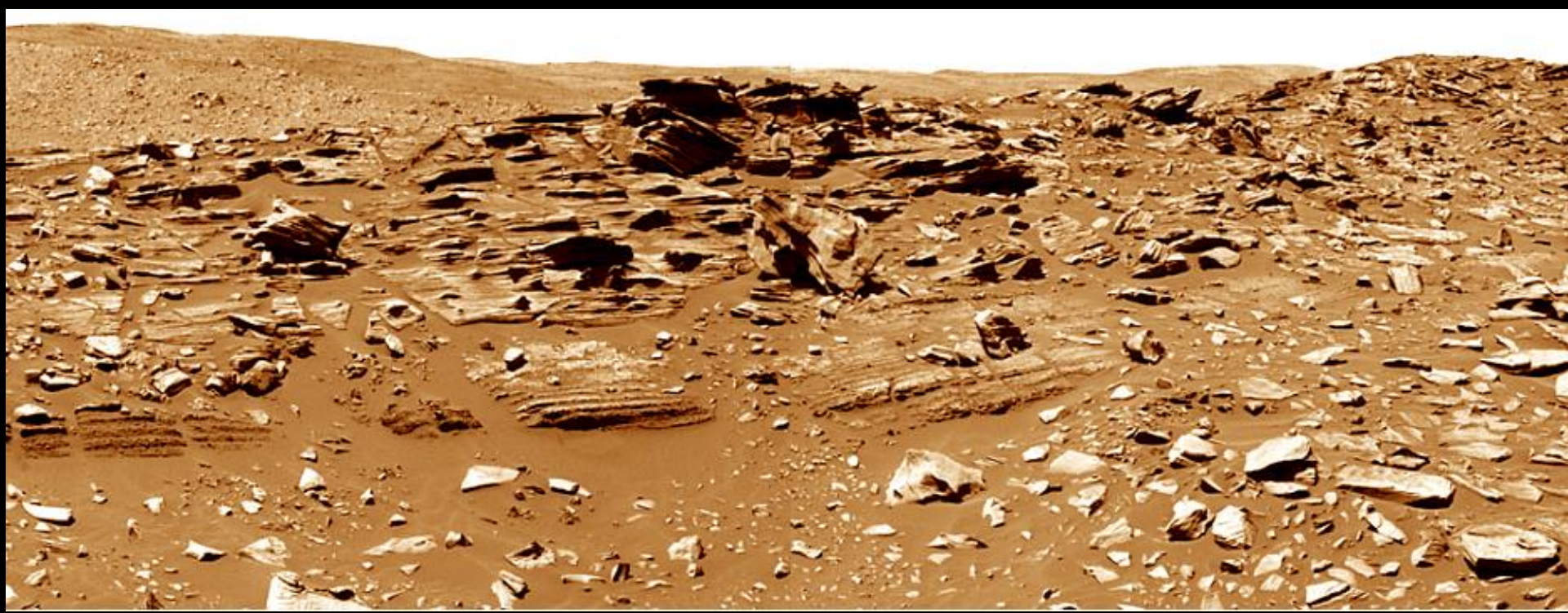


**Voici un panorama pris du  
sommet, vers l'autre coté.  
Une étrange structure,  
Home Plate  
(origine ?) sera la  
prochaine destination de  
Spirit**



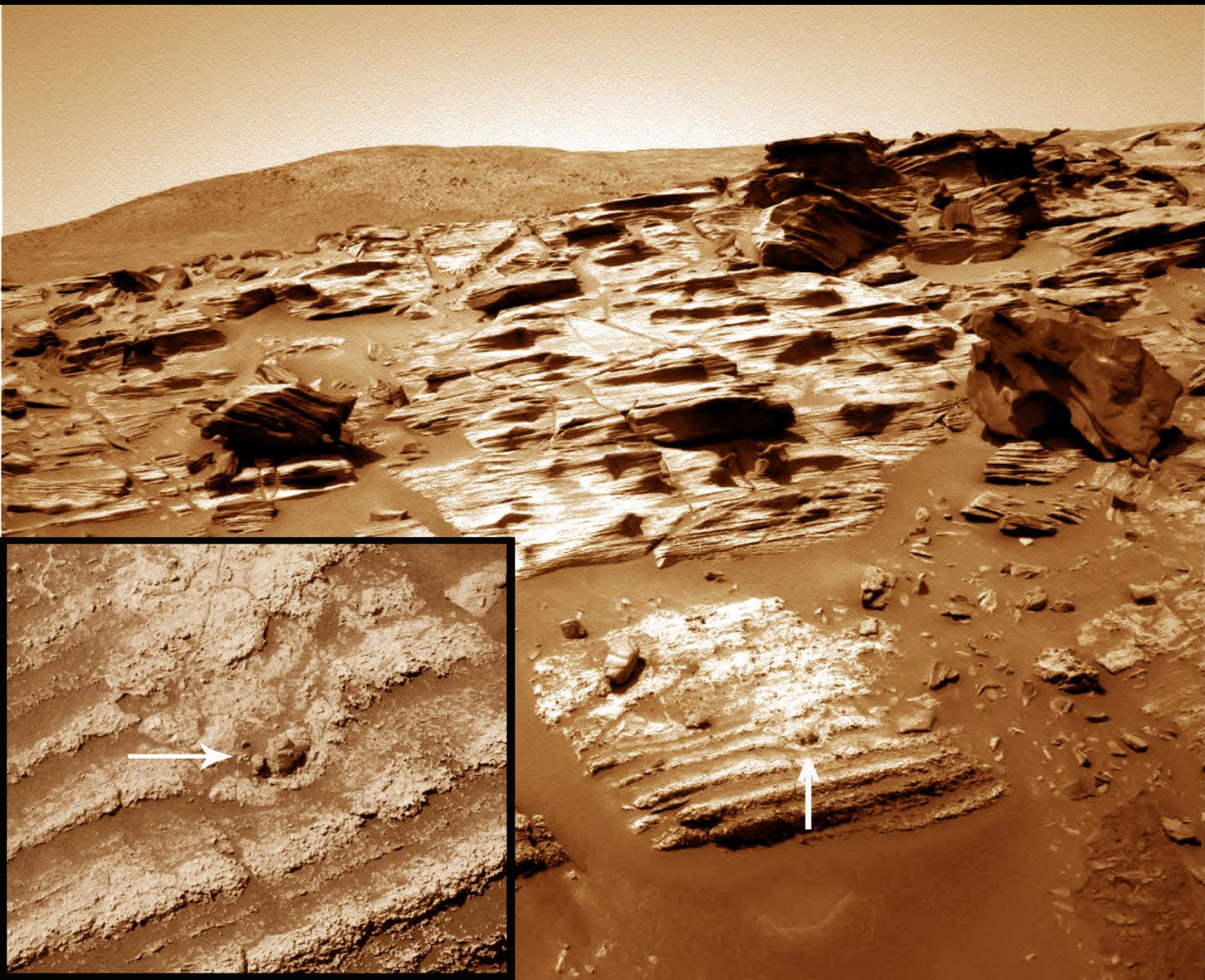
**Le plus « volcanologiquement spectaculaire » des affleurements trouvés par Spirit : Home Plate (où d'ailleurs il est « mort »). Que de belles strates !**



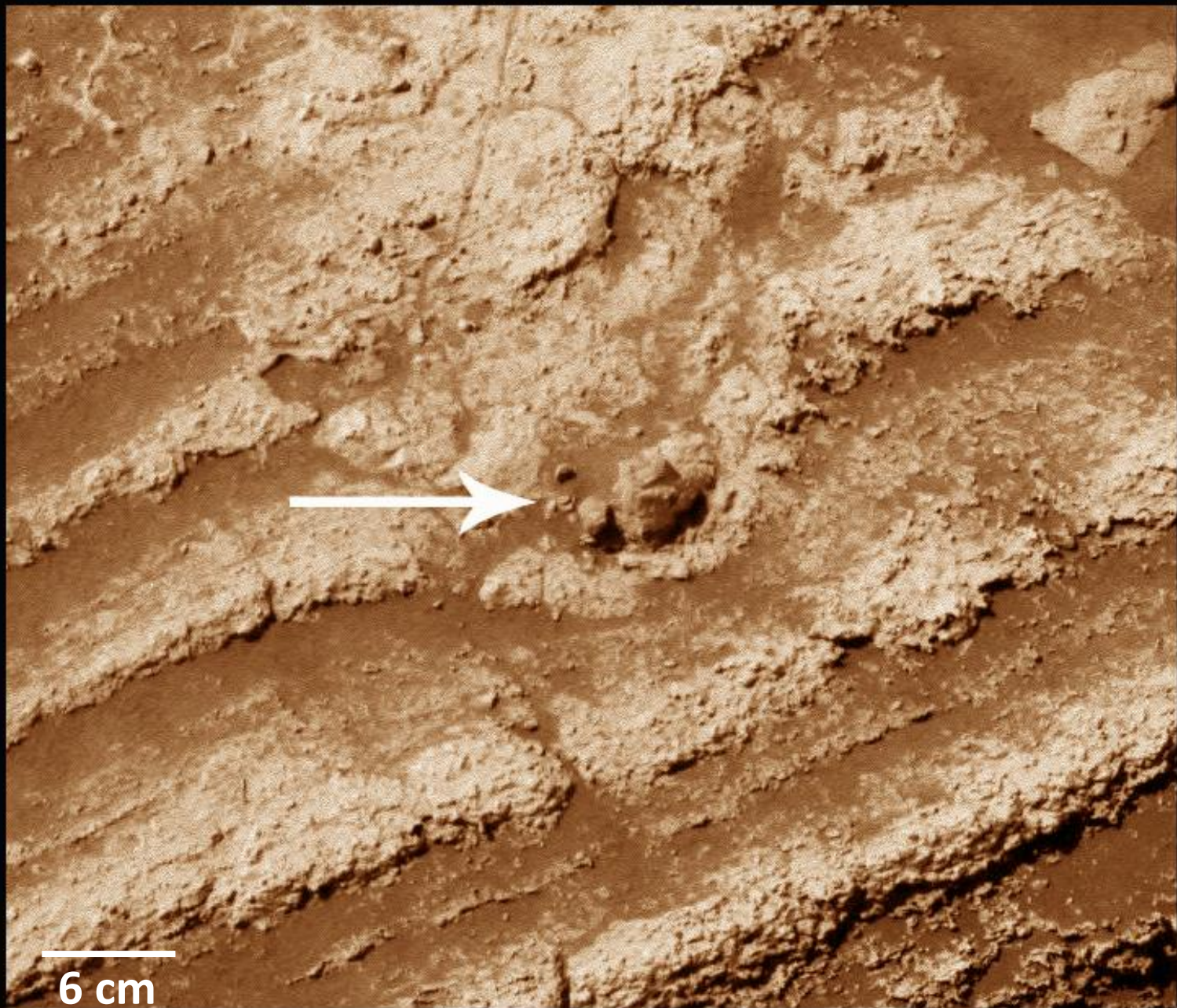


**On s'approche. Les strates du haut ne sont pas identiques à celles du bas**









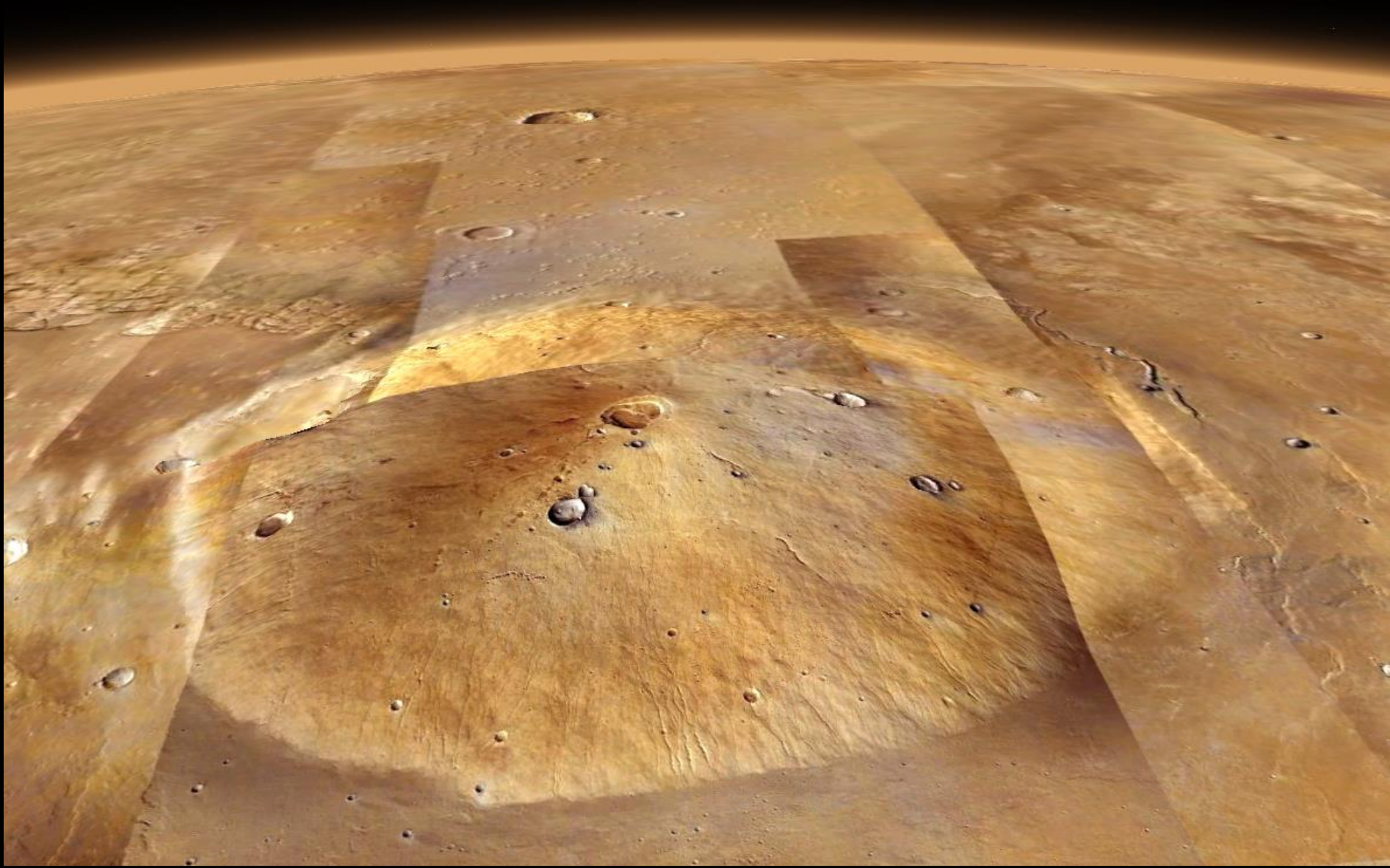
**Ca vous fait penser à quoi, cette disposition ?**





**A des figures de chocs dues à la chute d'objets  
pesants, éjectés par des éruptions volcaniques  
explosives**





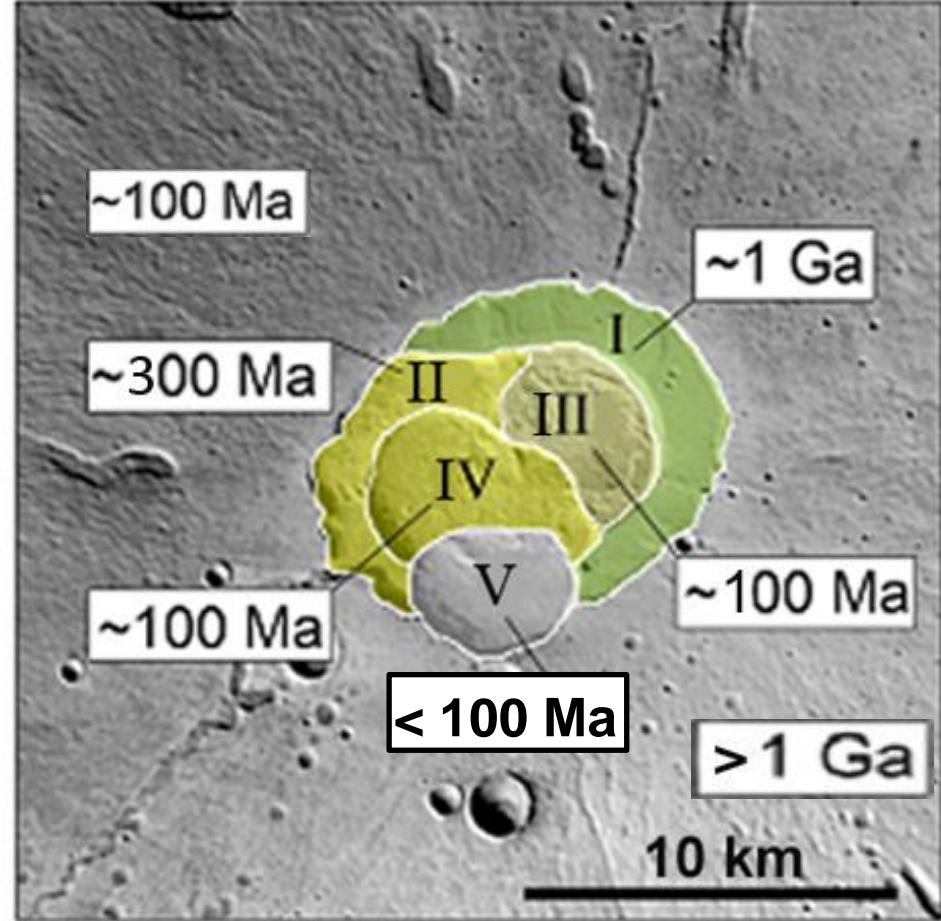
**Voici Hecates Tholus, un volcan avec calderas (cratères) sommitaux emboîtées**





**Cinq calderas qui se recoupent, qu'on peut classer dans l'ordre d'apparition (chronologie relative). Sur ces surfaces volcaniques, on peut compter les cratères de météorites. Et avec les données lunaires, on calcule ...**





... des âges. La toute fin de ce volcanisme (les dernières coulées qui remplissent les calderas et recouvrent le flanc NO) est « jeune ». Même pas 100 millions d'années, c'est rien pour un géologue ou un astronome (les 2,2 derniers % de l'histoire de Mars)

Distance de Mars à la Terre :  
55 à 400 millions de kilomètres

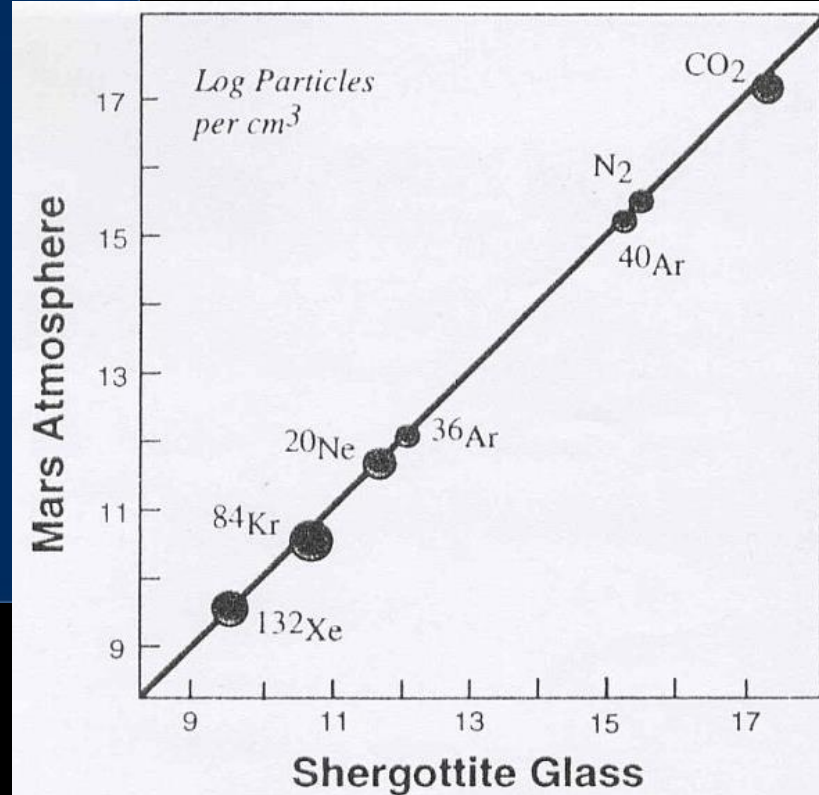
Sahara



Astéroïde

MARS

# Les météorites martiennes



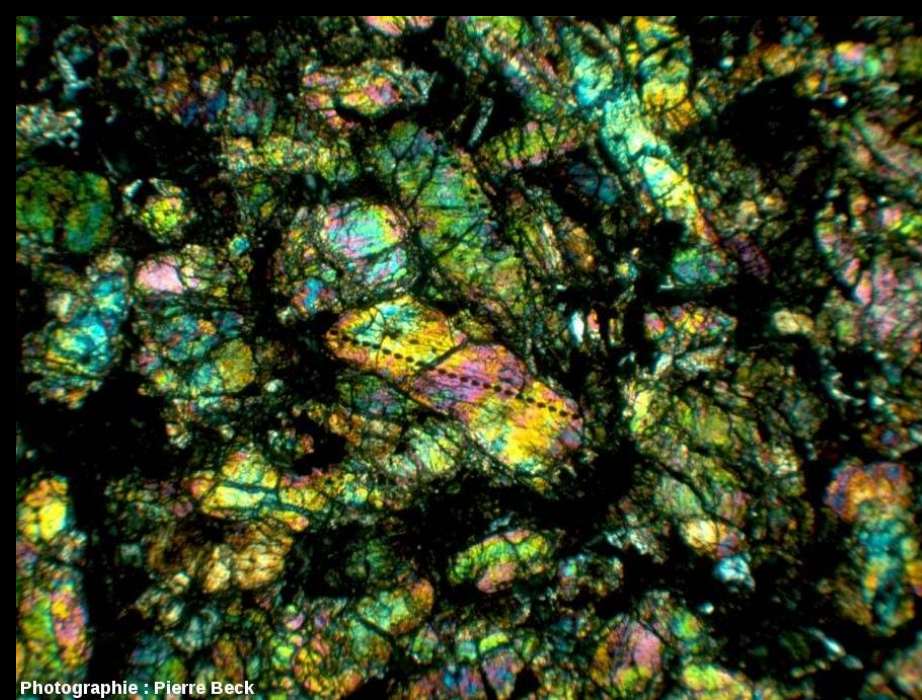




Photographie : Pierre Thomas

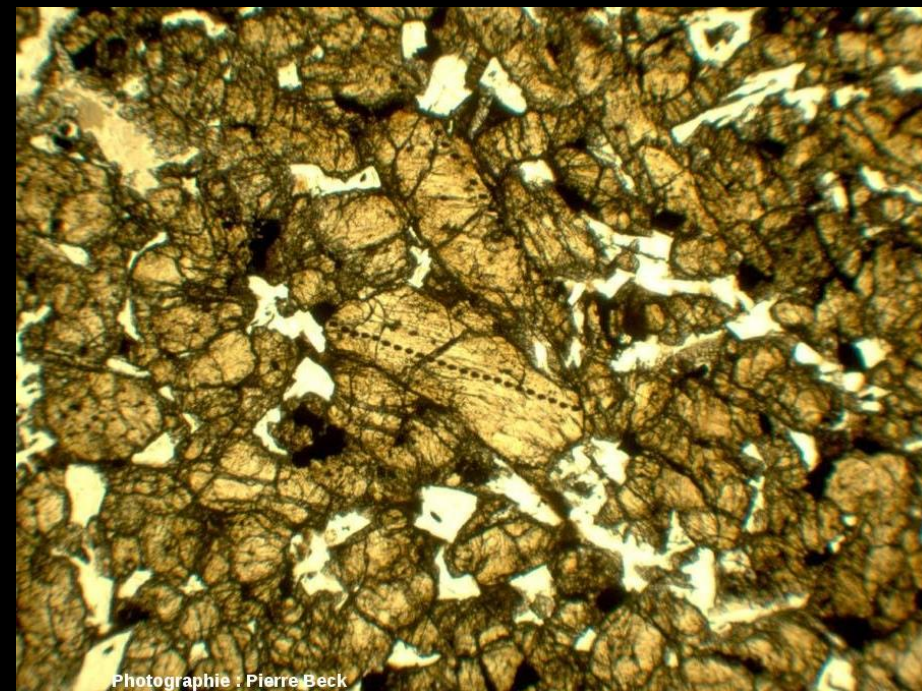
**La météorite de Zagami, un gabbro à grains fins, à pyroxènes clairs (sans fer) et à feldspaths sombres (maskelynites = feldspaths amorphisés, et « riches » en Mg)**





Photographie : Pierre Beck

**La même en lame  
mince.**



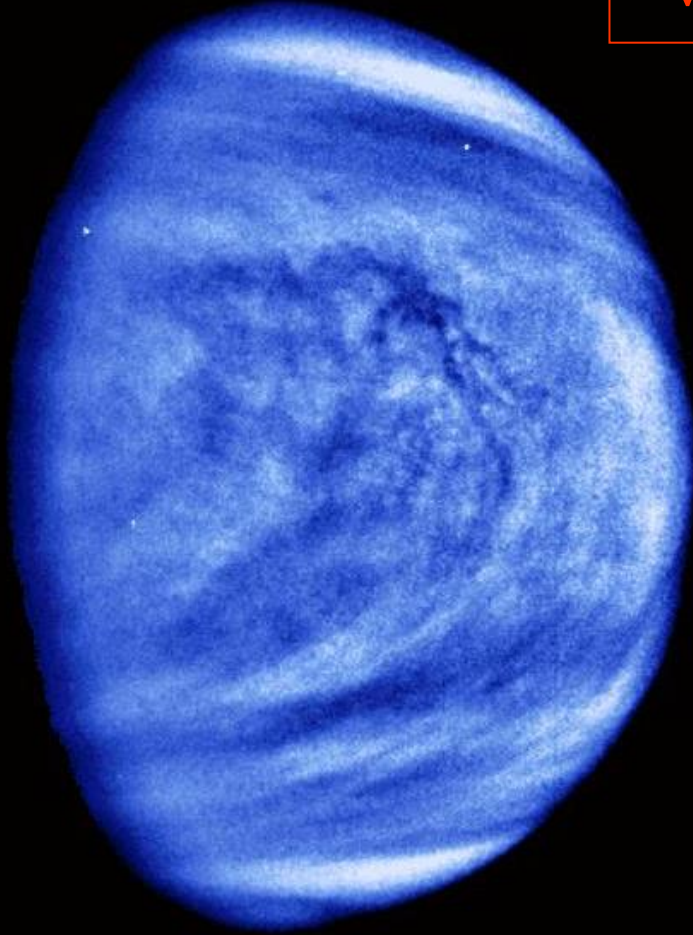
Photographie : Pierre Beck



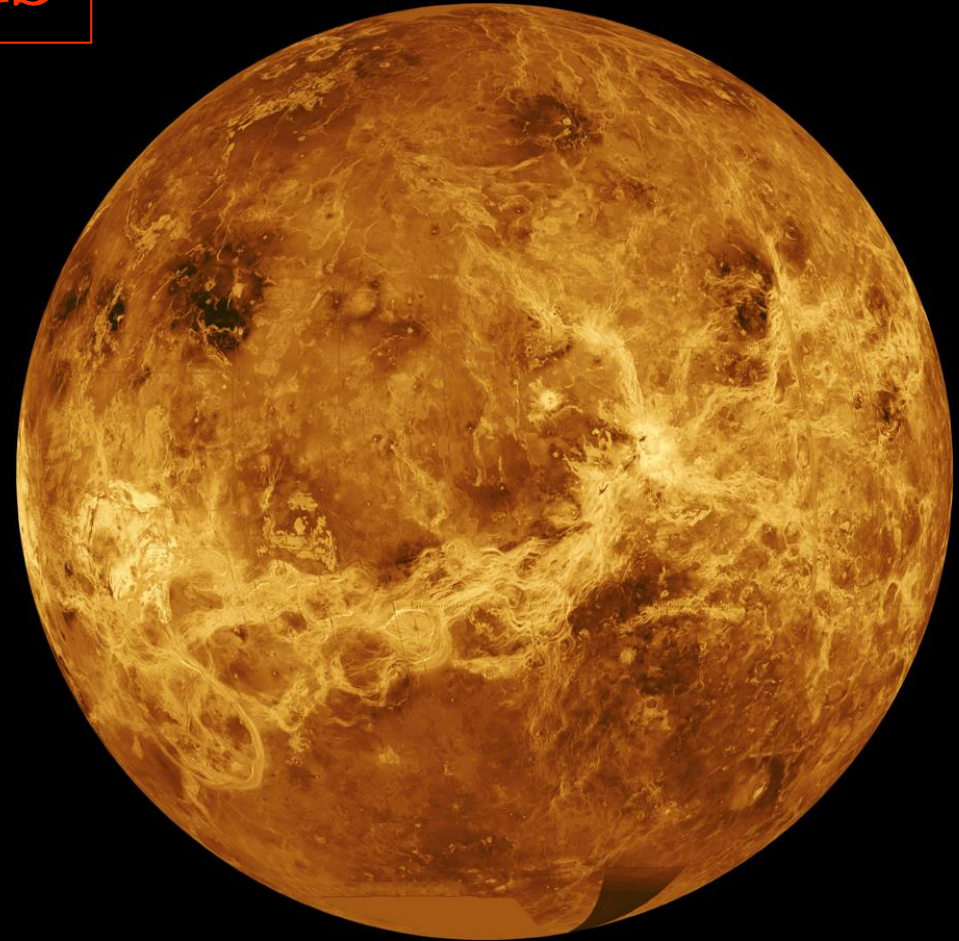


**Age du volcanisme martien :  
éteint depuis pas très longtemps,  
~ 100 millions d'années  
(Lune ~ 3 milliards d'années)**

# Venus



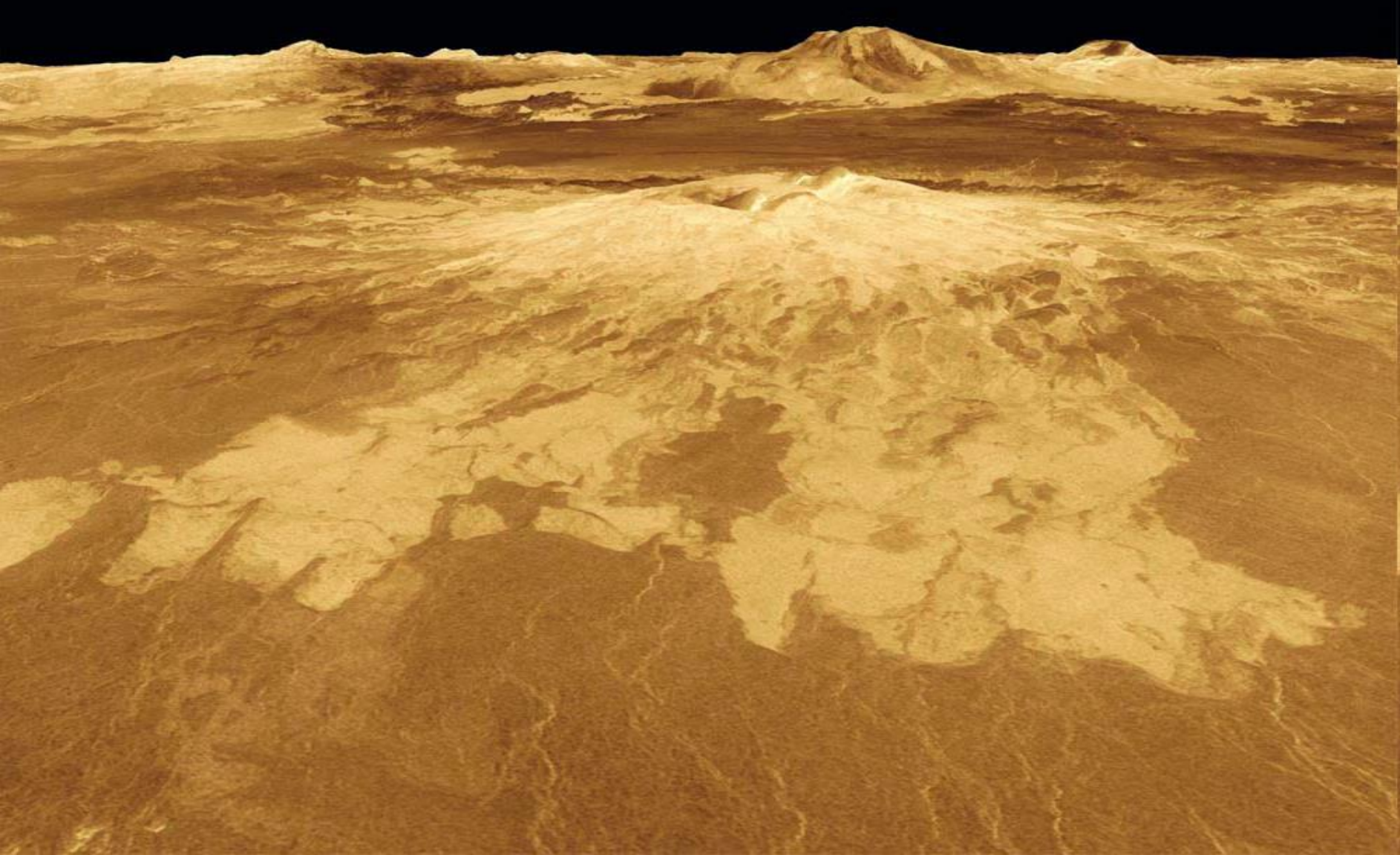
**Vénus en « lumière visible + UV » : que des nuages !**



**Vénus vue par un radar en orbite (magellan)**

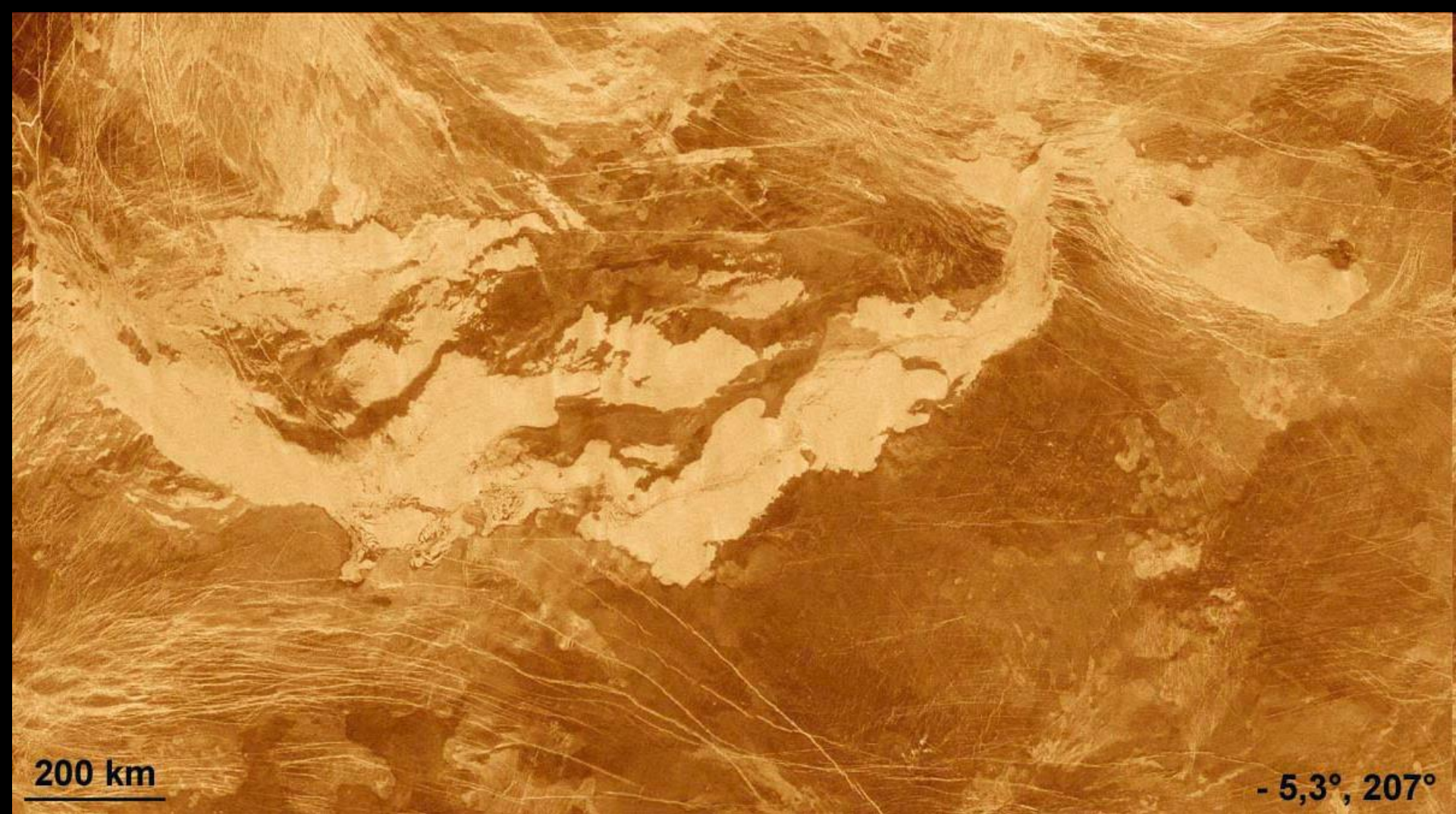
**Même taille et même masse que la Terre. Notre sœur jumelle « théorique » vis à vis de la dynamique interne.**





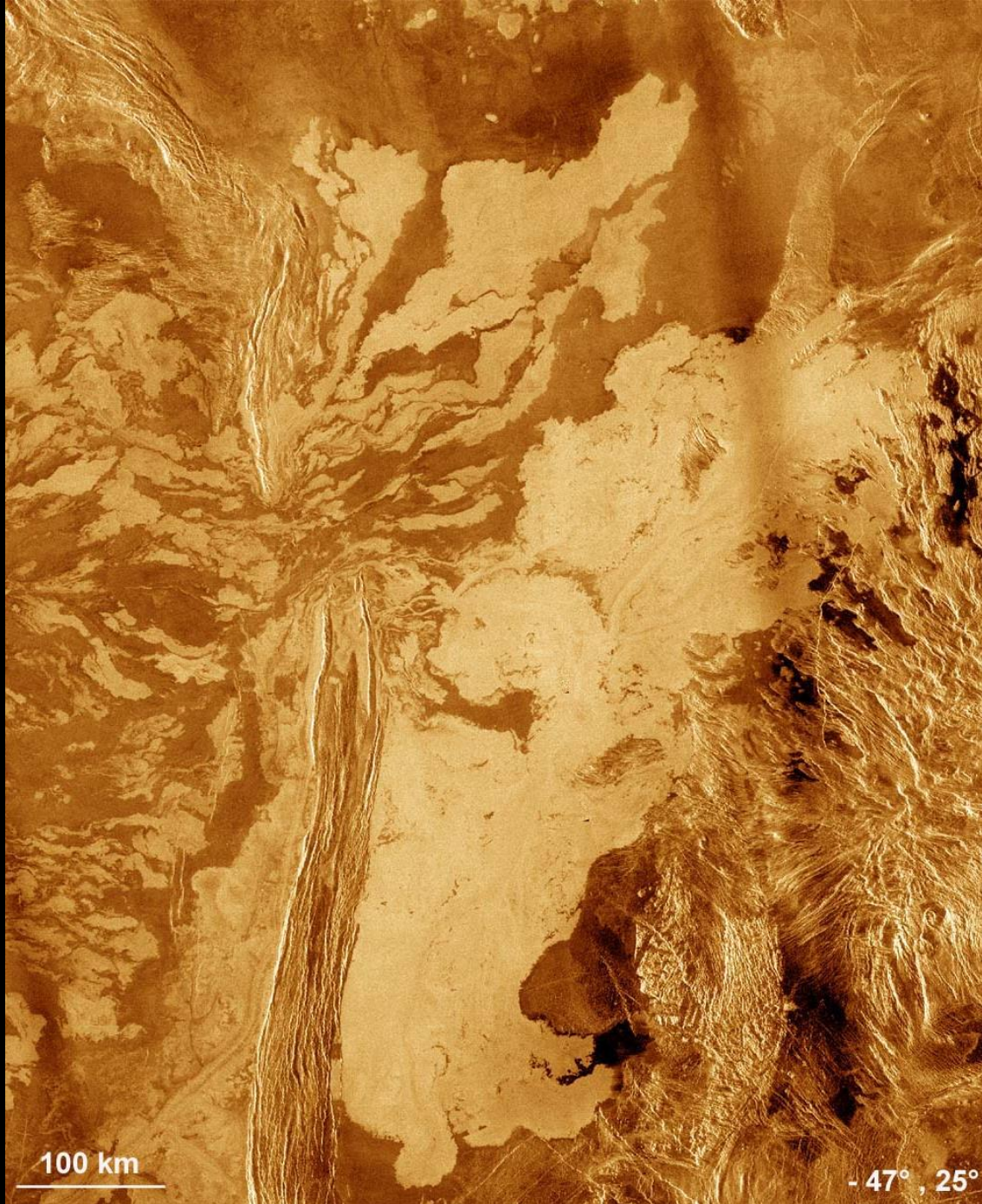
**Le paysage classique de Vénus : un champ de volcans.  
Ici, un très beau volcan, Sapas Mons, avec lave très fluide  
(D = 400 km, h = 2 km).**





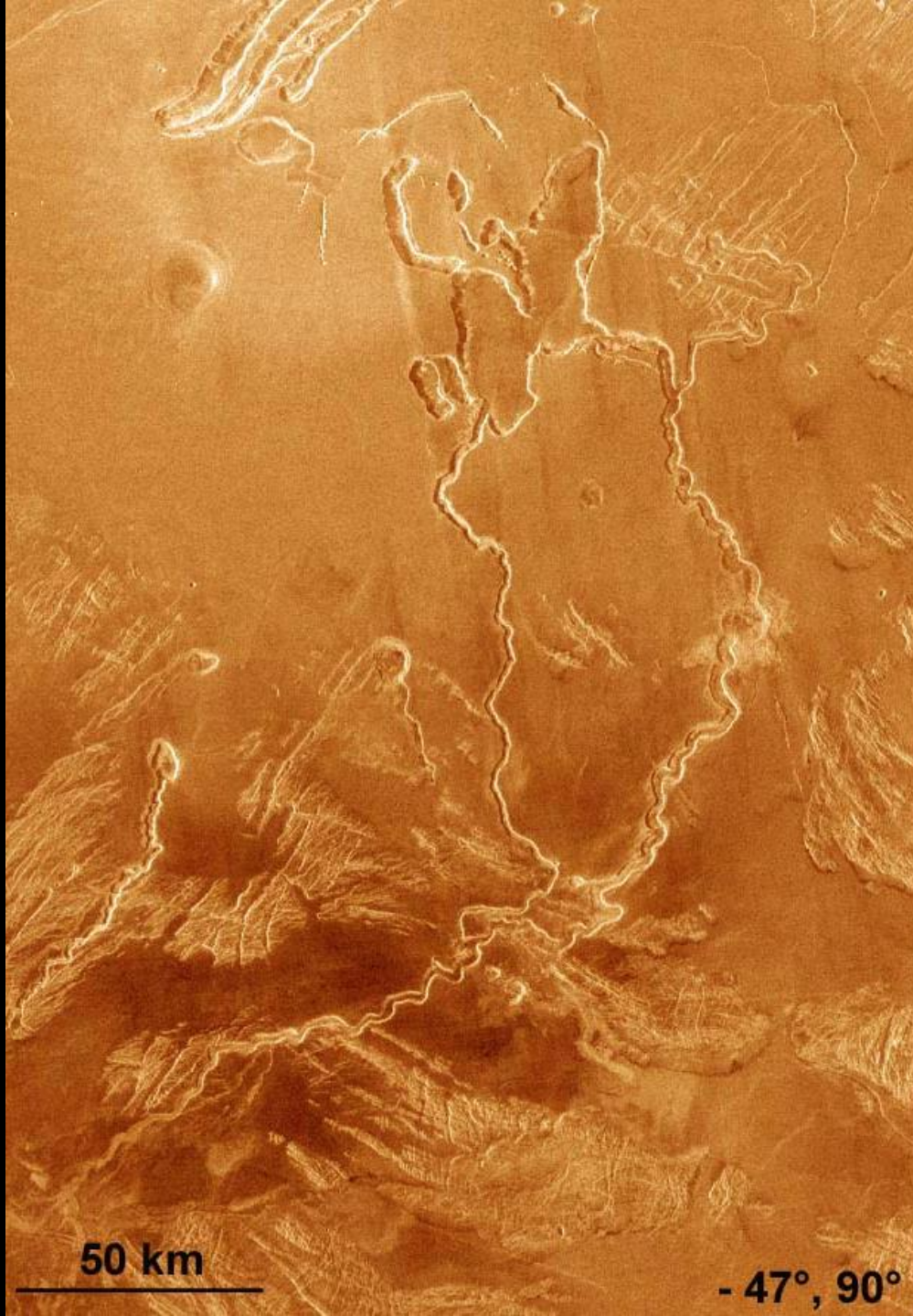
**Vénus, un musée de la morphologie volcanique.  
Pour le plaisir, 12 photos.  
Ici, Des coulées de lave de plus de 1000 km de long**





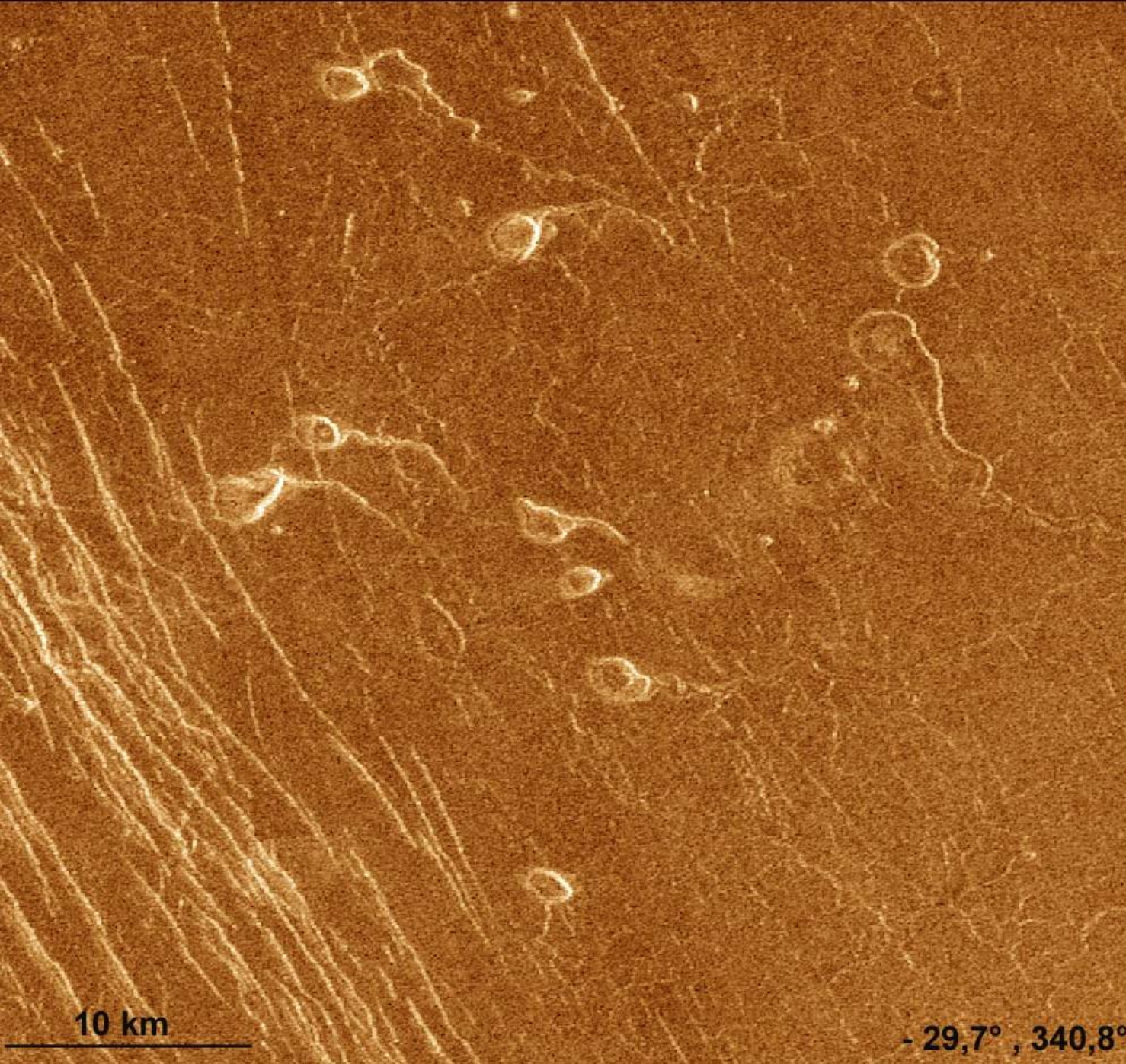
**Des coulées  
de lave qui  
passent par  
dessus une  
chaîne de  
montagne.**





**Coulées de lave très  
fluide = tunnels de  
lave effondrés.**



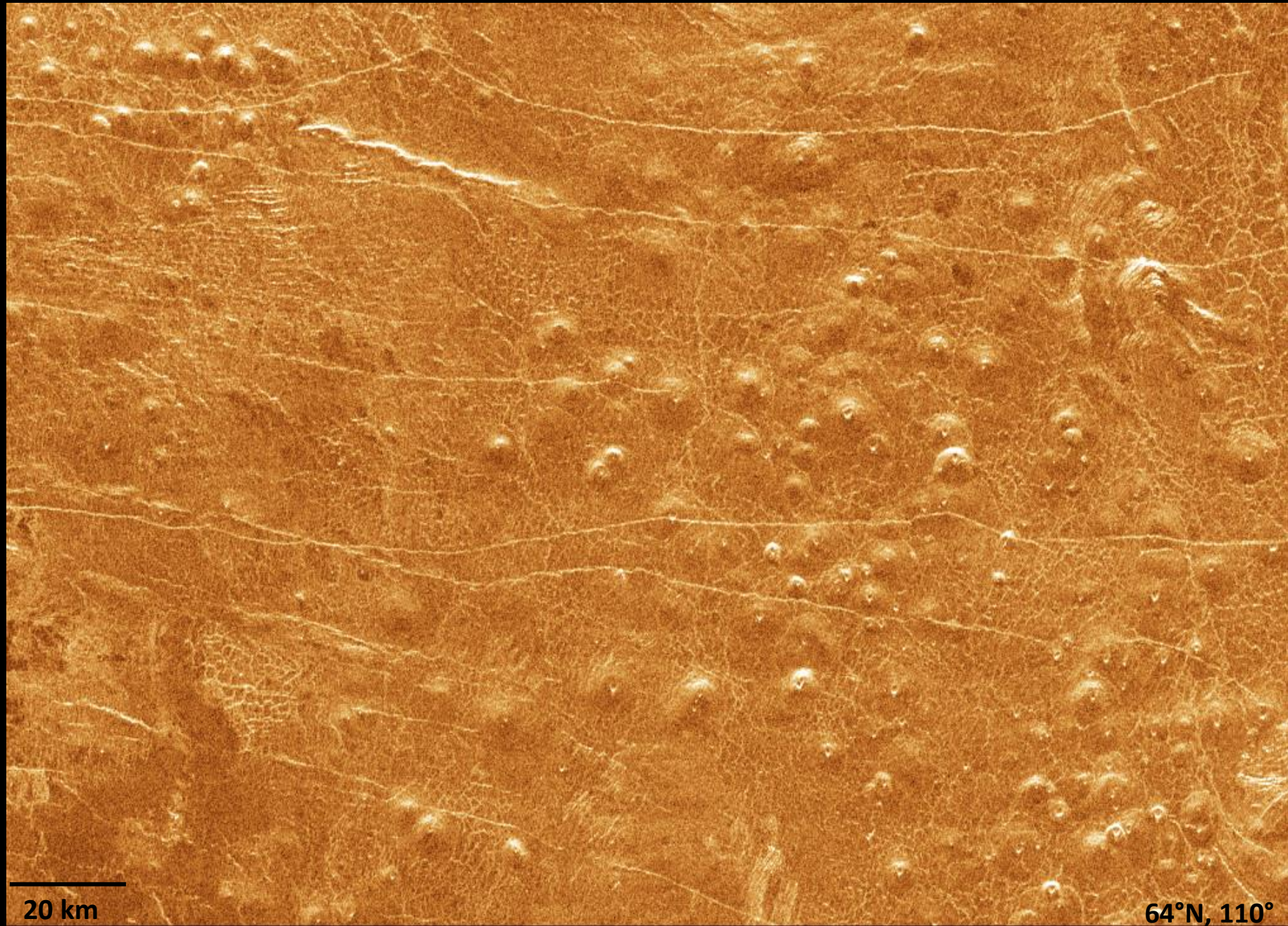


10 km

- 29,7° , 340,8°

**Cratères  
+ tunnels  
de lave  
effondrés  
→  
spermato-  
zoïdes  
géants  
(on est  
sur la  
planète  
« Vénus »,  
déesse de  
l'amour)**





**Plein de petits cônes volcaniques, peu de coulées**

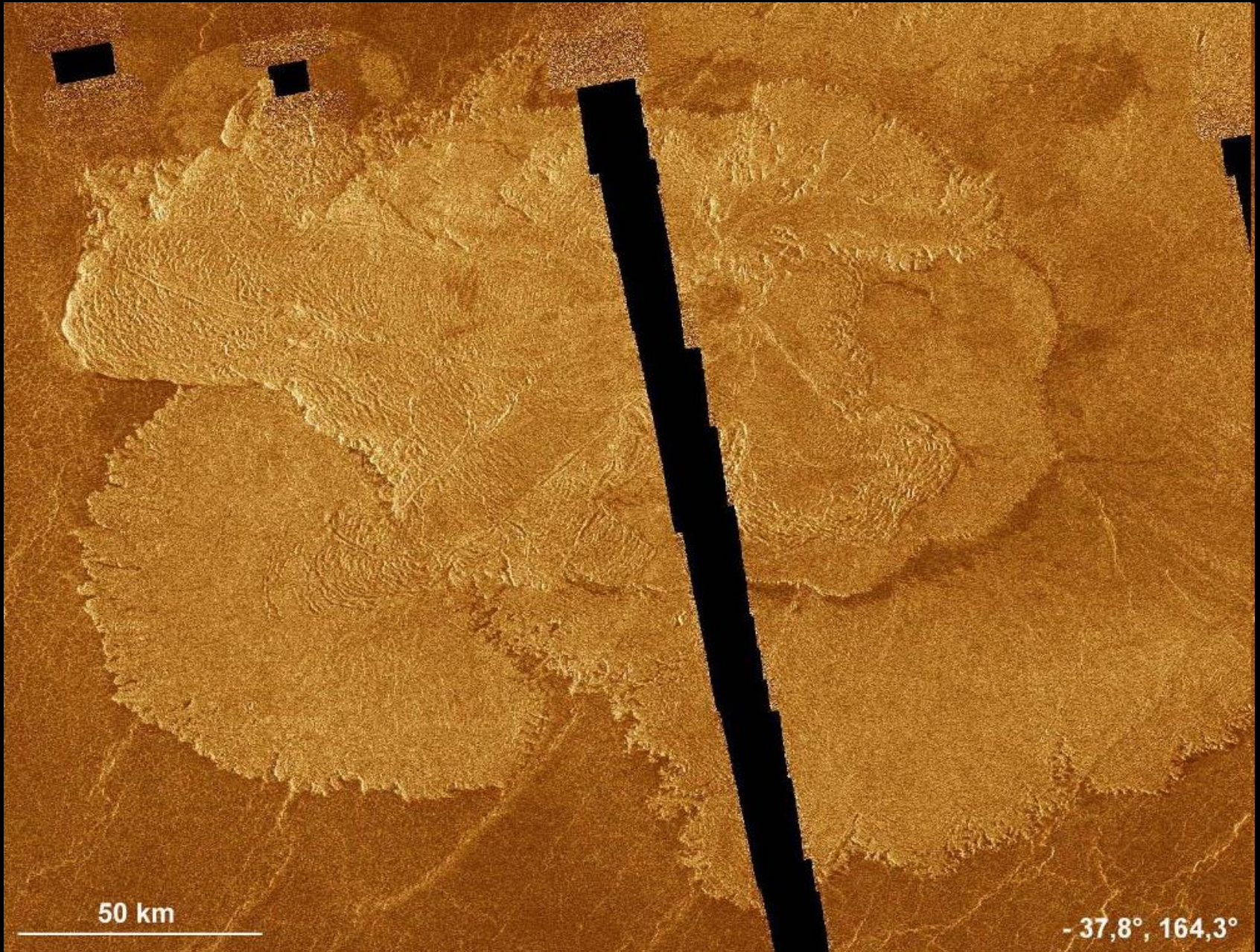


**Quand  
celui là est  
entré en  
éruption,  
le vent  
soufflait  
du Sud  
Ouest.**

10 km

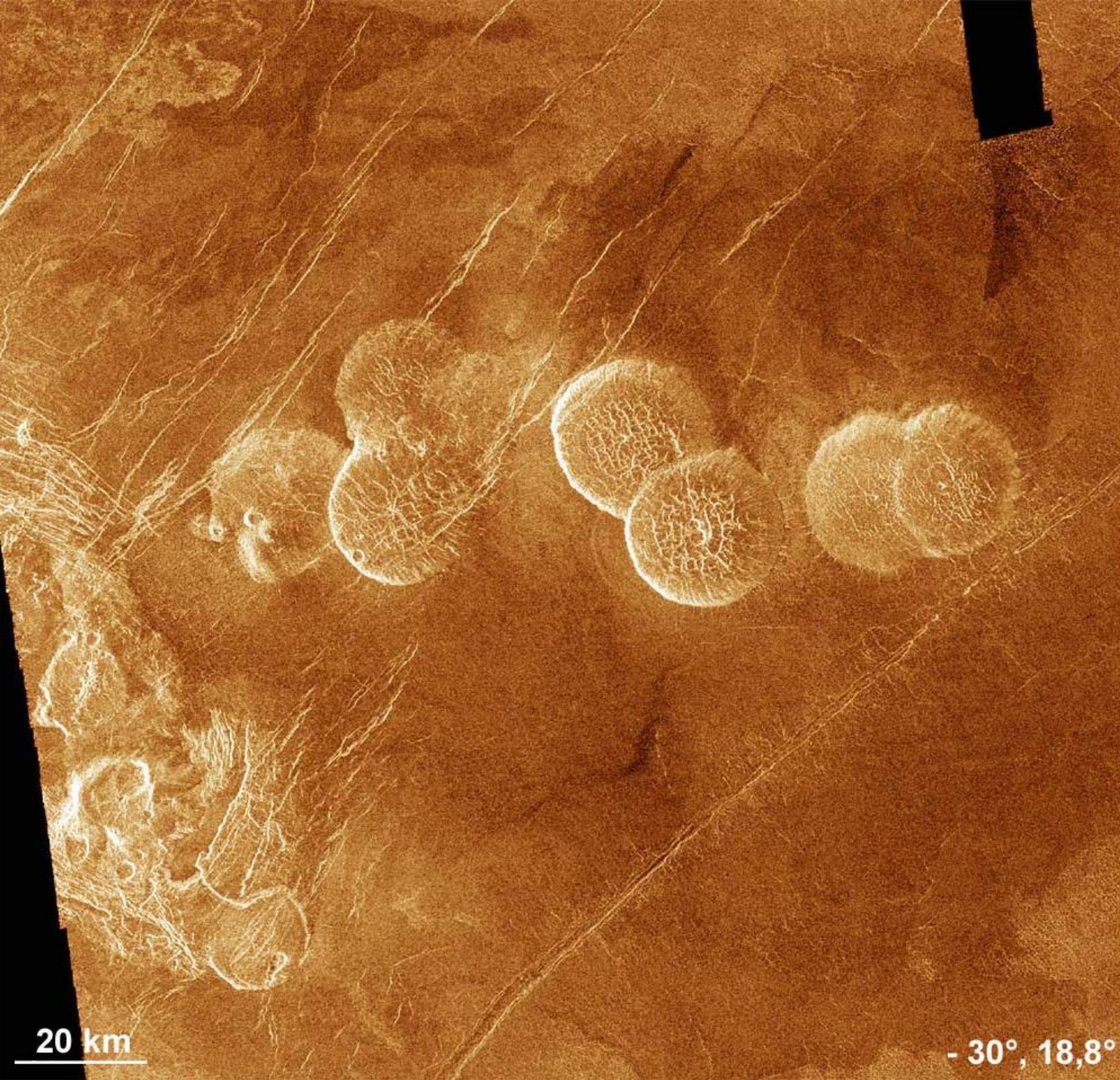
-9,4°, 247,5°





**Ici, les coulées de lave commencent à être visqueuses**





**Et voici des  
dômes, qui  
ressemblent  
à ...**



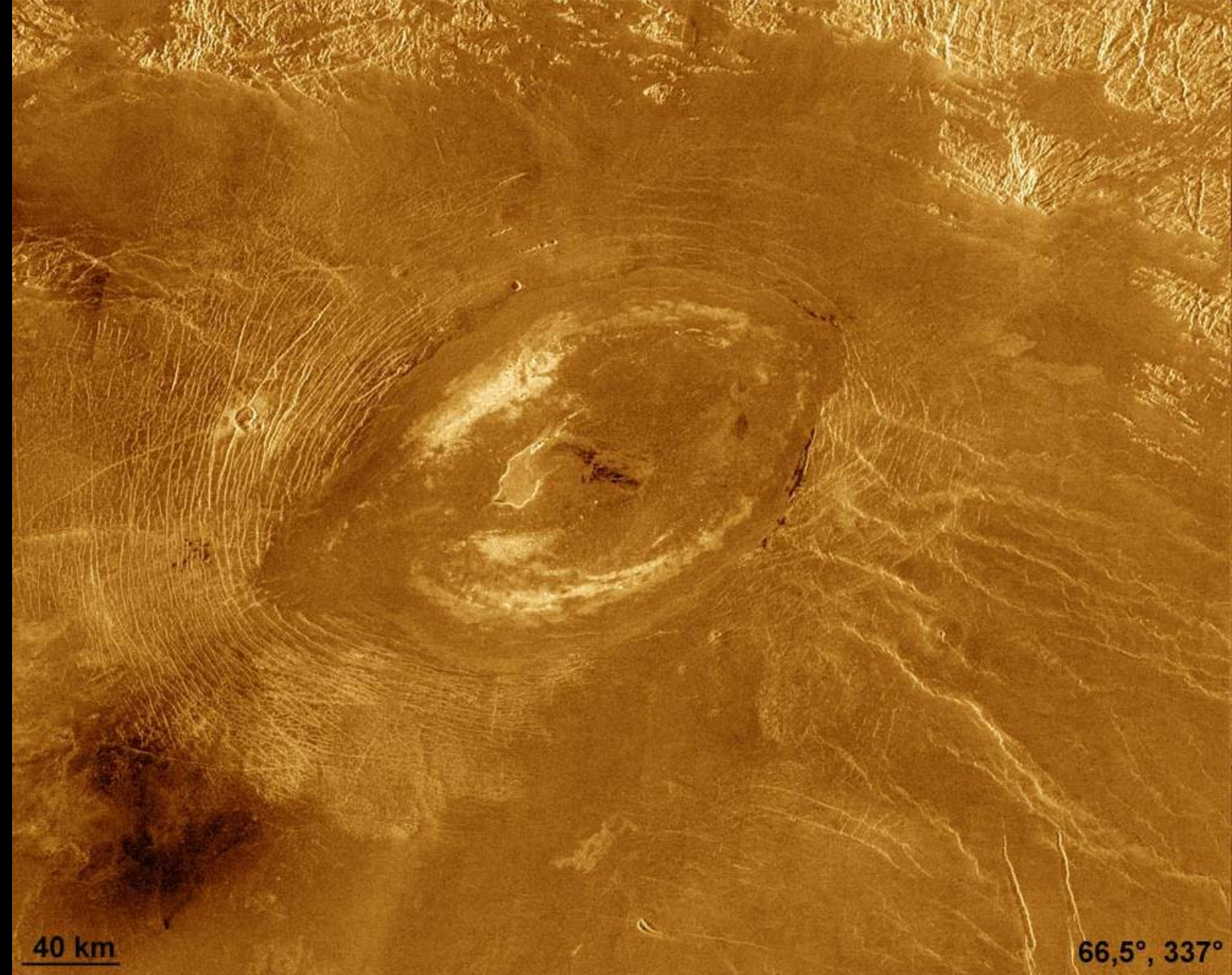


**Pour comparer, des  
dômes volcaniques en  
Californie,**

**dans l'état de  
Washington**





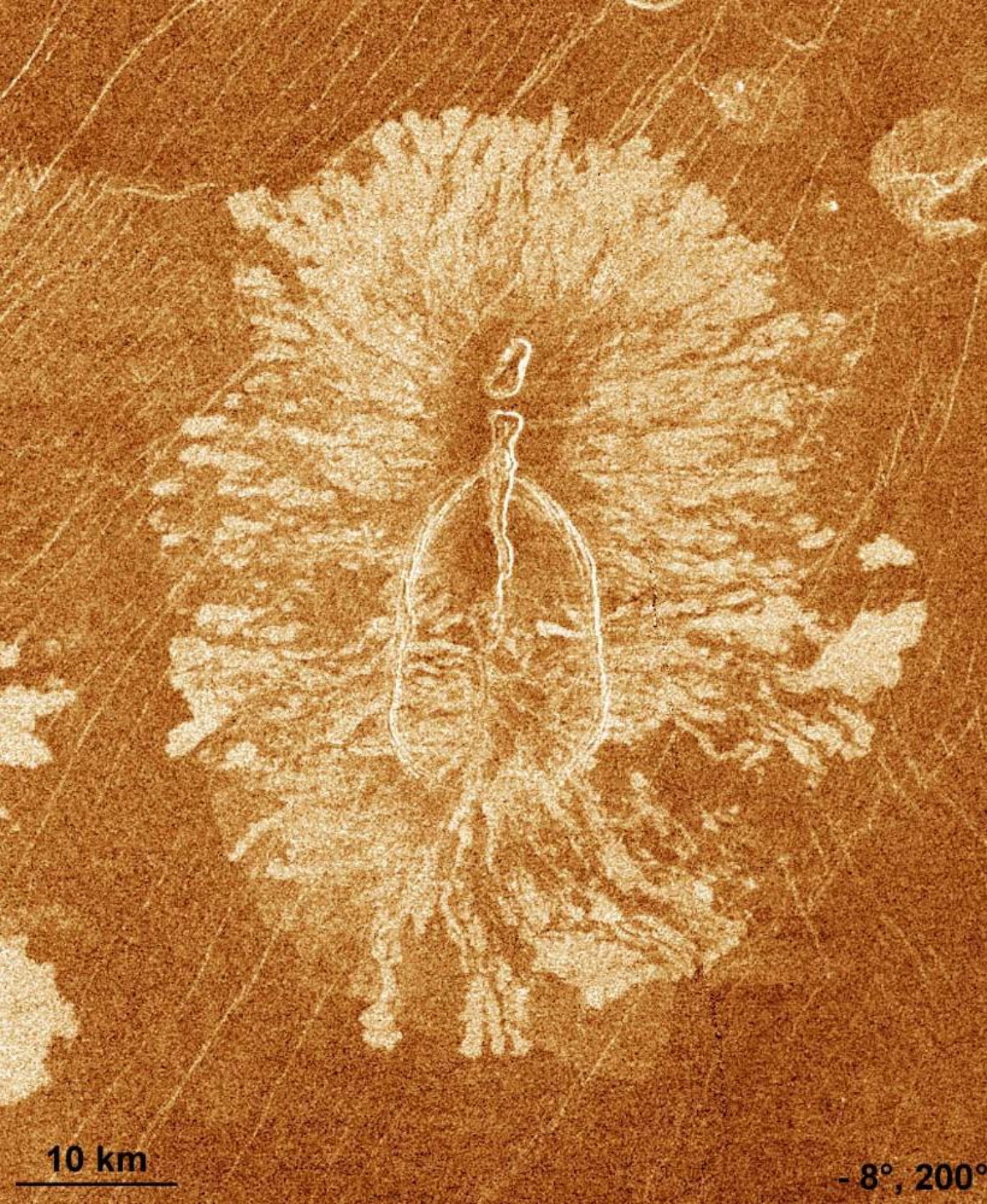


40 km

66,5°, 337°

**Une très belle caldéra**

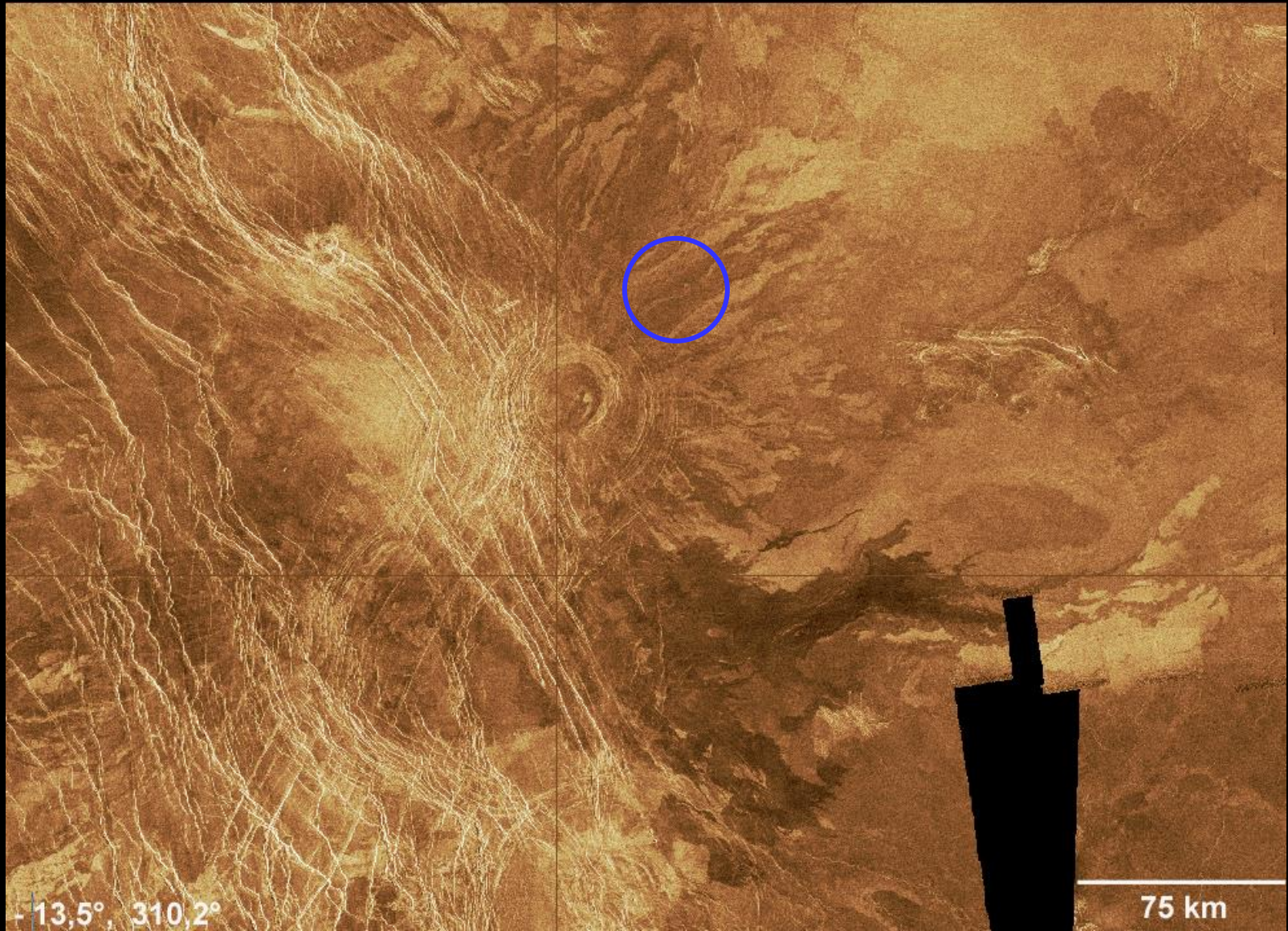




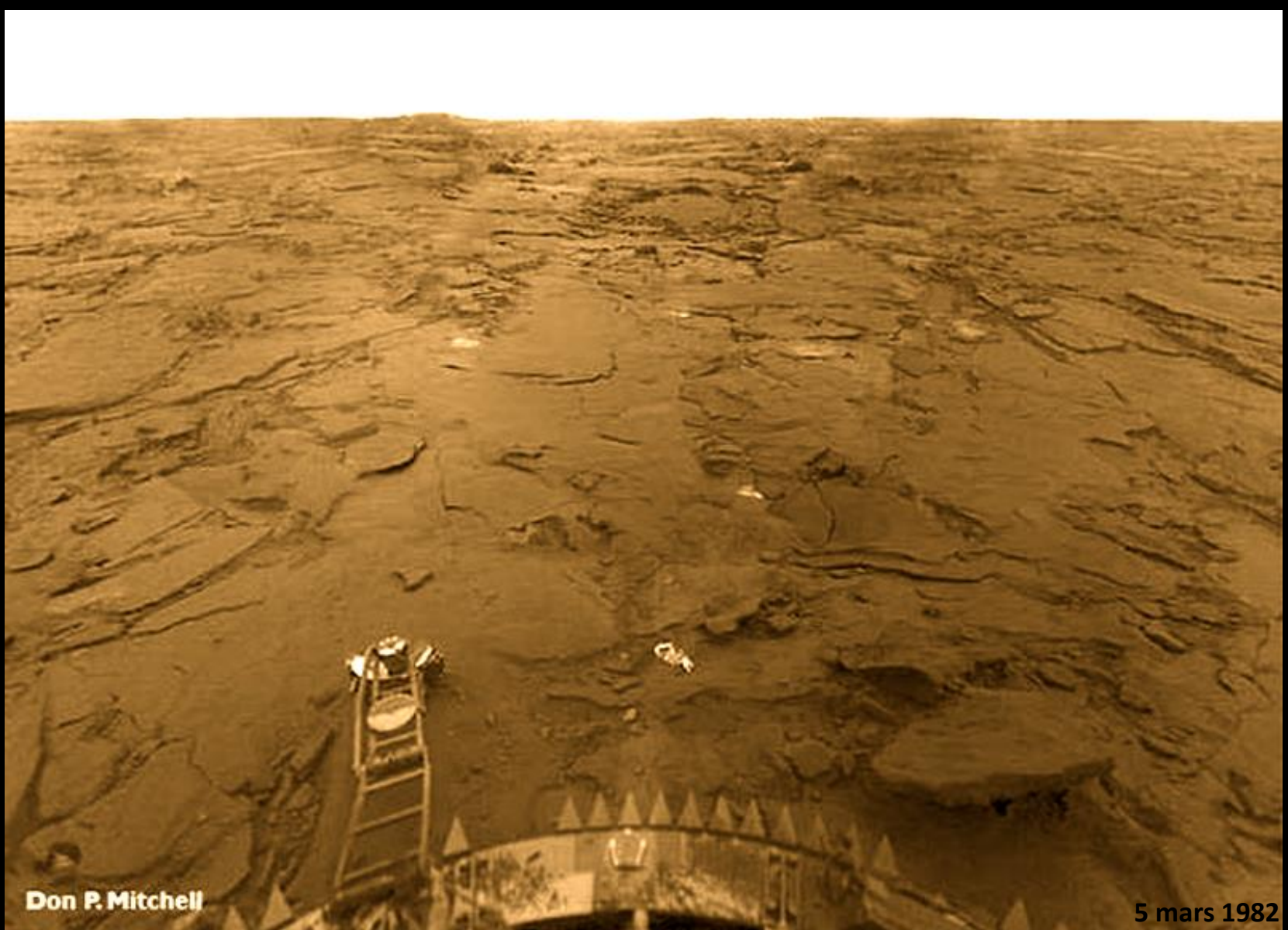
**Fente émissive  
ayant émis force  
coulées, bordée de  
deux lèvres avec  
au sommet une  
petite colline ...  
Cette structure est  
le prototype des  
structures  
appelées  
« anémone » par  
la Nasa. N'est-ce  
pas « mignon » et  
suggestif ?**



De 1975 à 1981, 5 sondes soviétiques se sont posées en douceur sur Vénus et ont transmis des images. Ici image radar du site d'atterrissage de Venera 14 vu par Magellan







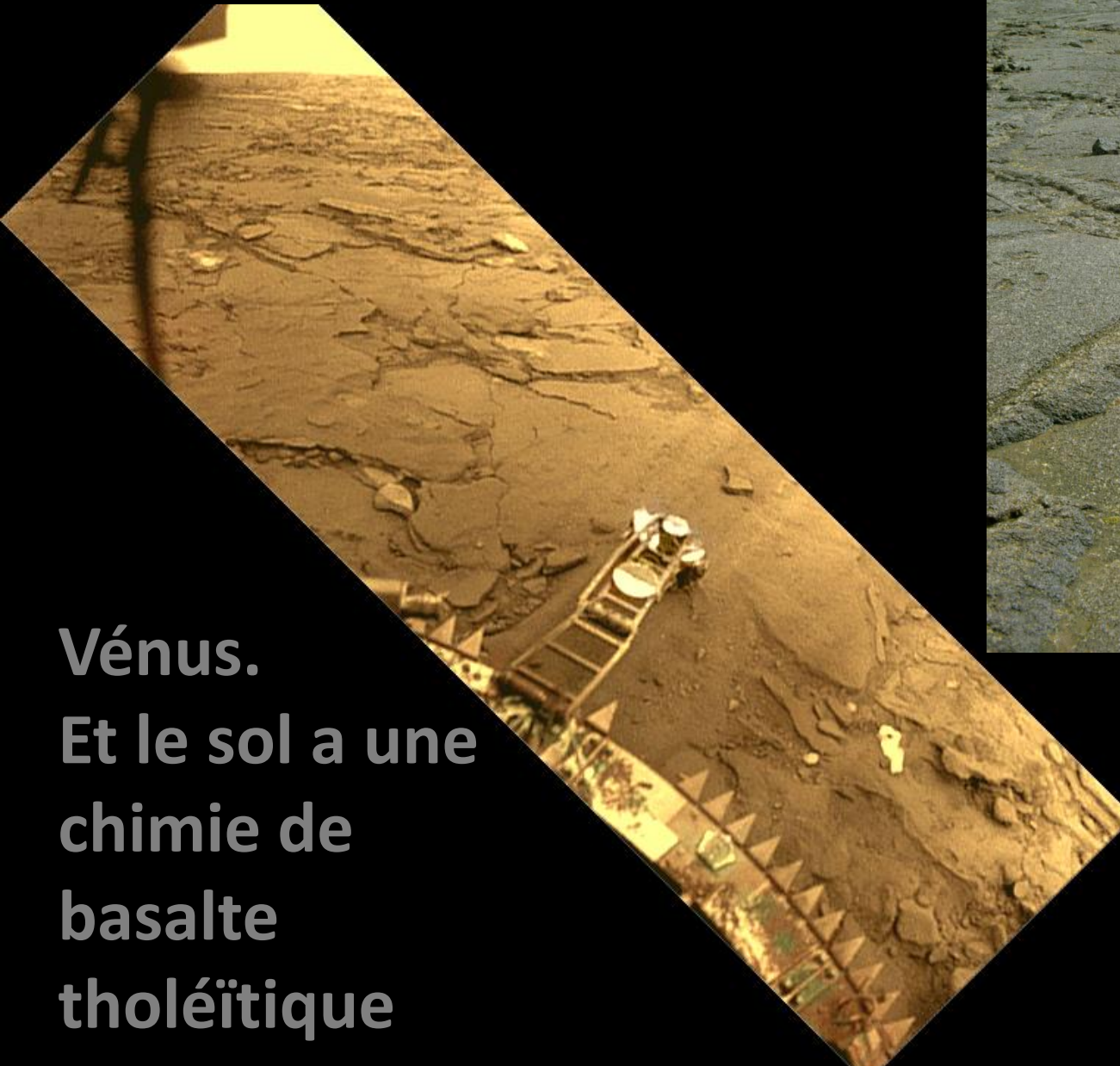
Don P. Mitchell

5 mars 1982

**Le paysage vénérien d'un coté de Venera 14 (« travaillé »  
et colorisé par Don P. Mitchell) , qu'on peut comparer avec ...**



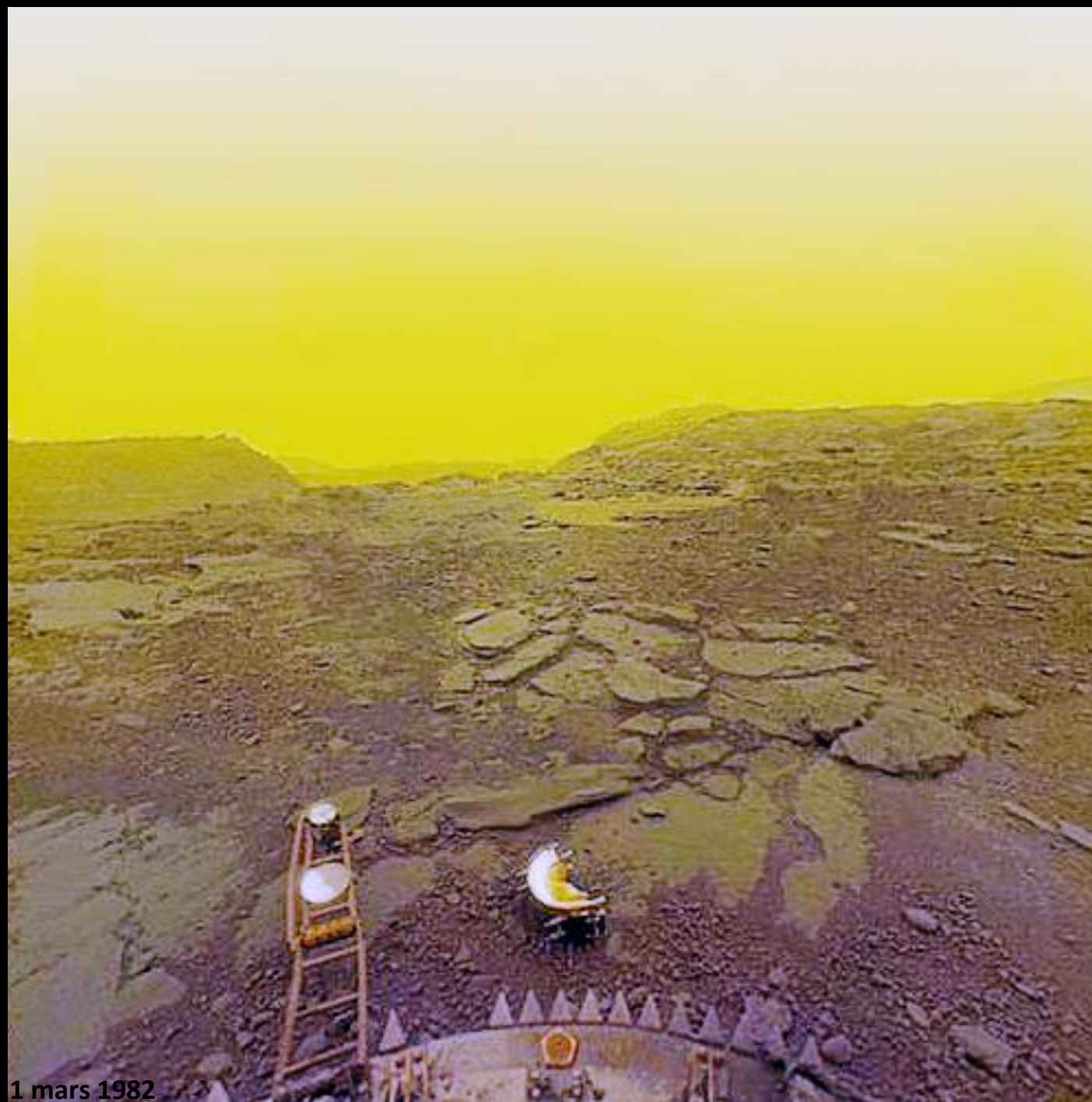
qu'on peut comparer avec ...



Vénus.  
Et le sol a une  
chimie de  
basalte  
tholéitique



Islande

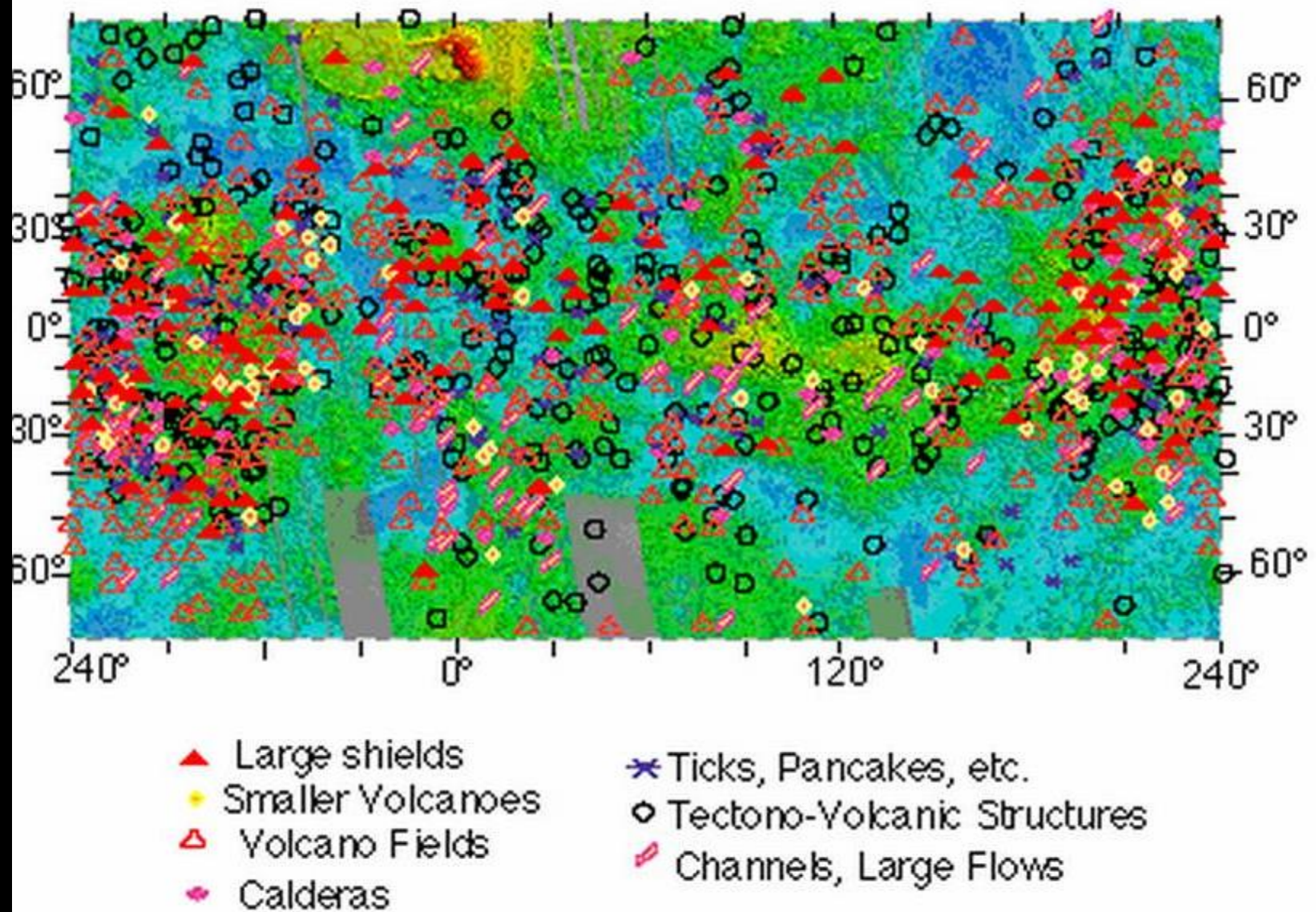


Et pour le plaisir, le paysage vu par Venera

**13** (« travaillé » et colorisé par Don P. Mitchell, version « artistique »)

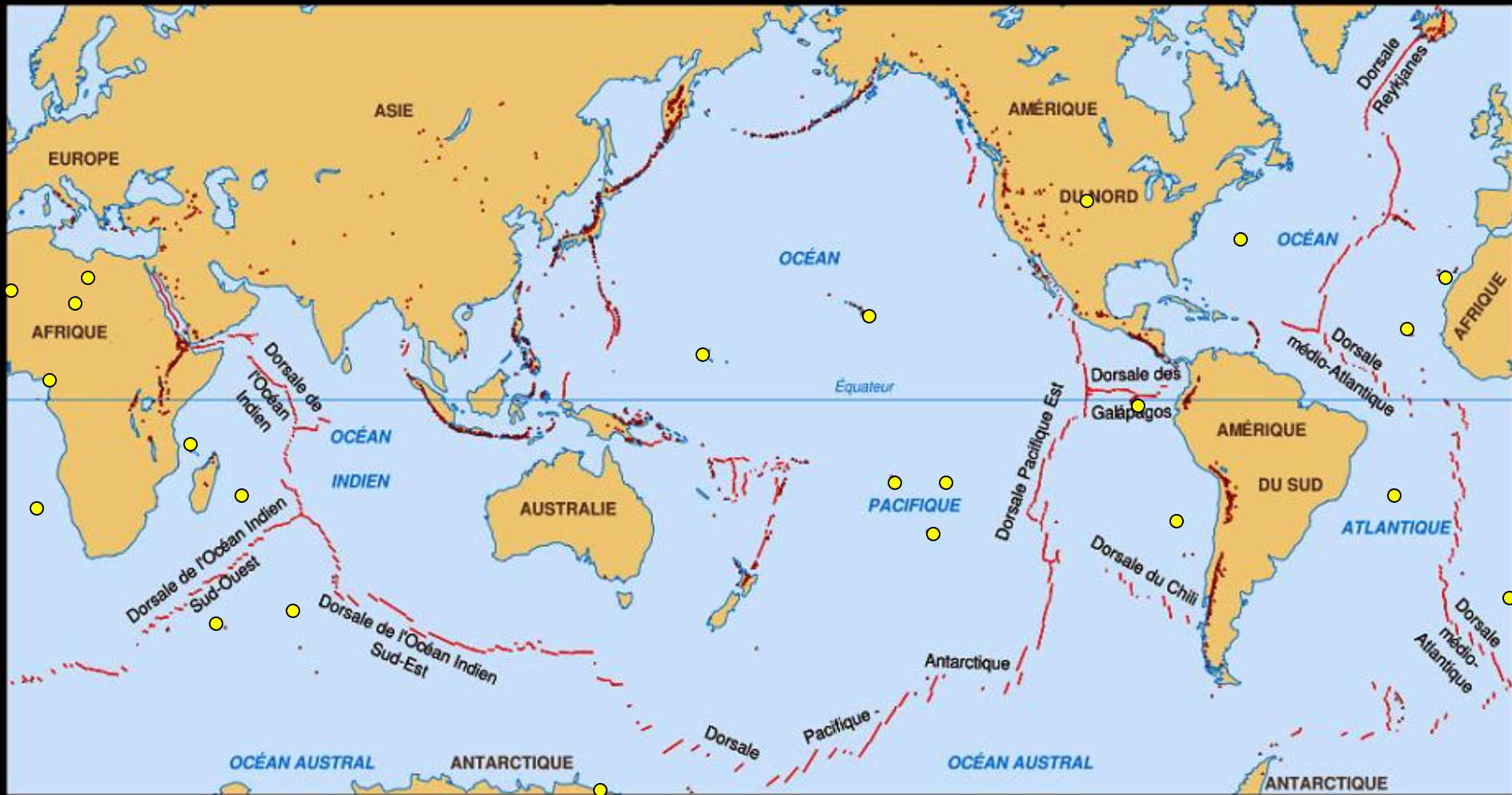


## Volcanoes on Venus



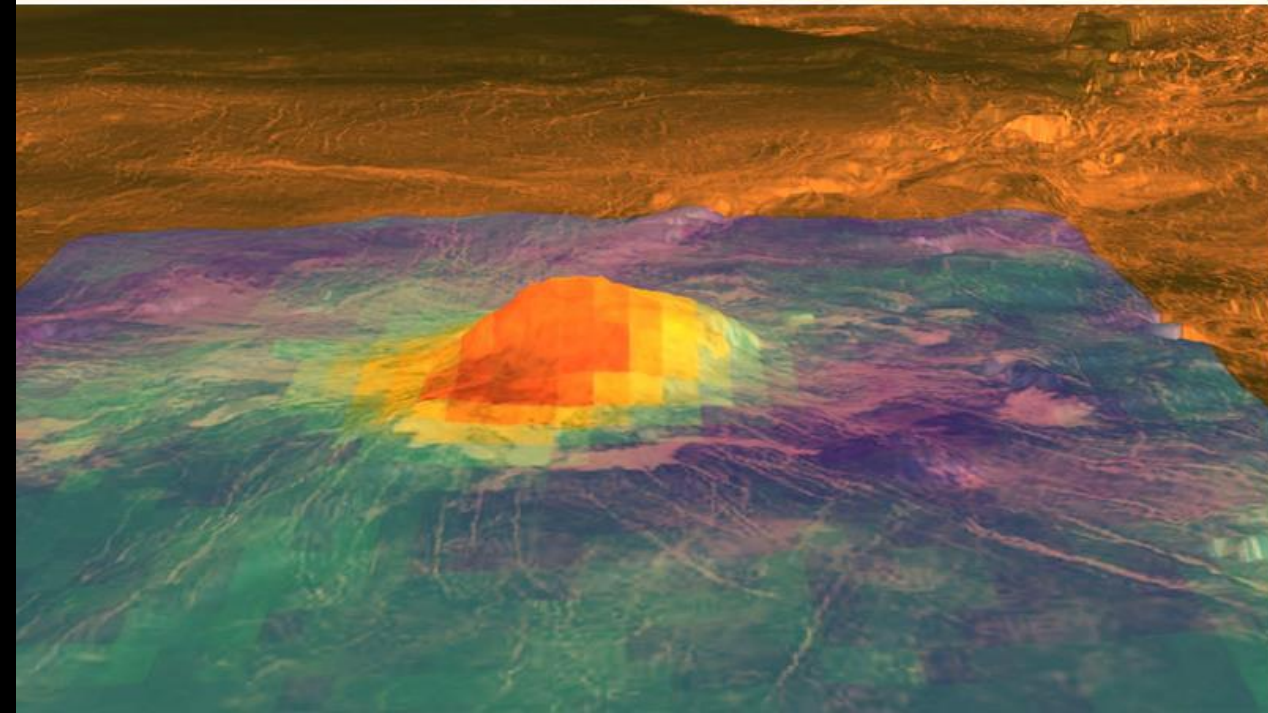
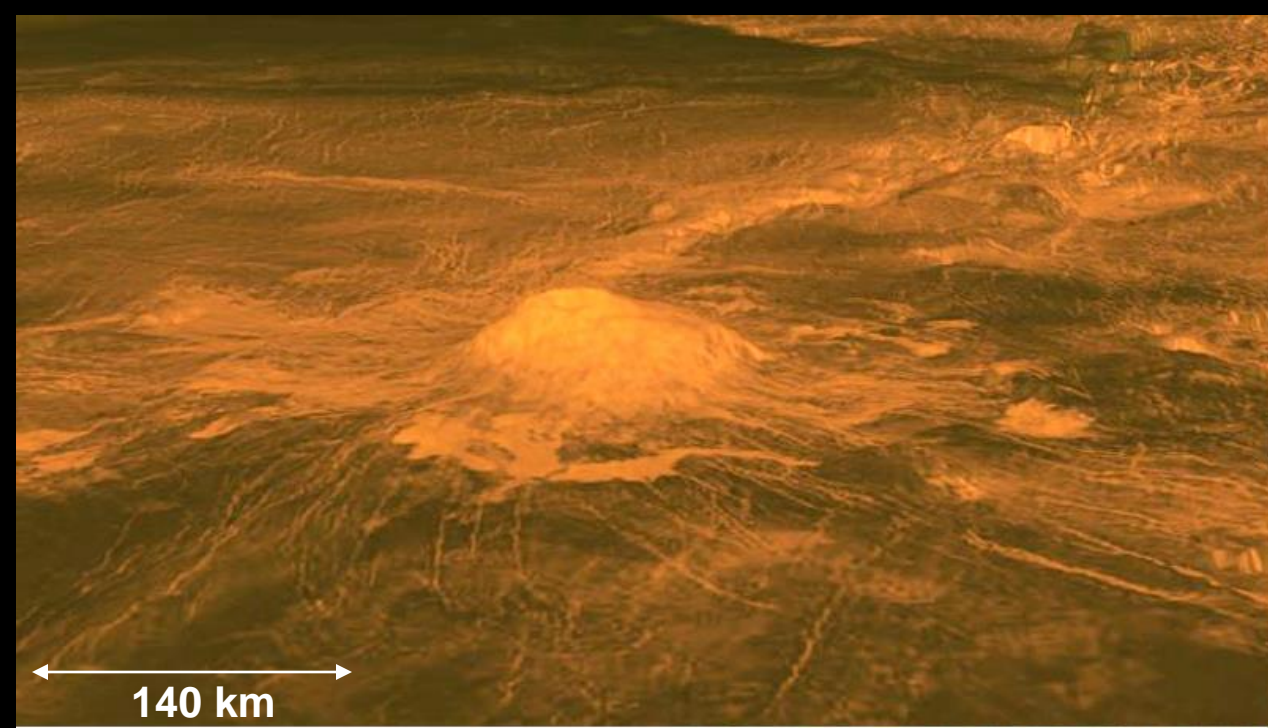
**La répartition des volcans vénériens. Il y en a partout, sans groupement particulier. On peut comparer avec ...**

... celle des volcans terrestres actifs ou récents.



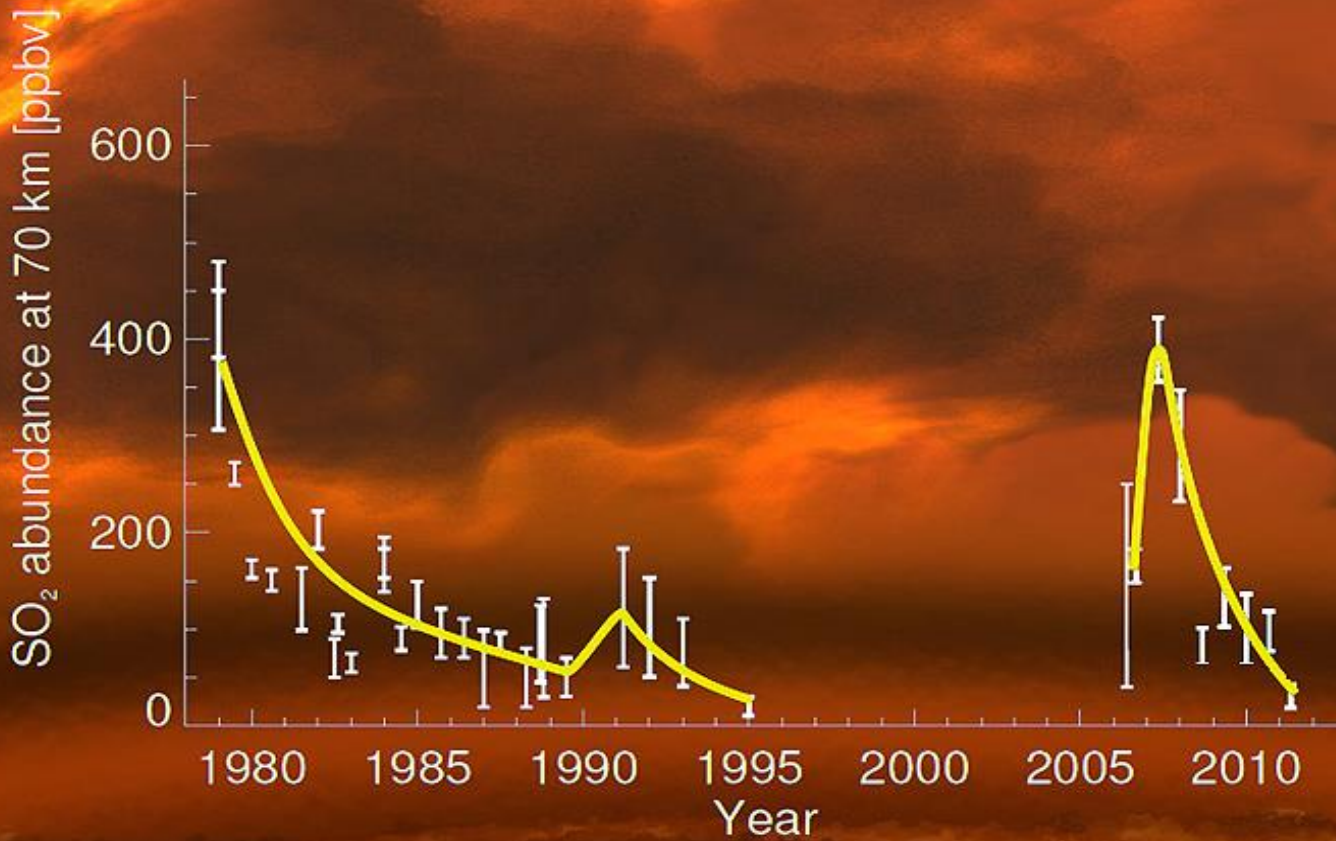
Sur Terre, la majorité des volcans forment des alignements ou des regroupements (petits points ou traits rouges), signature volcanique de la tectonique des plaques (seuls quelques uns sont « hors logique plaque »). Rien de tout ça sur Vénus → pas de tectonique des plaques.





**Le sommet de certains volcans est encore chaud (ou du moins absolument pas altéré).**

**Le volcanisme est encore actif !**



[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Venus\\_Express/Have\\_Venusian\\_volcanoes\\_been\\_caught\\_in\\_the\\_act](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Venus_Express/Have_Venusian_volcanoes_been_caught_in_the_act)  
<http://www.nature.com/ngen/journal/v6/n1/full/ngen1675.html>

**Dernière nouvelle (janvier 2013) : confirmation des «bouffées» d'oxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère de Vénus. Des éruptions volcaniques géantes sont une des explications possibles.**



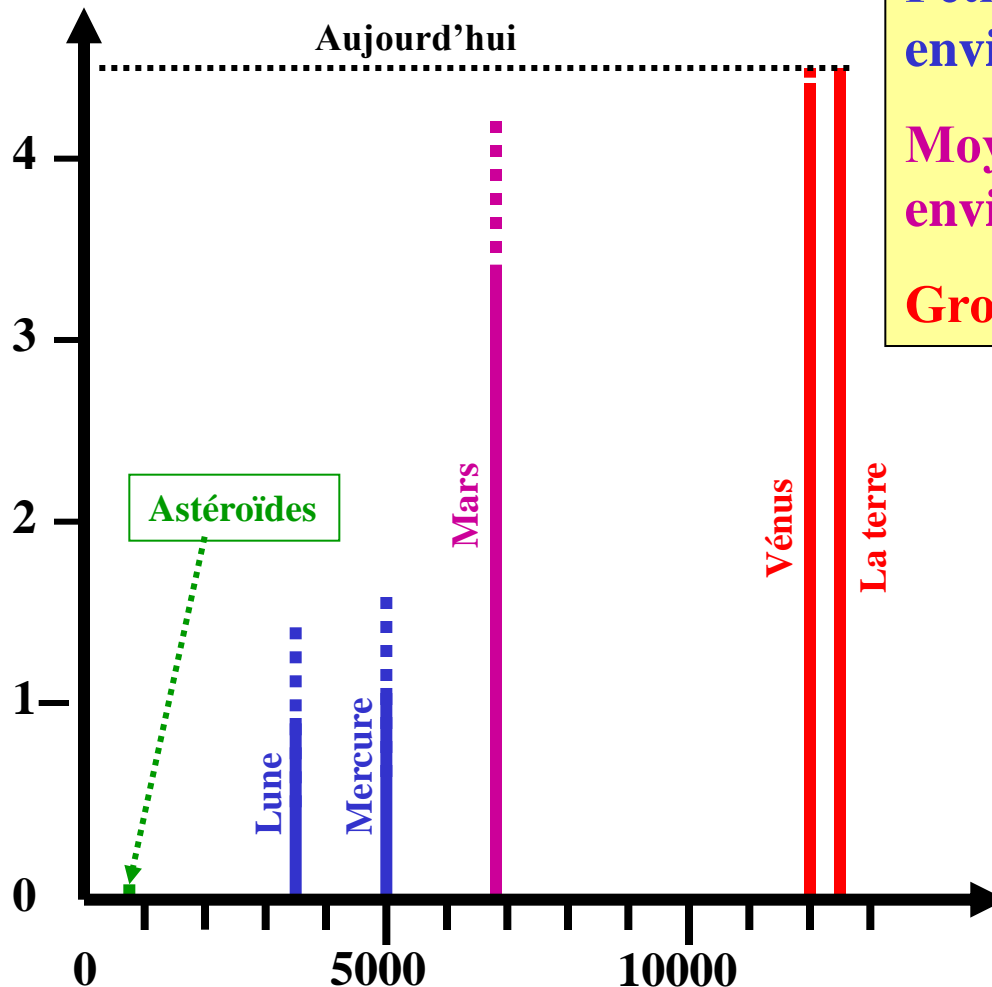


**Le volcanisme de Vénus, comme celui de la Terre, est actif.**

**Pourquoi la Terre et Vénus ont un volcanisme actif alors que celui de Mars est éteint depuis 100 millions d'années et celui de la Lune (et de Mercure) depuis 3 milliards d'années ?**

# Conclusion pour l'activité interne : des durées différentes

Durée de l'activité interne (volcanisme majeur) en Ga



Tout petit : pas (ou peu) d'activité

Petit : durée de l'activité environ 1 Ga

Moyen : durée de l'activité environ 4 Ga

Gros : l'activité dure encore

Diamètre des corps (km)



## TEMPERATURE A L'INTERIEUR D'UNE PLANETE

Production de chaleur :  $Q \sim q \cdot V \sim q \cdot R^3$

Perte de chaleur :  $P \sim k \cdot S \cdot \Delta T \sim k \cdot R^2 \cdot T$

Avec :

~ : fonction de

q : chaleur produite par unité de volume (radioactivité ...)

V : volume de la planète

S : surface de la planète

R : rayon de la planète

k : « coefficient de perte » (ex : conductivité thermique,...)

T : température interne de la planète

$\Delta T$  : température interne – température externe

A l'équilibre et en régime stationnaire, ce qu'on suppose vrai après 4,5 G.A., les pertes de chaleurs compensent la production :

$$Q = P \rightarrow q \cdot R^3 \sim k \cdot R^2 \cdot T$$

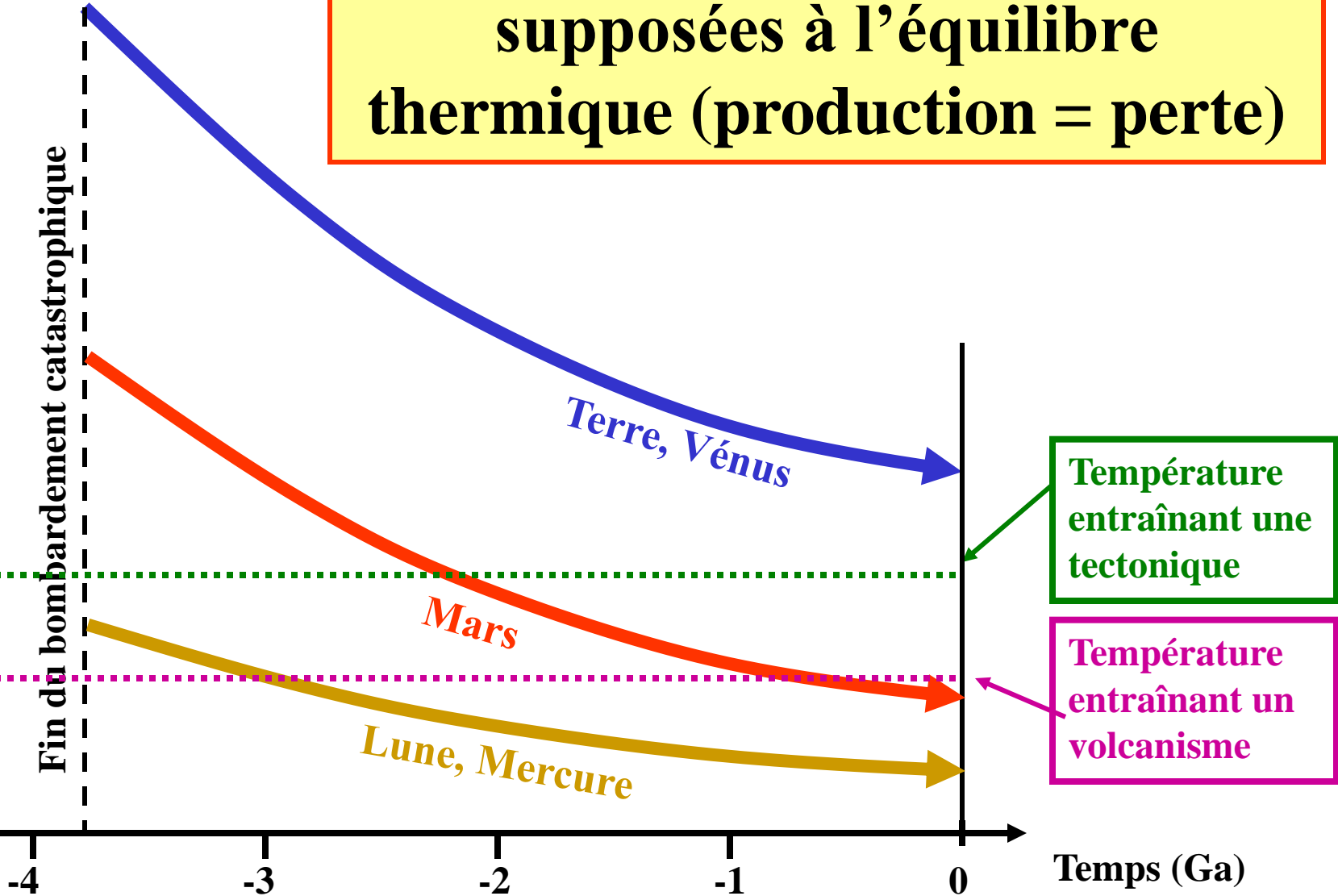
$$\rightarrow T \sim R \cdot q/k$$

Plus une planète est grosse, plus elle est chaude  
et géologiquement active

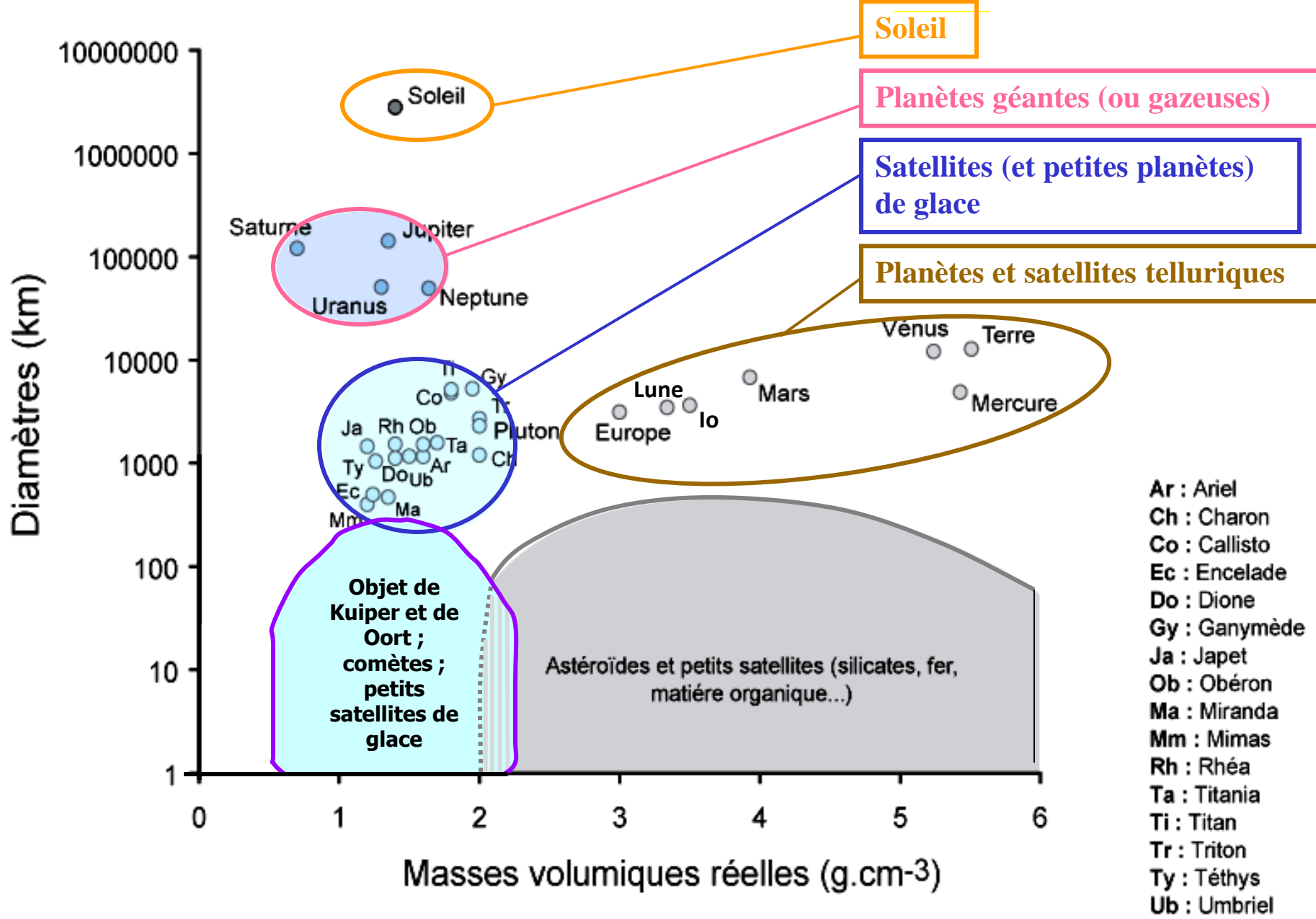
# L'évolution de la température interne des planètes telluriques supposées à l'équilibre thermique (production = perte)

Température interne (à l'équilibre)

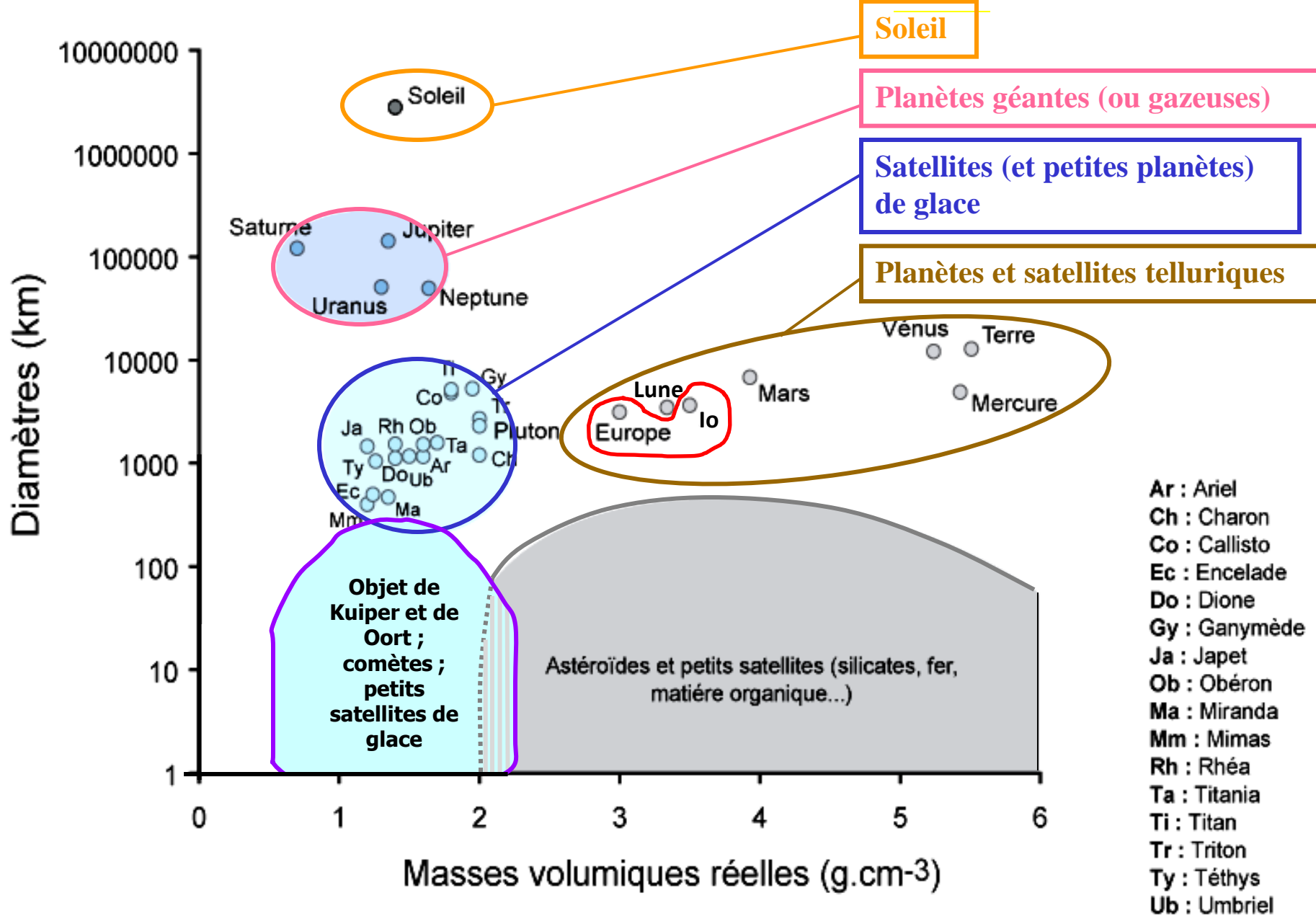
Fin du bombardement catastrophique





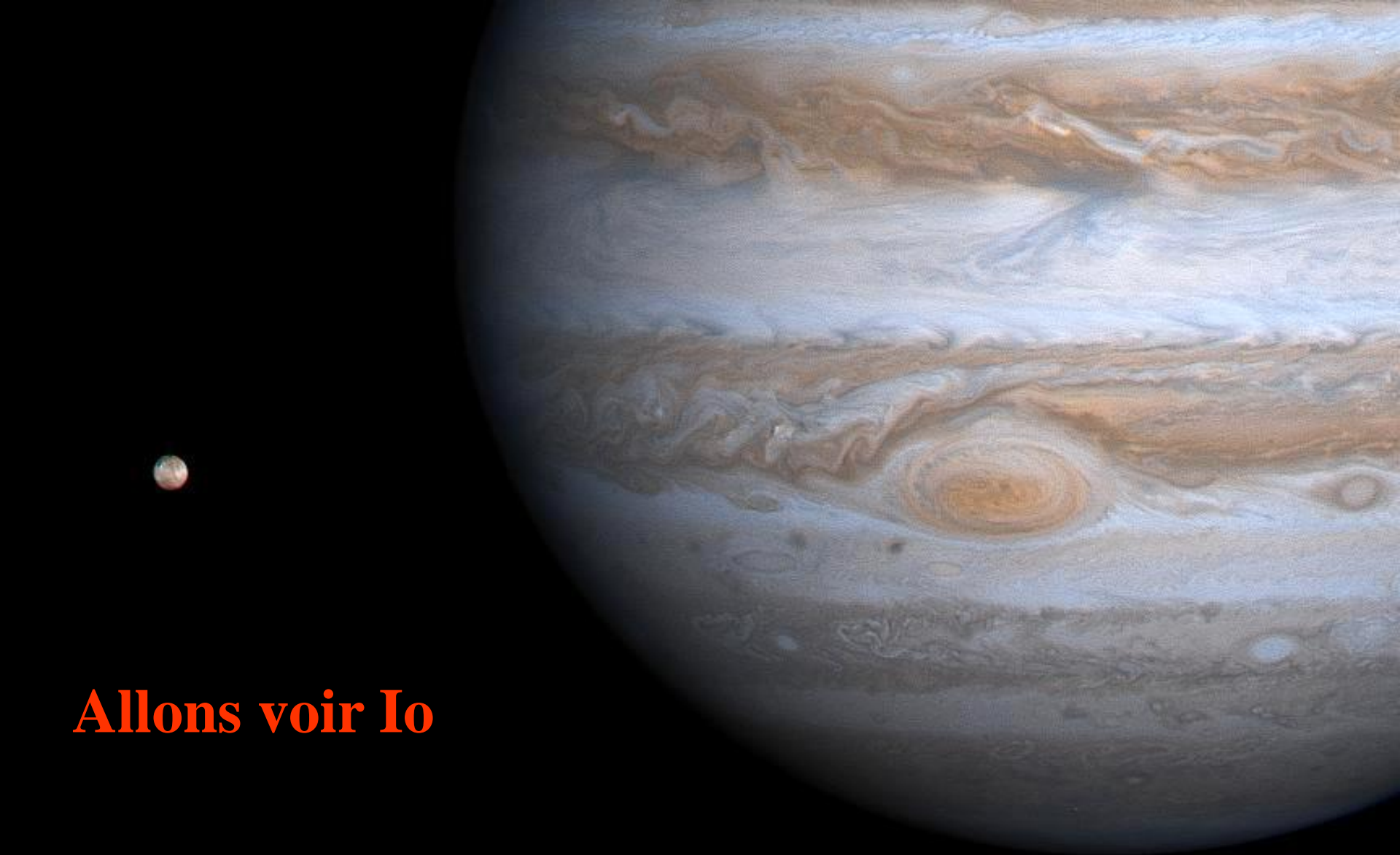


# La classification géologique du système solaire

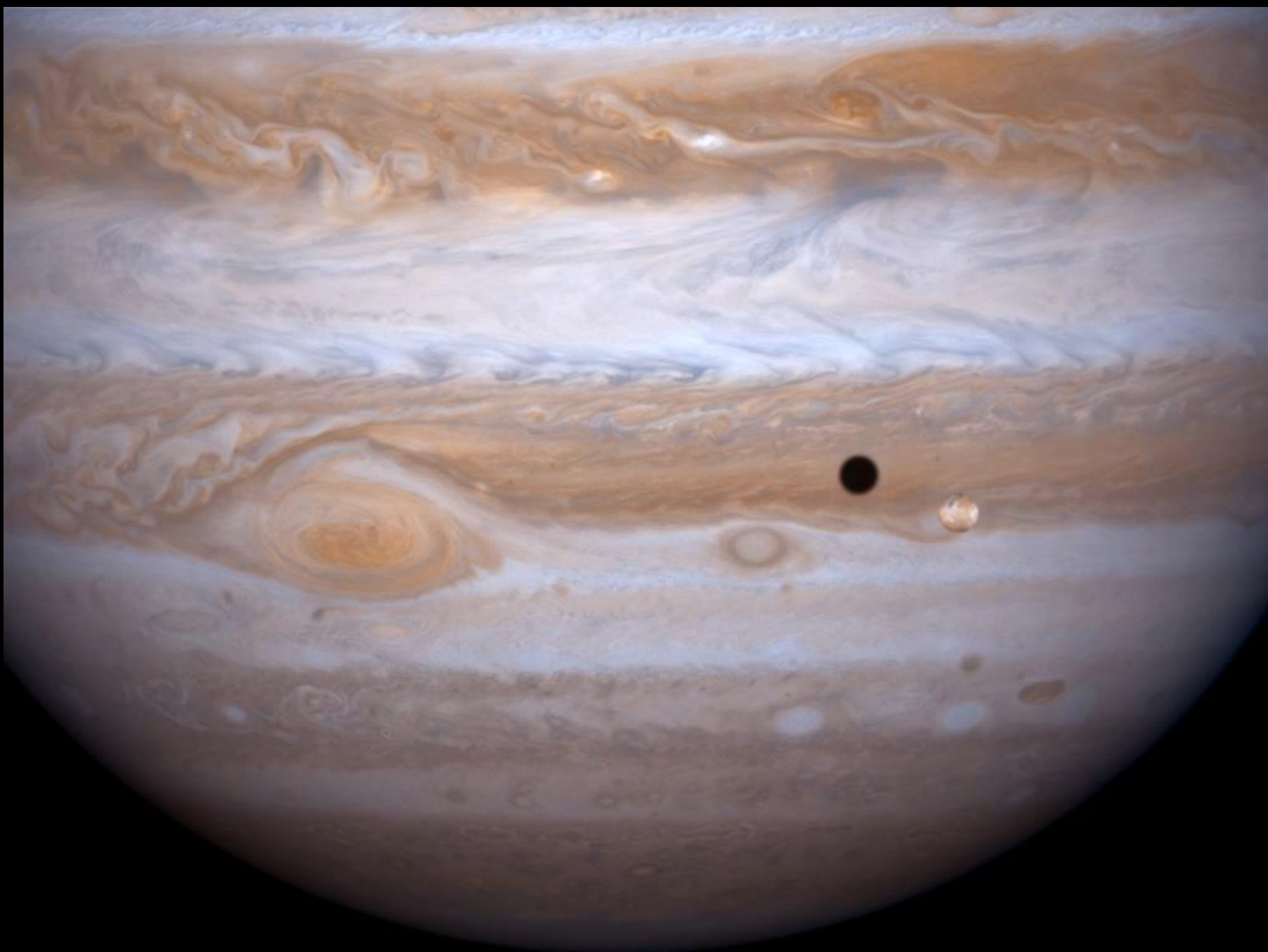


# La classification géologique du système solaire





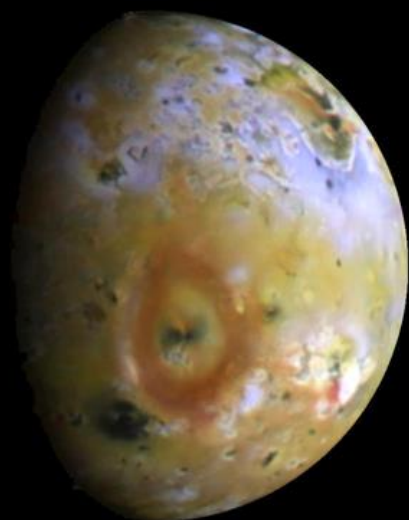
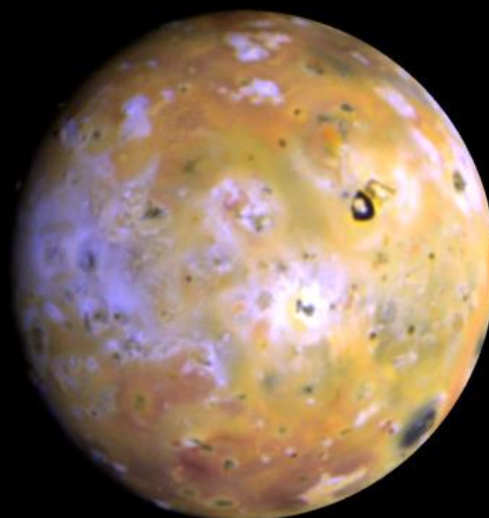
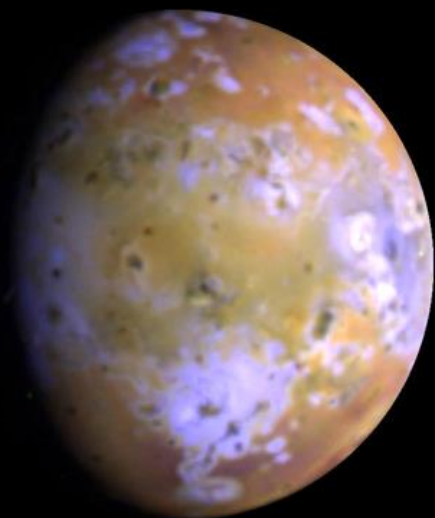
**Allons voir Io**

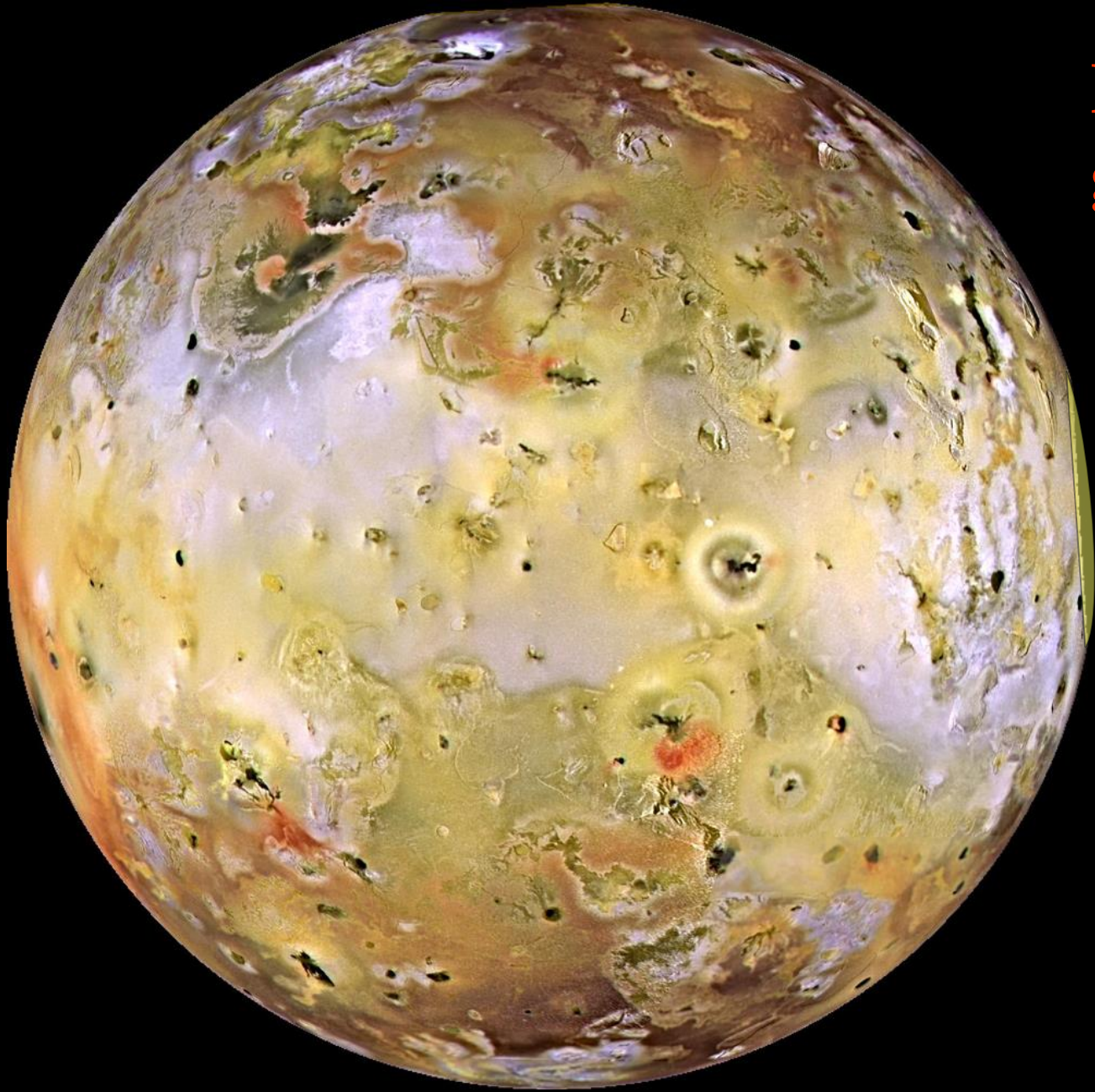


**Une éclipse de soleil sur Jupiter, due à Io**



**Six**  
**« phases »**  
**de Io**

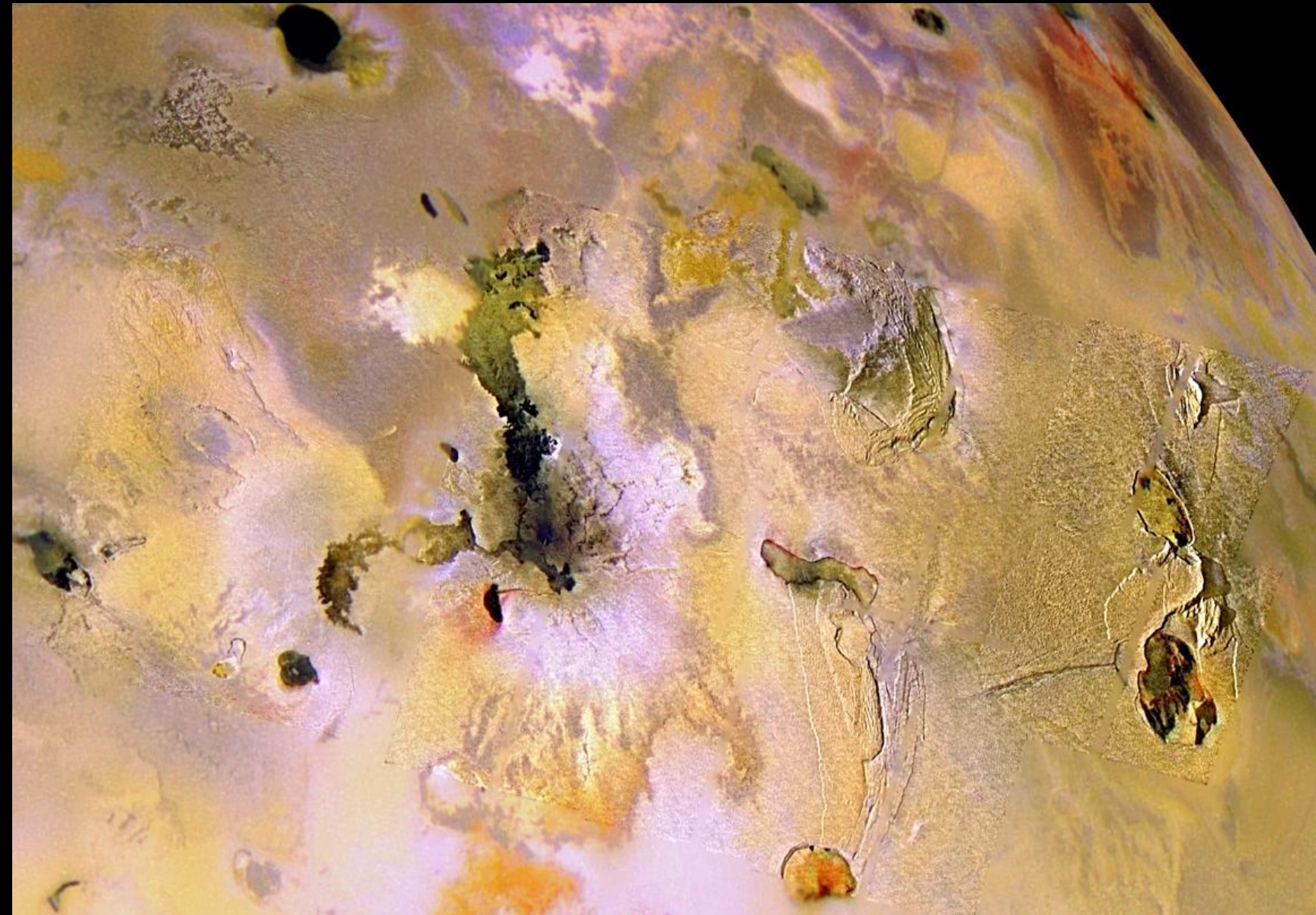




**Io dans toute sa  
gloire**



# Failles, montagnes, coulées de lave ...

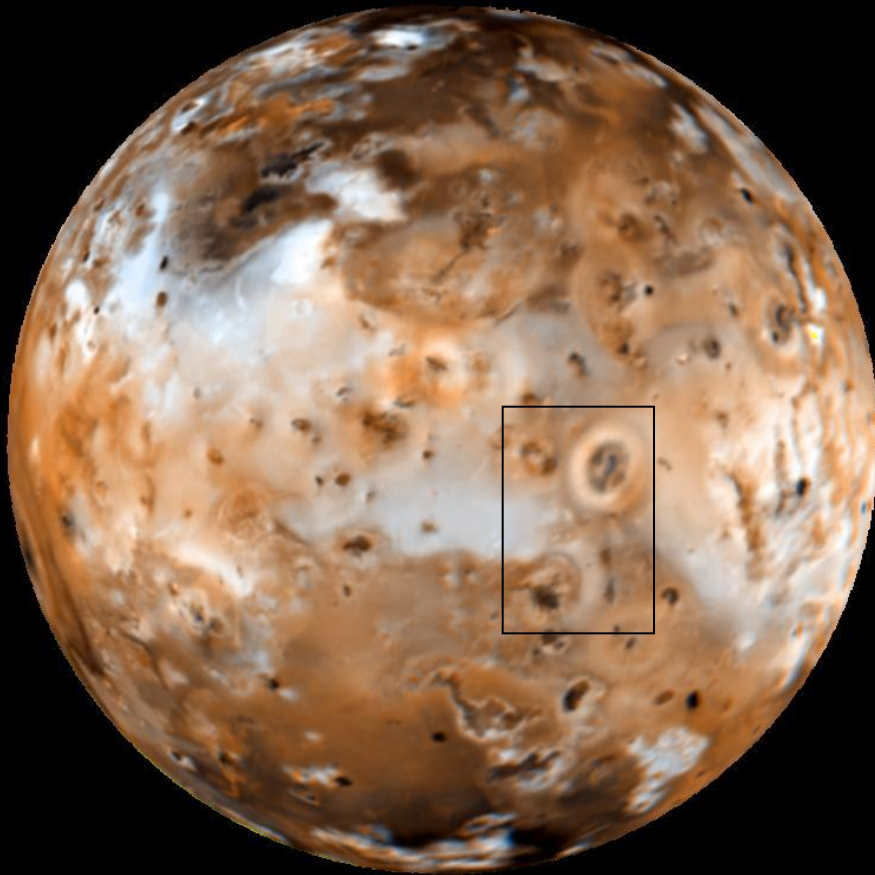




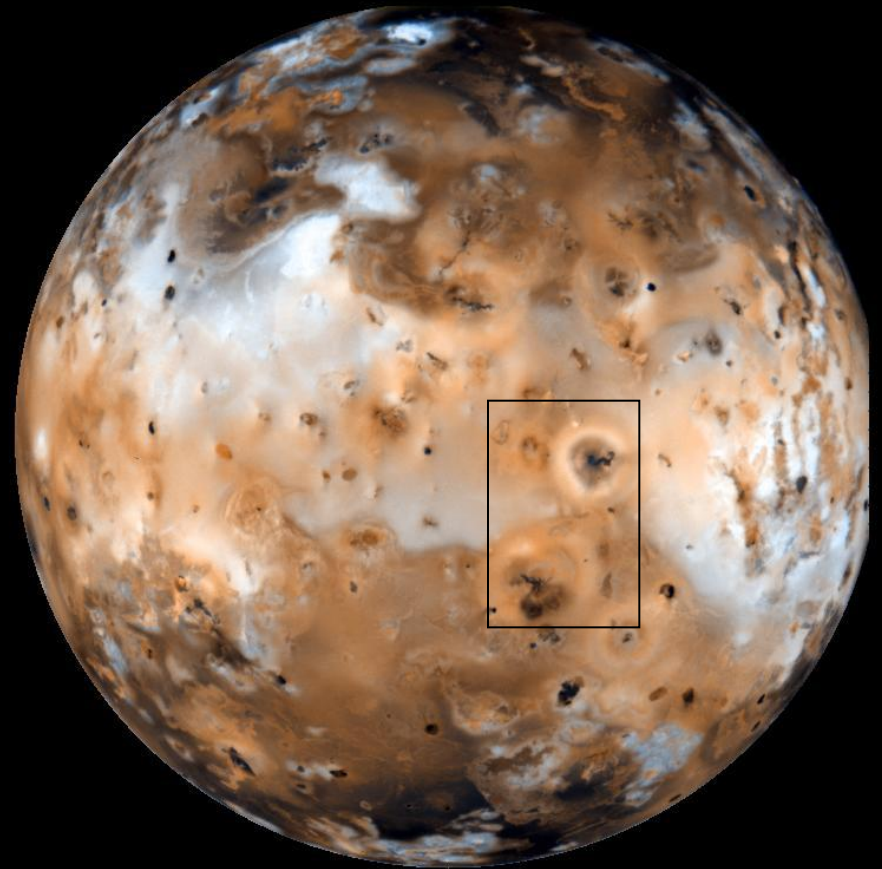
**Volcan et coulées**



# En 17 ans Io change !

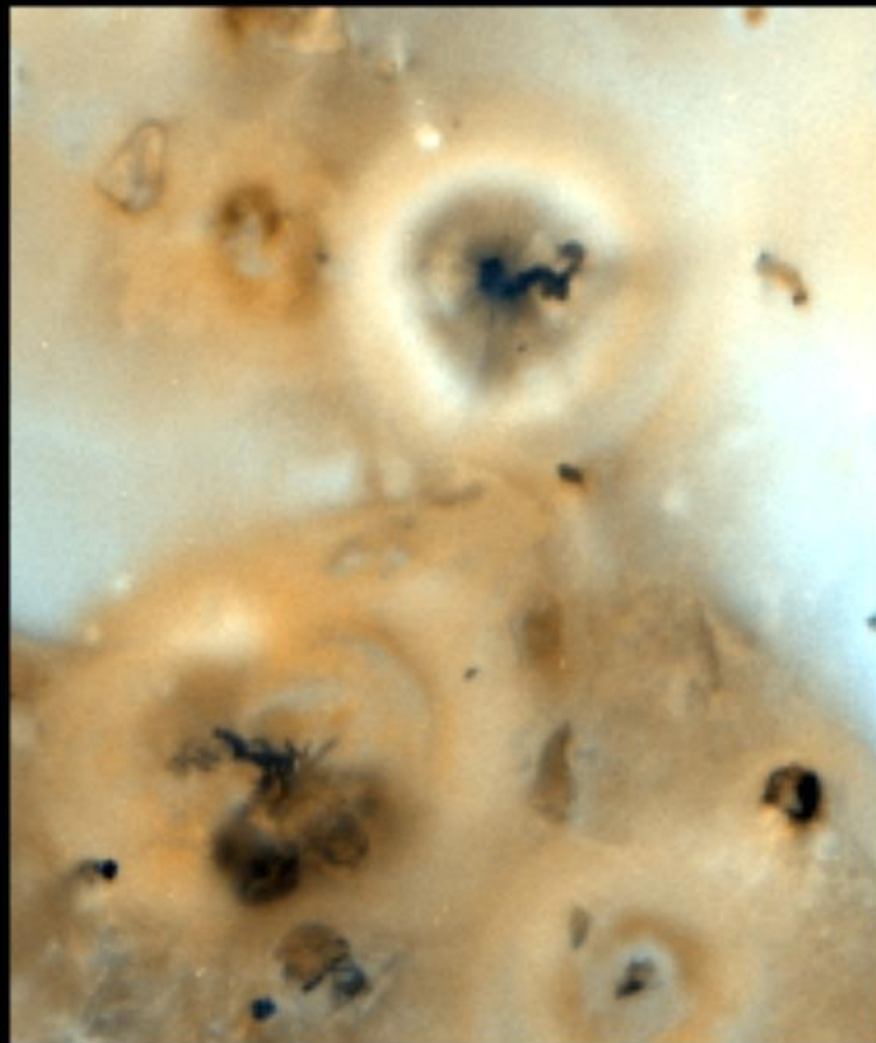


1979 (Voyager)

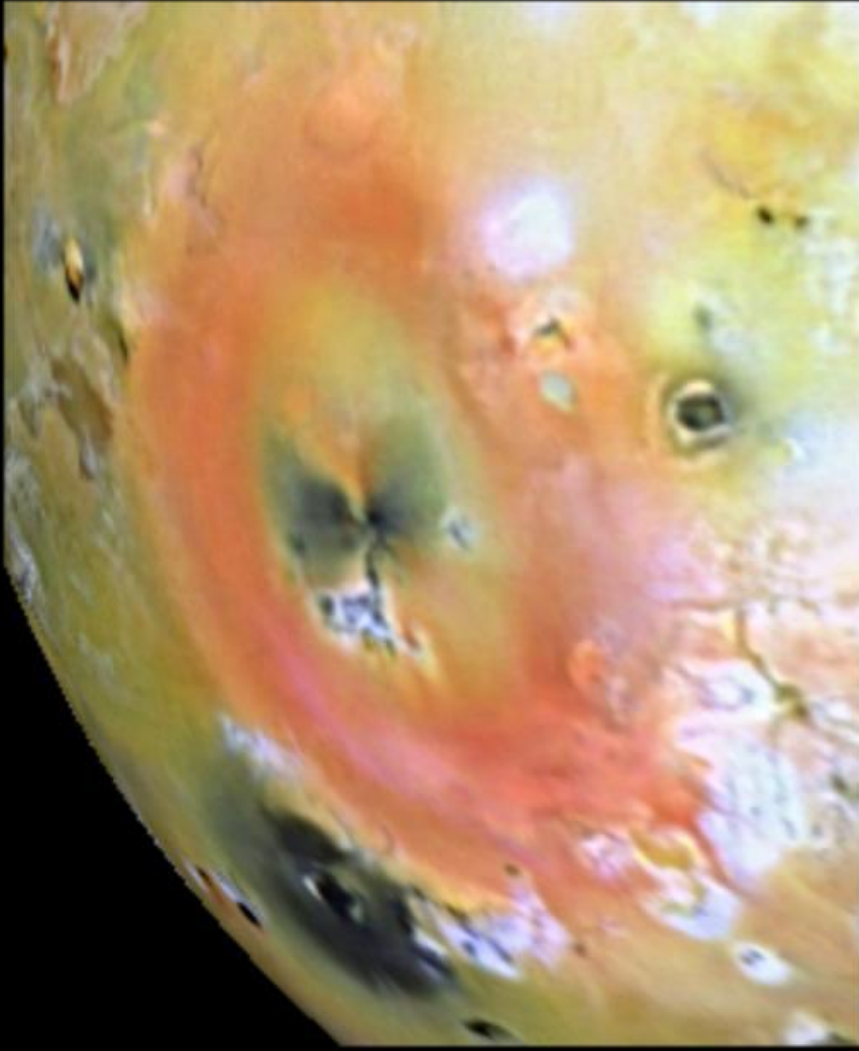


1996 (Galileo)

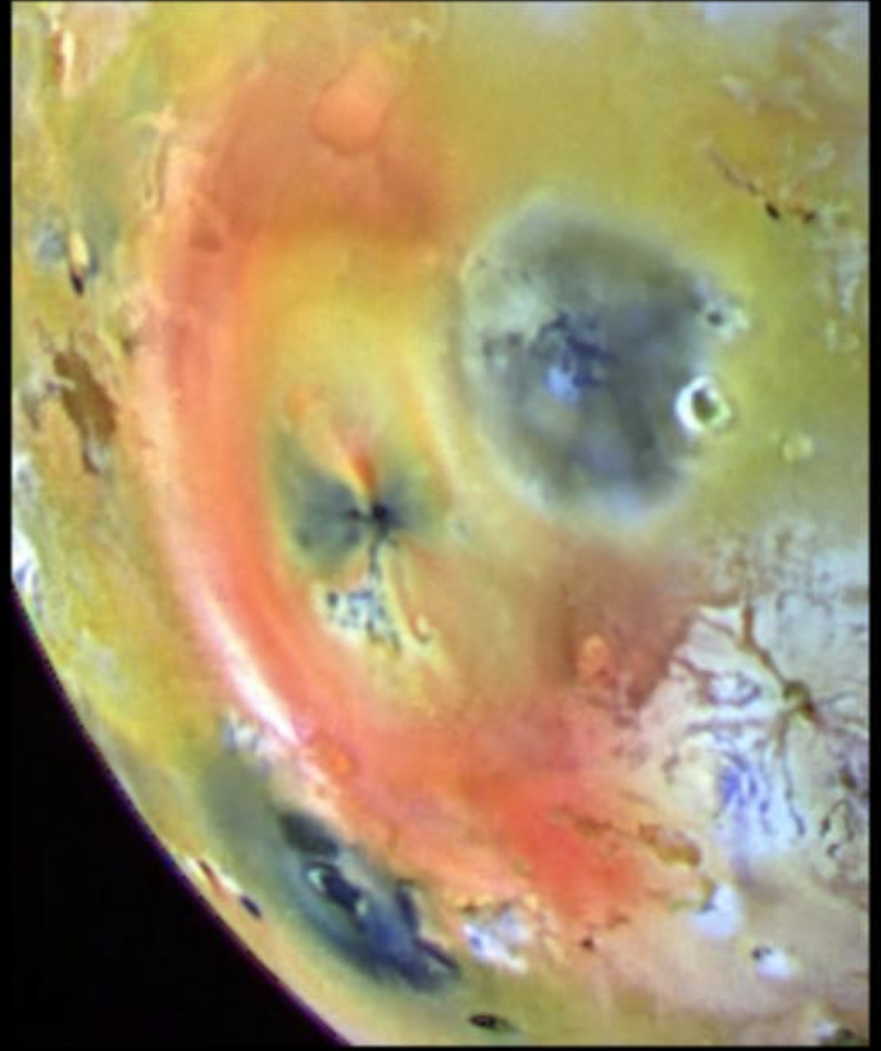
# Détail des changements





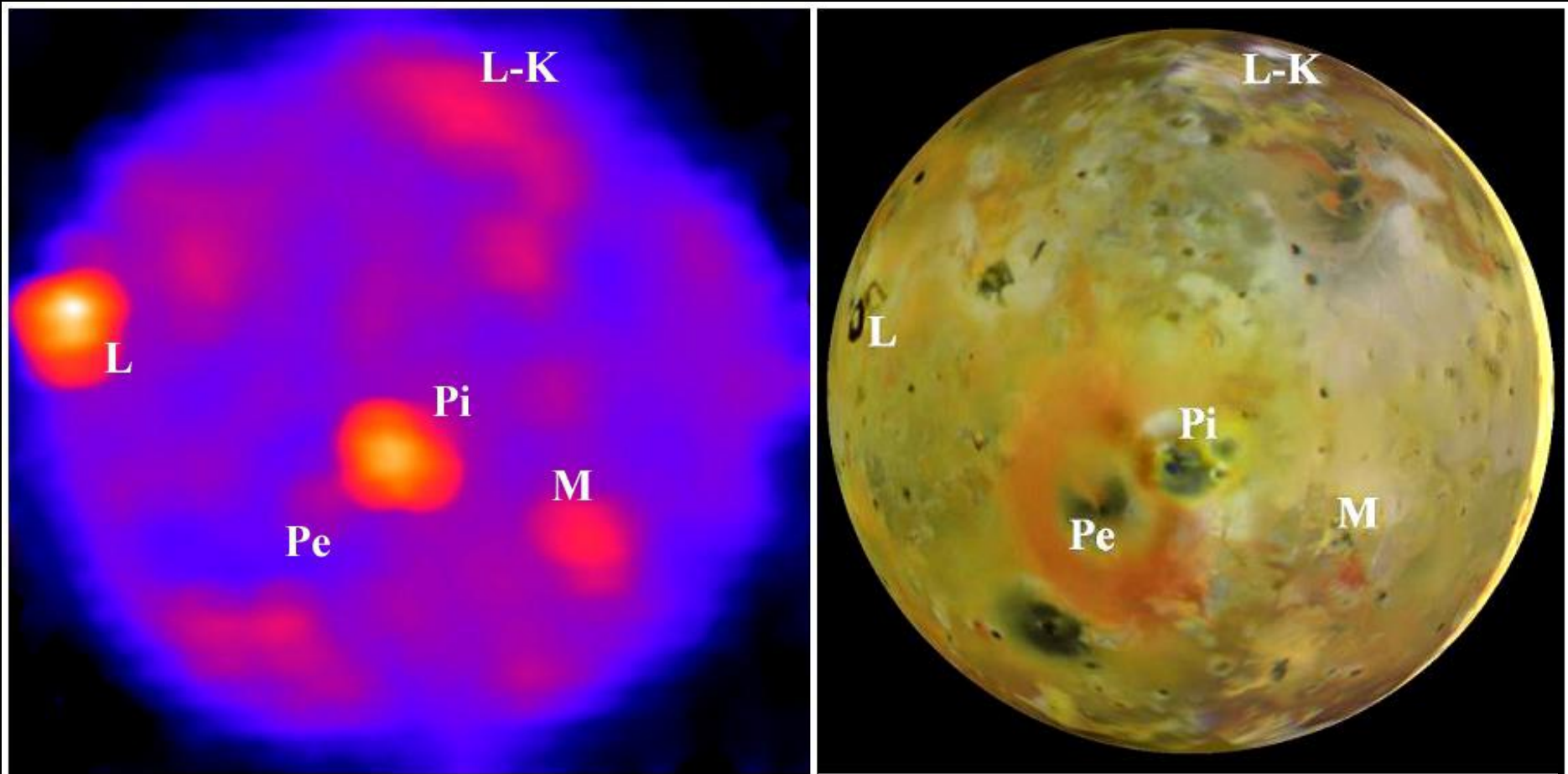


**Avril 1997**



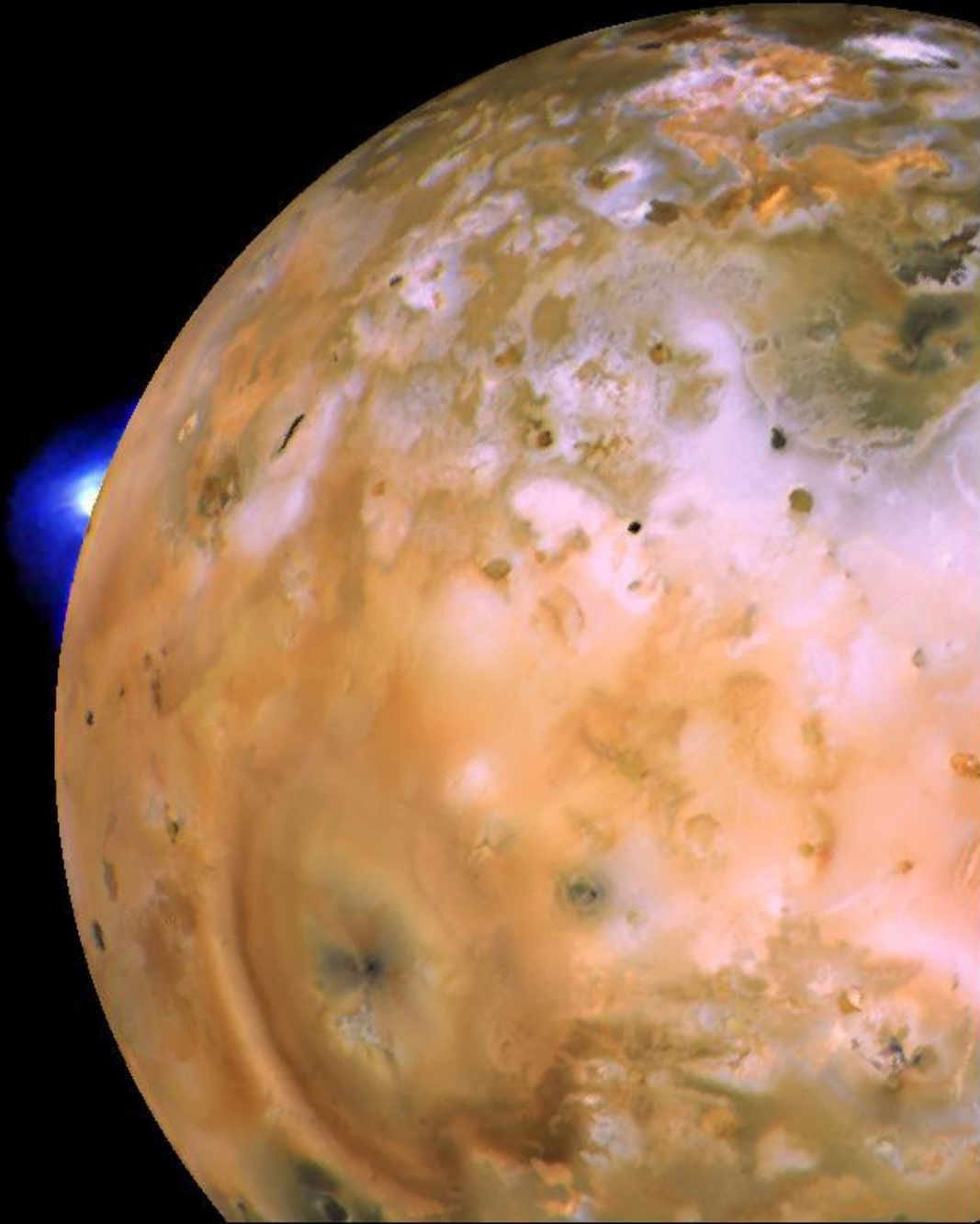
**Septembre 1997**

**Io, dont la T superficielle est « normalement » de 90 K (- 180°C) possède des zones à T > 1500 K (+1230°C). Il y a des volcans hyper-chauds.**

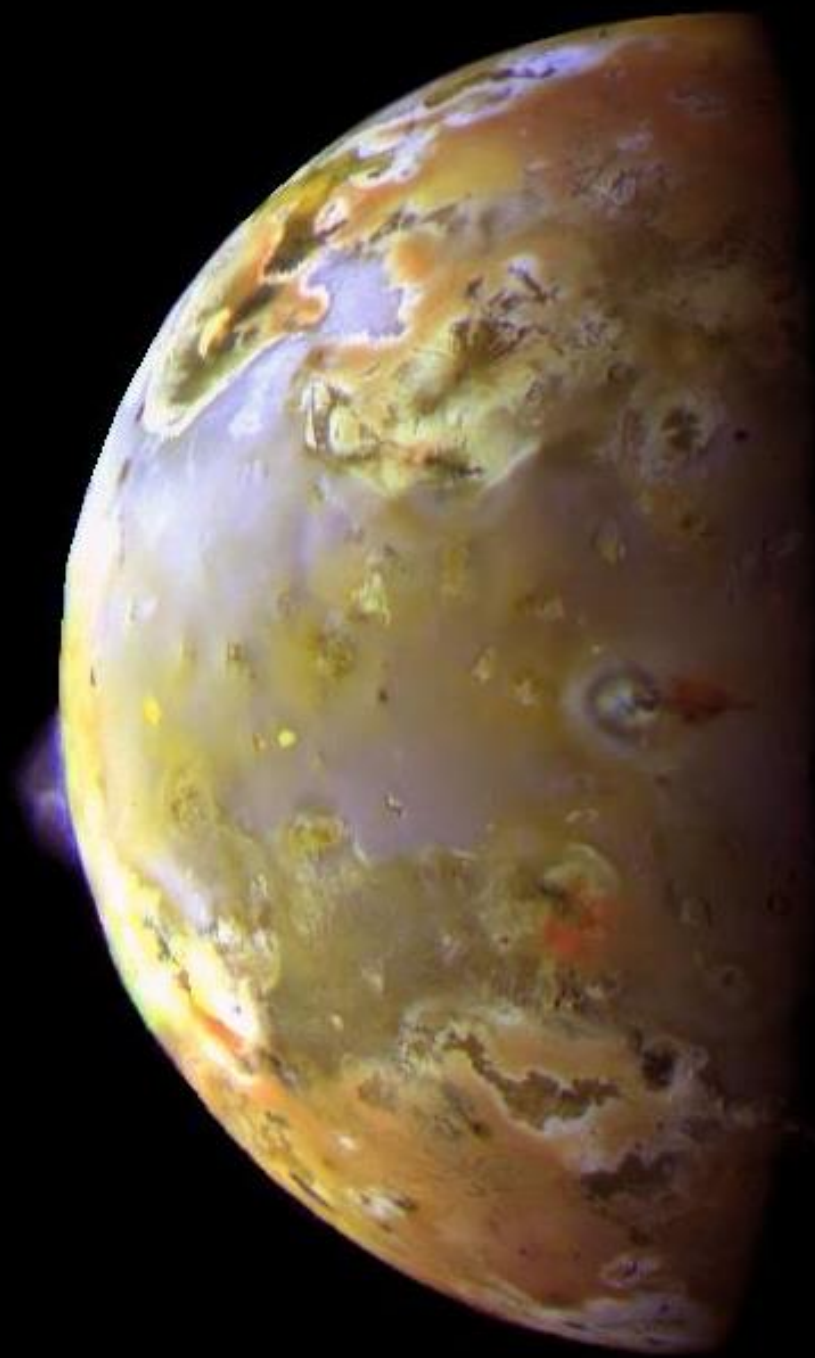


**De 90 K (bleu) à > 1500 K (blanc), février 2000**

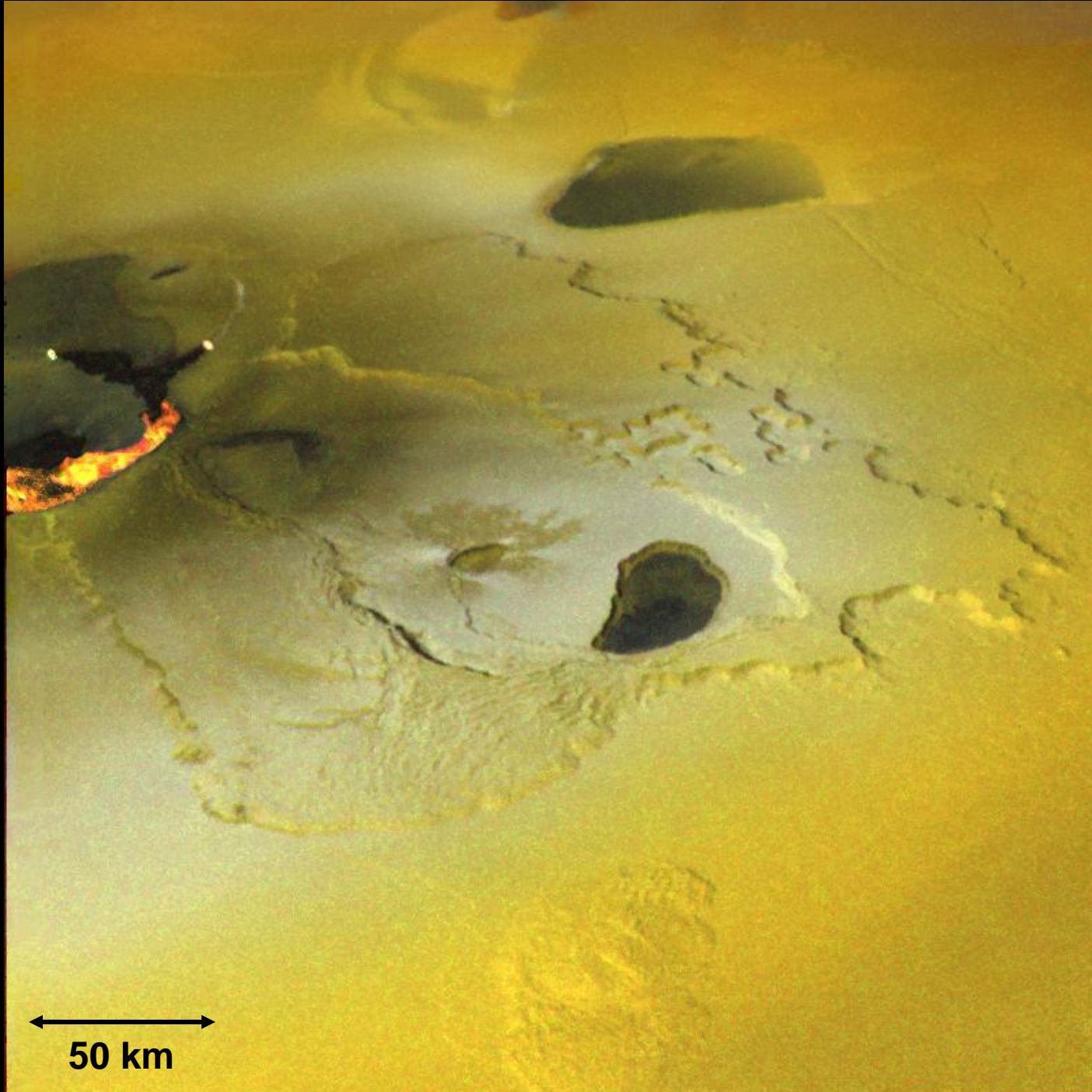




**Non  
seulement  
c'est chaud,  
mais ça  
crache !**



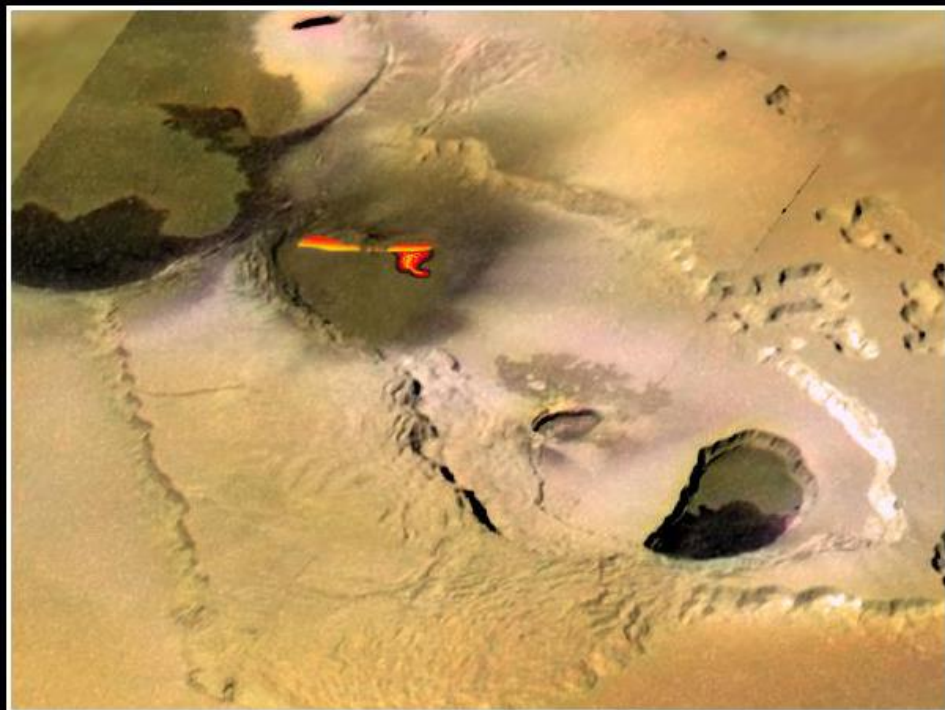




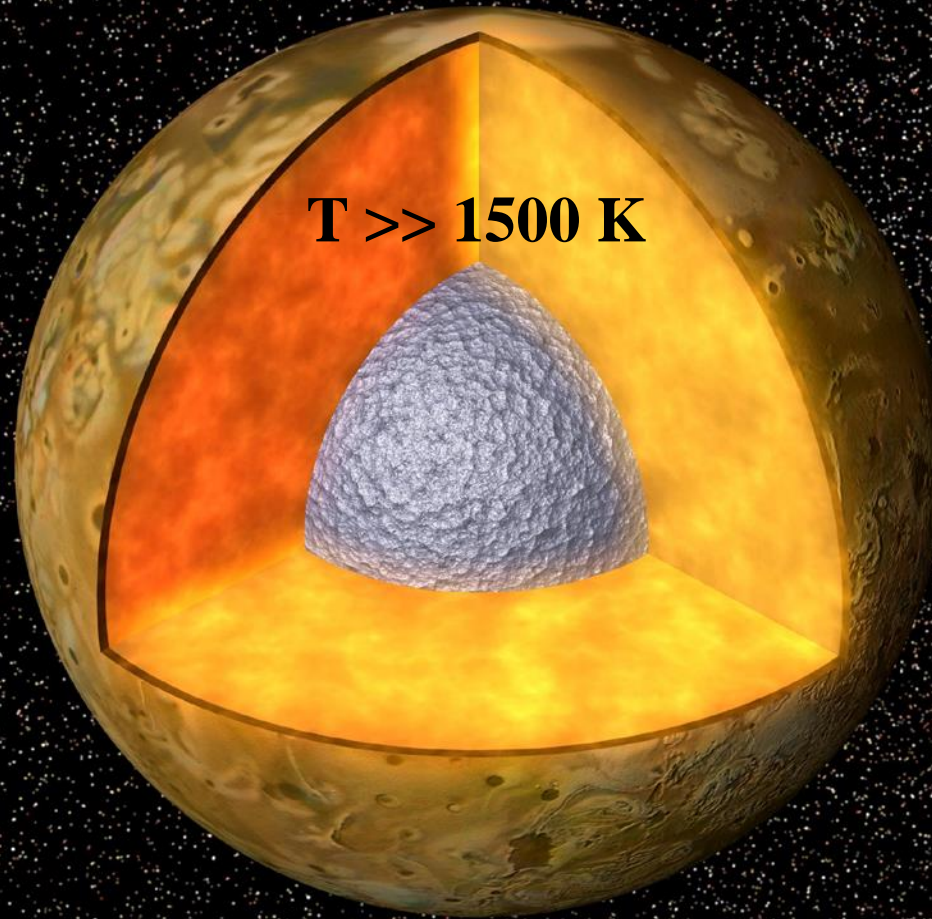
**Une belle  
éruption,  
celle de  
Tvashtar  
avec  
fontaines  
de lave  
(février  
2000)**

50 km

# L'évolution de l'éruption de Tvashtar , entre novembre 1999 (à gauche) et février 2000 (à droite)



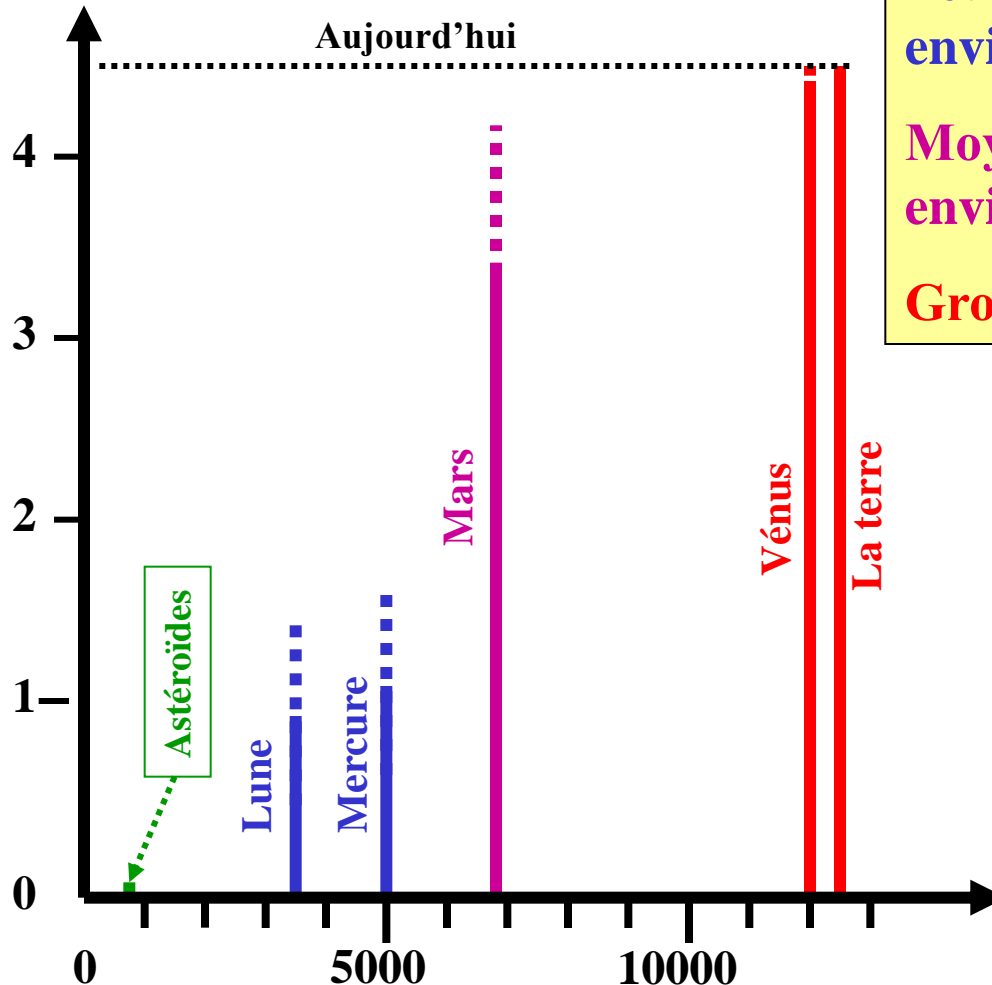




**Structure interne de Io. Modèle tiré de la densité globale, du moment d'inertie, de la présence d'un champ magnétique ...**

# Conclusion pour l'activité interne : des durées différentes

Durée de l'activité interne (volcanisme majeur) en Ga



Tout petit : pas (ou peu) d'activité

Petit : durée de l'activité environ 1 Ga

Moyen : durée de l'activité environ 4 Ga

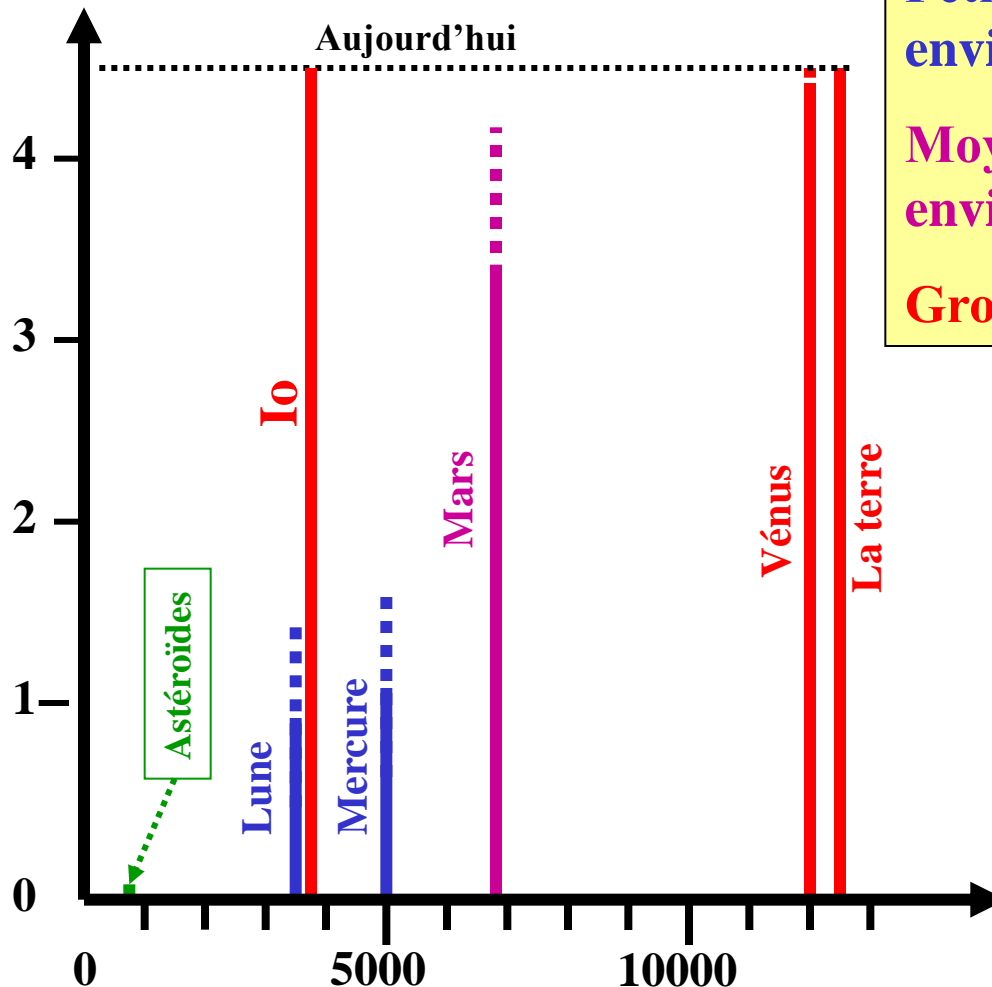
Gros : l'activité dure encore

Diamètre des corps (km)



# Conclusion pour l'activité interne : des durées différentes

Durée de l'activité interne (volcanisme majeur) en Ga



Tout petit : pas (ou peu) d'activité

Petit : durée de l'activité environ 1 Ga

Moyen : durée de l'activité environ 4 Ga

Gros : l'activité dure encore

Diamètre des corps (km)

## TEMPERATURE A L'INTERIEUR D'UNE PLANETE

Production de chaleur :  $Q \sim q \cdot V \sim q \cdot R^3$

Perte de chaleur :  $P \sim k \cdot S \cdot \Delta T \sim k \cdot R^2 \cdot T$

Avec :

~ : fonction de

q : chaleur produite par unité de volume (radioactivité ...)

V : volume de la planète

S : surface de la planète

R : rayon de la planète

k : « coefficient de perte » (ex : conductivité thermique,...)

T : température interne de la planète

$\Delta T$  : température interne – température externe

A l'équilibre et en régime stationnaire, ce qu'on suppose vrai après 4,5 G.A., les pertes de chaleurs compensent la production :

$$Q = P \rightarrow q \cdot R^3 \sim k \cdot R^2 \cdot T$$

$$\rightarrow T \sim R \cdot \frac{q}{k}$$

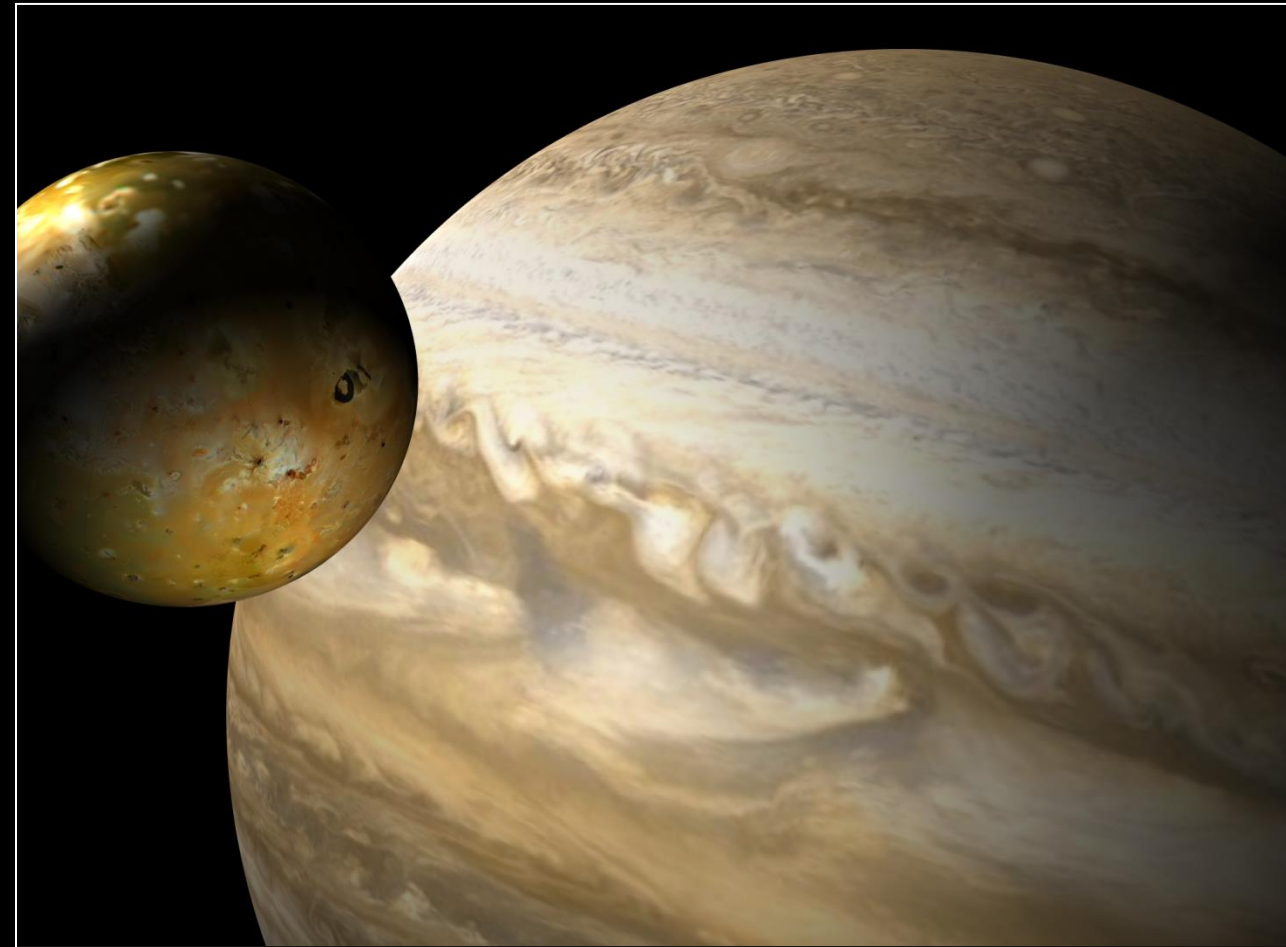
Plus une planète est grosse, plus elle est chaude  
et géologiquement active

Il faut que le « q »  
de Io soit gros.  
Qu'est ce qui peut  
faire grossir le  
« q » de Io ?



**La proximité de Jupiter, de masse égale à 300 fois la masse terrestre ! Les effets de marées dus à**

**Jupiter tout proche déforment Io à chaque tour, car les autres satellites rendent l'orbite de Io très elliptique. Et déformer, cela produit de la chaleur.**

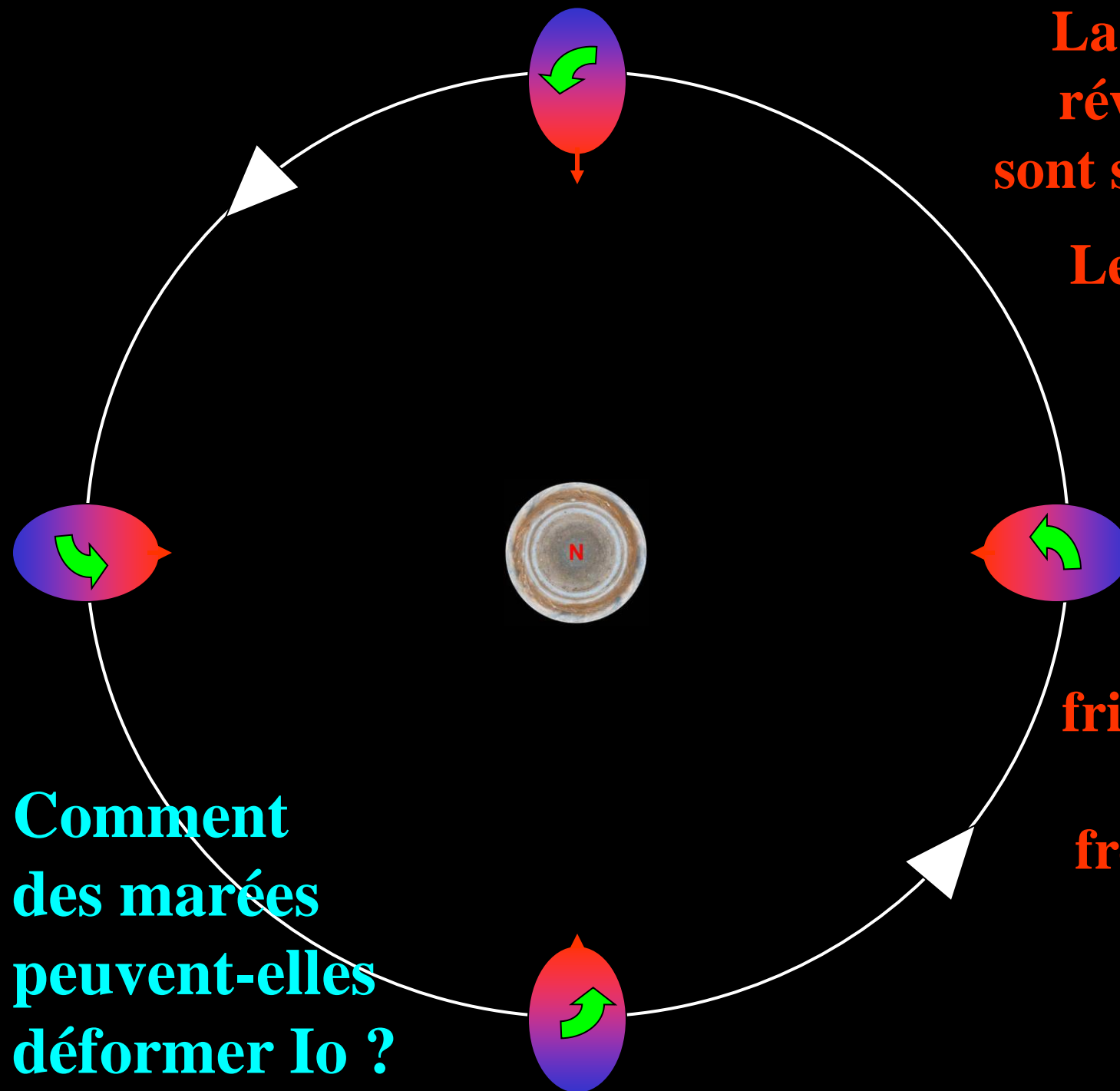


**La rotation et la révolution de Io sont synchronisées**

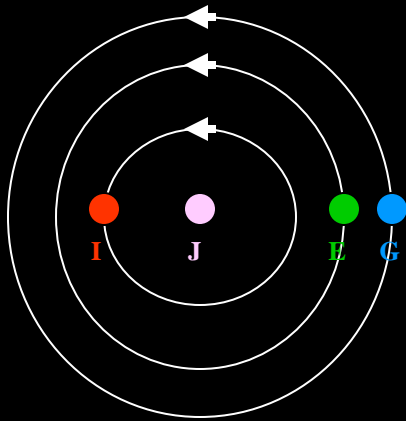
**Le bourrelet de marée est fixe par rapport au globe de Io.**

**Pas de friction interne, pas de frottement, pas de rappel. La situation est stable**

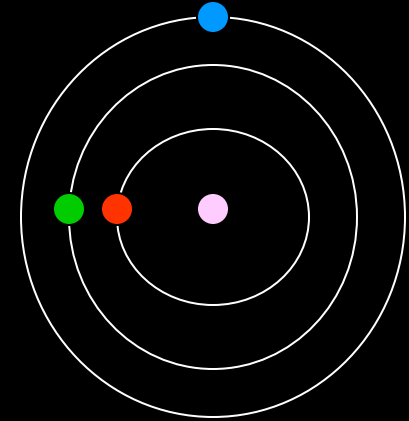
**Comment des marées peuvent-elles déformer Io ?**



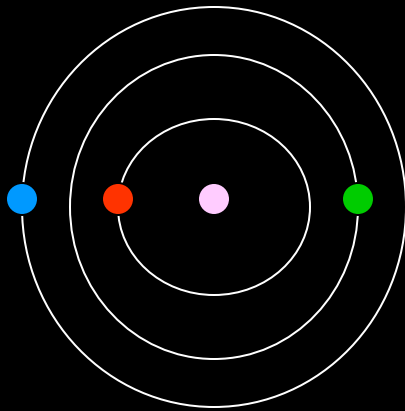




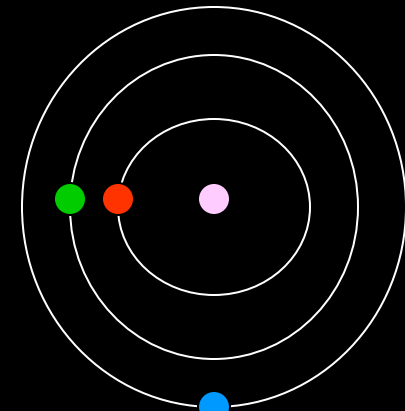
**T = 0 = 4 périodes orbitales de Io plus tard**



**T = 1 période orbitale de Io plus tard**



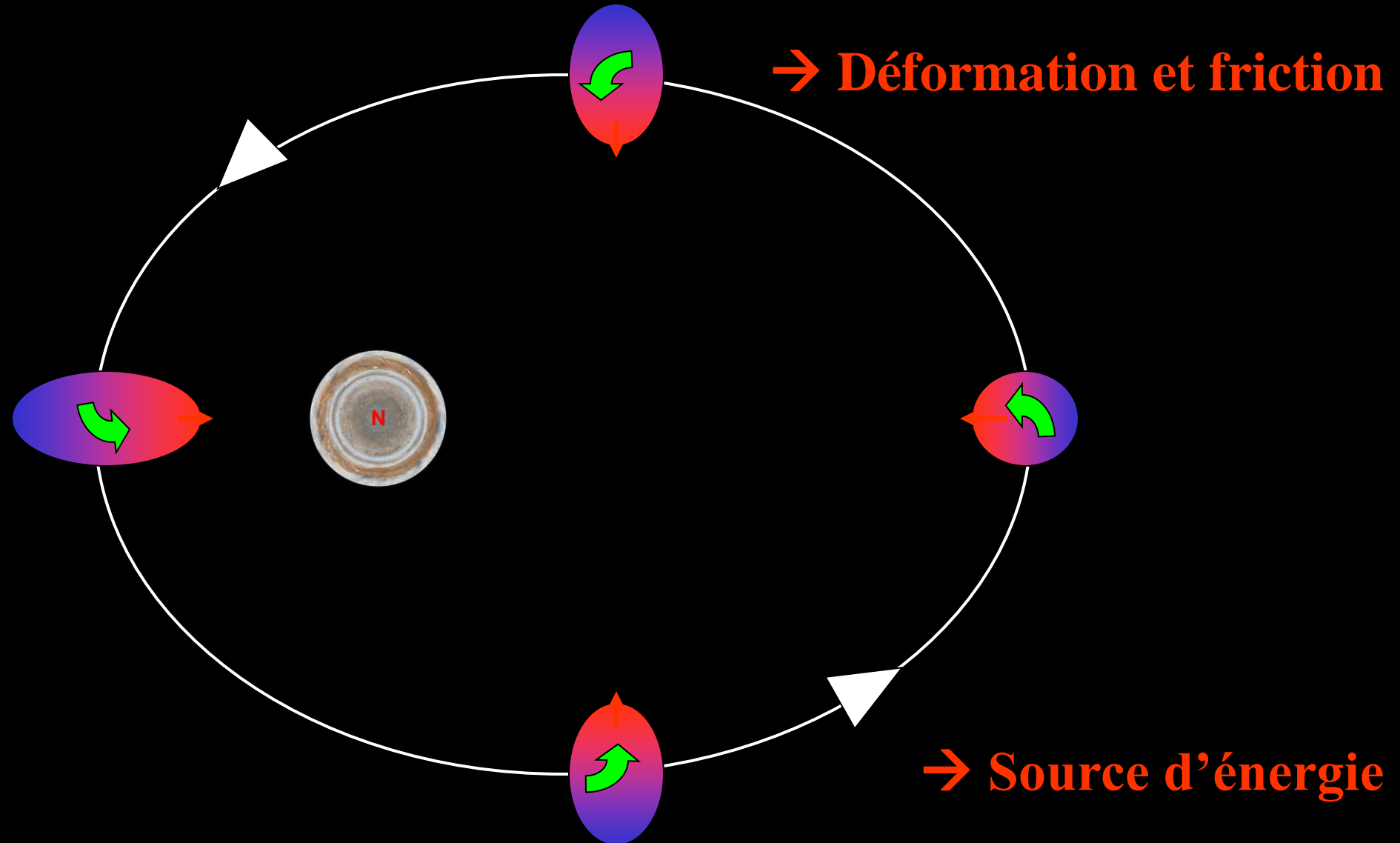
**T = 2 périodes orbitales de Io plus tard**



**T = 3 périodes orbitales de Io plus tard**

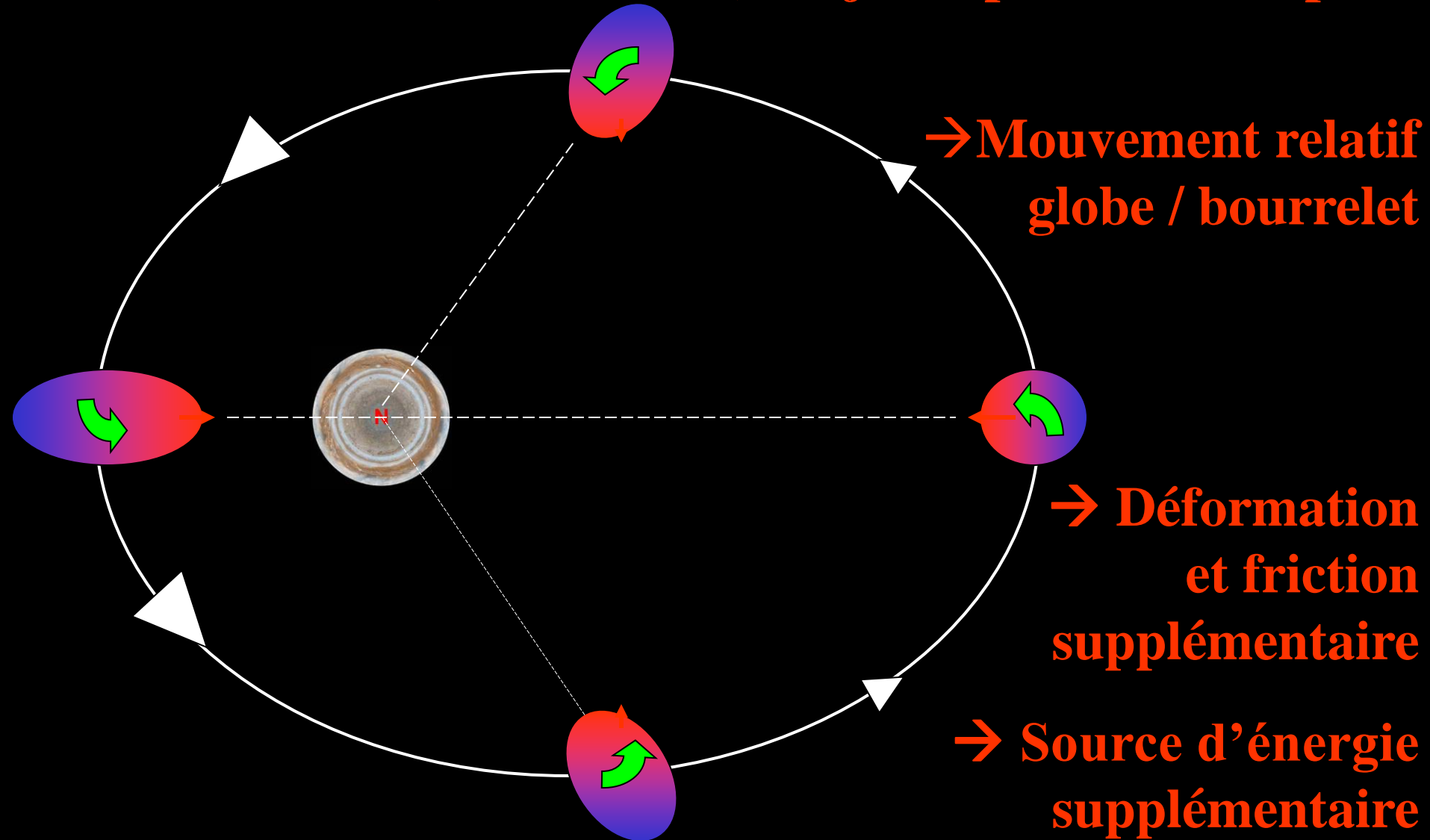
**Il y a résonance 1-2-4 entre les périodes orbitales de Io, Europe et Ganymède. Il n'y a pas mieux pour entraîner des ellipticités forcées des orbites, surtout celle de Io, puis celle d'Europe, puis celle de Ganymède. Et ellipticité forcée dit déformations de marées**

**Une ellipticité (forcée) a plusieurs effets.  
Premier effet : l'amplitude du bourrelet varie**

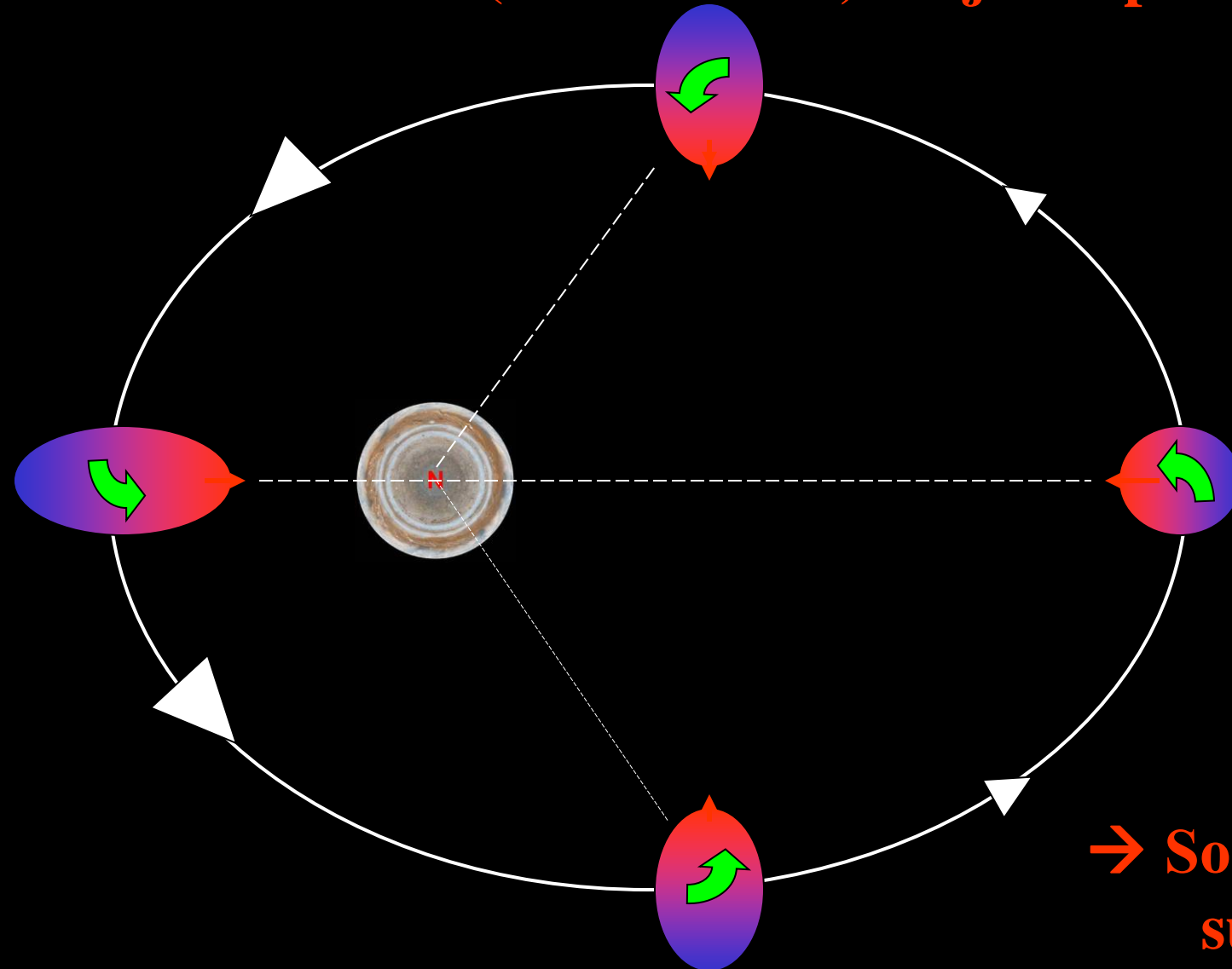




**Deuxième effet : la vitesse de révolution varie (cf Kepler), pas celle de rotation, alors que le bourrelet est (au 1er ordre) toujours pointé vers Jupiter**



**Deuxième effet : la vitesse de révolution varie (cf Kepler), pas celle de rotation, alors que le bourrelet est (au 1er ordre) toujours pointé vers Jupiter**

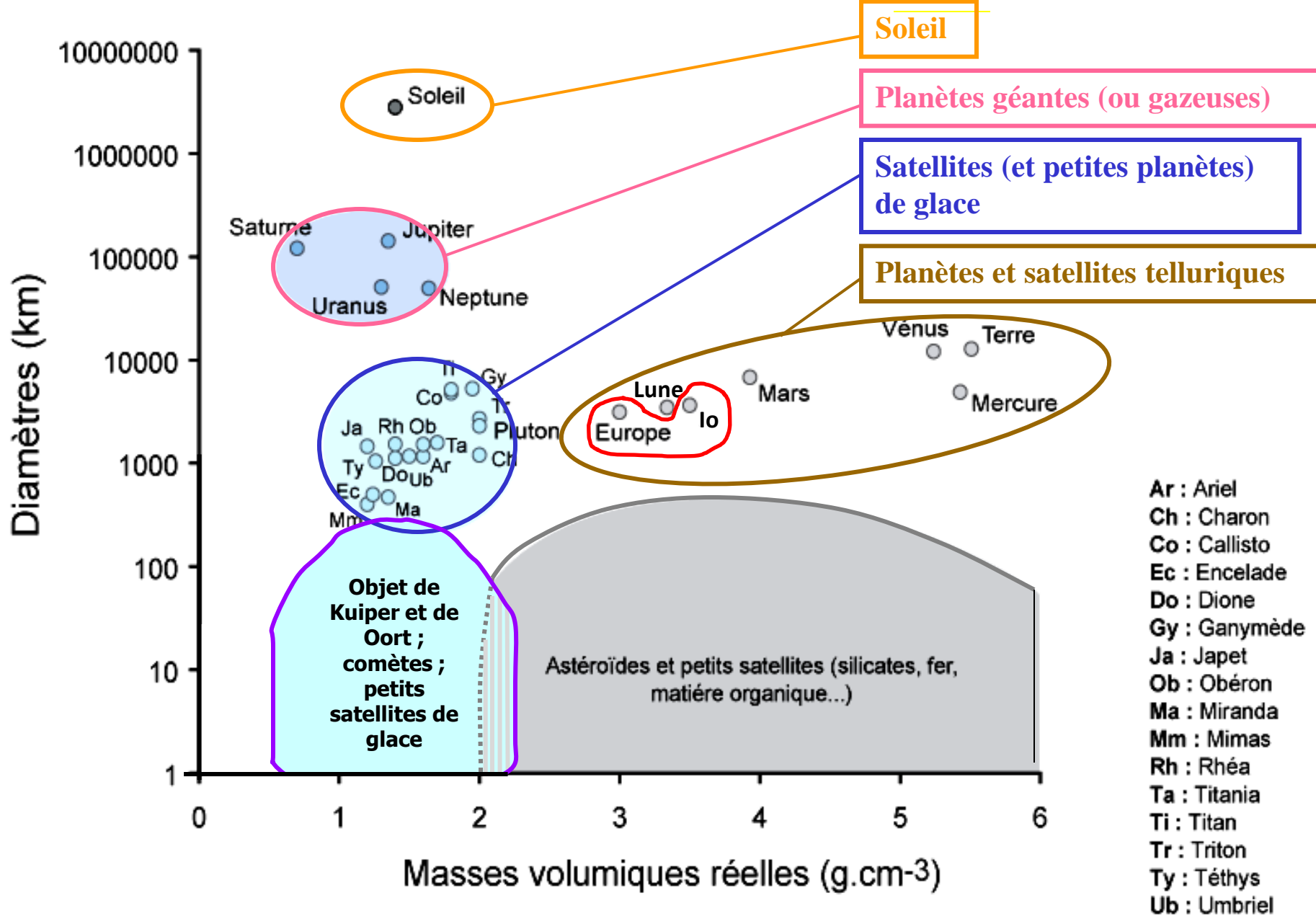


**→ Source d'énergie supplémentaire**





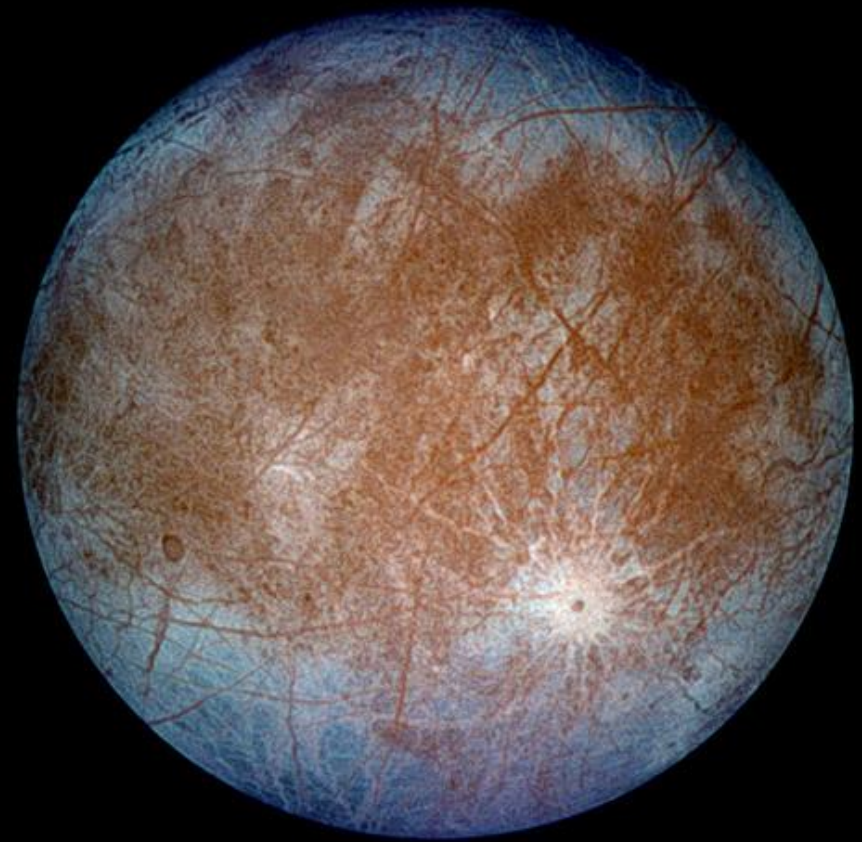
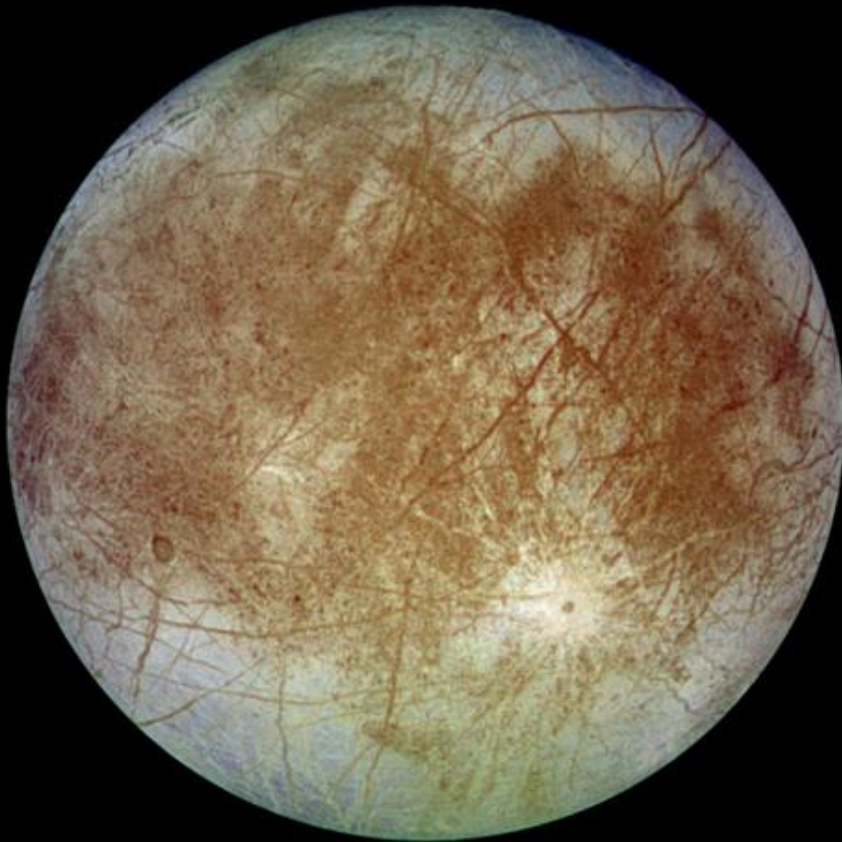
**Pour Io, le bourrelet permanent de marée est de 7 km. Il oscille de + ou - 100 m. En donnant à Io des coefficients de friction et autres paramètres mécaniques « normaux », cela entraîne un dégagement d'énergie de  $10^{14}$  W (Terre =  $4 \cdot 10^{13}$  W). Or Io à une masse 66 fois plus faible que la Terre. Le « q » de Io est > 100 fois celui de la Terre. Ce qui est vrai pour Io l'est aussi pour d'autres satellites de Jupiter, Saturne ...**

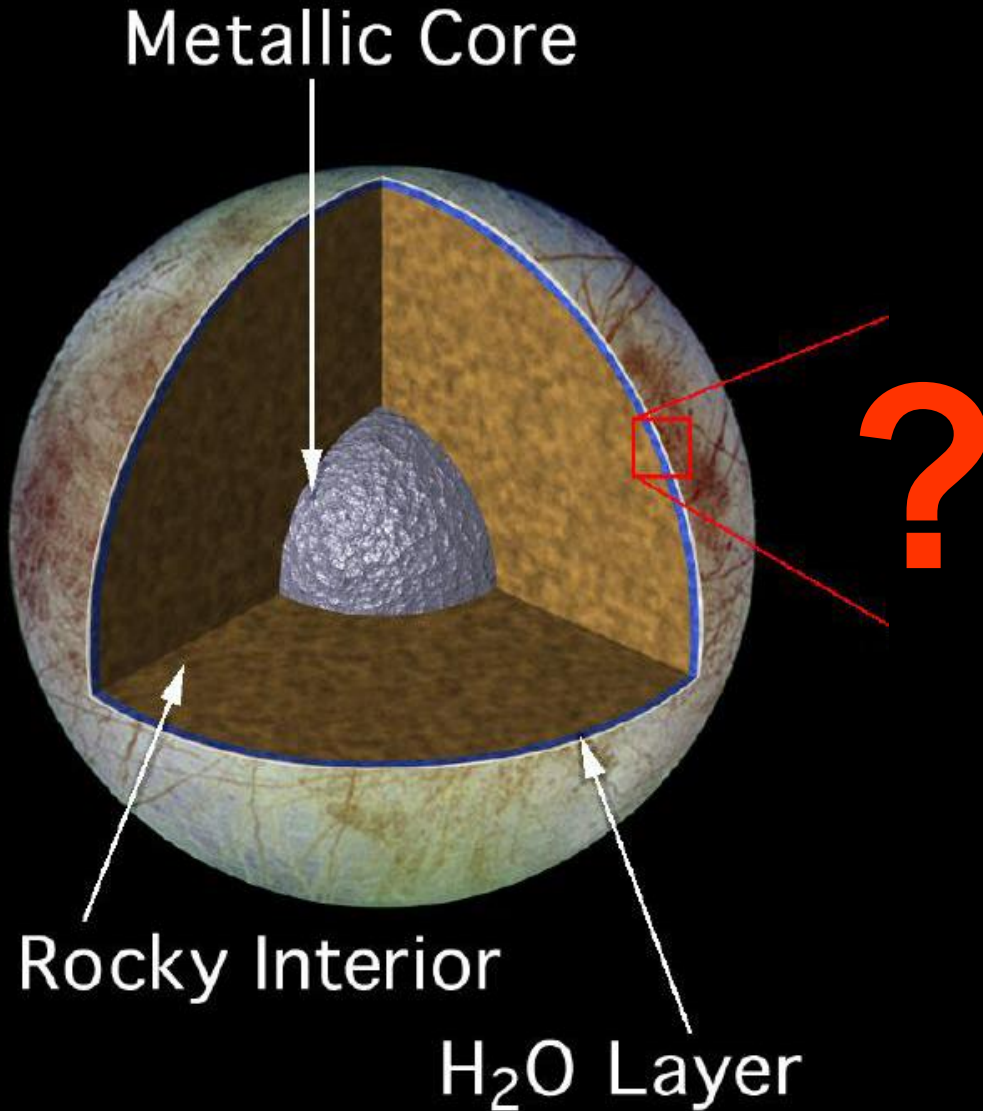


# La classification géologique du système solaire



**Dernier satellite tellurique de  
« bonne » taille : Europe, le 2eme  
satellite de Jupiter**



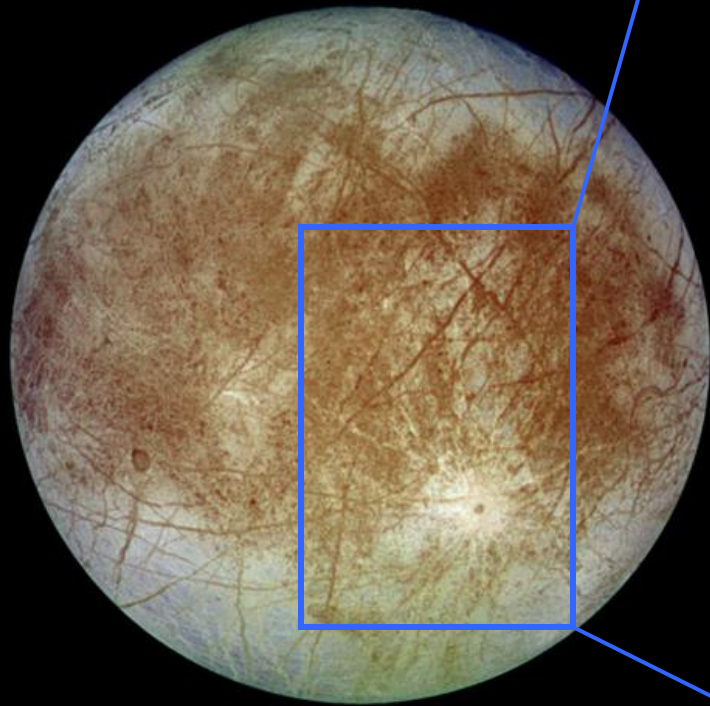


## Europe.

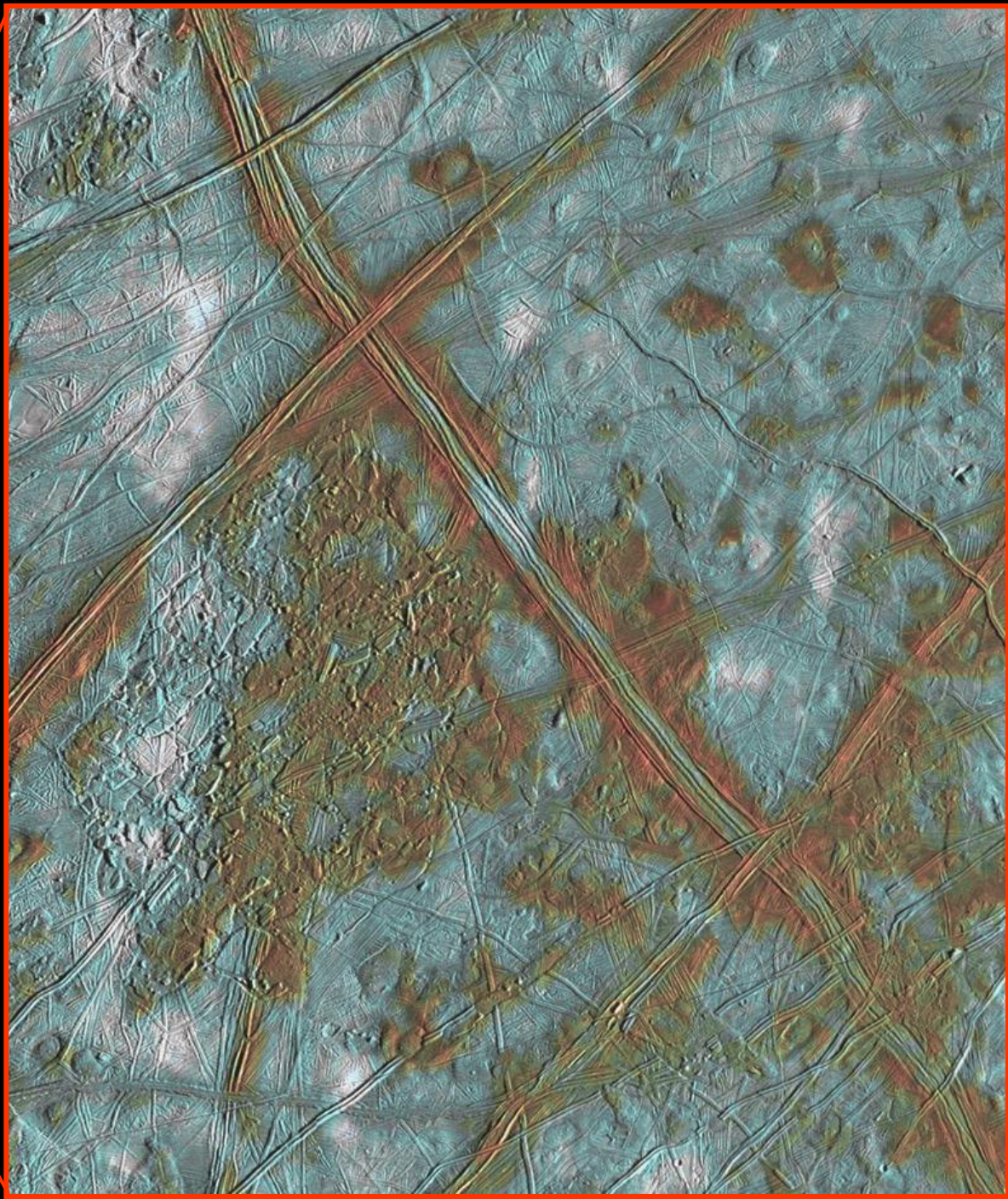
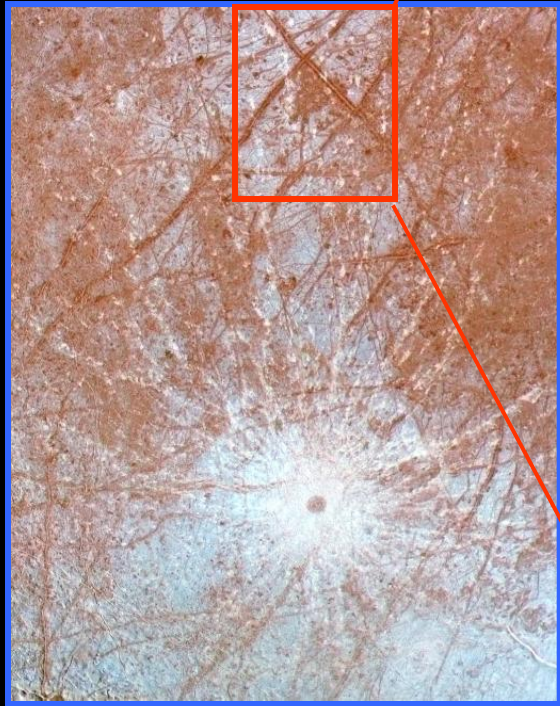
La masse volumique ( $3,04 \text{ g/cm}^3$ ) indique que c'est un corps identique à la Terre, recouvert d'un océan de 100 km d'épaisseur (Terre 3 km), mais cet océan est gelé, car il fait  $-170^\circ\text{C}$



**Faisons une  
série de zooms  
sur Europe  
pour le 2eme  
aspect**









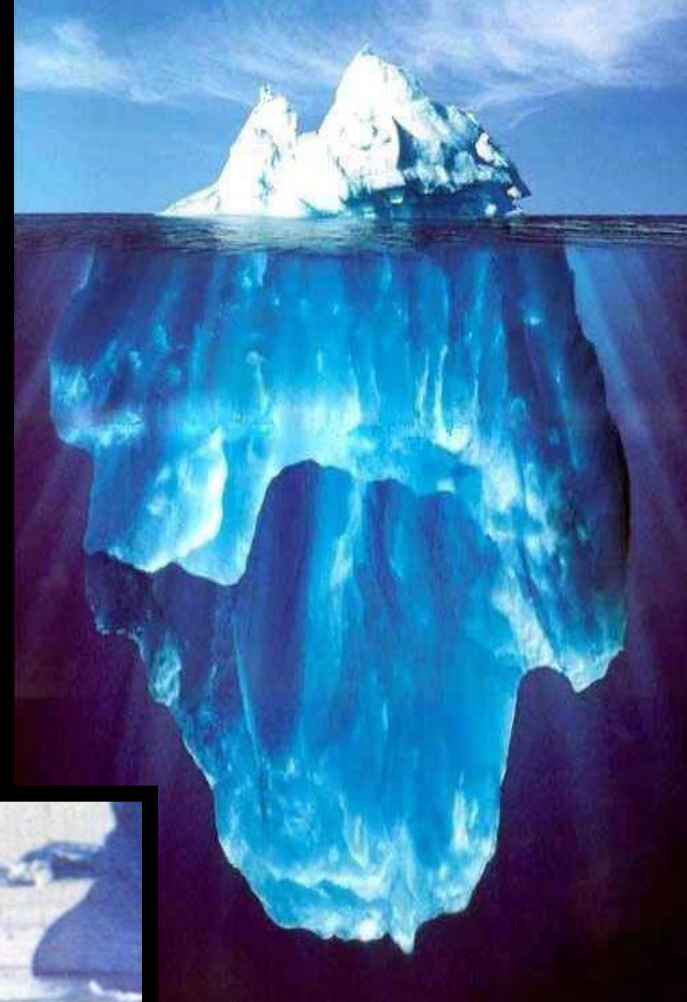


Avouez que ça  
ressemble !

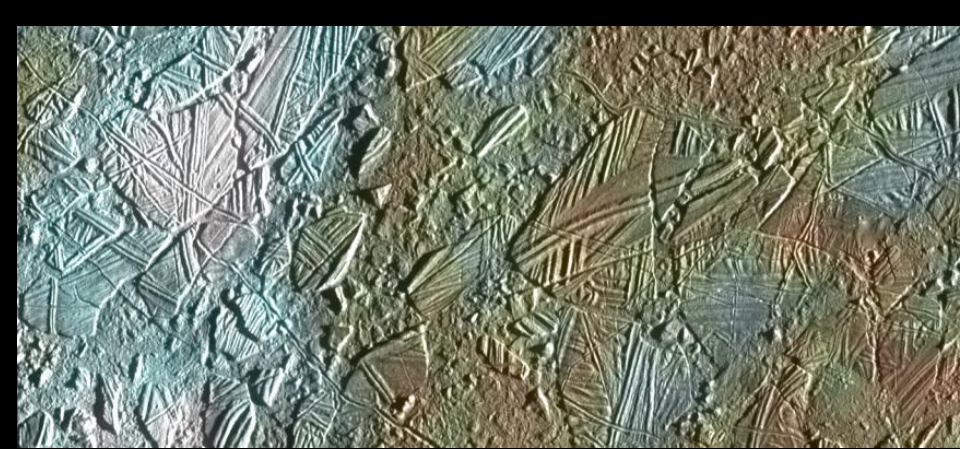




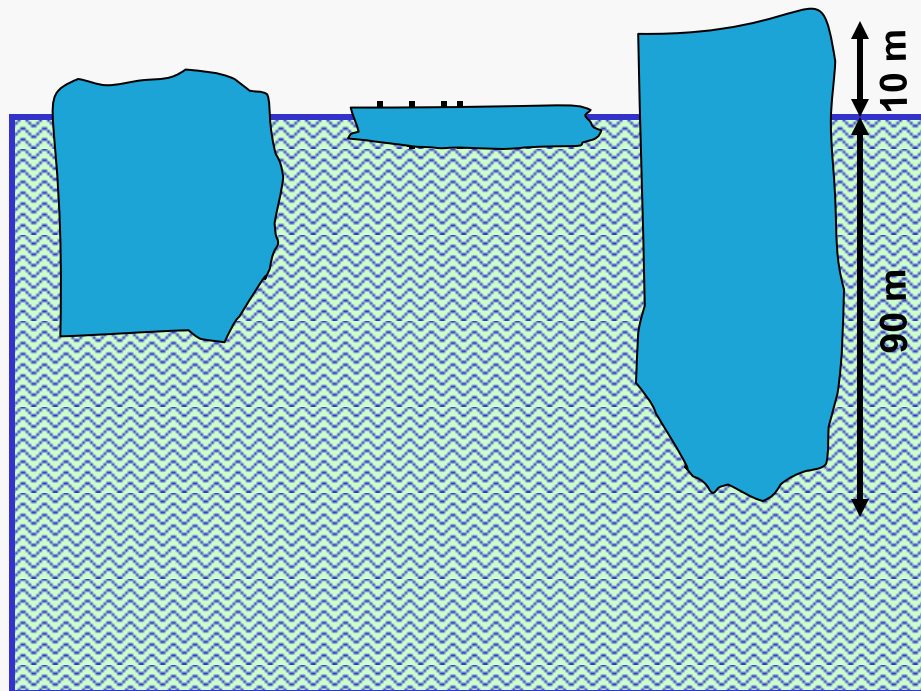
**Avec la hauteur de la partie émergée de l'iceberg, on peut connaître la hauteur totale de l'iceberg**







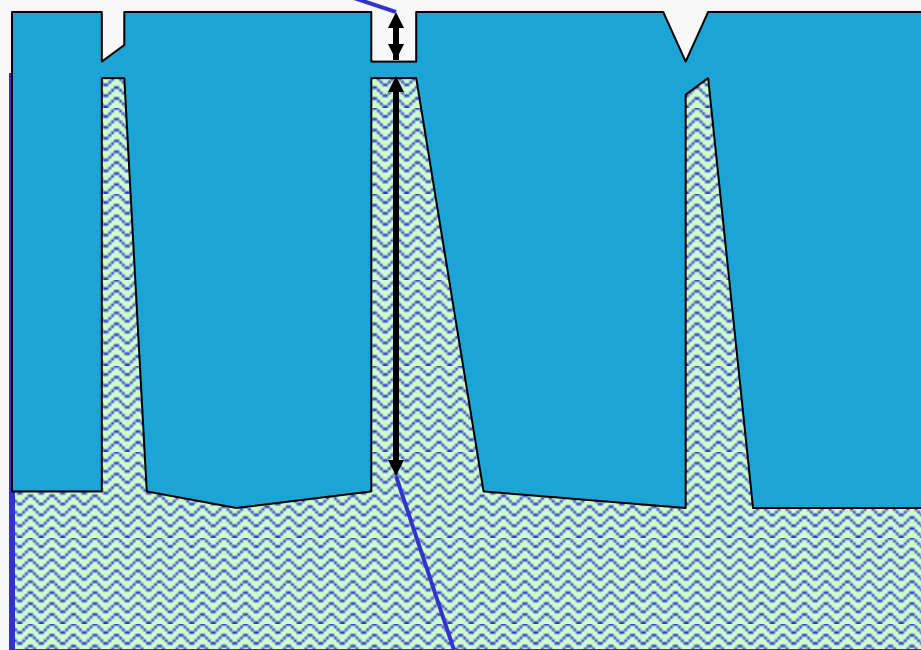
**Terre**



Iceberg : la partie émergée représente 1/10 du total

La partie émergée mesure 500 à 1000 m

**Europe**

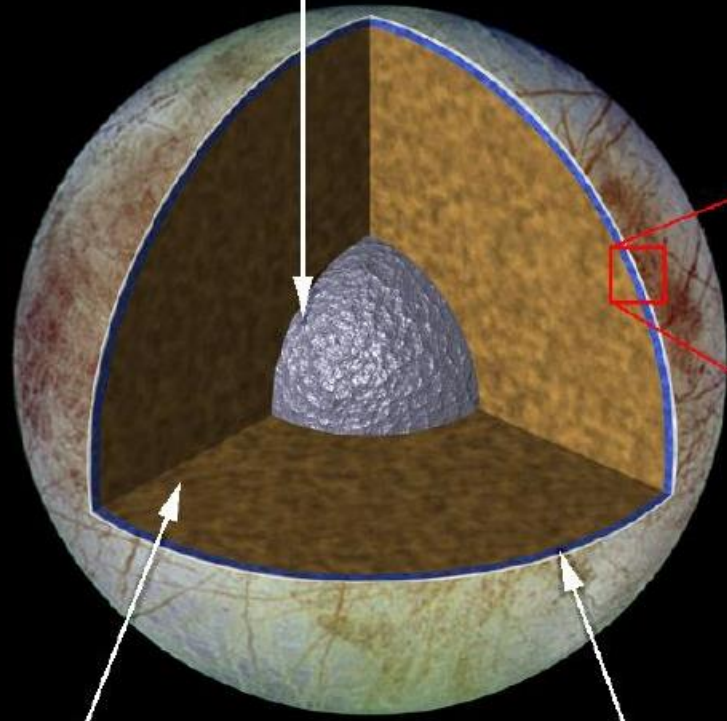


→ la partie immergée représente 5 à 10 km

→ Océan liquide de 90 à 95 km de profondeur

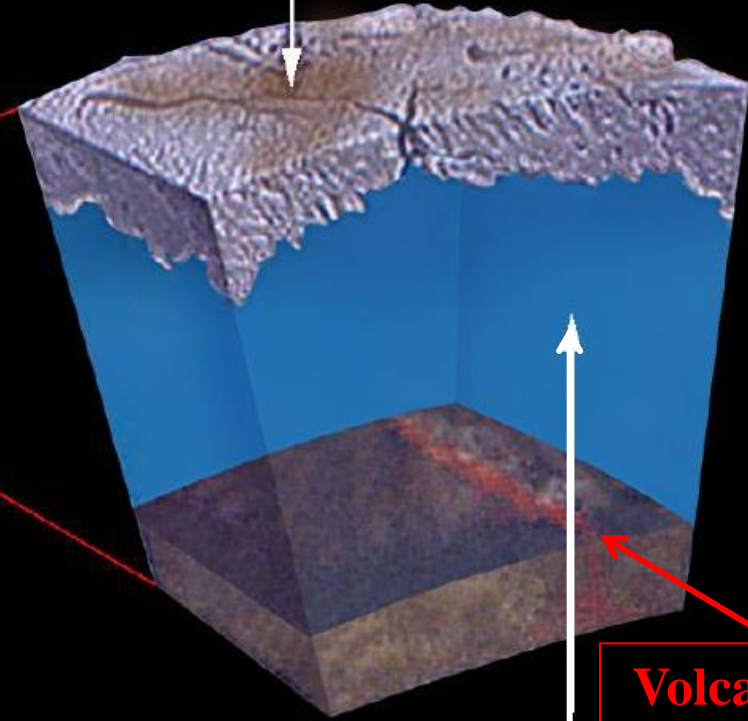
**Noyau métallique**

**Banquise de glace**



**Intérieur rocheux**

**Couche d'H<sub>2</sub>O**

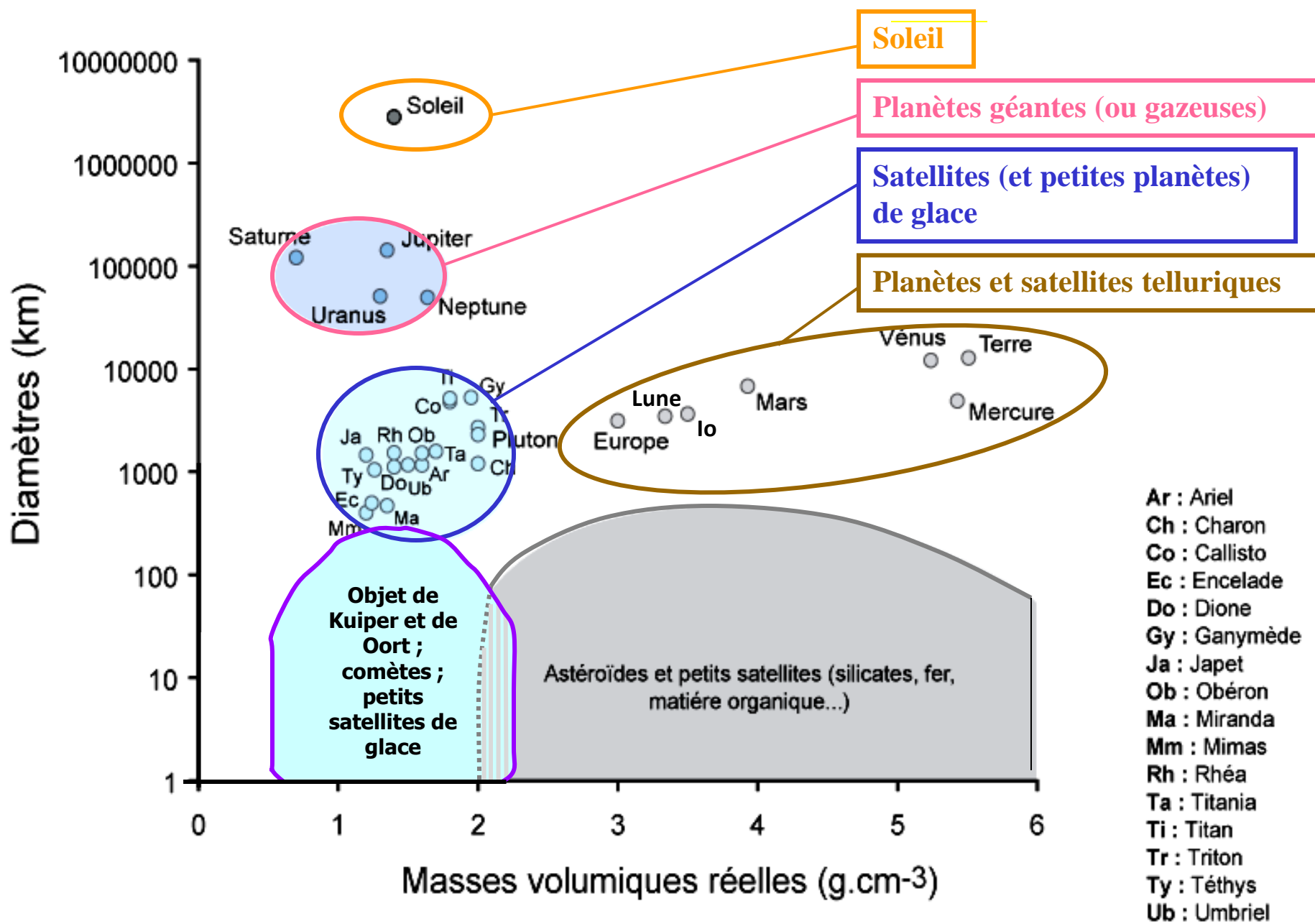


**Volcanisme  
sous-marin**

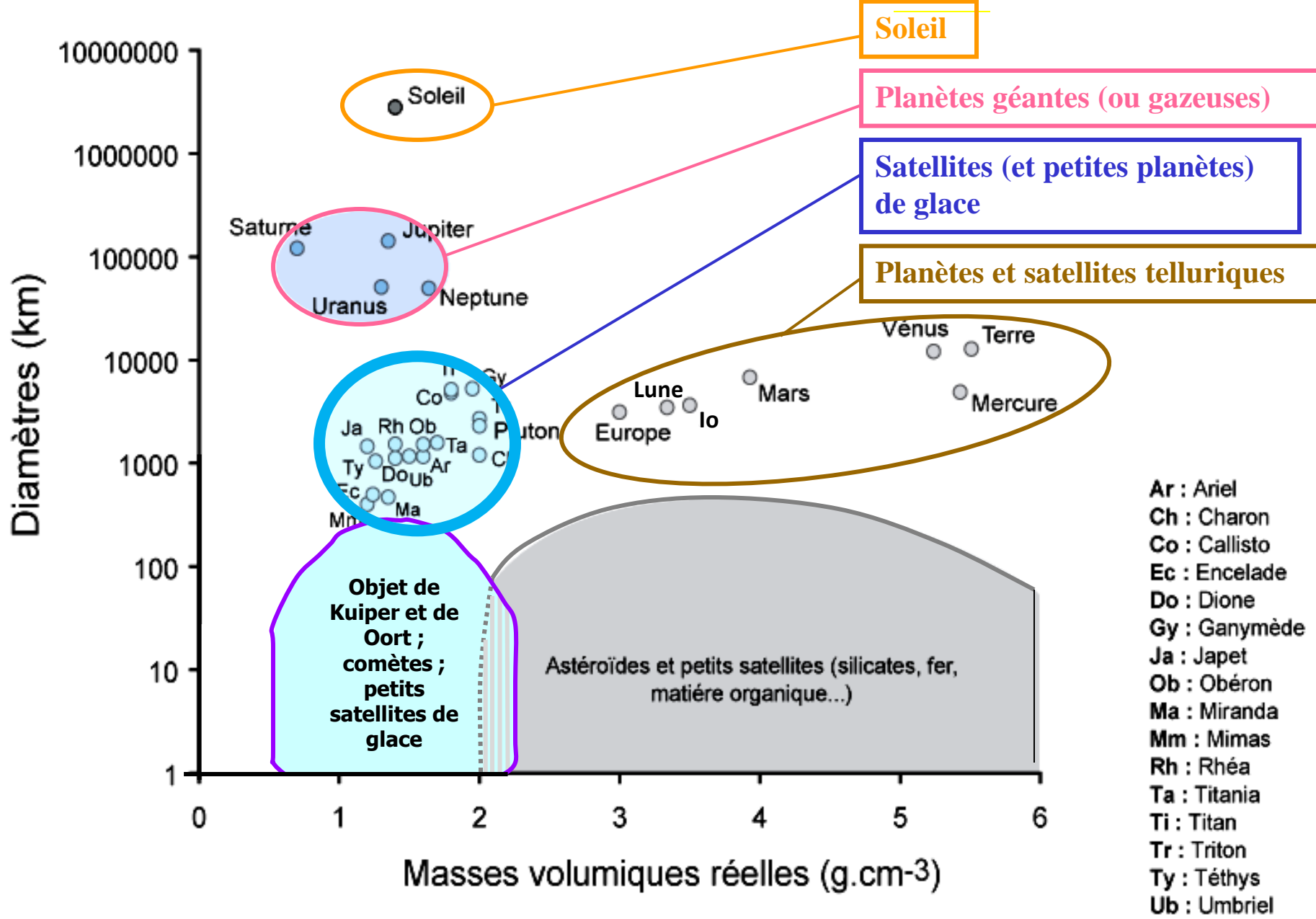
**Océan liquide sous la glace**

**Europe, la « planète » océan. Y a t'il de la vie dans cet océan ? Si oui, nos cousins les plus probables dans le Système Solaire, ce serait des ... « Européens »**





**Et pour finir (si on a le temps), les corps de glace.**



**Et pour finir (si on a le temps), les corps de glace.**



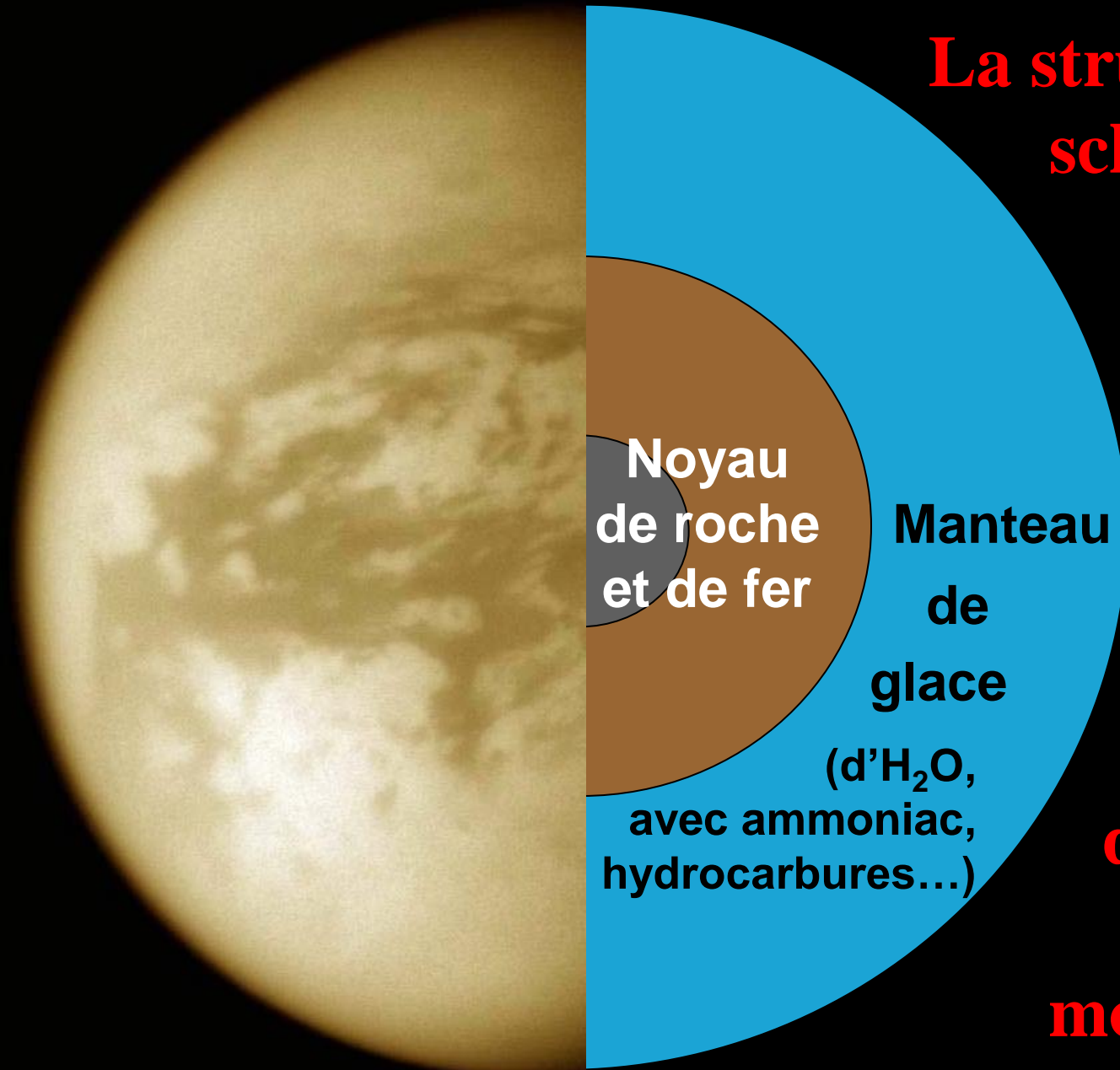
**Et pour finir, deux  
des 7 satellites  
majeurs de  
Saturne, Titan et  
Encelade (ici au  
1<sup>er</sup> plan) .**





**Encelade au dessus des superbes anneaux.**





**La structure interne schématique des satellites externes du système solaire. Ils sont constitués pour moitié de roche (et de fer) et pour moitié de glaces.**



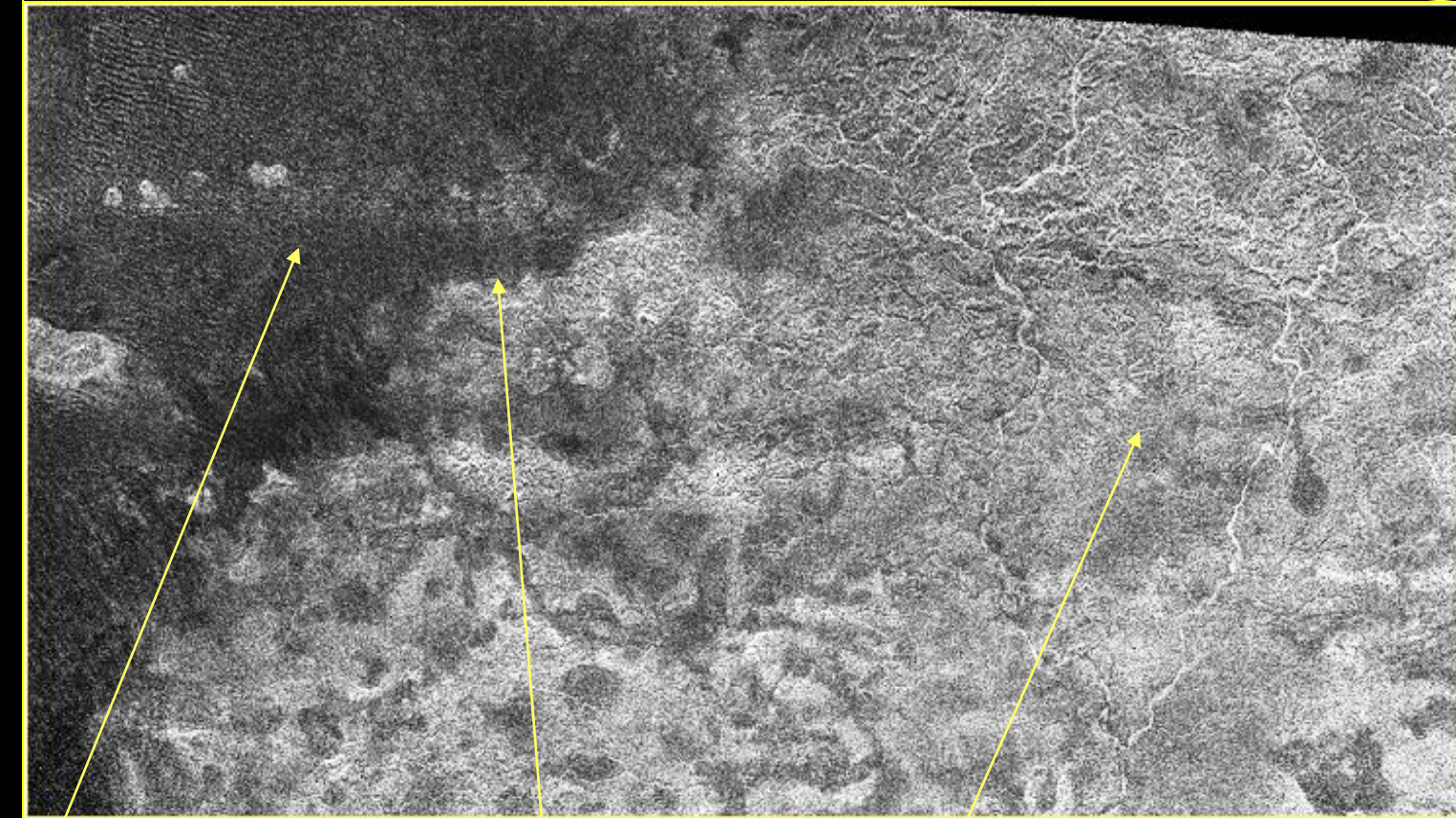
**Nos deux satellites : Titan ( $D = 5150$  km,  $\rho = 1,9$ ), avec Encelade au 1er plan pour comparer les dimensions. Titan est le 2eme plus gros satellite du système solaire (après Ganymède, plus gros que Mercure). C'est le seul satellite du Système Solaire avec une atmosphère dense. Pour l'observer, radar ou Infra-Rouge.**



# Exemple d'une bande radar (avril 2005)

200 km

**Les  
« plaines »  
ne sont  
pas lisses,  
mais  
« striées ».  
Sur les  
continent,  
des lits de  
rivières.**



« plaines » de dunes

« côte »

« continent »





150 km

**On voit aussi des structures qu'on peut interpréter comme des caldeiras (cratères volcaniques)**





Image © 2010 DigitalGlobe

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

©2009 Google

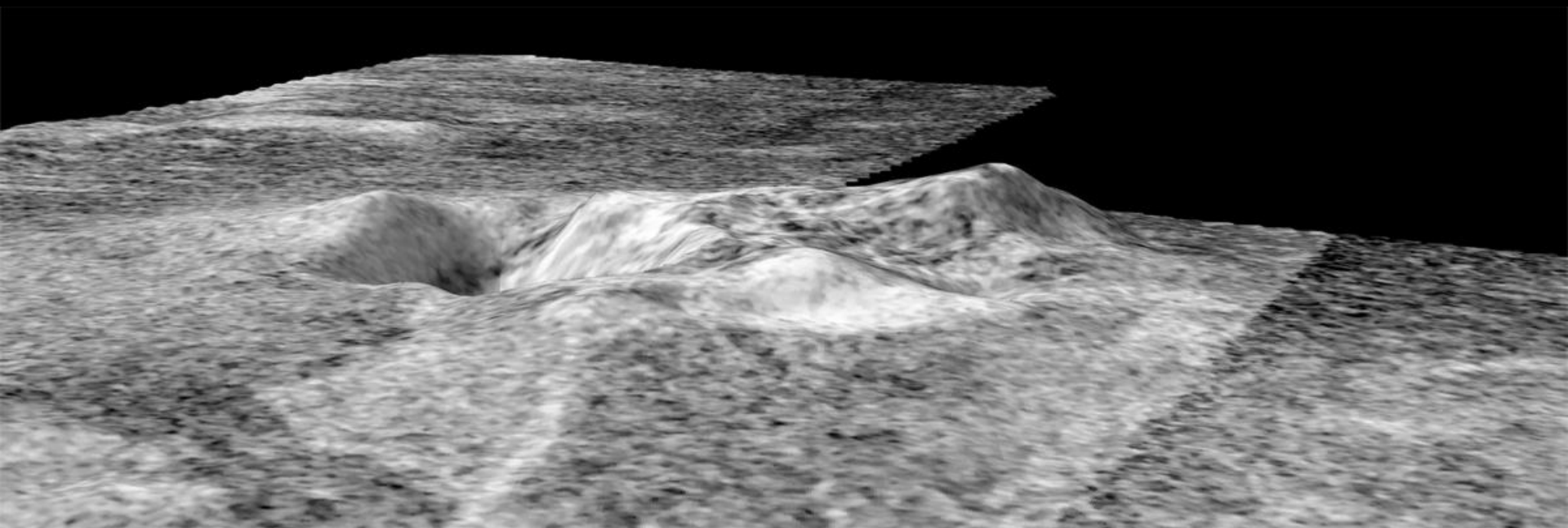
4.98 km

Date des images satellite : 13 sept. 2007

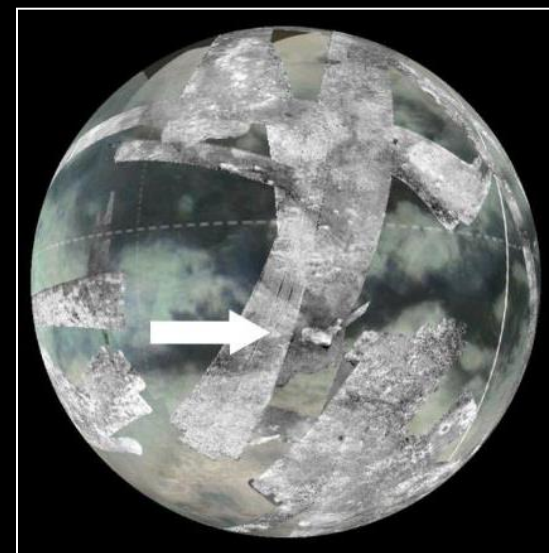
40°49'47.66" N 14°08'04.33" E élév. 138 m

Altitude 17.21 km

**La même chose dans la région de Naples**

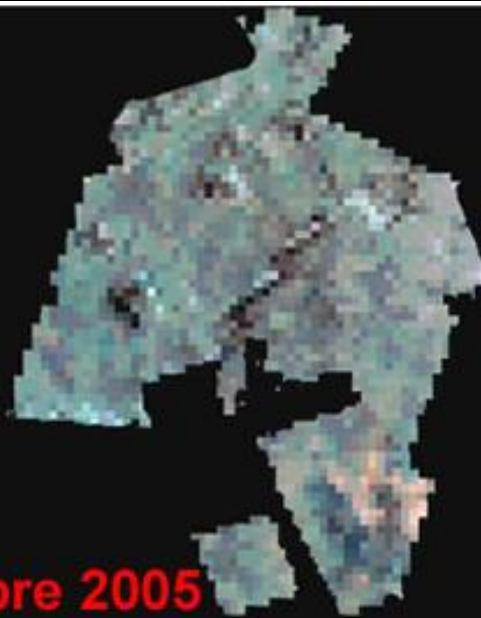


**Sotra Facula, un de ces cryo-  
volcans (H x 5) avec cratère et  
« pic latéral ». Le pic de droite  
mesure 1000 m de haut.**





Region 2



500 km

27 octobre 2005

Region 2



500 km

15 janvier 2006

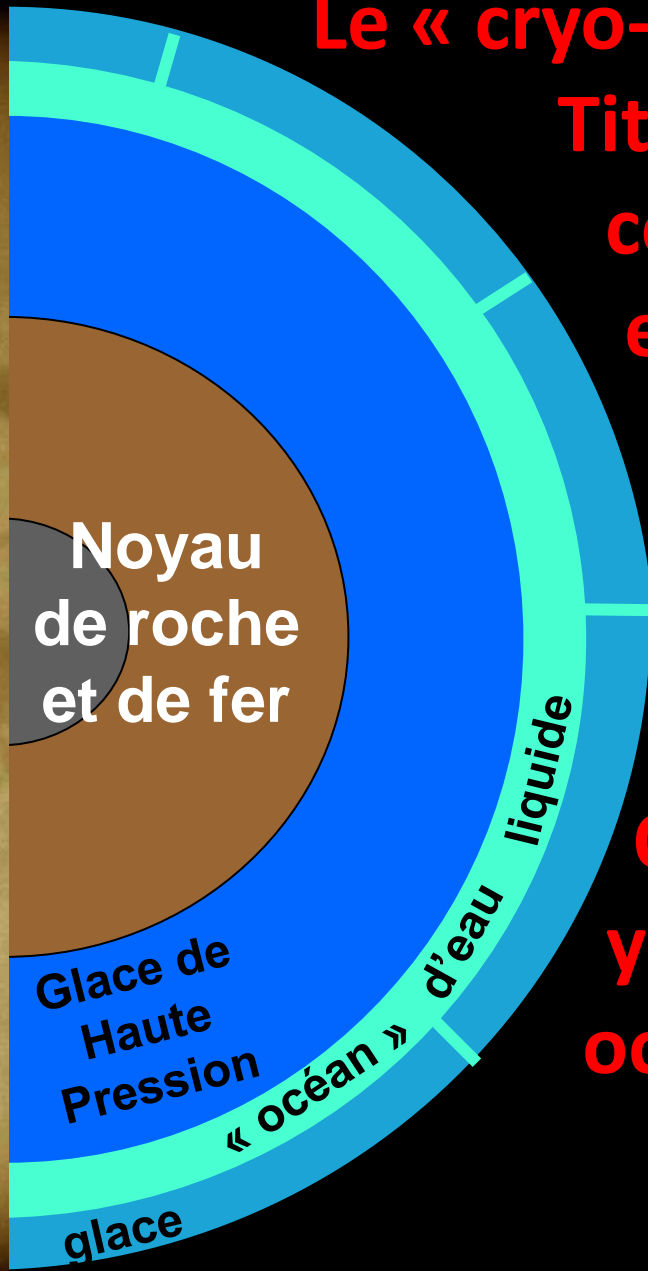
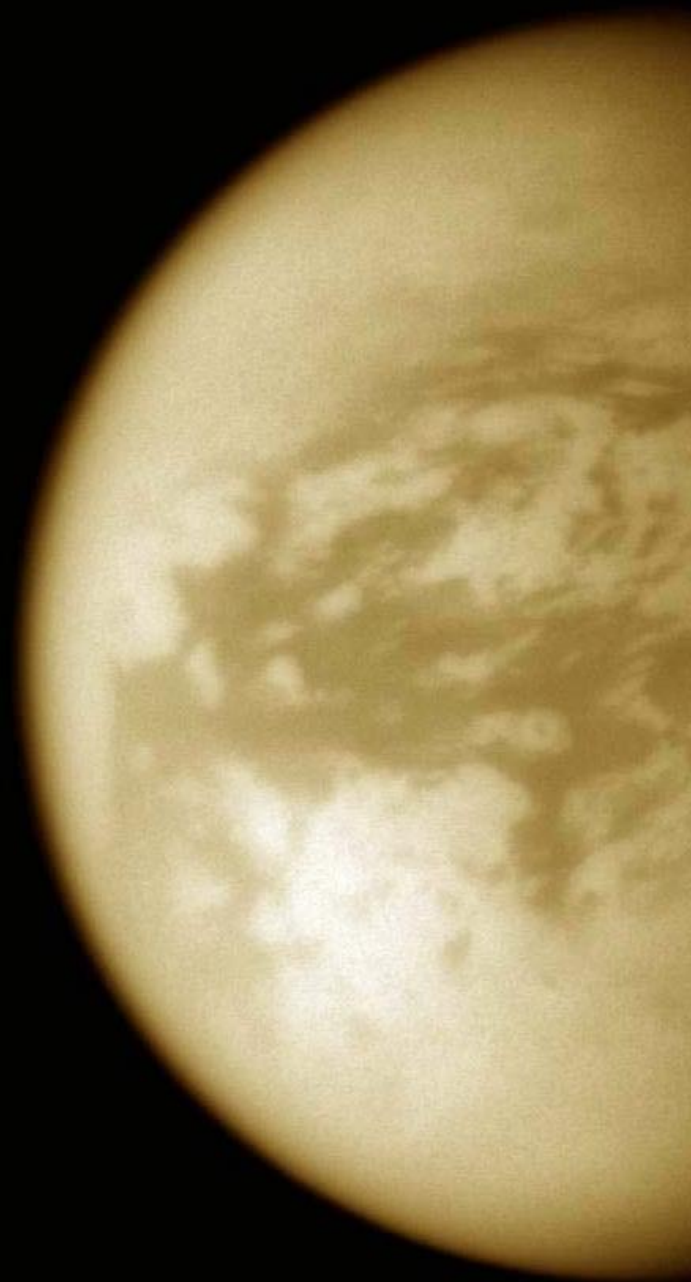
Region 2



500 km

18 mars 2006

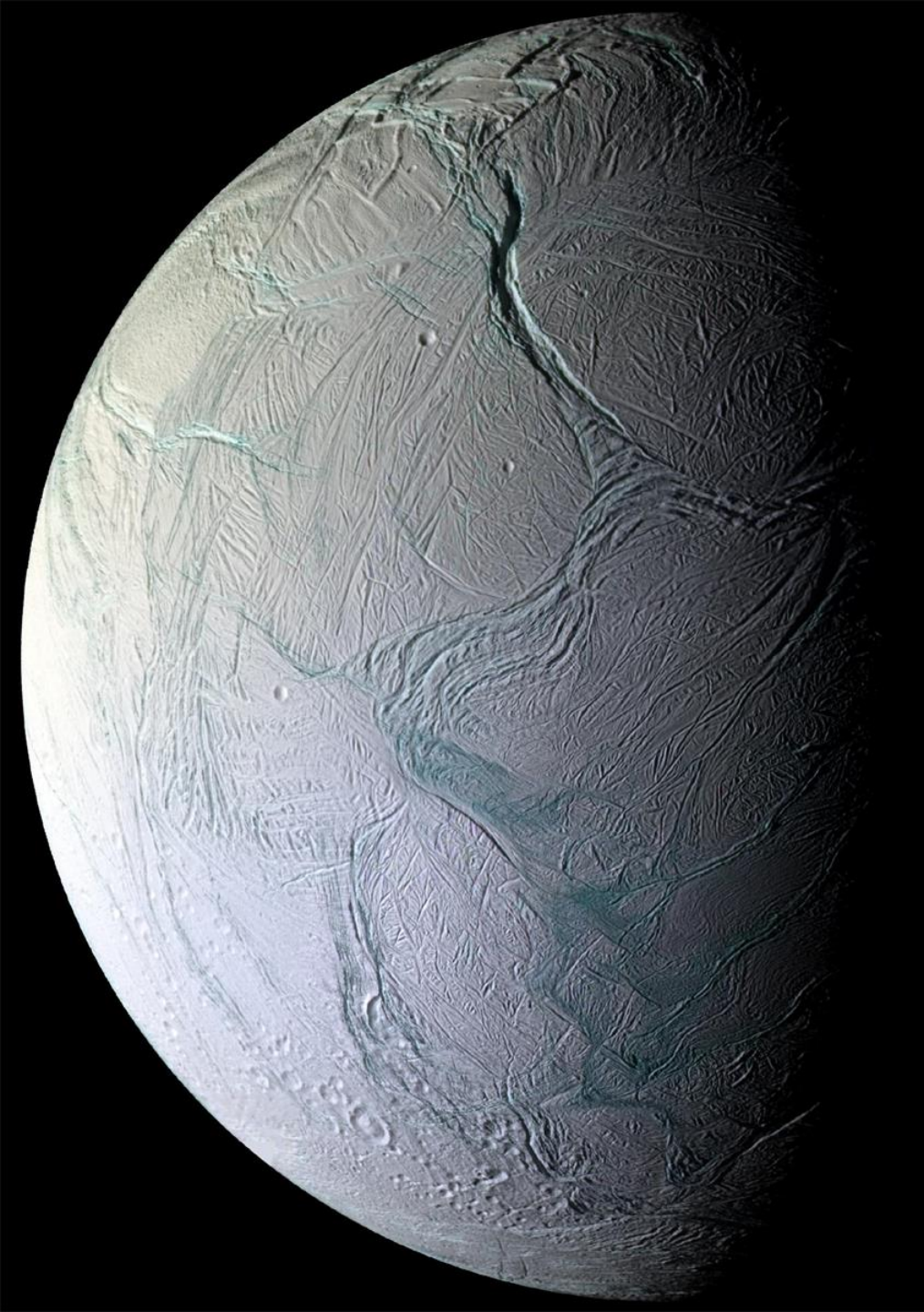
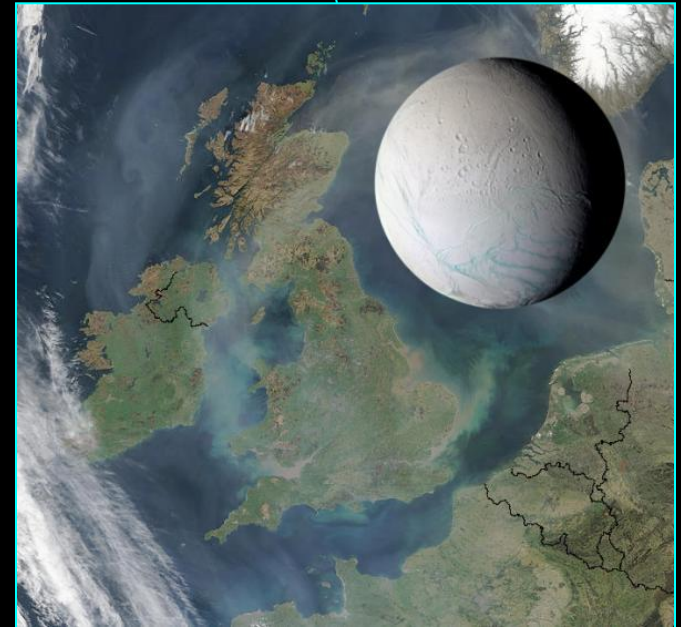
**Et le « paysage » (image IR) peut changer en quelques mois ; sans doute un recouvrement volcanique = eau + matières organiques (hydrocarbures lourds)**



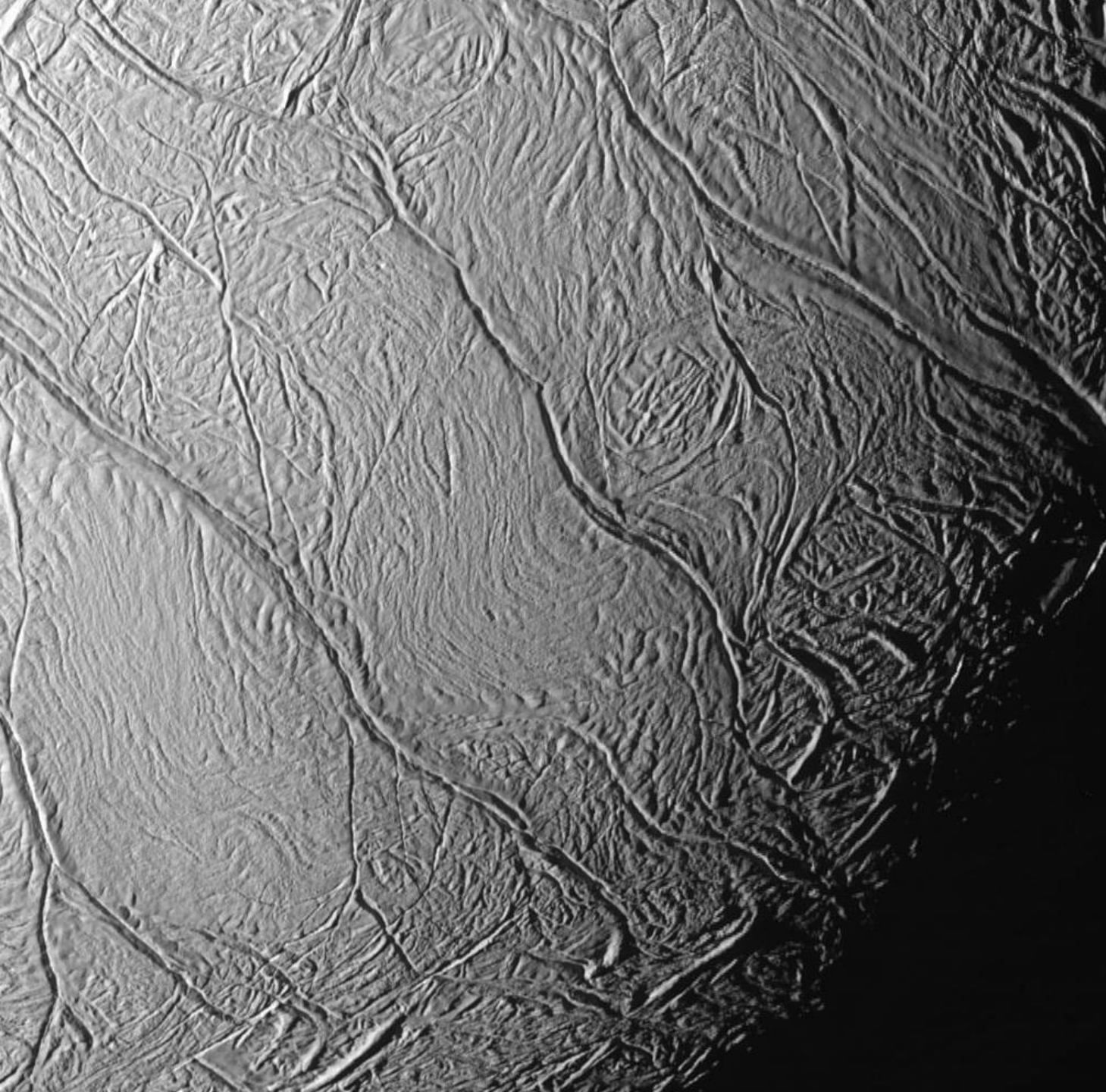
**Le « cryo-volcanisme de Titan : la mise en communication entre un océan profond (chauffé par les marées) et la surface. Que pourrait-il y avoir dans cet océan profond ?**



**Et voici Encelade  
( $D = 502$  km), avec  
une géologie très  
tourmentée. En bas,  
on l'a superposé à  
l'Europe pour  
apprécier sa taille**

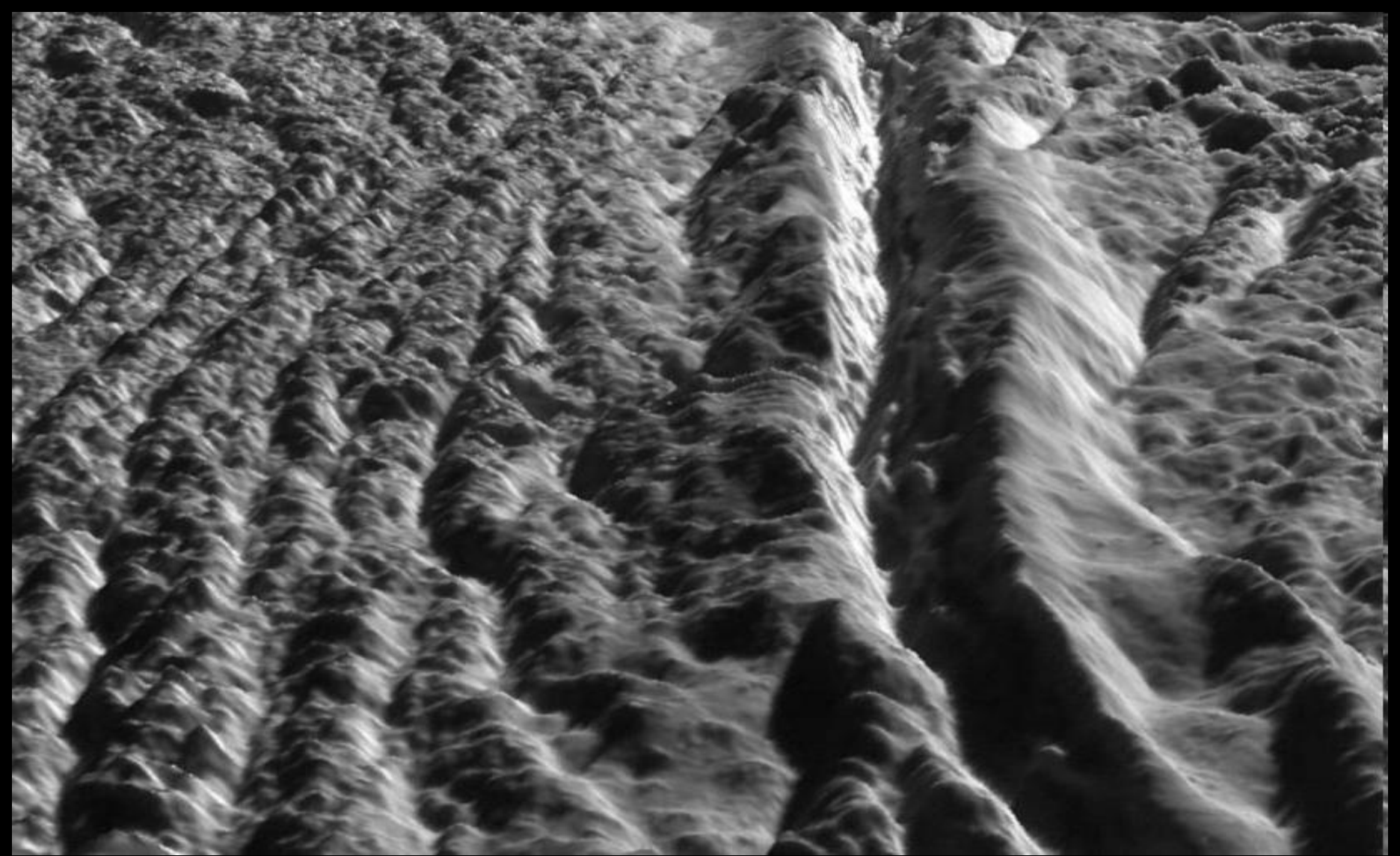






**Détail de  
ces  
structures  
(appelées  
rayures  
de tigre)  
situés  
près du  
Pôle Sud**





**Une de ces fissures, nommées Damas, qui ressemble au relief des dorsales océaniques, avec rift.**

**Et par ces espèces de fissures, il sort de la  
vapeur d'eau ! Des volcans d'eau, actifs !**

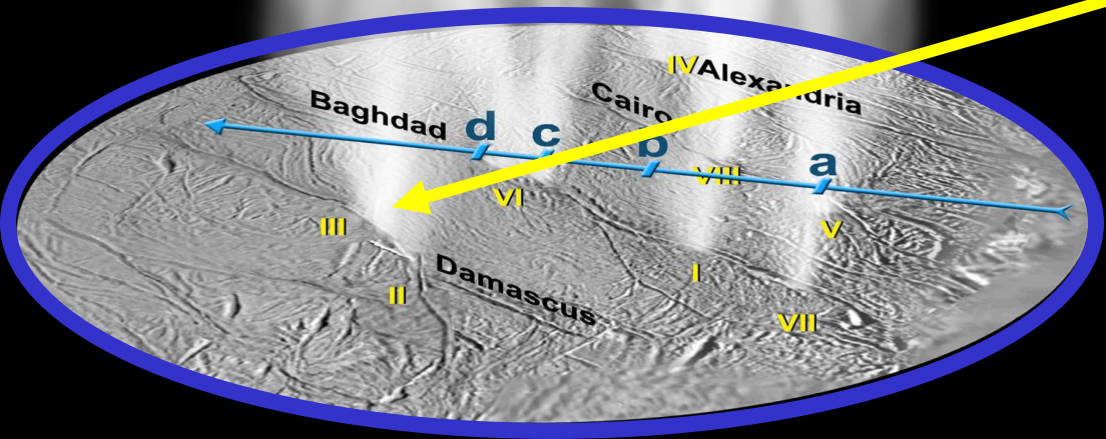
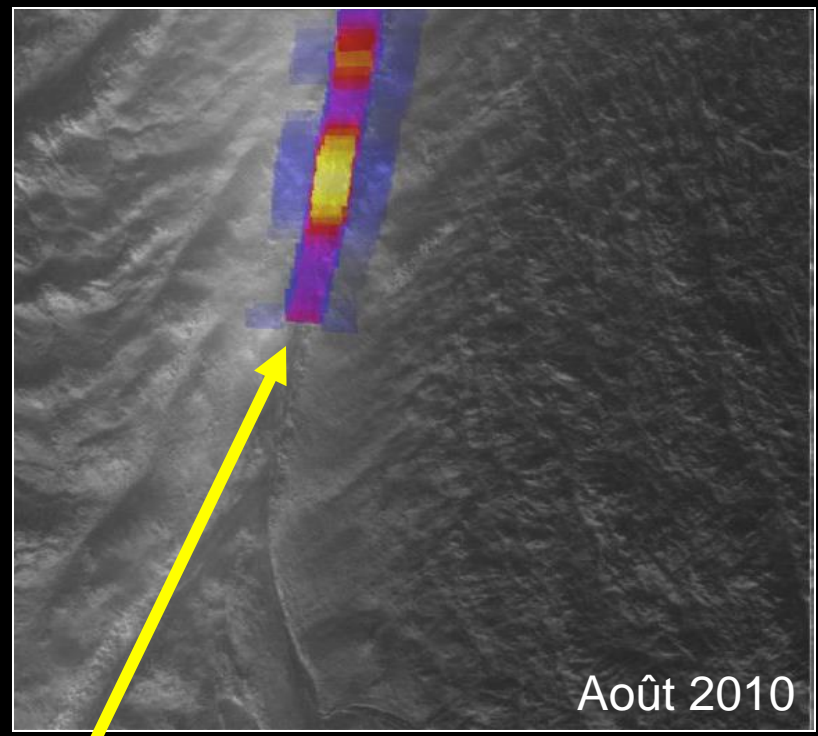
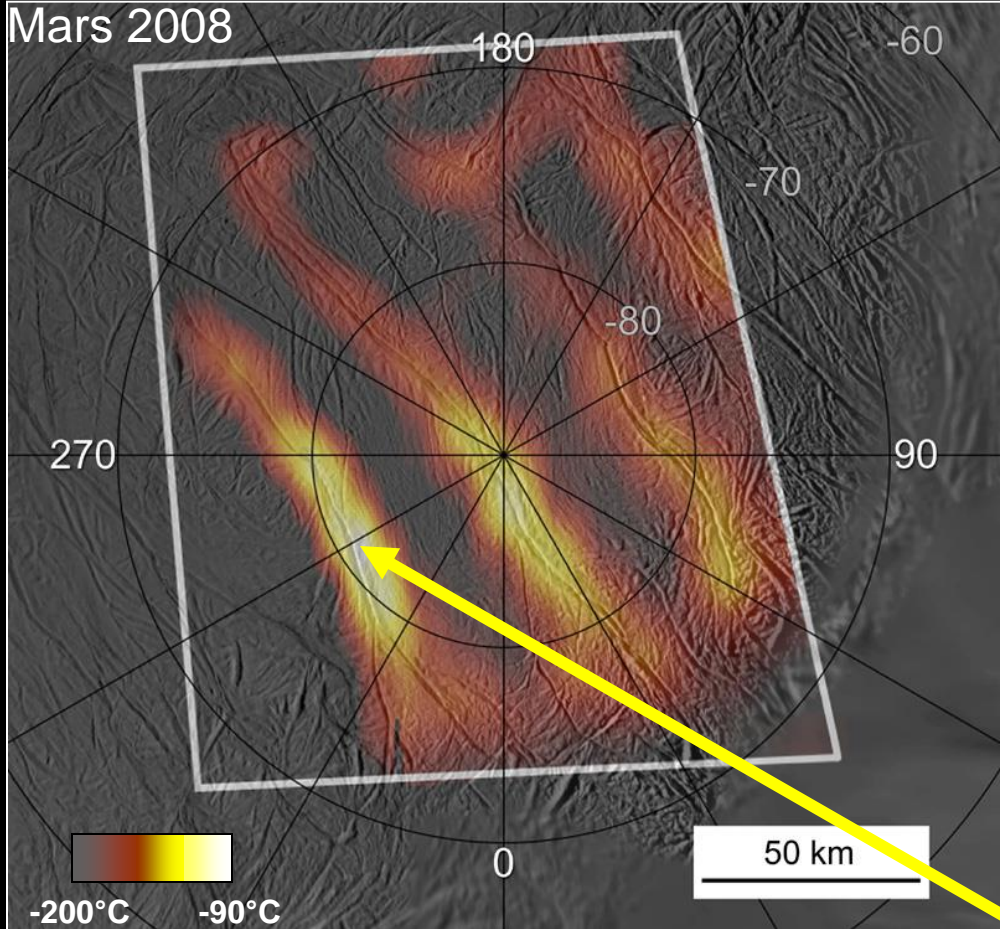




**Une vue globale  
d'Encelade pour  
vous montrer  
l'ampleur de ces  
jets volcaniques !**



# Données Infra-Rouge



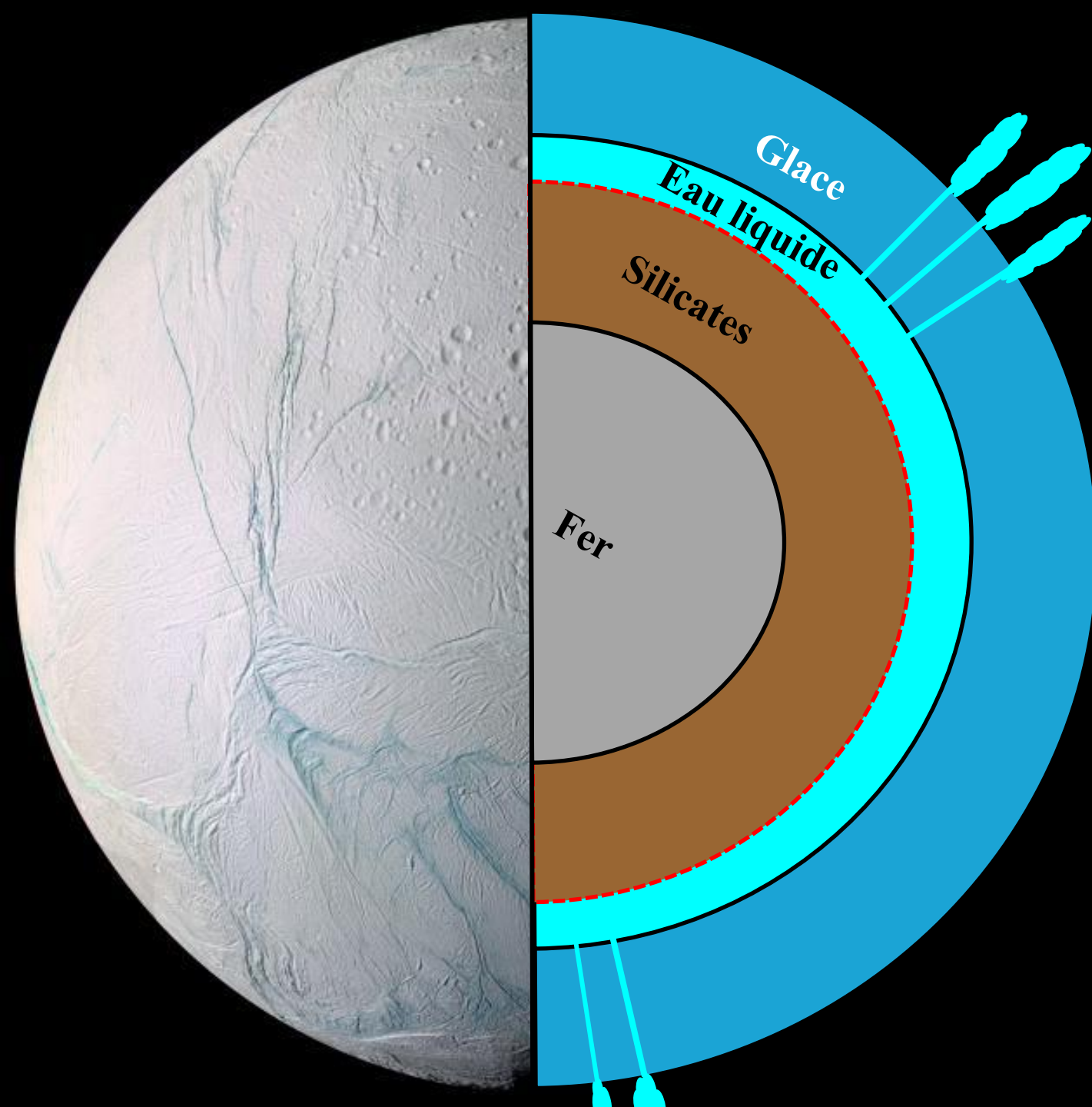
La température des « zones en gris » est de  $-200^{\circ}\text{C}$ . Là où elle est maximale, elle est de  $-83^{\circ}\text{C}$ , soit un excès de  $+117^{\circ}\text{C}$



**Comment faire un tel volcanisme sur un si petit corps,  
dans une région si froide ?**

**Un peu d'ammoniaque et de sel dans la glace, ce qui  
facilite sa fusion,  
des marées qui  
déforment et  
réchauffent  
l'intérieur  
(comme pour  
Io), et le tour est  
(presque) joué !**

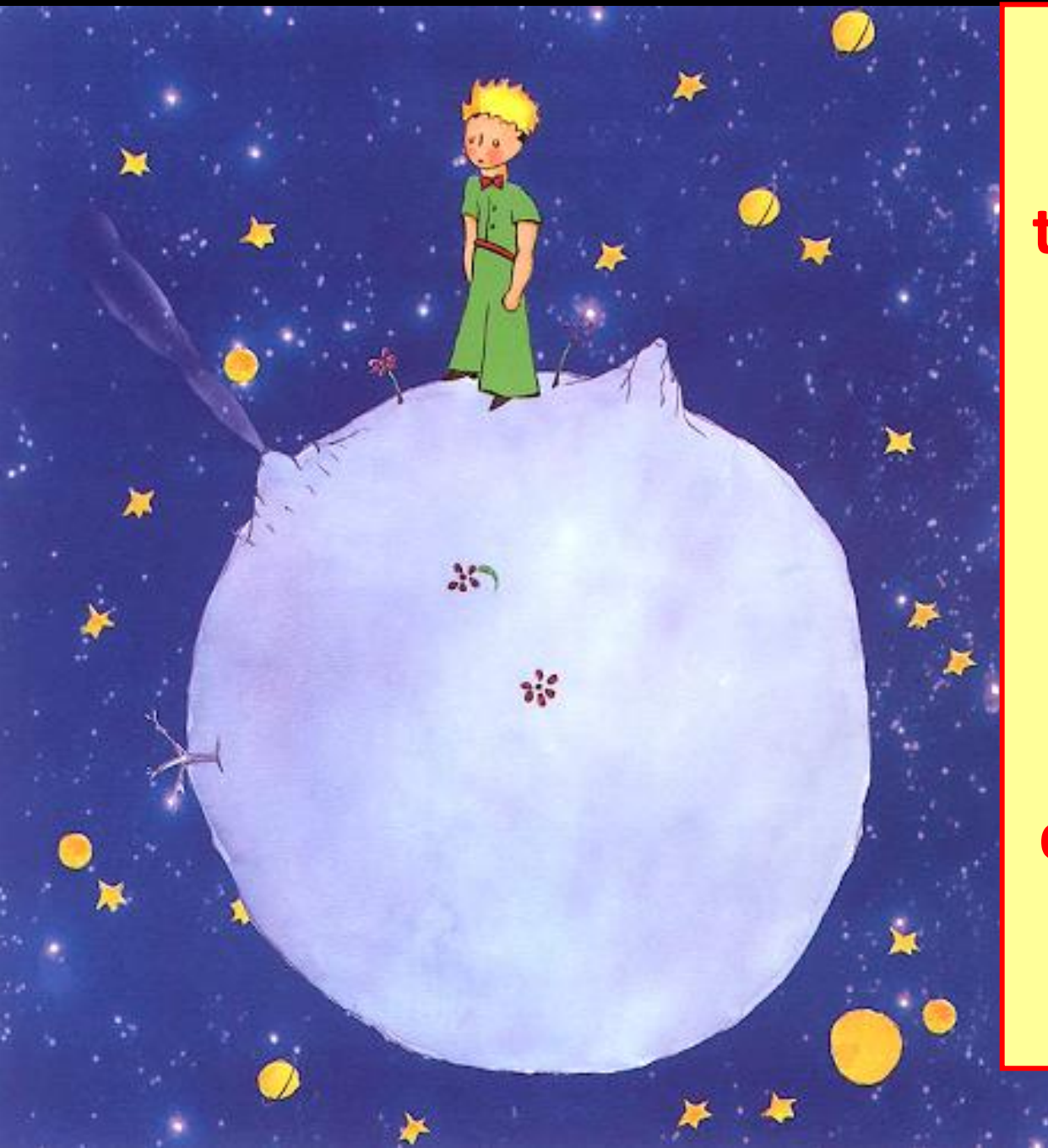




**Voilà à quoi  
doit  
ressembler  
la structure  
interne  
d'Encelade.**

**Et toujours  
la même  
question : y  
aurait-il de  
la vie dans  
cet océan  
profond ?**





**214 diapos. Il est  
temps de finir. Je  
termine ce voyage  
à travers le  
système solaire  
avec son plus  
célèbre volcan,  
celui du Petit  
Prince. J'espère  
que ça vous a plu.  
Et merci de votre  
attention !**