

En redescendant de l'autre côté des collines, le robot arrive dans un site remarquablement stratifié. Zoomons sur le rectangle jaune.



Ca vous fait penser à quoi, cette disposition ?

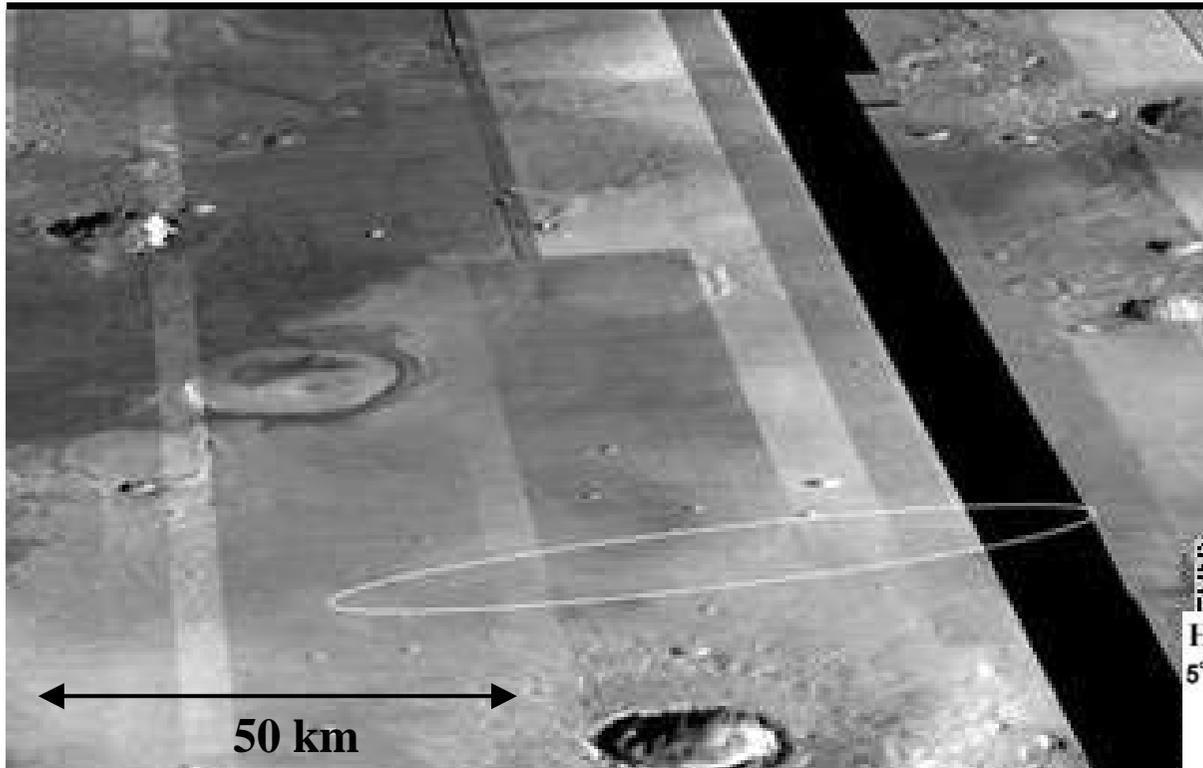


A des figures de chocs dues à la chute d'objets pesants, éjectés par des éruptions explosives

Et qui dit volcanisme explosif dit gaz, donc très probablement vapeur d'H₂O.

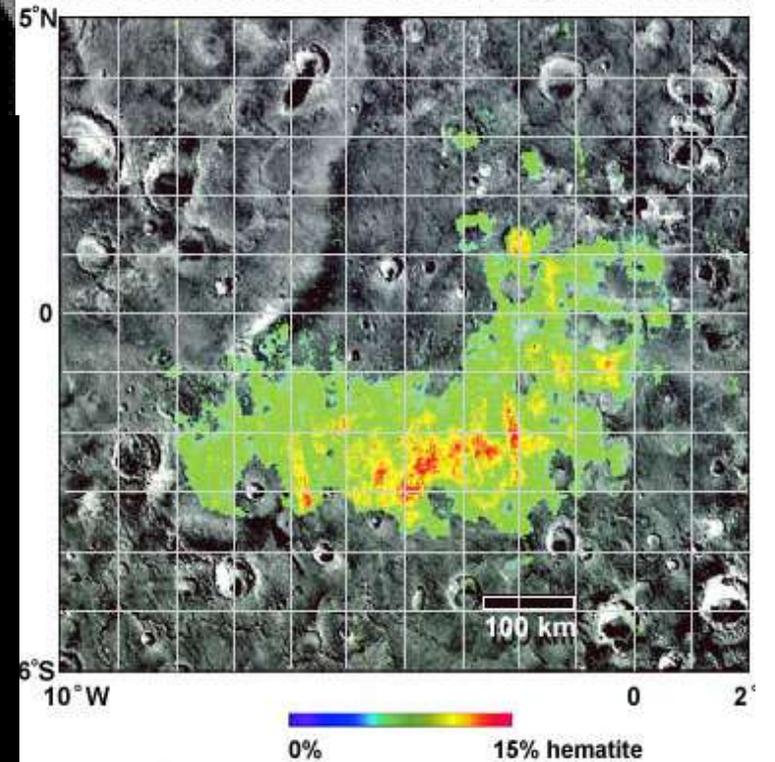
Ce 1er robot, Spirit, est maintenant « mort » depuis 2 ans.

Opportunity

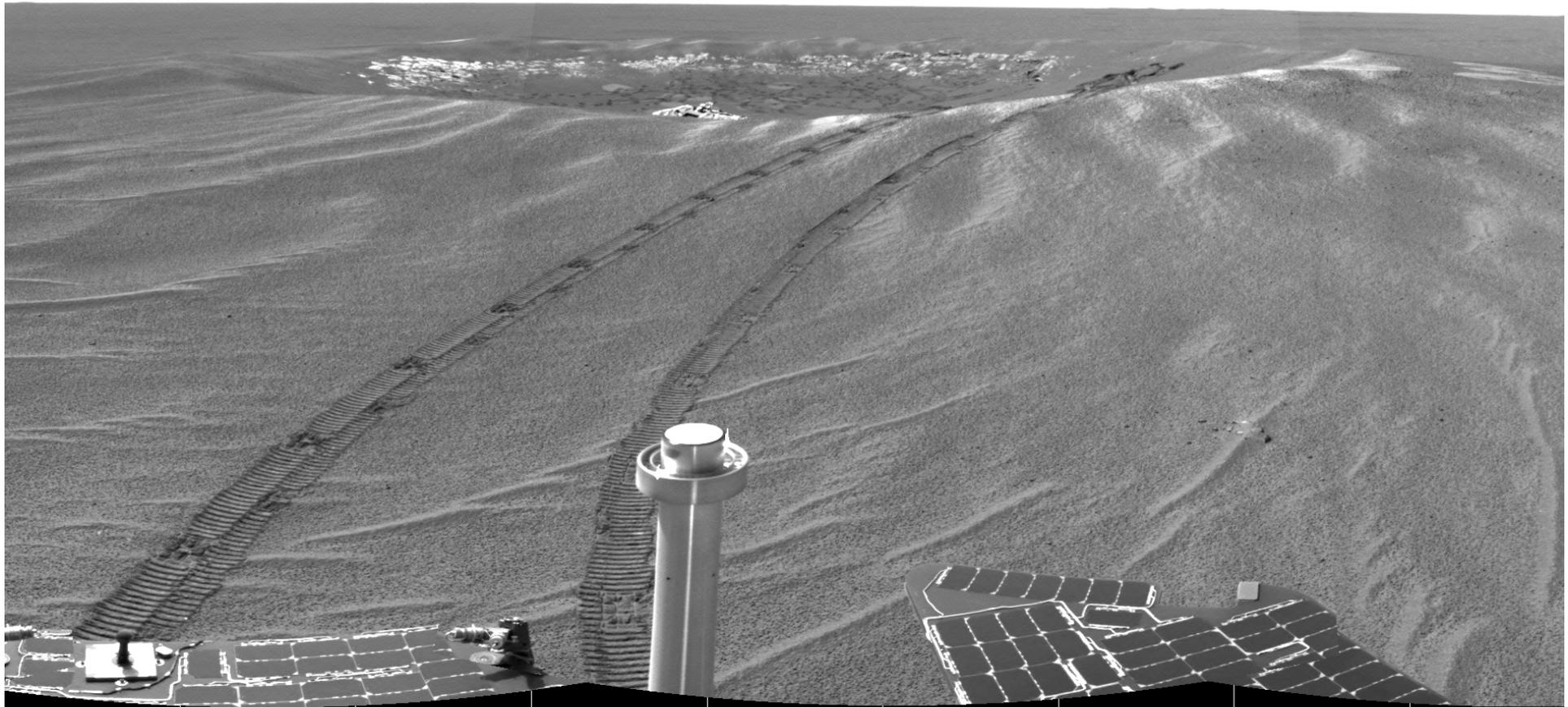


Opportunity, le 2eme robot mobile, s'est posé dans une plaine, Meridiani Planum, que des études orbitales montraient très riche en hématite (Fe_2O_3 = « rouille »), minéral suggérant la présence d'eau liquide passée.

HEMATITE DISTRIBUTION MAP FROM TES DATA



(Figure based on Christensen et al., (2001) JGR, v. 106(E10), Plate 2, p. 23,877)

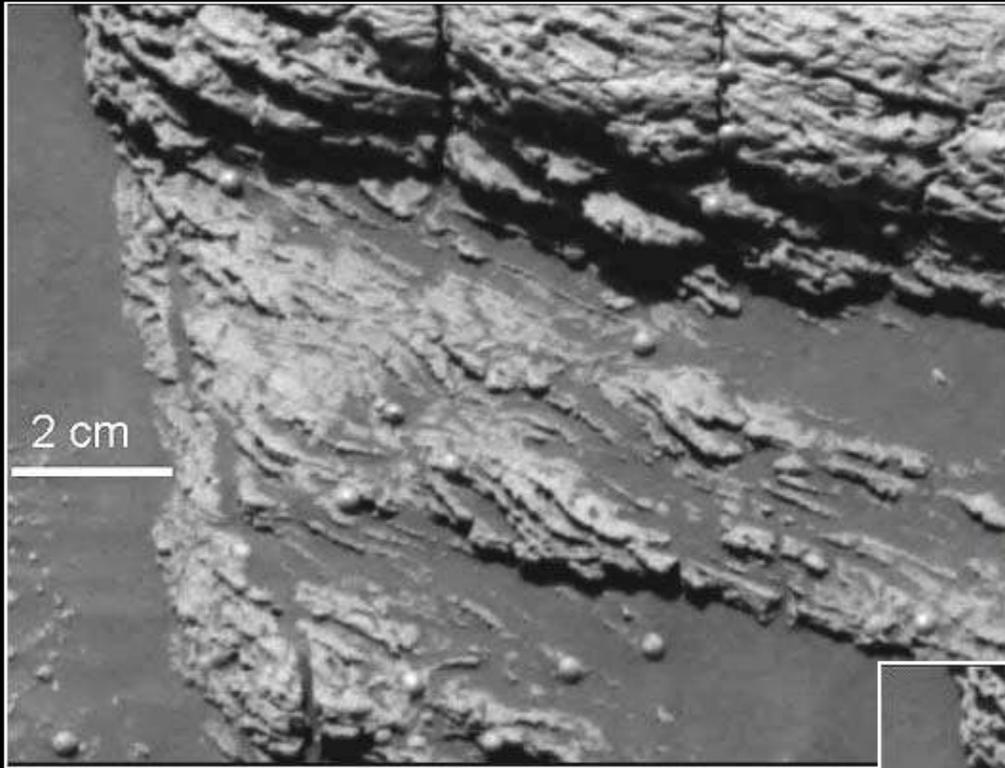


La plaine « Méridiani », le petit cratère Eagle (d = 20m, profondeur de 2 m) dans lequel s'est posé Opportunity, et les traces qu'il a fait pour en sortir au bout de 2 mois.



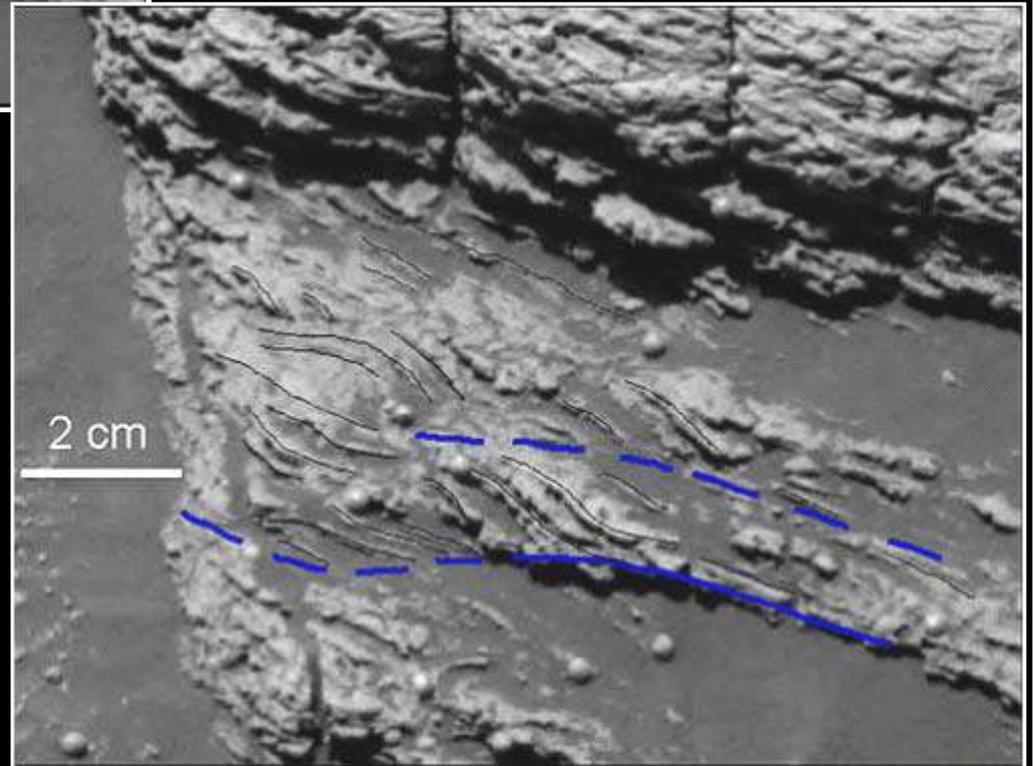
↑ «Falaise»
de 75 cm
↓ de haut

Dans ce cratère Eagle, pour la 1ere fois, on voit des affleurements (on n'avait pas encore trouvé ceux des Columbia Hills). Et pas n'importe quel affleurement : des strates ! Le jackpot !! Mais des strates de quoi ? Des laves, des cendres volcaniques, des sédiments ? Et si ce sont des sédiments, sont-ils éoliens, « aquatiques » ... ?



Et en regardant le détail des stratifications, Opportunity découvre des stratifications obliques !

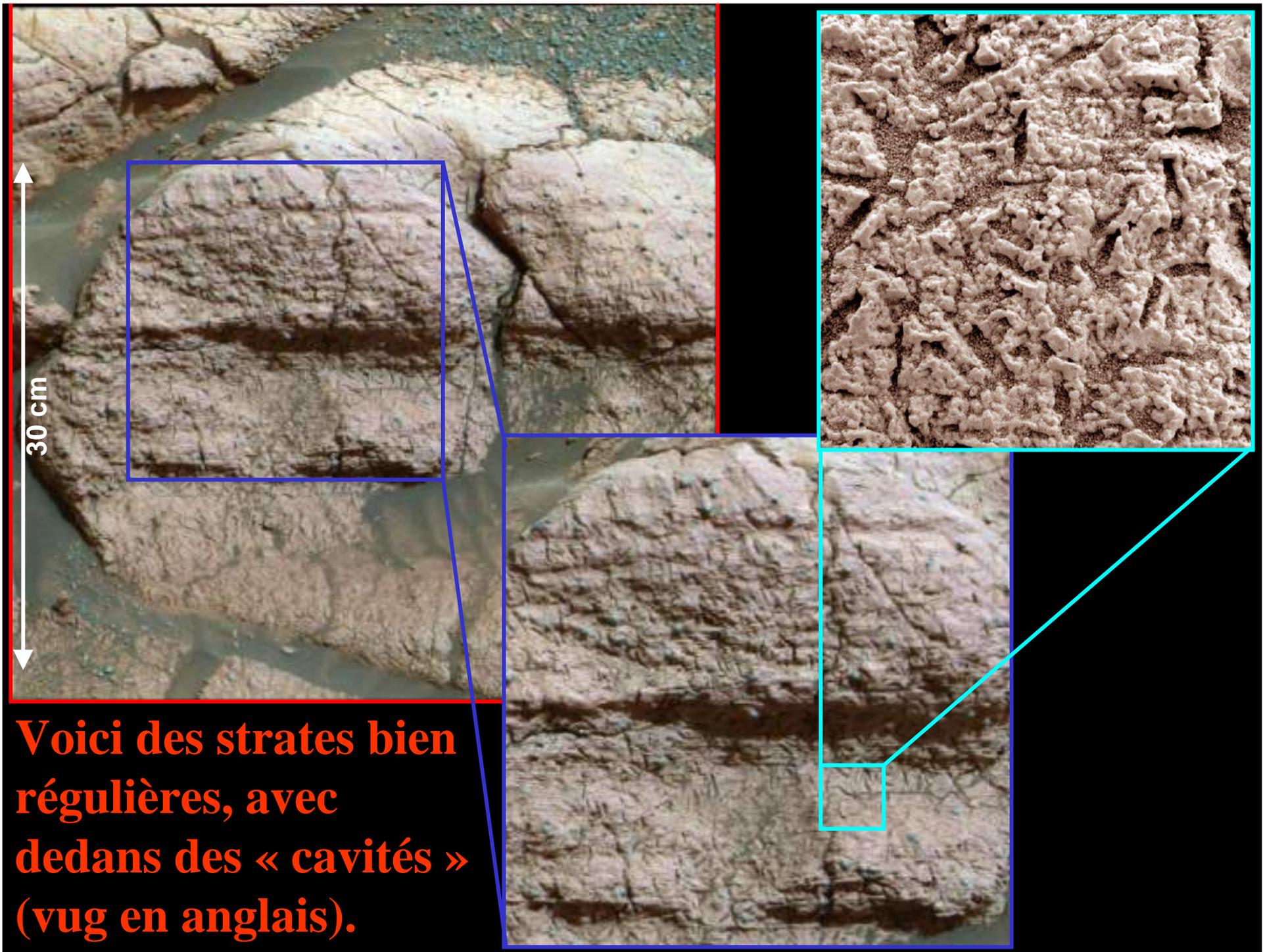
Et des sédimentologues patentés nous affirment que se sont des stratifications faites sous un courant d'eau



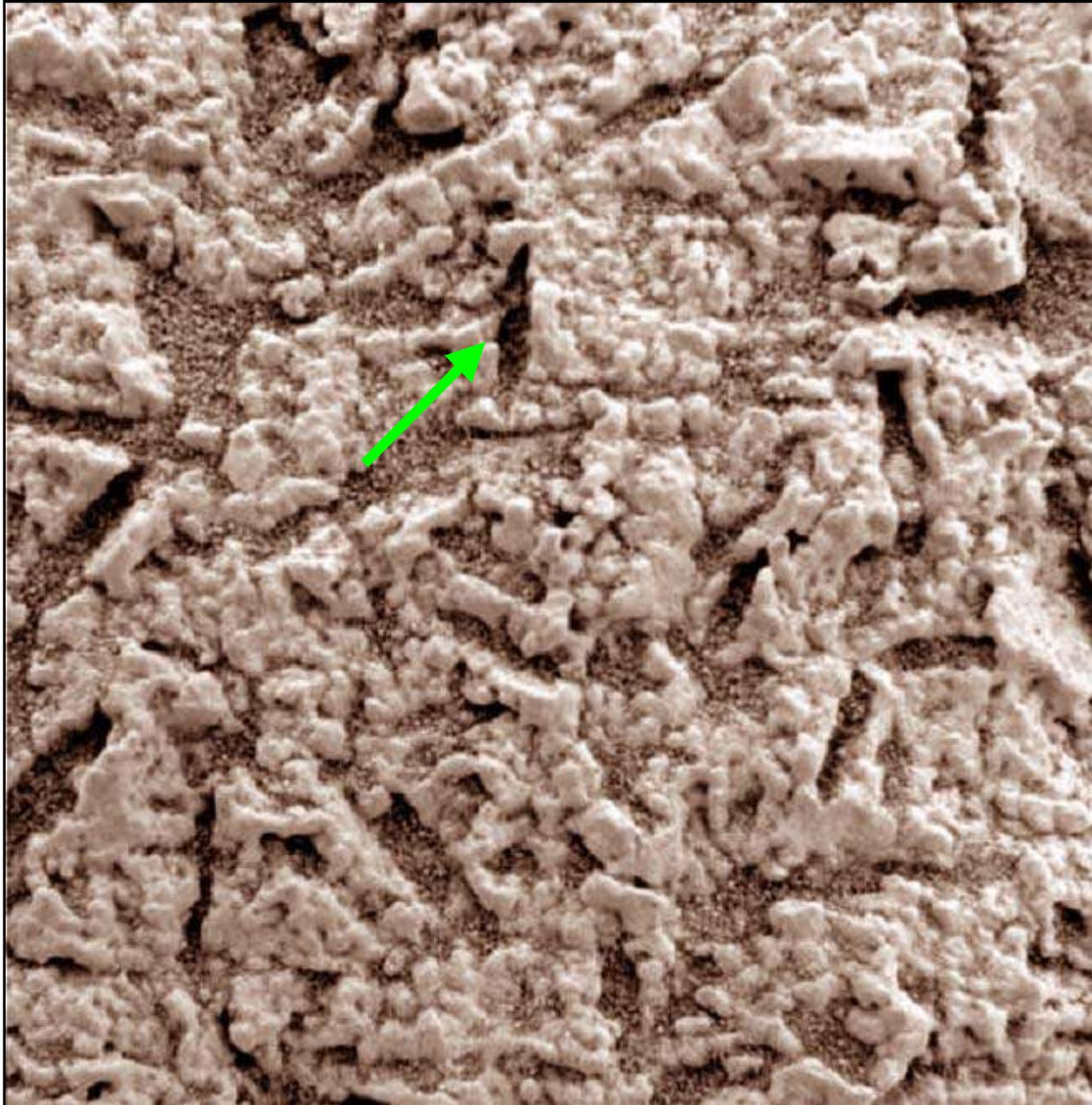


Photographie : Pierre Thomas

**Une analogie
terrestre des
stratifications
obliques du cratère
Eagle, ici dans le
crétacé supérieur des
Corbières**



Voici des strates bien régulières, avec dedans des « cavités » (vug en anglais).

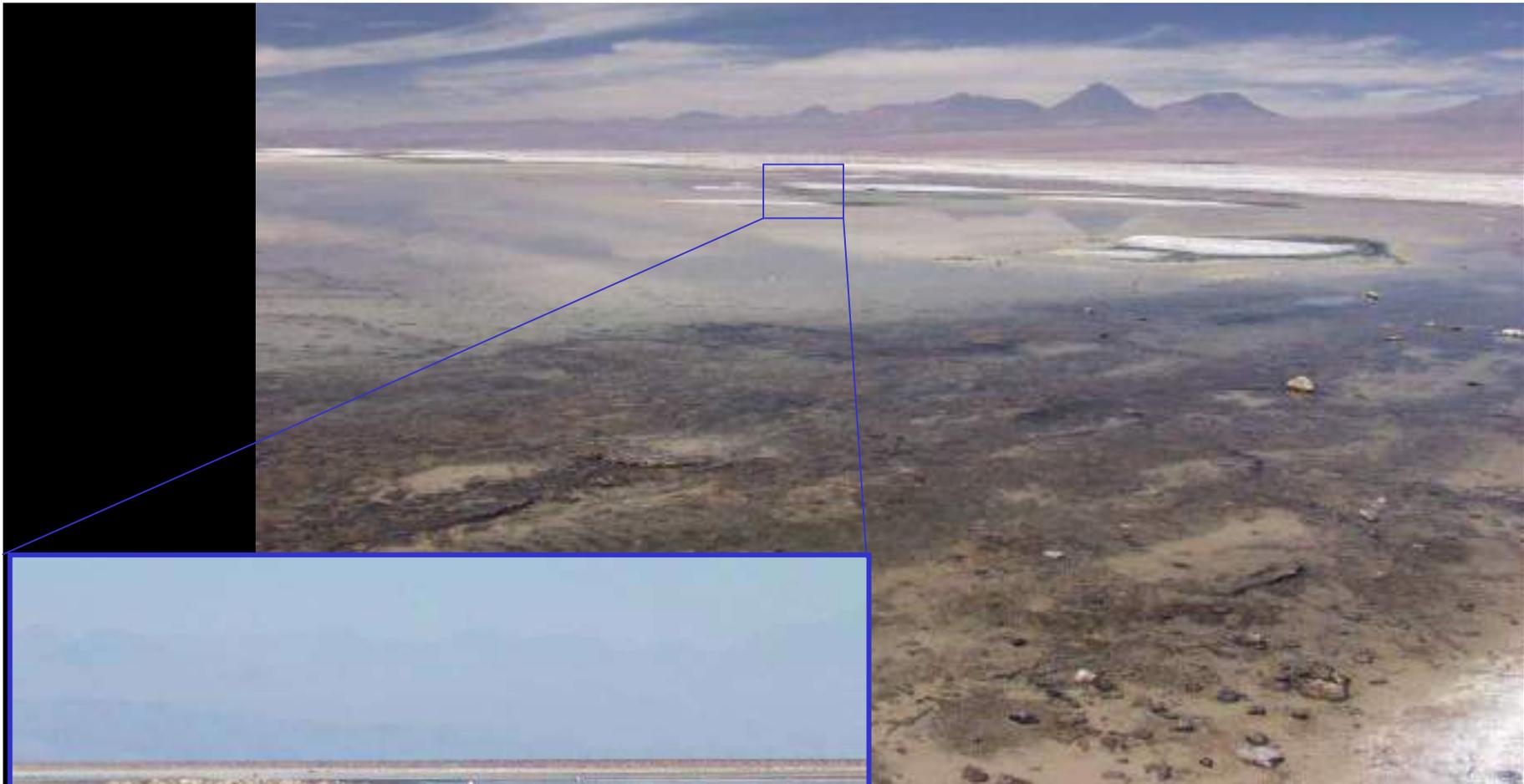


**Les « vugs » ?
Parfois ils ont
des formes
«géométriques»
rappelant
furieusement la
forme des
cristaux de
gypse (roche se
formant par
évaporation
d'une mer ou
d'un lac salé)**

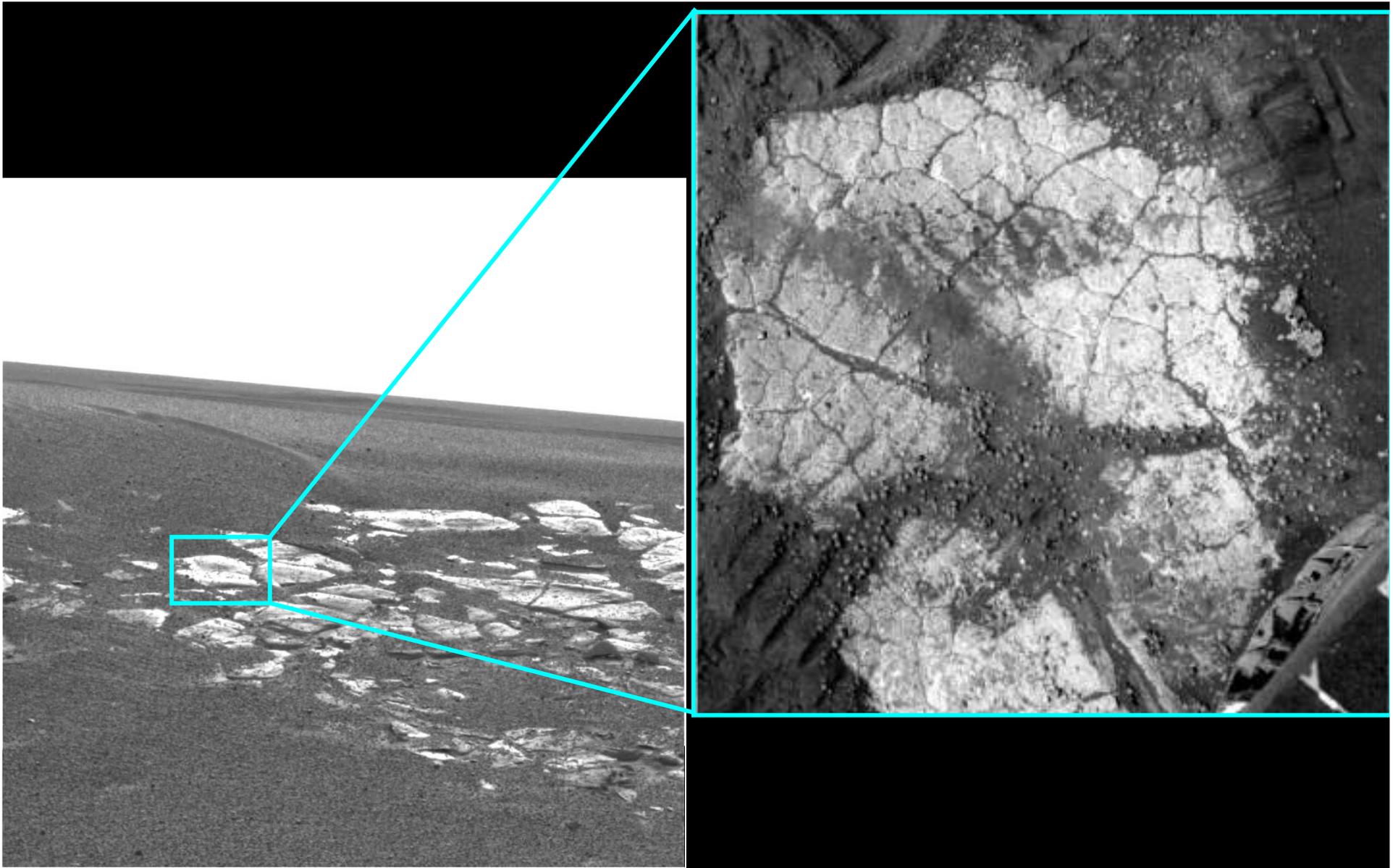
Les « vugs » ressemblent à des pseudomorphoses de gypse et autres sels



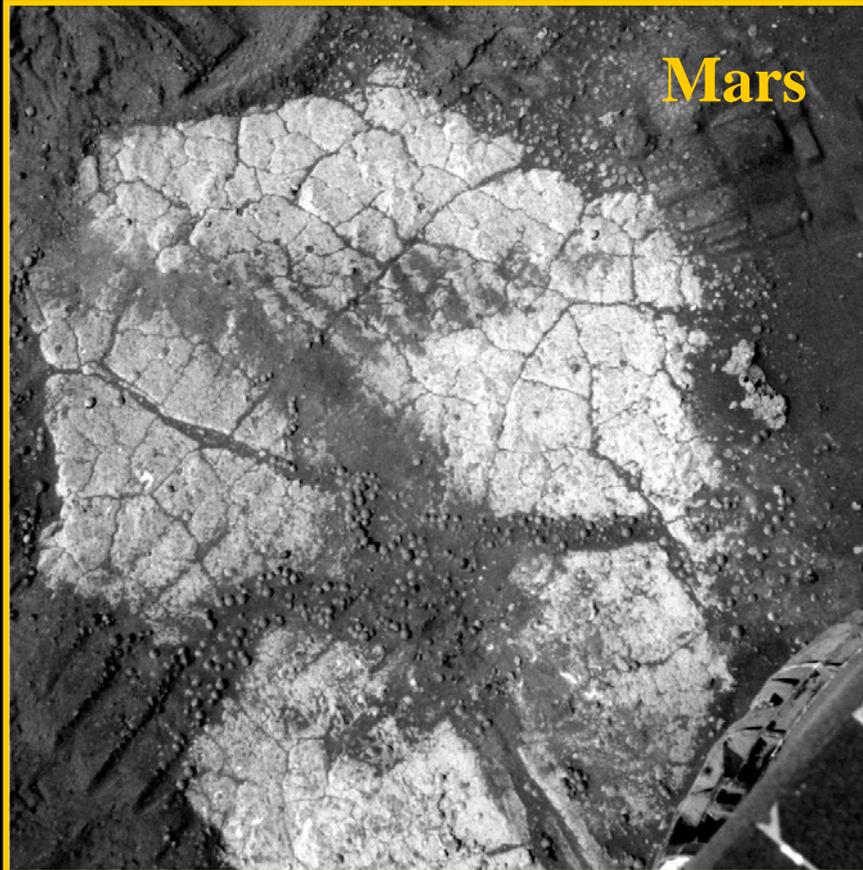
(ressemblance indiquée sur Planet-Terre la veille de la publication des analyses)



**Gypse, et autres sels,
ça se dépose dans des
lacs salés, des lagunes
en bord de mer ...**

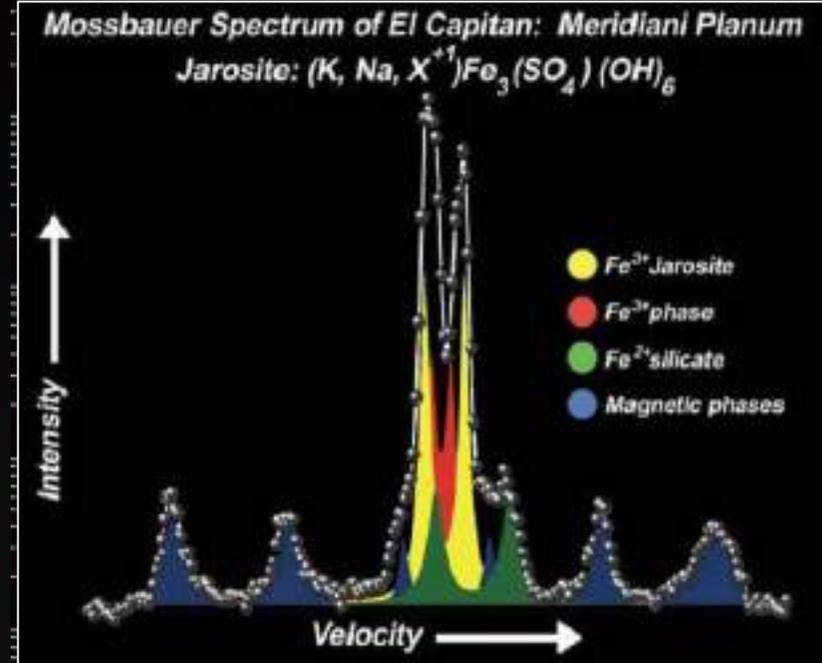
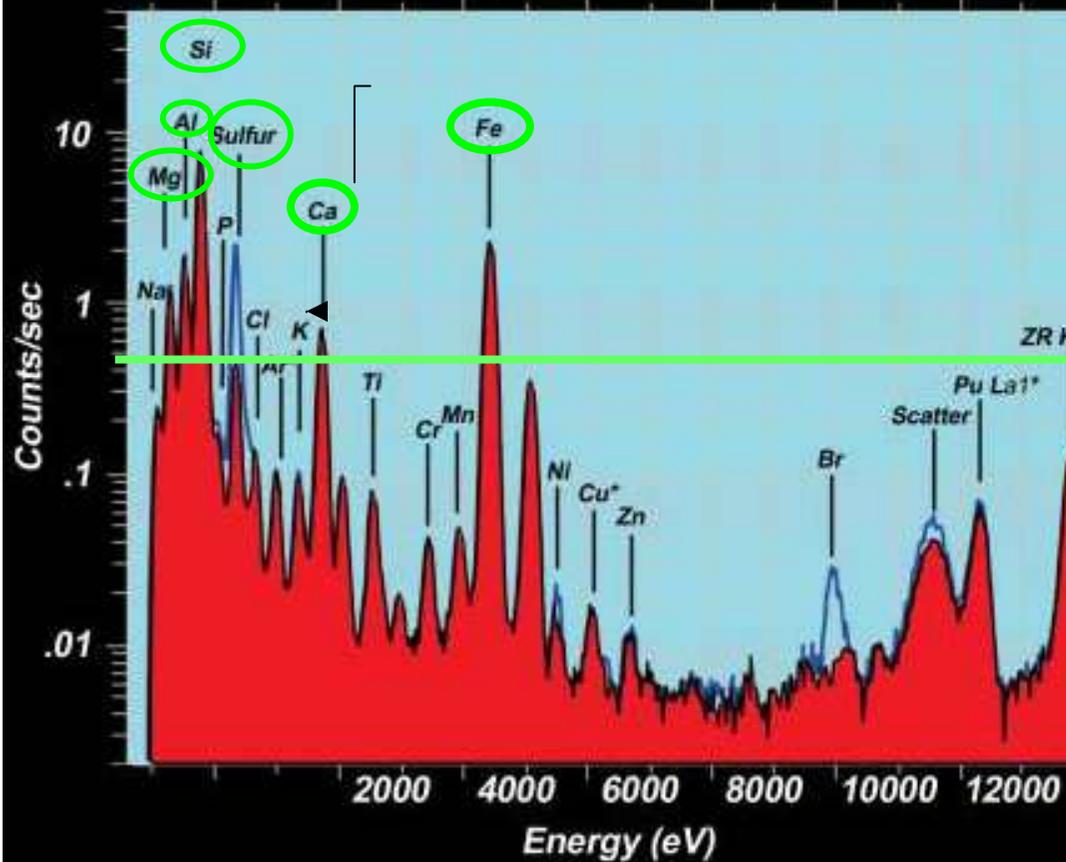


**Allons voir maintenant là où l'on voit les couches
« par dessus » !**

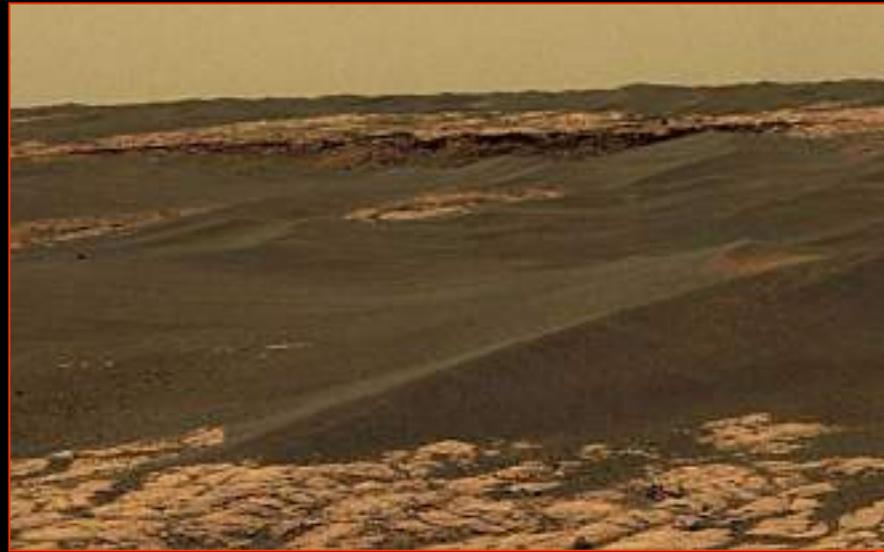


Certaines de couches, vues de dessus, présentent un réseau de fentes polygonales, comme une argile qui se rétracte ! Et sur Terre, ces fentes de rétractions se font en général par dessiccation !

APXS Rock and Soil X-ray Spectra at Meridiani

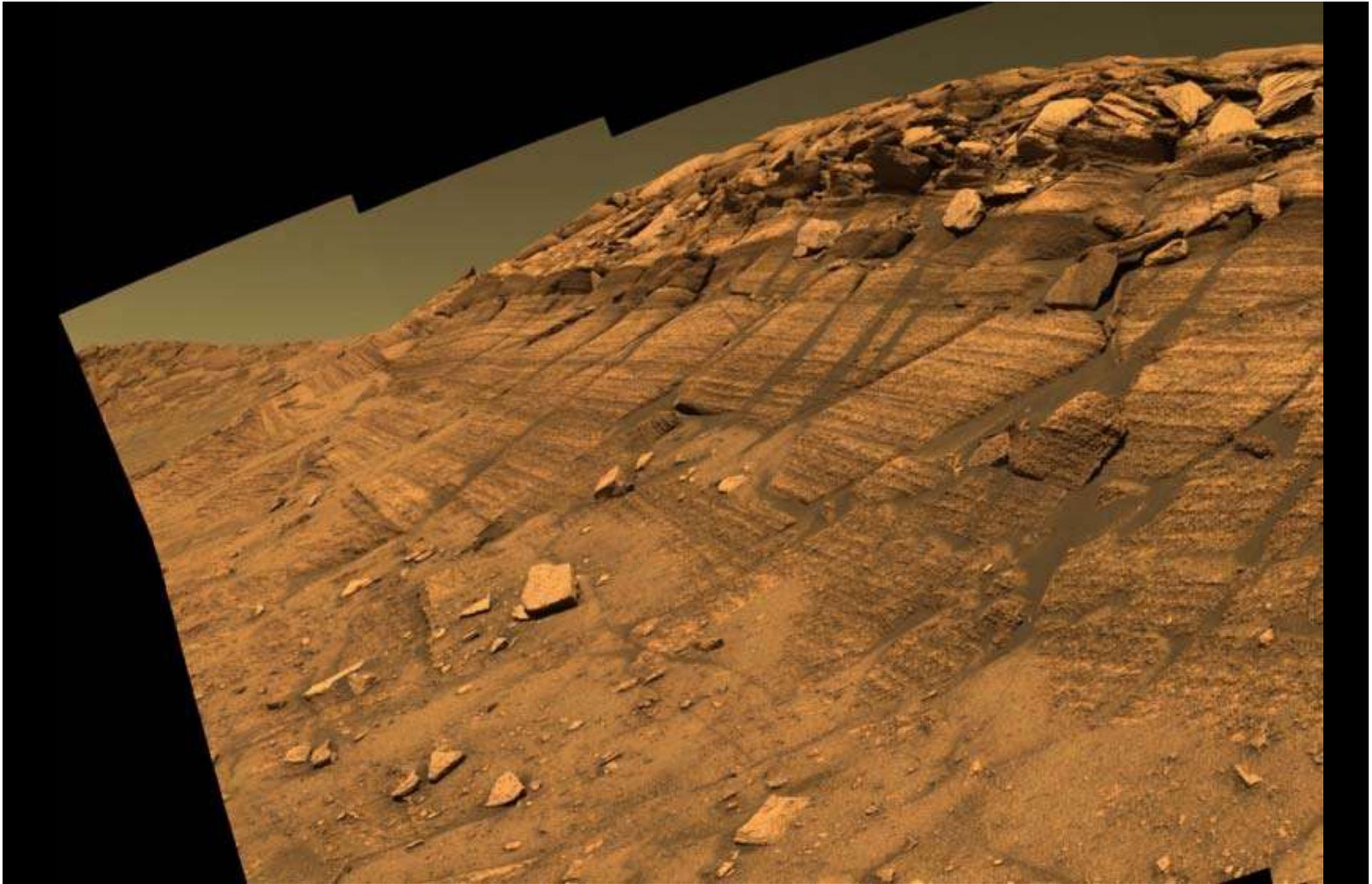


Analyse chimique globale : des aluminosilicates hydratés (chimie d'argile) riches en Fe, Mg, Ca et S. Analyse minéralogique : la roche « globale » contient de l'hématite (Fe₂O₃ ± hydraté), un sulfate potasse-ferrique hydraté ...

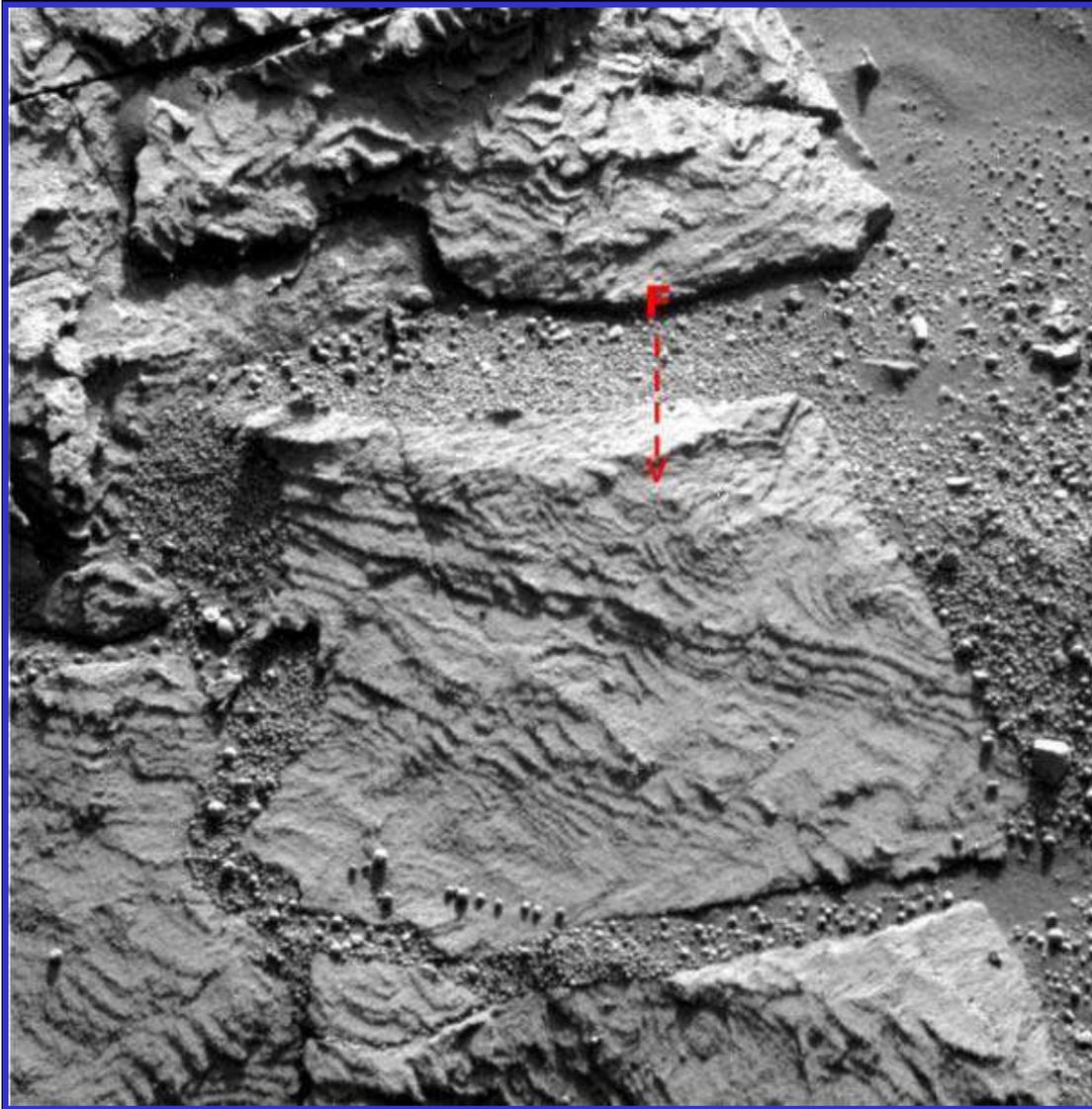


Après avoir quitté le cratère, Opportunity roule dans une plaine où les fentes de retrait (dessiccation ?) semblent être la règle.





Il atteint le cratère Endurance dont il explore les falaises internes magnifiquement stratifiées



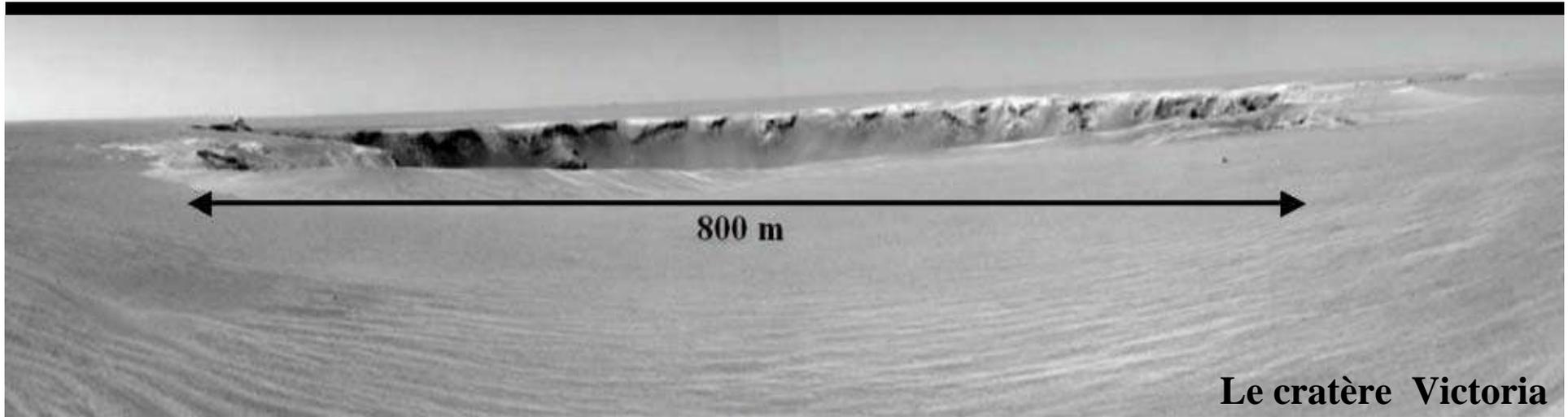
Dans ce secteur, vues en section, les strates sont parfois « festonnées ». Sur Terre, on connaît de telles states festonnées





Sur Terre, de tels festons, symétriques, indiquent que la boue s'est déposée dans de l'eau clapotante, sous une profondeur d'eau de quelques cm.



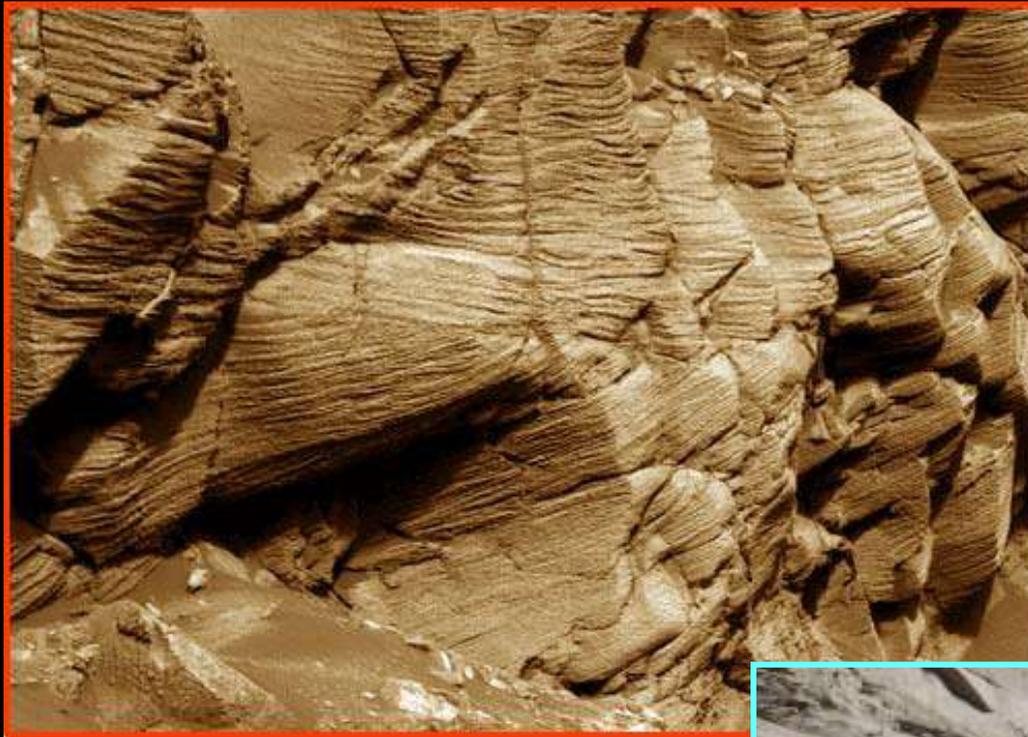


Le cratère Victoria



Et après avoir roulé plus de 10 km, notre robot atteint un grand et profond cratère, le cratère Victoria. Après

en avoir exploré les bords, Opportunity commence à y descendre. On va passer de 7m à 30m de succession de couches ! Que va-t-on découvrir ??

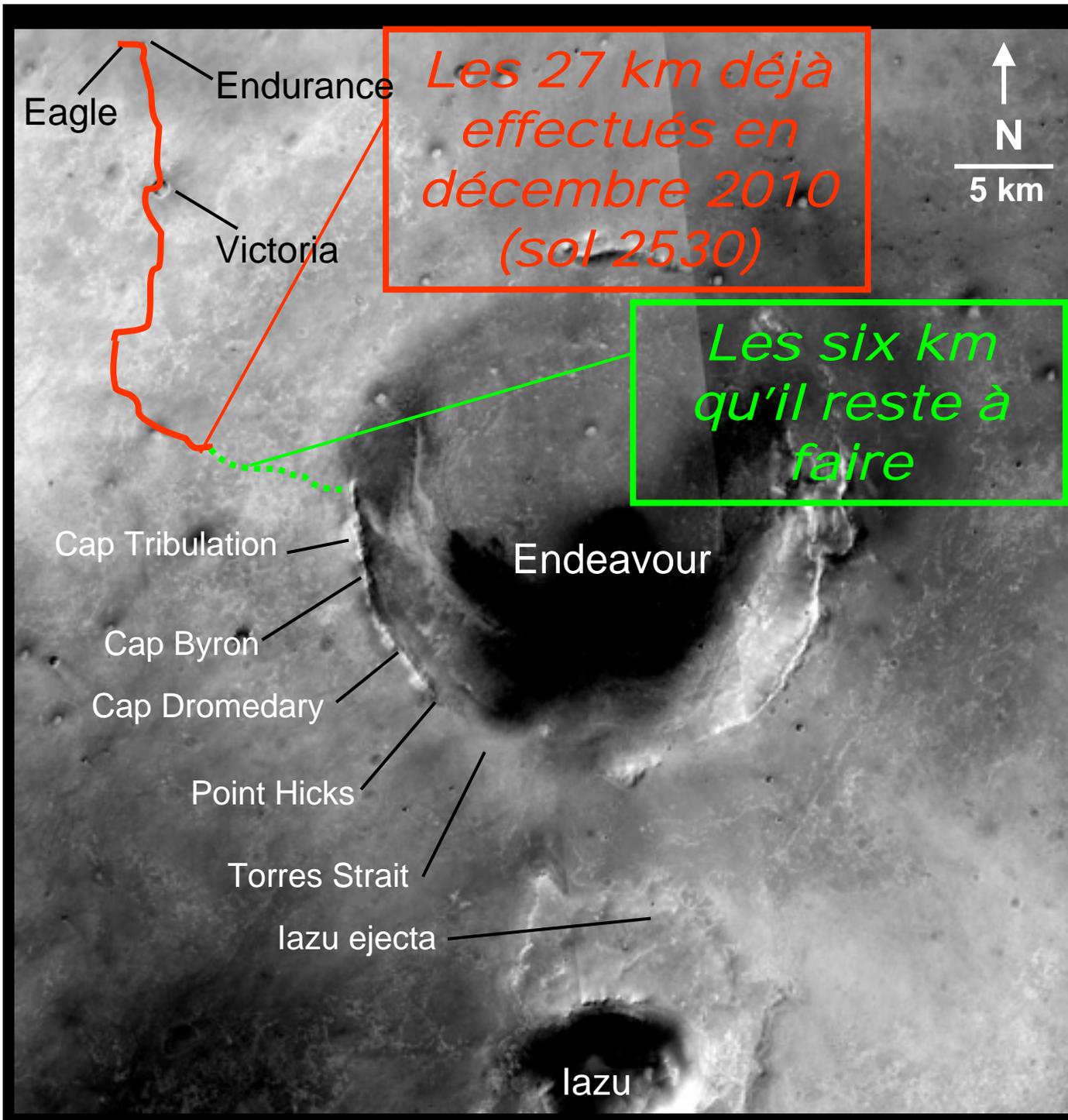


**On y voit et analyse à
peu près la même
chose que
« d'habitude » ! C'est
beau, mais
« décevant »**

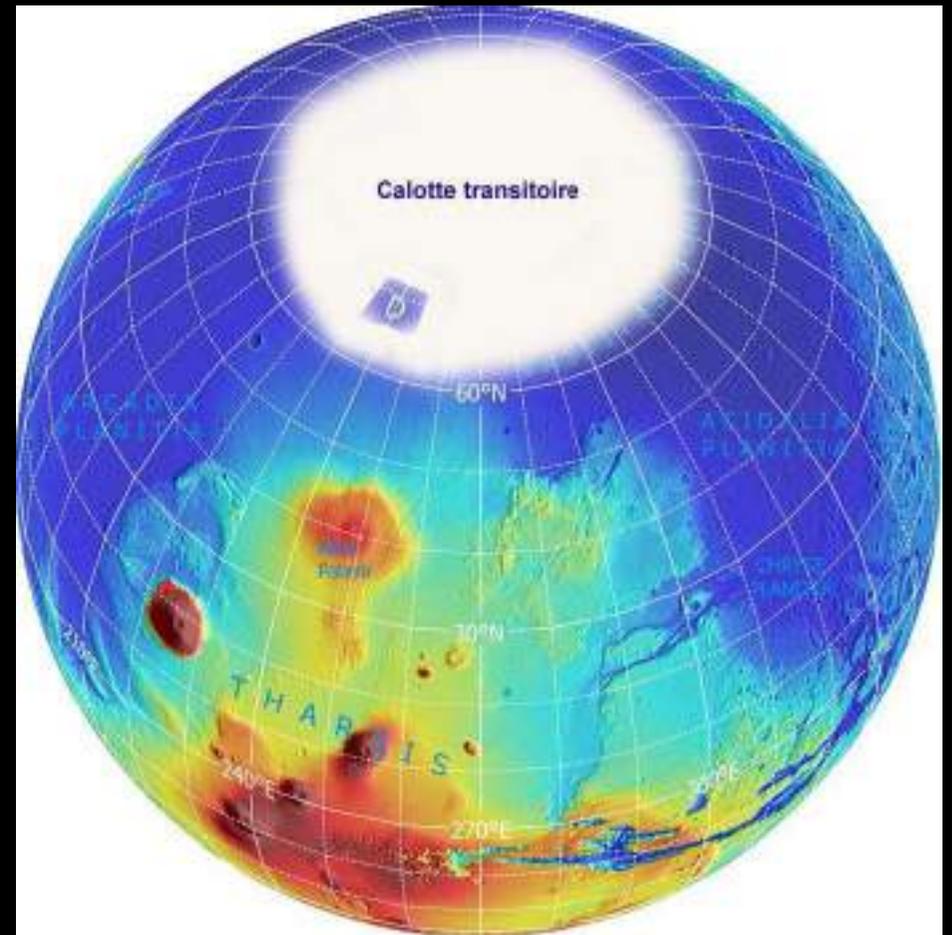
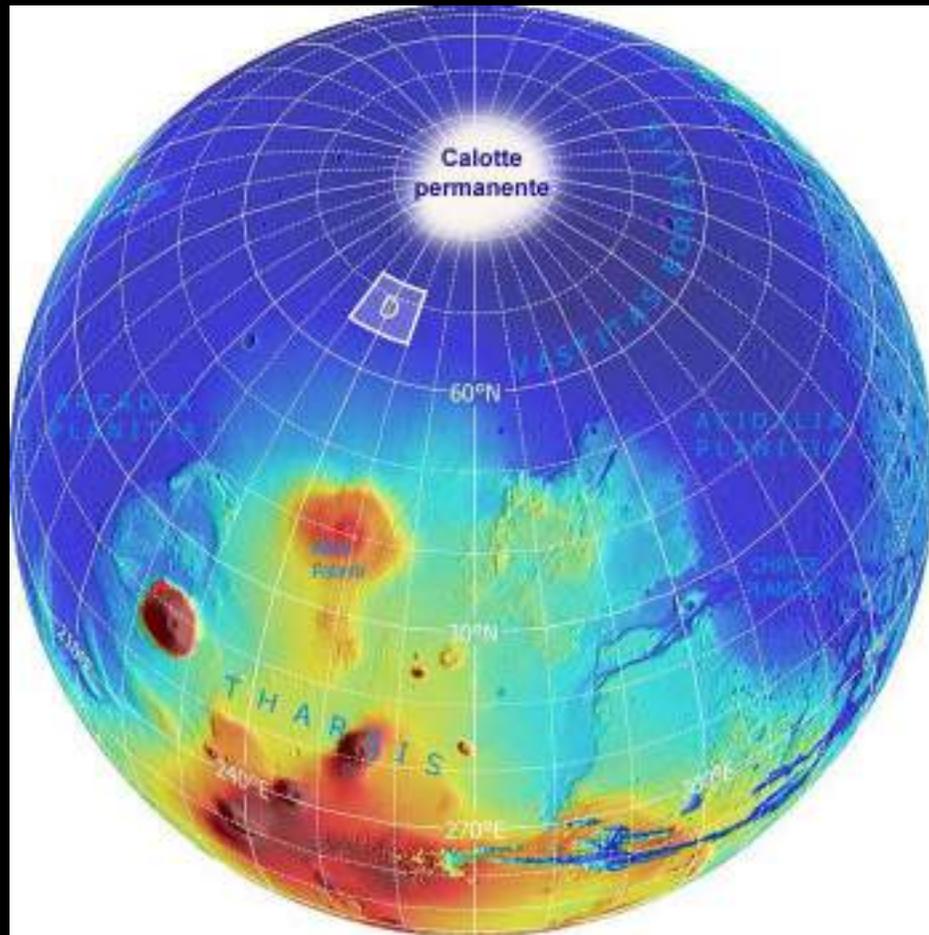
**Je ne peux pas
m'empêcher de faire
cette comparaison !**

**Il ressort de son
cratère.
Et où va-t-il ?**

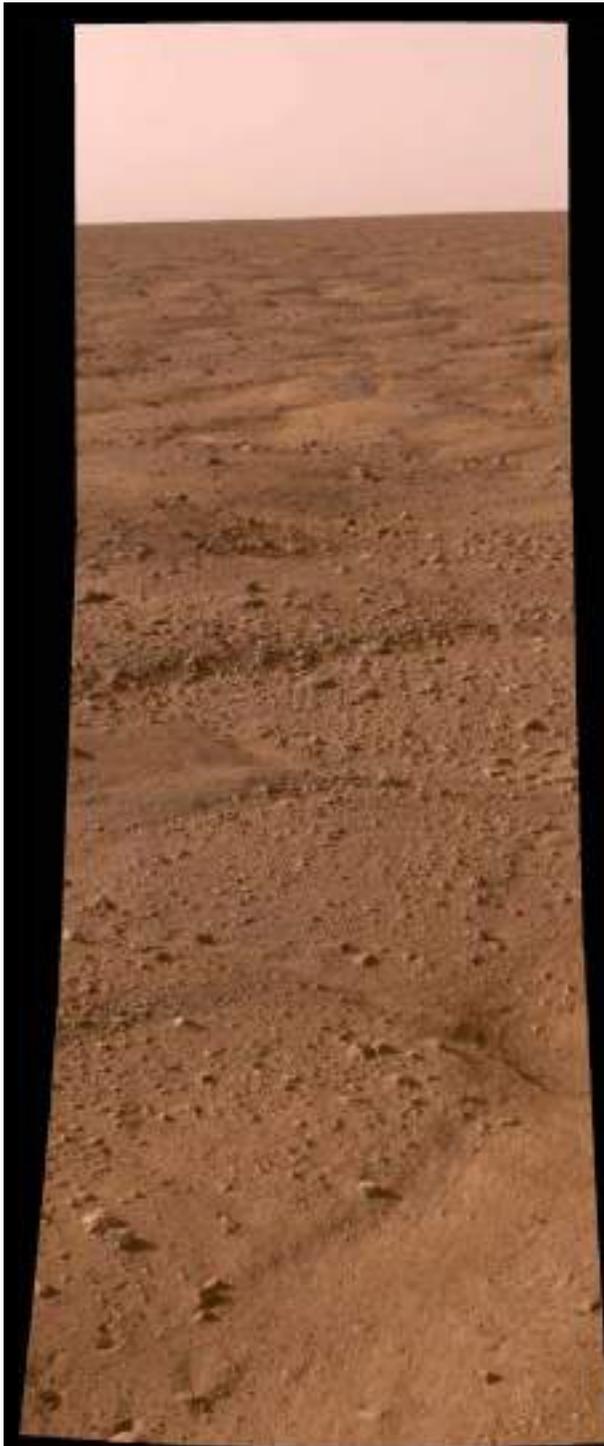




Opportunity a déjà fait 27 km depuis janvier 2004. Il lui reste 6 km à faire pour arriver au bord du cratère Endeavour, plus profond que le canyon du Colorado. Que va-t-il y découvrir ?



Chercher glace, argiles, carbonates et molécules organiques dans les terrains péri-polaires martiens a été l'une des tâches du 3eme robot (non mobile) Phoenix, parti le 4 août 2007, arrivé le 25 mai 2008 et « mort » de froid (c'était prévu) le 2 novembre 2008.

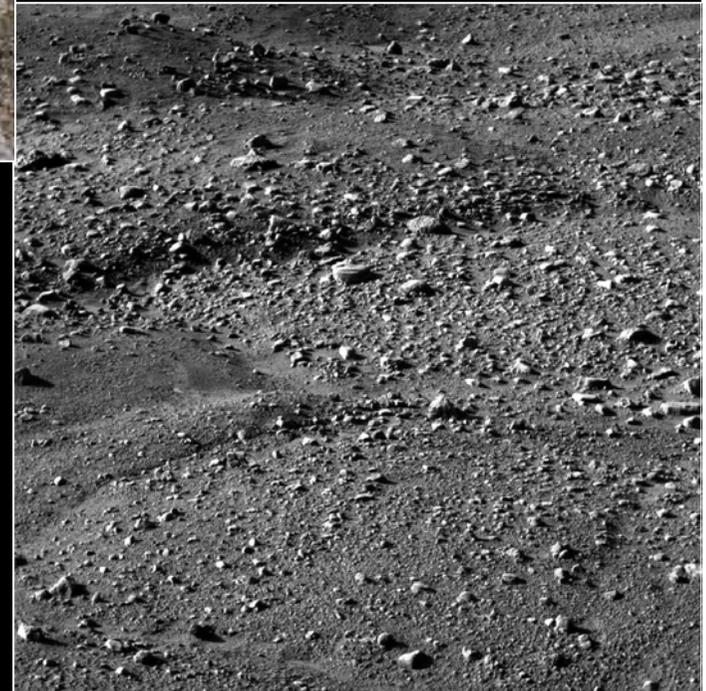


**Le paysage : un
sol polygonal, à
perte de vue,
avec des
polygones de
dimension
métrique**



**On en connaît
aussi sur Terre
de taille
métrique,
comme ceux de
Phoenix**

**Mais pour faire des sols polygonaux (sur
Terre), il faut un permafrost avec des
alternances gel-dégel superficiel.
Permafrost sur Mars, oui ; alternance gel-
dégel par 68° lat. nord sur Mars, non !**



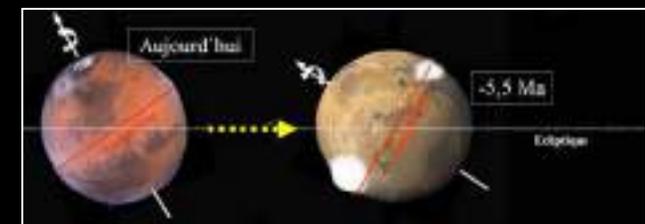
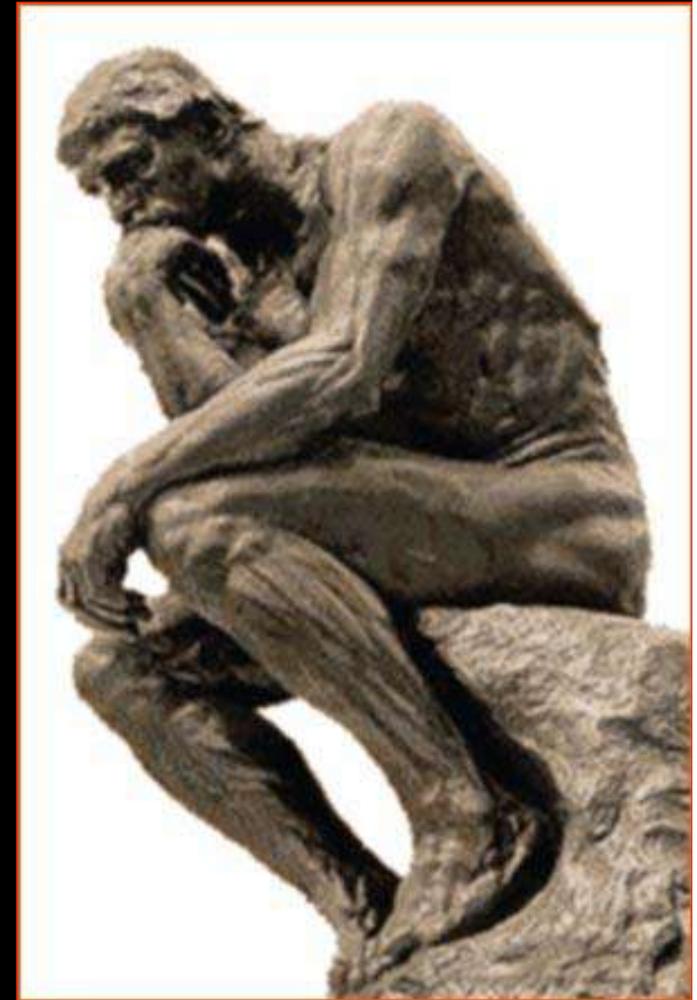
Depuis l'atterrissage, en plein été, la température oscille entre -25°C le jour et -80°C la nuit ! Et ça baisse avec l'arrivée de l'automne.

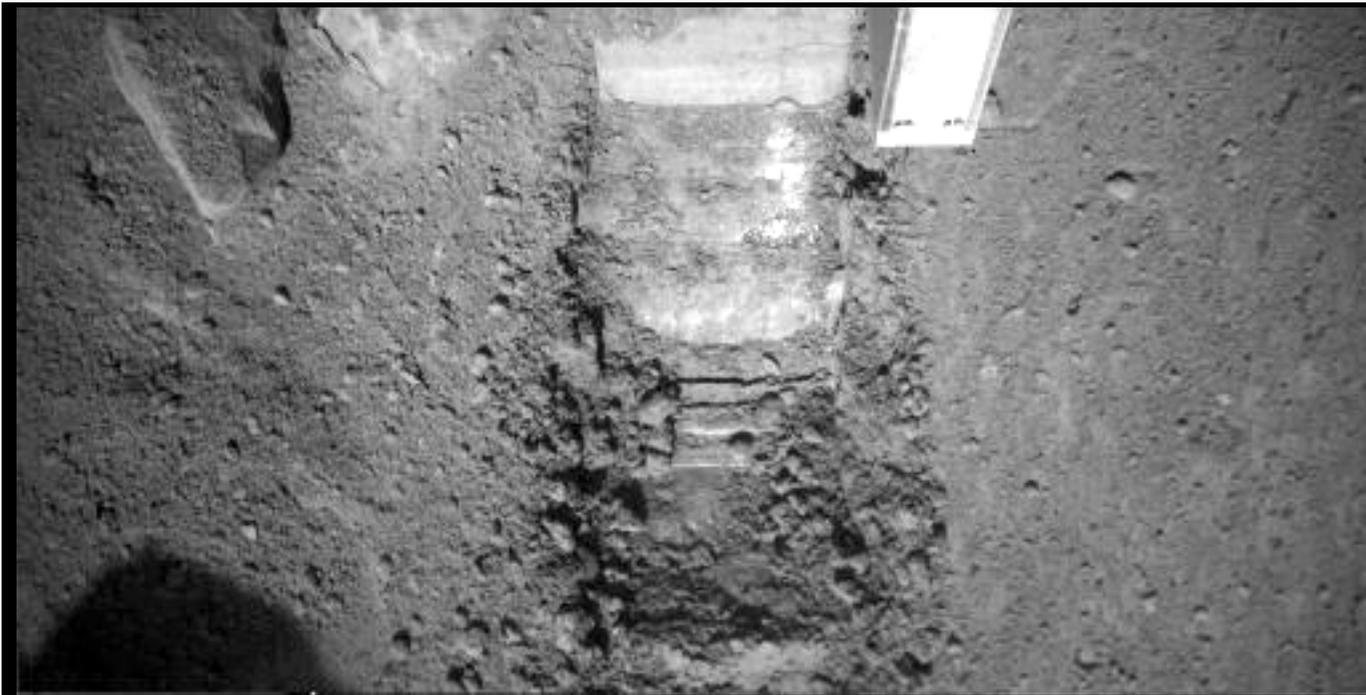
Comment faire des sols polygonaux quand il ne dégèle jamais ?

Peut-on faire des sols polygonaux avec des cycles condensation-sublimation ?

Et si ces polygones étaient fossiles, datant d'il y a $-5,5$ Ma quand les pôles étaient beaucoup plus chauds l'été ?

Peut-on conserver des sols polygonaux fossiles pendant si longtemps ??





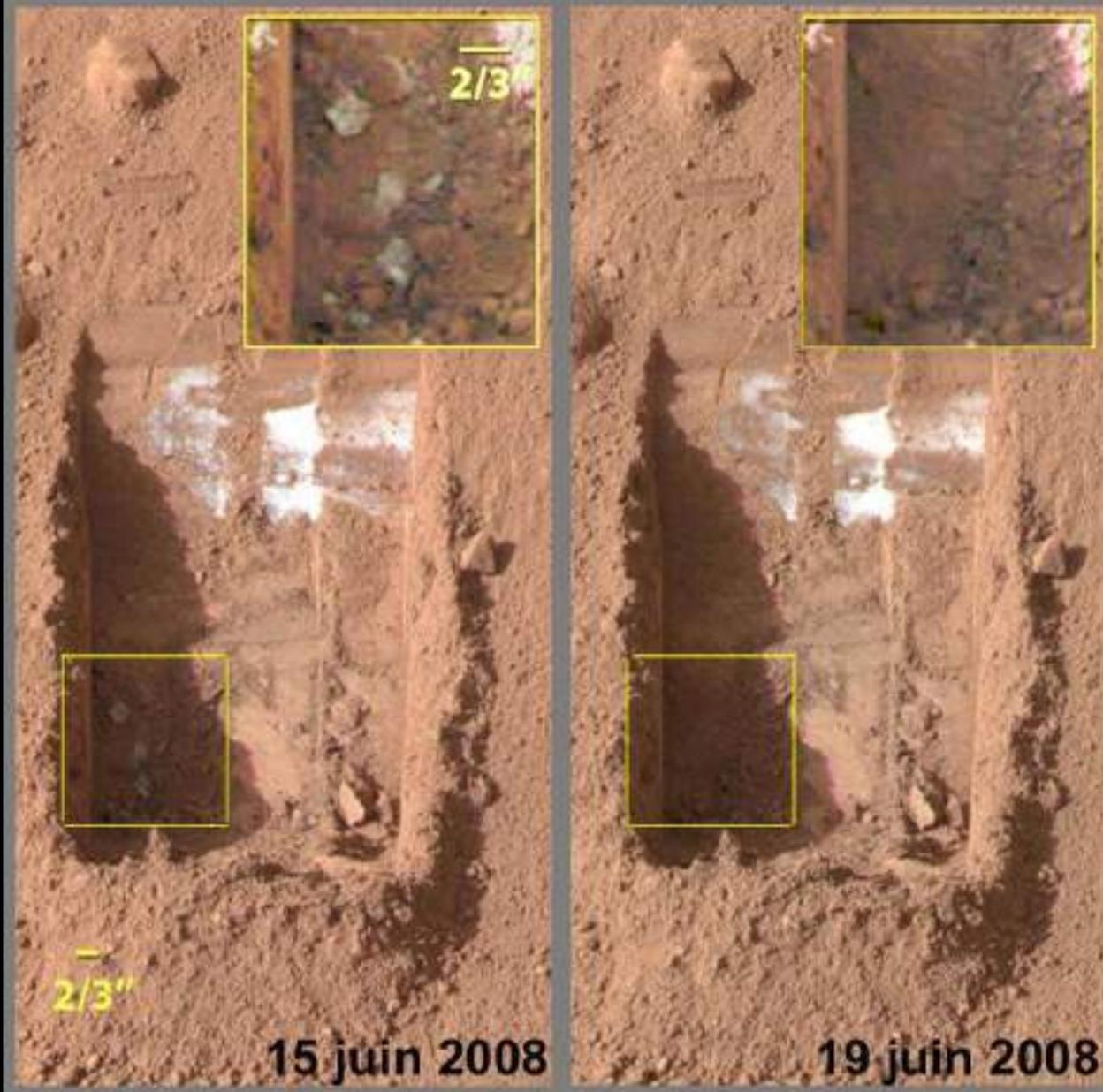
**Avec une
« pelle » (5 cm
de large) au
bout d'un bras
articulé,
Phoenix creuse
des petites
tranchées.**

**Dans les
tranchées
comme dans le
contenu de la
pelle, on voit
une substance
blanche. Sels
ou glace(s) ?**



15 juin

19 juin



**Cette substance
blanche se
sublime
(partiellement)
en 4 jours.**

De la glace !

**Mais est-ce de
l'eau pure ?**

**Contient-elle des
volatils (CH_4 ...)
des sels
(SO_4^{--} ...), autre
chose ... ?**

Il dépose le sol ramassé dans des mini-laboratoires automatiques d'analyse.

Victoire !



"We have water," said William Boynton of the University of Arizona, lead scientist for the Thermal and Evolved-Gas Analyzer, or TEGA. "We've seen evidence for this water ice before in observations by the Mars Odyssey orbiter and in disappearing chunks observed by Phoenix last month, but this is the first time Martian water has been touched and tasted." (Nasa News du 31 juillet 2008)

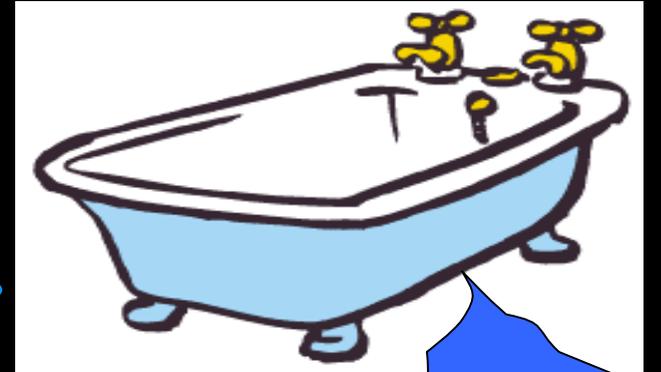
Résultats des analyses :
la glace est bien de la
glace d' H_2O , eau qui a
un Ph basique de 8-9, qui
contient des ions divers
(magnésium, sodium,
potassium, chlore et
perchlorate). Le sol
contient des argiles
jusqu'à 5% de carbonate
de calcium. Tout cela
révèle un « passé »
humide !



Petit chimiste vert analysant le
sol de Mars

Pourquoi n'y en a t'il plus d'H₂O liquide en surface aujourd'hui ? La faible gravité et l'absence de champ magnétique font que Mars perd lentement son atmosphère. Mars « fuit ». Pression, effet de serre et température baissent.

***De 4,5 à 4-3,8 Ga, il y avait de l'eau liquide pérenne à la surface de Mars.**



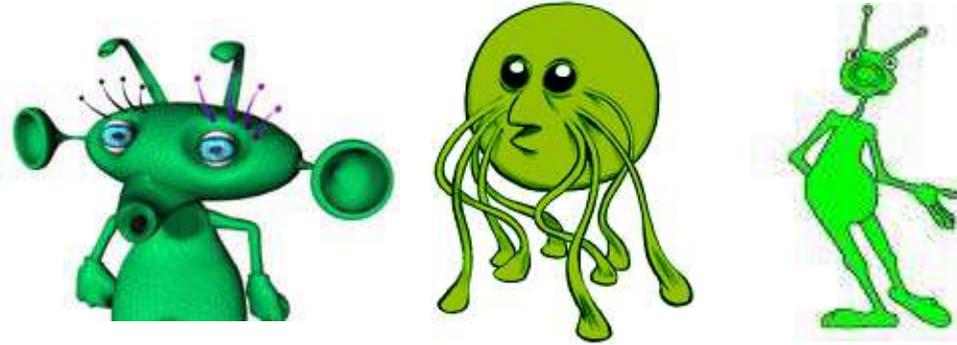
***Entre 4-3,8 et 3,5-3 Ga, période de transition.**

Il y en avait plus ou moins en fonction de l'intensité du volcanisme qui fournissait du CO₂ et de l'effet de serre.

***Depuis 3,5-3 Ga, il n'y en a plus, sauf exceptionnellement et en déséquilibre (volcanisme, versant sud au soleil ...)**

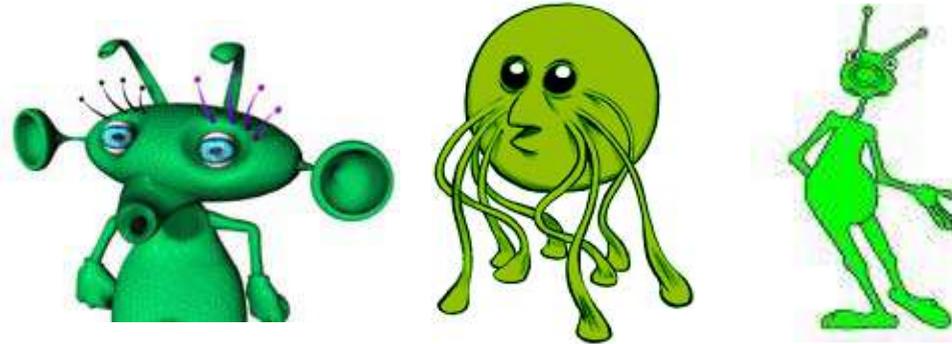
***Mais il en reste beaucoup dans le sous-sol, gelée près de la surface, sans doute liquide en profondeur**

Plus vieilles traces
de vie sur Terre



Y-a-t-il (y-a-t-il eu) des martiens ??

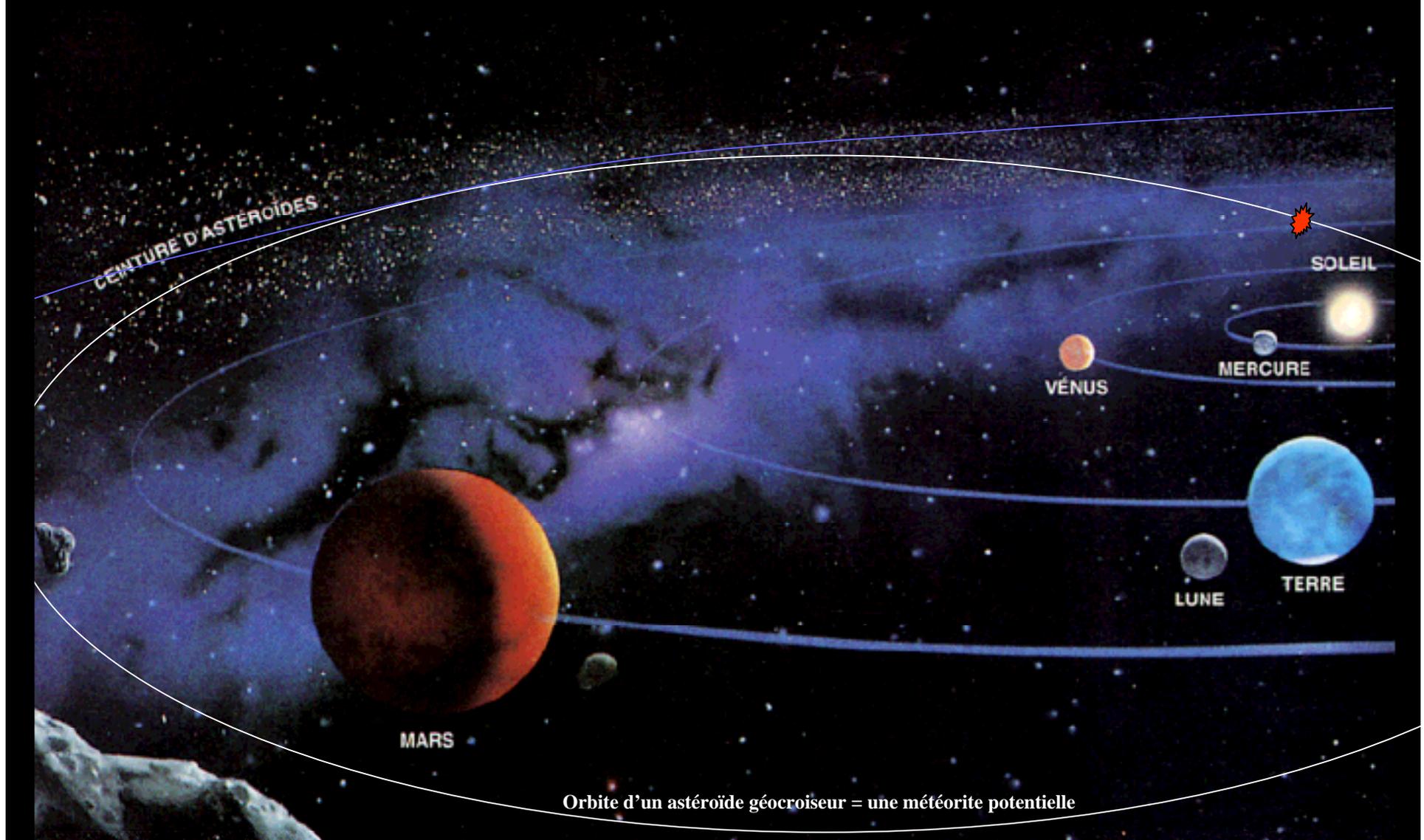
Plus vieilles traces de vie sur Terre



Tous les espoirs sont permis !

Y-a-t-il (y-a-t-il eu) des martiens ??

Allons plus loin. Après Mars, la ceinture des astéroïdes. Y-a-t-il de l'eau dans les astéroïdes ?



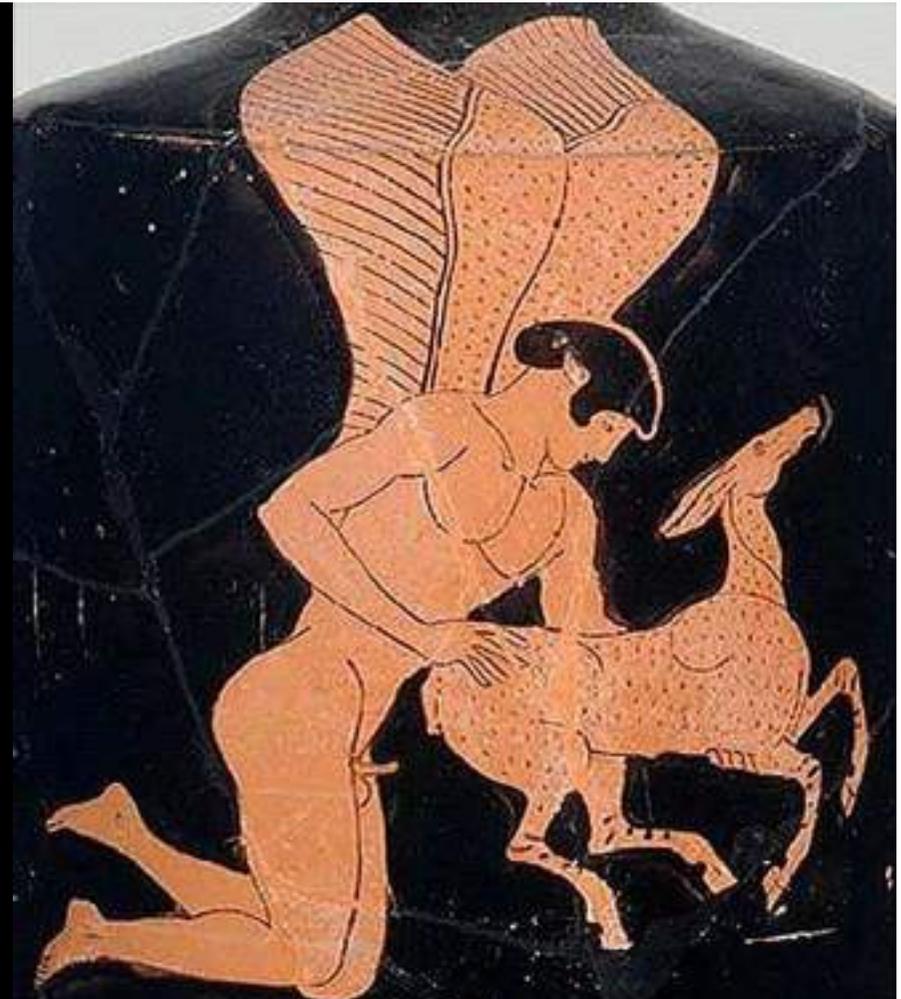
Orbite d'un astéroïde géocroiseur = une météorite potentielle



**Voici un
astéroïde,
Eros
(survol Nasa 2000)**



Éros, Musée du Louvre.
A qui tend-il les bras ?



Eros with fawn, Museum of Fine Arts,
Boston, Massachusetts, USA

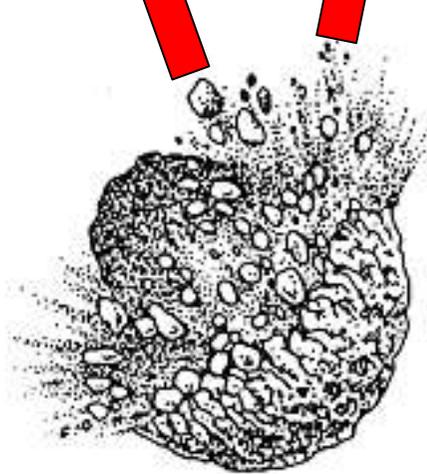
Je rappelle que le noms des planètes, des astéroïdes (découverts depuis longtemps) ... sont tirés des mythologies « péri-méditerranéennes ». Ceux découvert récemment ont des noms tirés des mythologies de tous les continents.

**Voici un autre astéroïde, Itokawa
(2005, mission japonaise Hayabusa)**



540 m

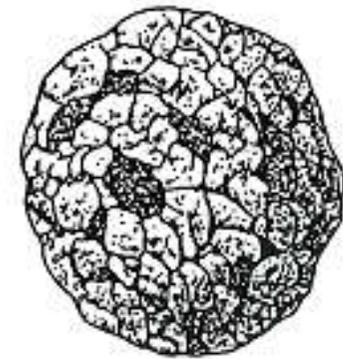
L'origine de ces « petits » astéroïdes biscornus : collision / re-accrétion. Certains des morceaux qui s'échappent de telles collisions vont devenir des astéroïdes géocroiseurs, c'est-à-dire des météorites s'ils tombent sur Terre



Catastrophic
disruption
by collision

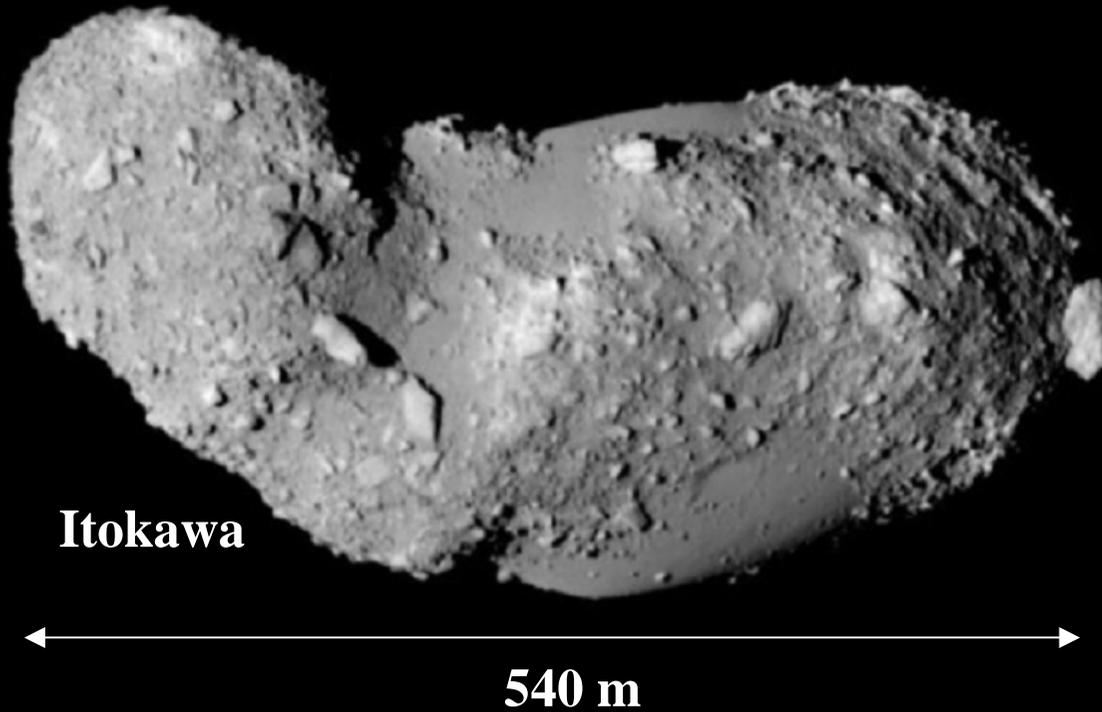


Reassembly by mutual gravity



Rubble pile model

Les météorites en sont des fragments.



Et les météorites sont des roches
contenant un peu d'eau
(de 0,1 à 10% d'H₂O, le maximum)

L'eau dans les météorites . Il y en a jusqu'à 10%, inclus dans des minéraux hydroxylés (argiles, serpentines...) Ces météorites se sont formées (ou ont été altérées) en présence d'H₂O, à T < 300°C

Image TEM:
Smectite (argile) et
serpentine



Spherules de
magnetite,
oxyde de fer

Veines de phosphates
dans la chondrite
d'Orgueil





Au delà des astéroïdes, les planètes géantes

Caractéristiques de la surface supérieure des nuages

Pression atmosphérique	70 kPa
Hydrogène H ₂	>81 %
Hélium He	>17 %
Méthane CH ₄	0,1 %
Eau H ₂ O (vapeur)	0,1 %
Ammoniac NH ₃	0,02 %
Éthane C ₂ H ₆	0,0002 %
Hydruure de phosphore PH ₃	0,0001 %
Sulfure d'hydrogène SH ₂	<0,0001 %

Et en leur cœur, un noyau gros comme plusieurs Terres, fait de fer + silicates + glaces.
Je n'en parlerai pas plus que cela.

**Jupiter,
11 fois le
diamètre
de la Terre**

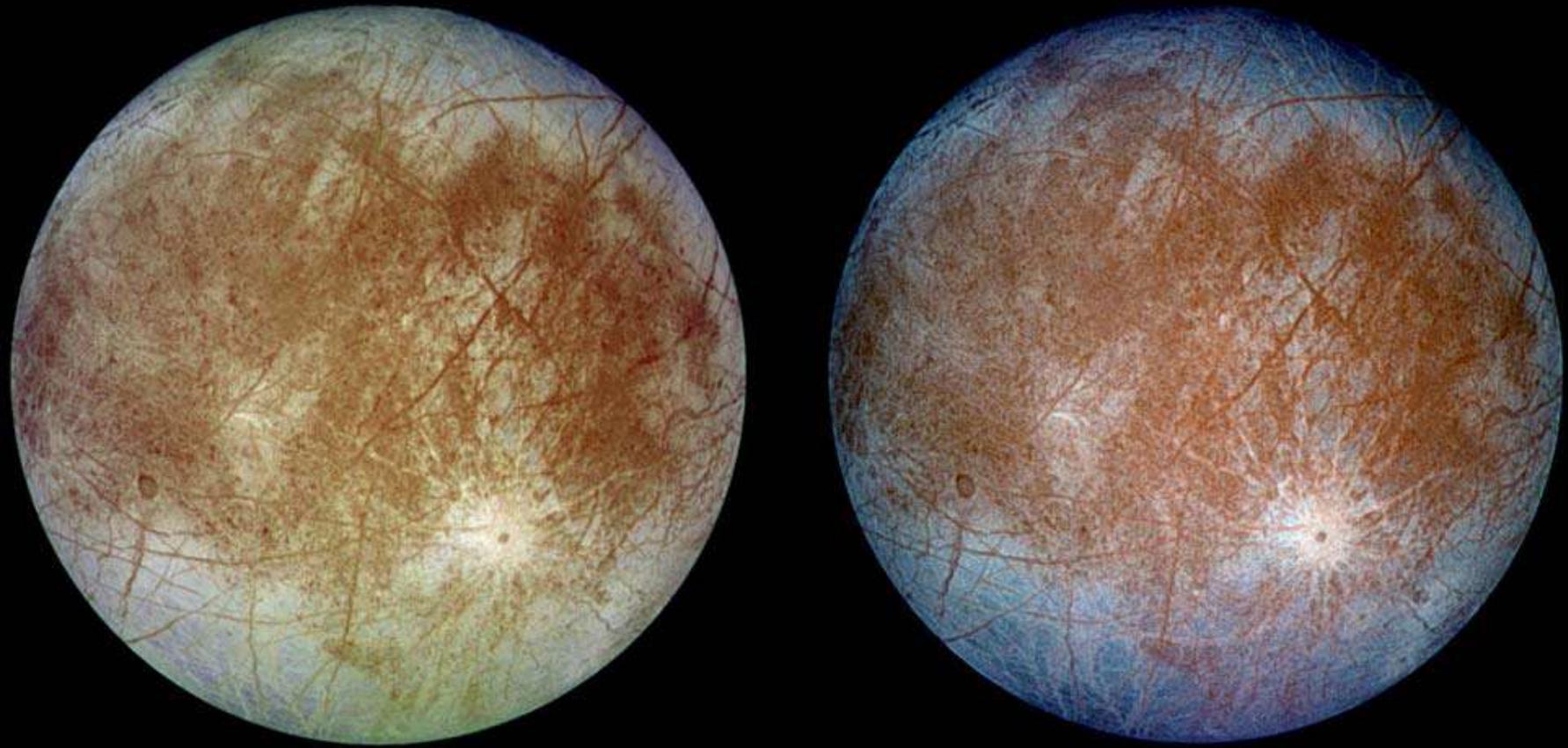
**T = - 150°C
à - 200 °C**

**Callisto
(1,5 fois
la Lune)**

**Europe
(taille de
la Lune)**

Les 4 planètes géantes ont des satellites, 17 « gros » (et des dizaines de « petits »). Parmi leurs 17 satellites principaux, un n'est constitué que de roches (Io), un autre est constitué de roches recouvertes de glaces (Europe) et les 15 autres sont constitués majoritairement de glaces. On va en étudier trois : Europe, Titan et Encelade.

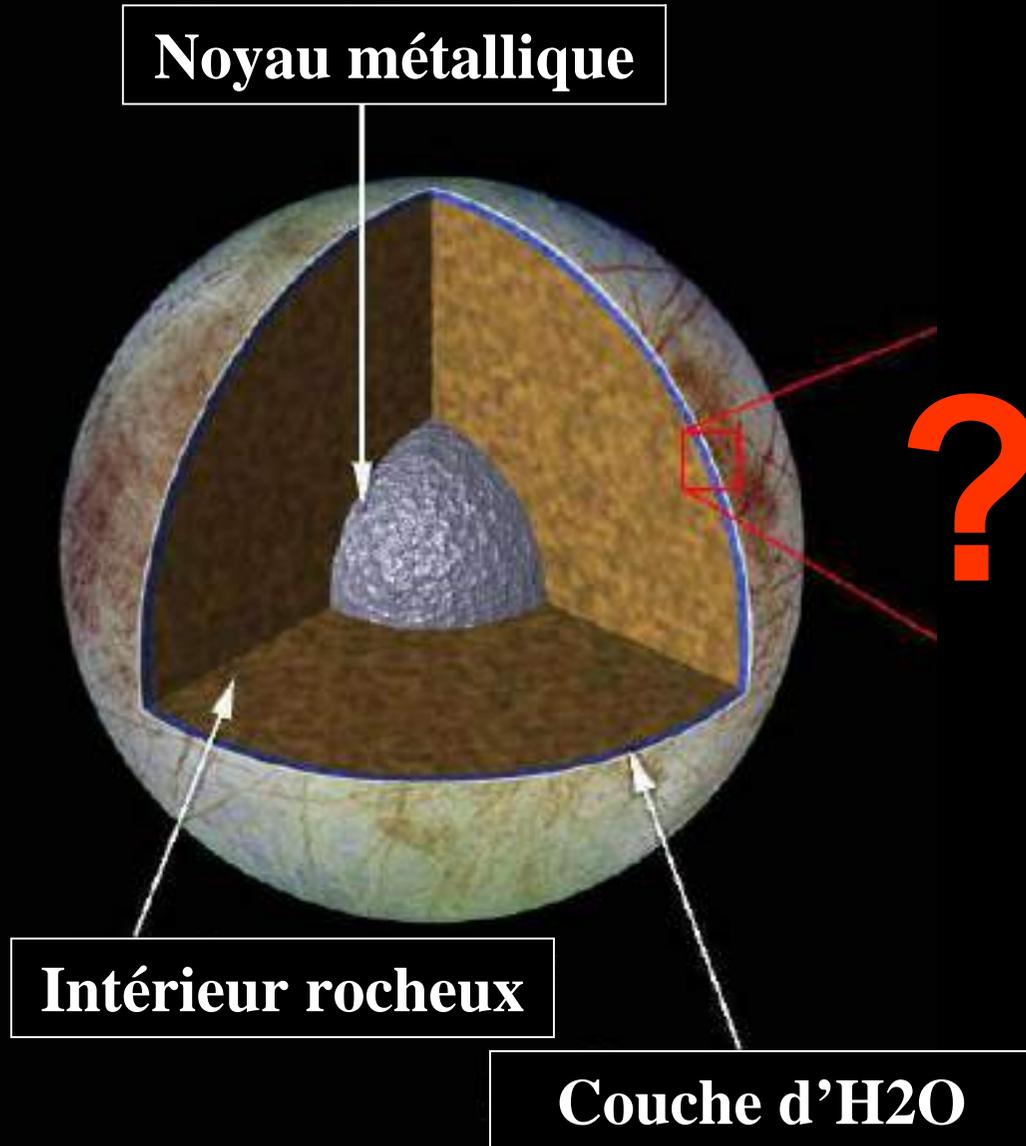
Regardons Europe, le 2eme satellite de Jupiter, ici vu par Galiléo.



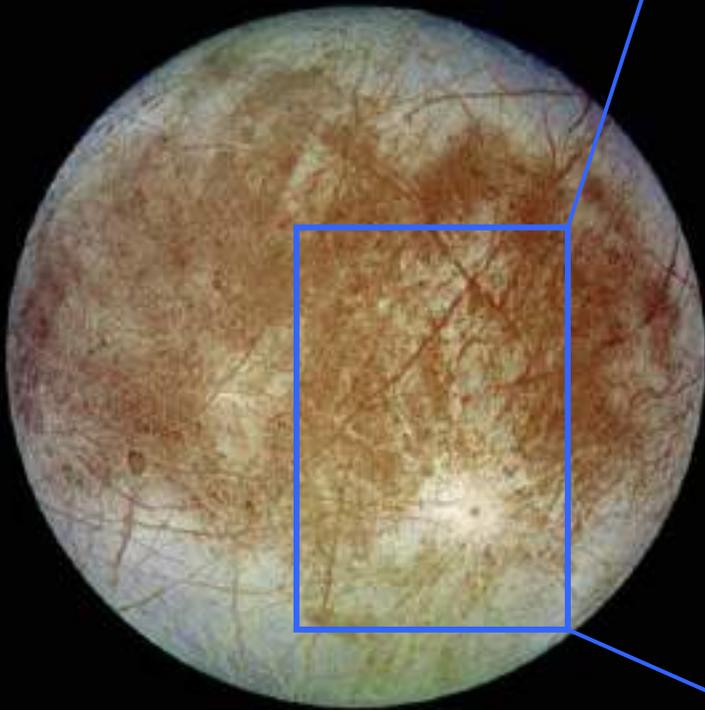
← 3000 km →

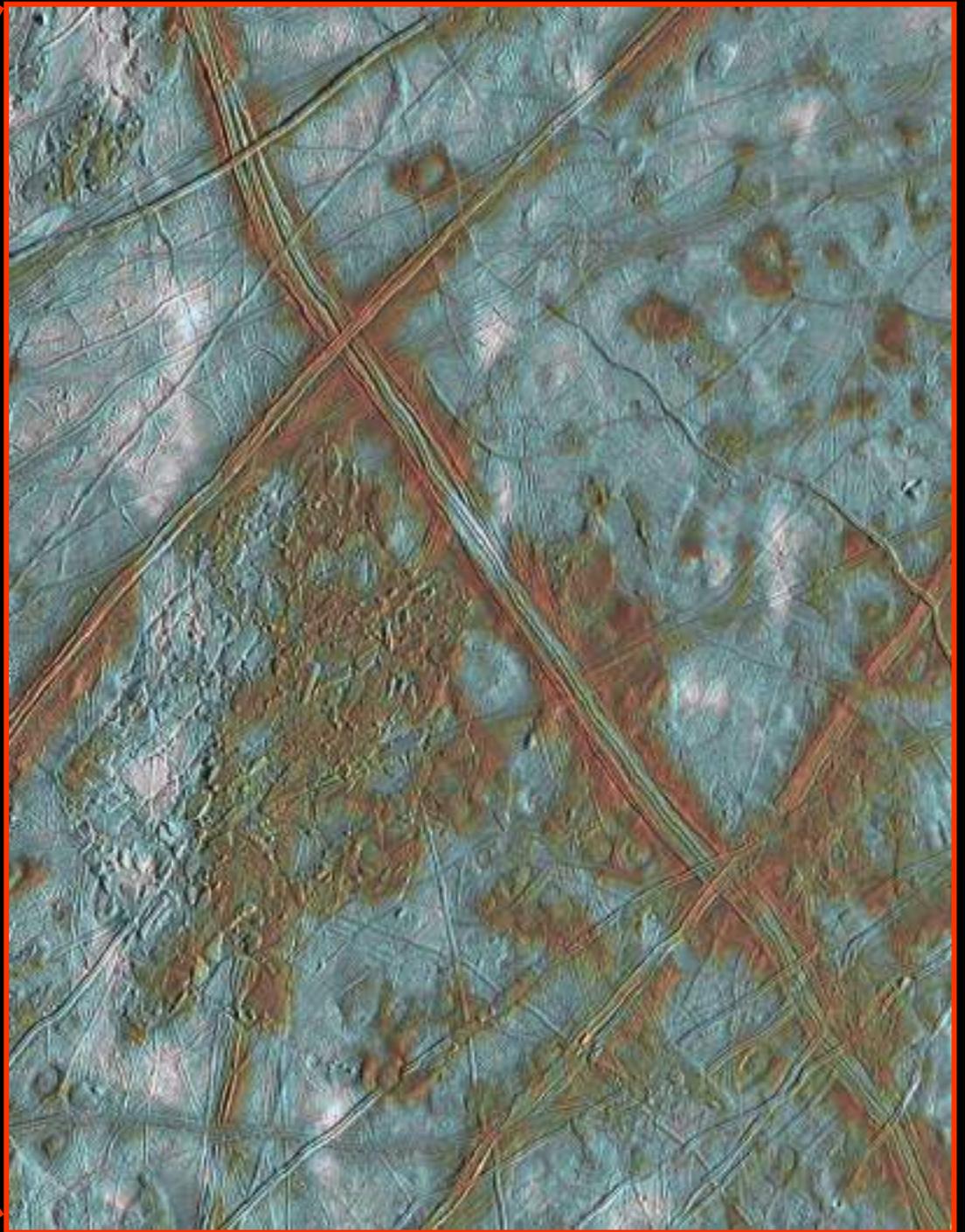
Europe.

La masse volumique (3 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 au mieux -150°C en été au soleil)



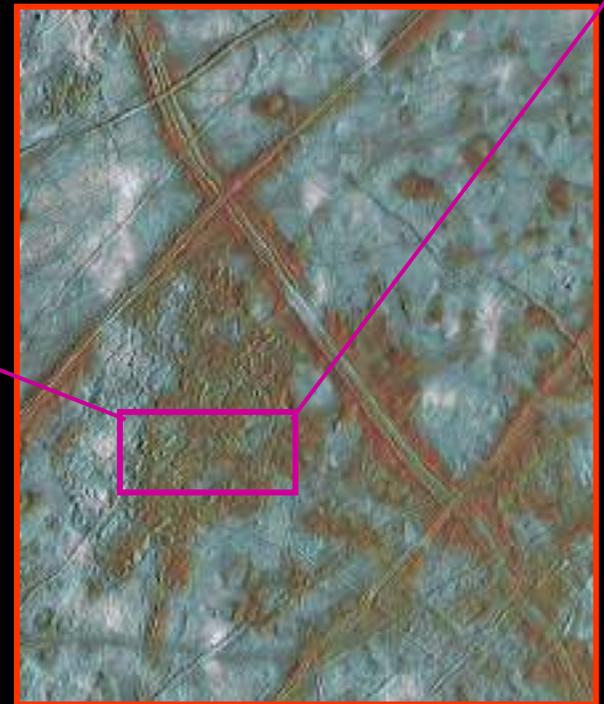
**Faisons une
série de zooms
sur Europe**



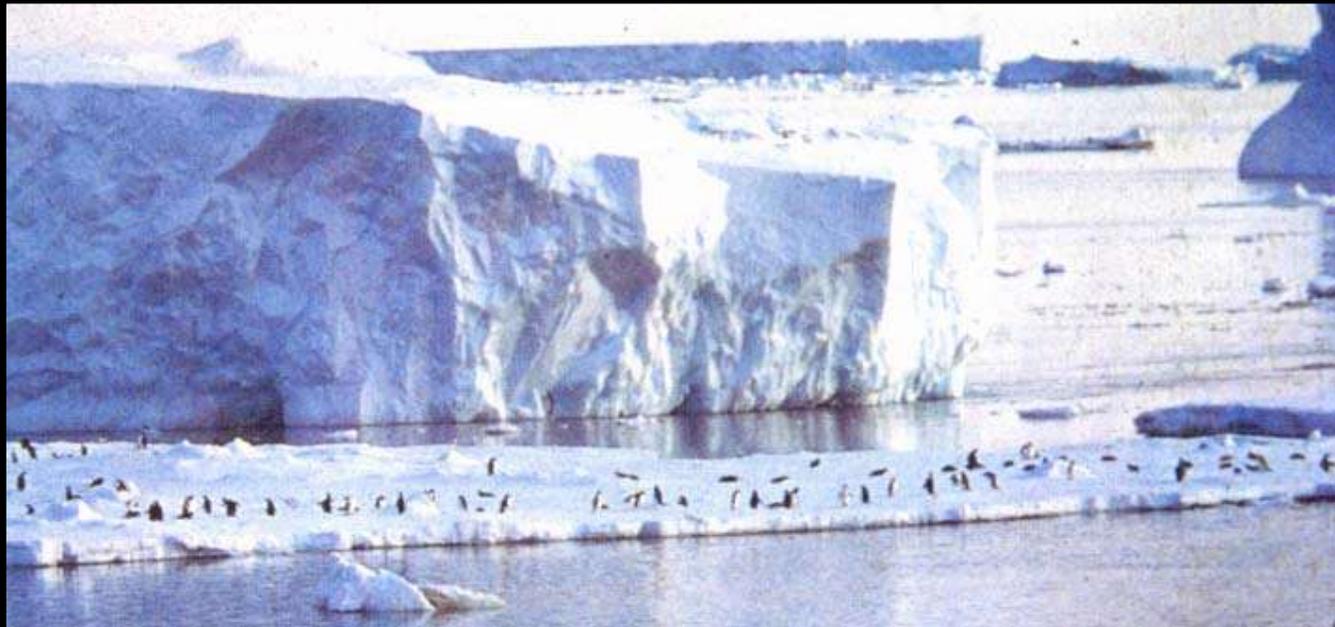
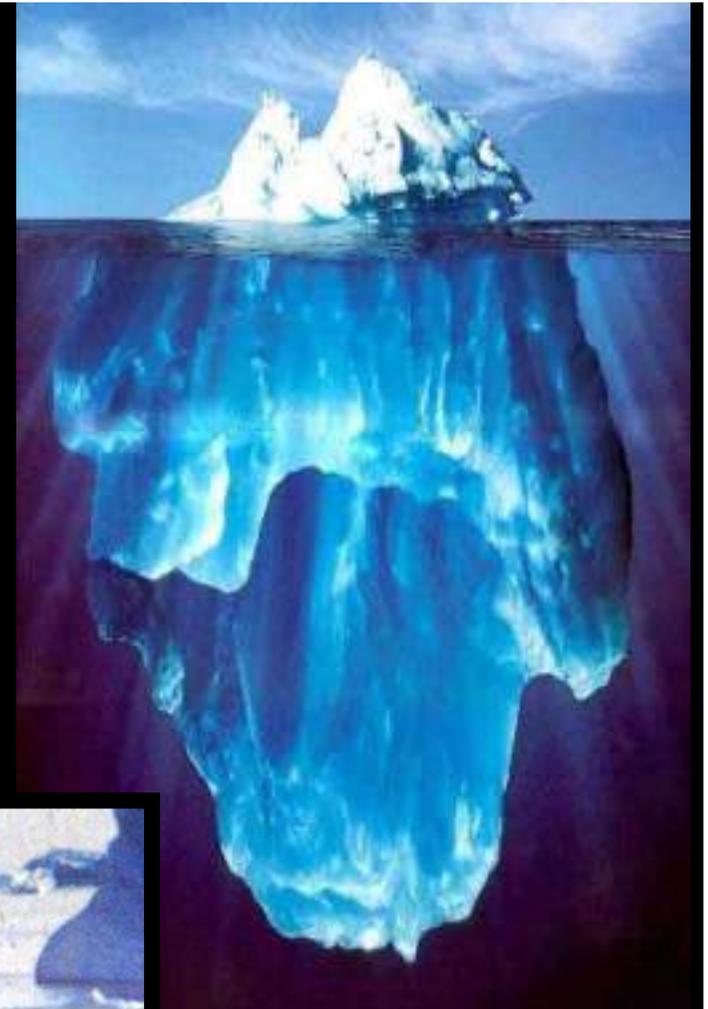


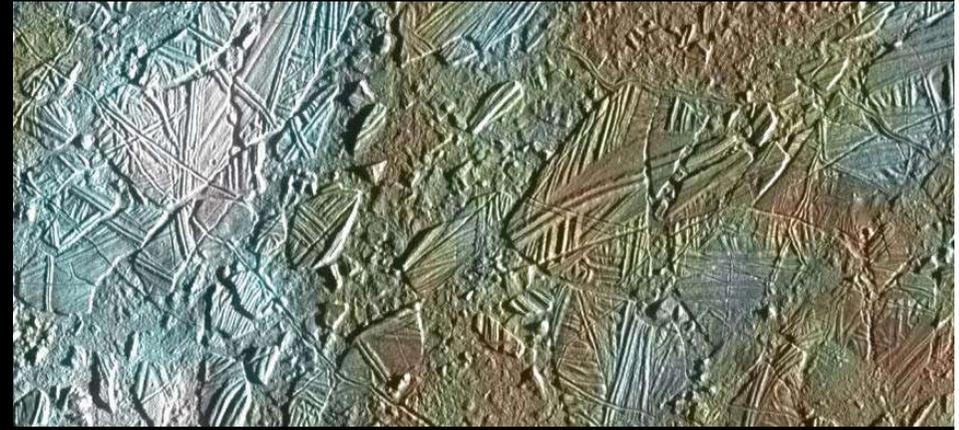
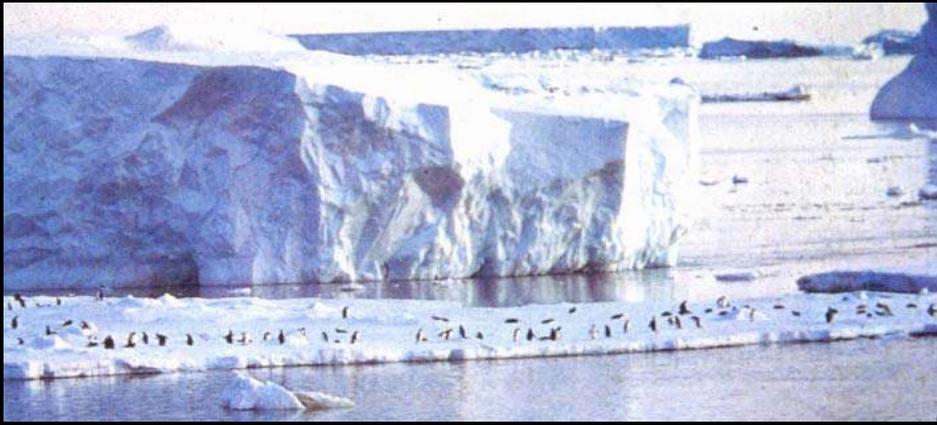


Avouez que
ça ressemble !

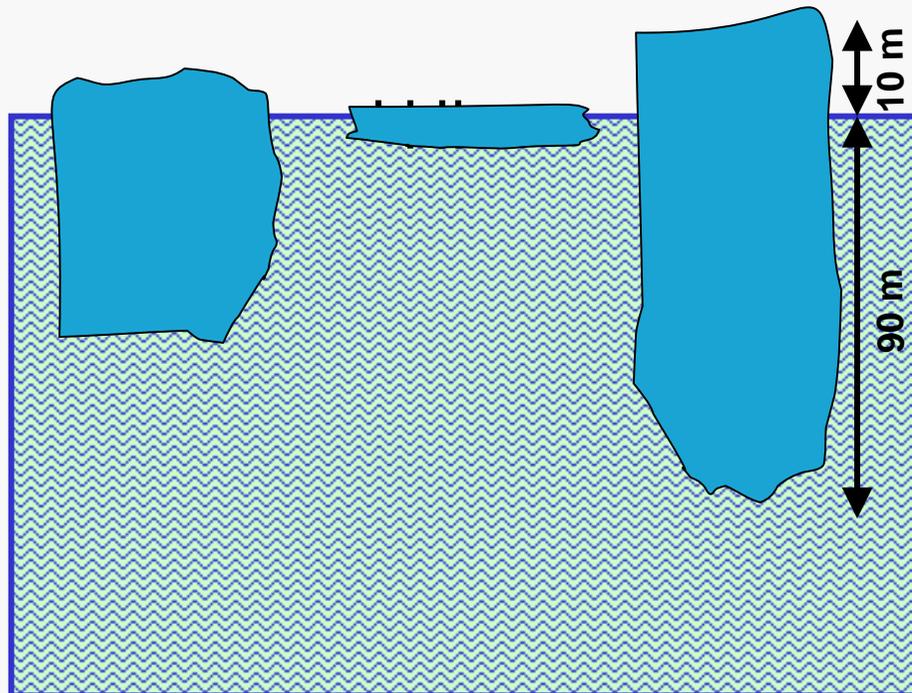


Avec la hauteur de la partie émergée de l'iceberg, on peut connaître la hauteur totale de l'iceberg





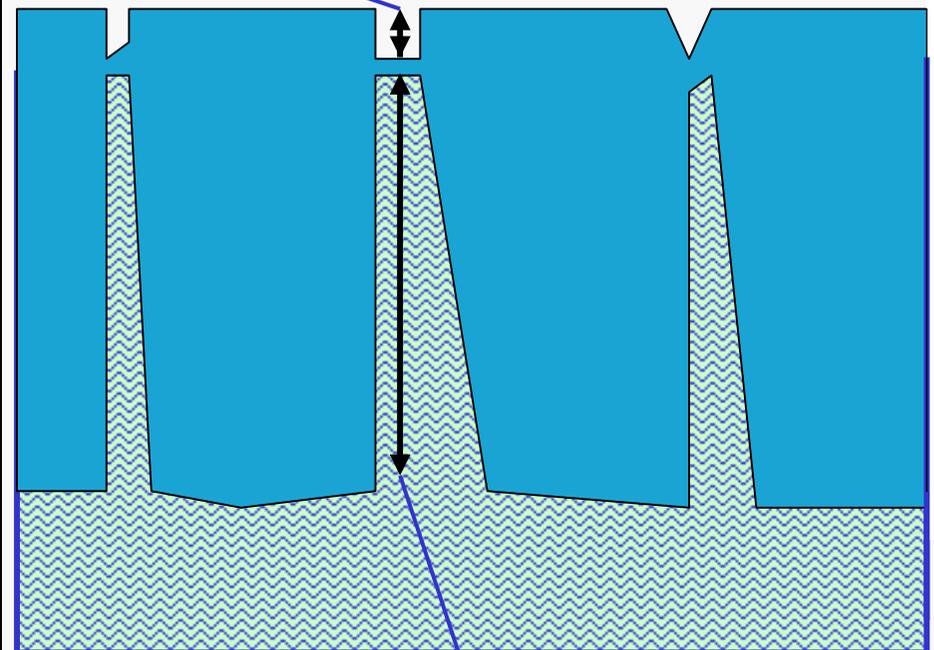
Terre



Iceberg : la partie émergée représente 1/10 du total

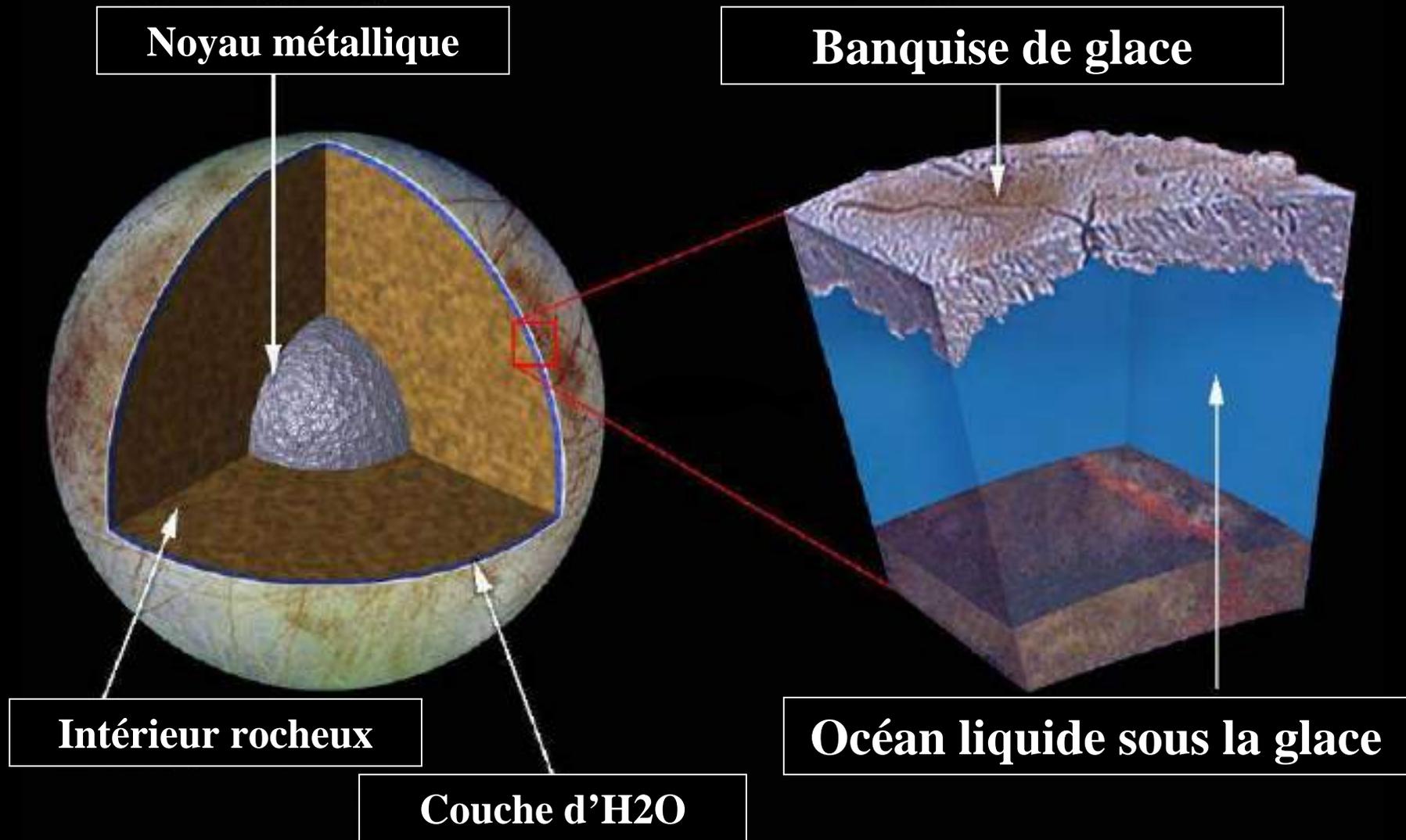
La partie émergée mesure 500 à 1000 m

Europe

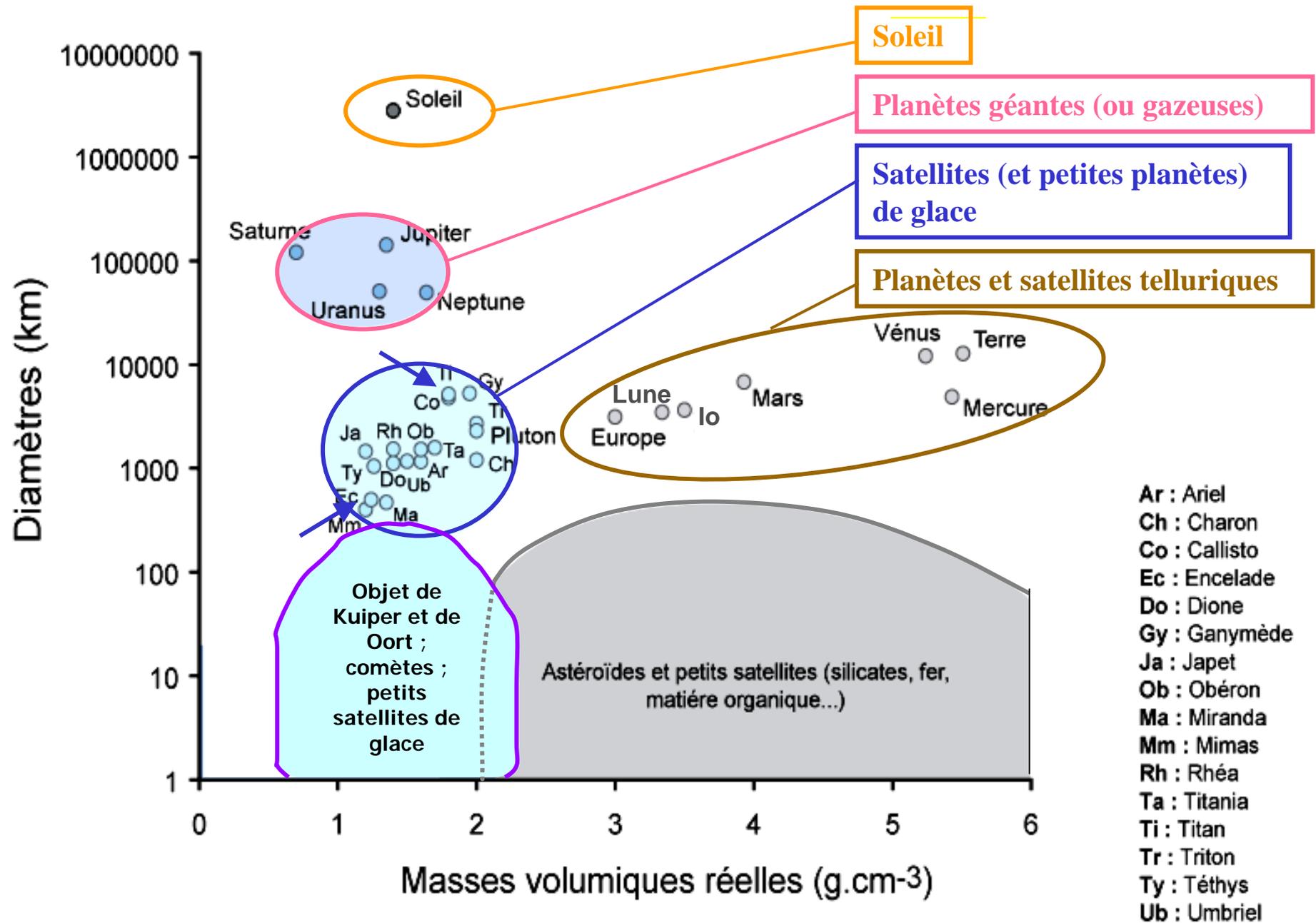


→ la partie immergée représente 5 à 10 km

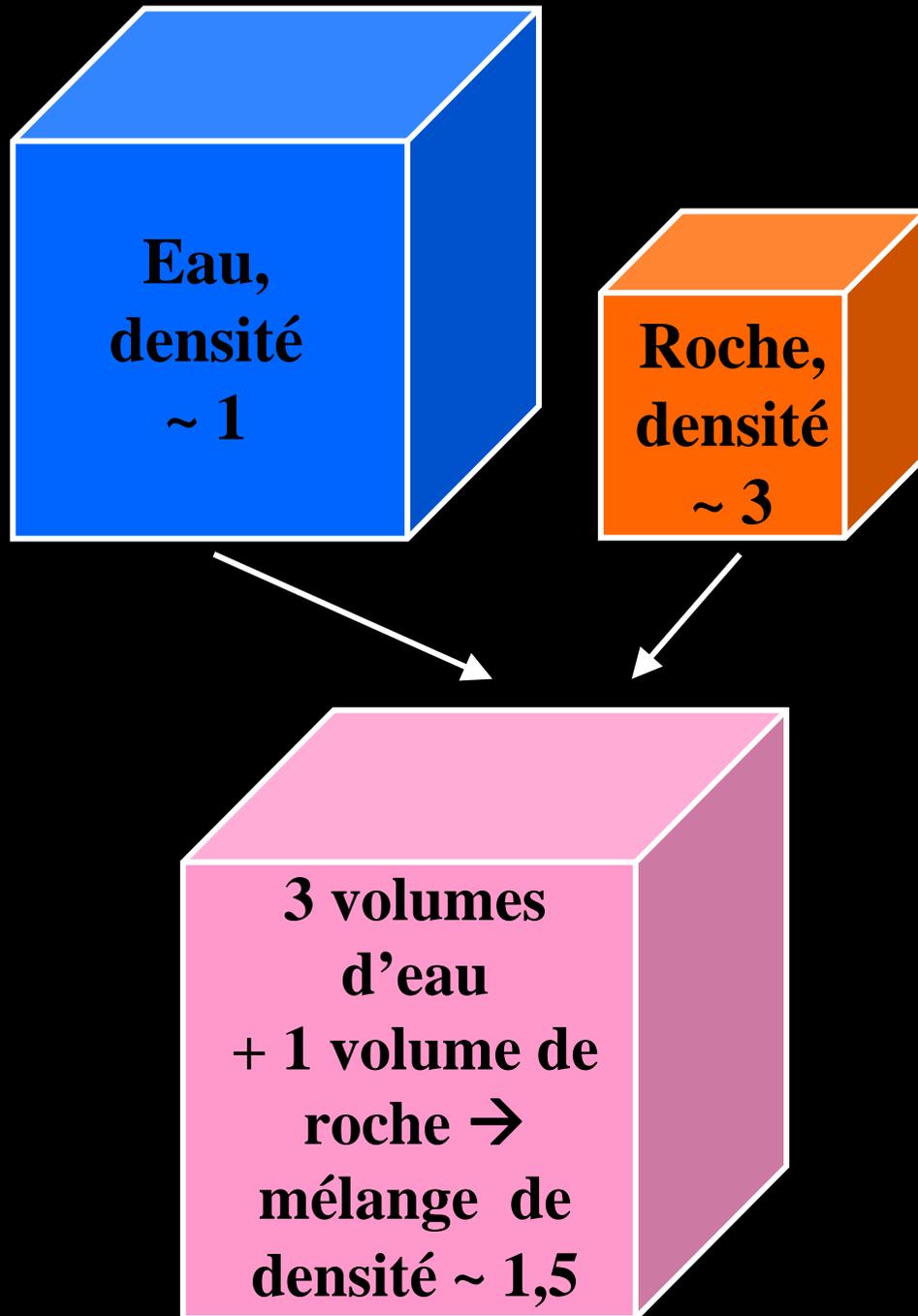
→ Océan liquide de 90 à 95 km de profondeur



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

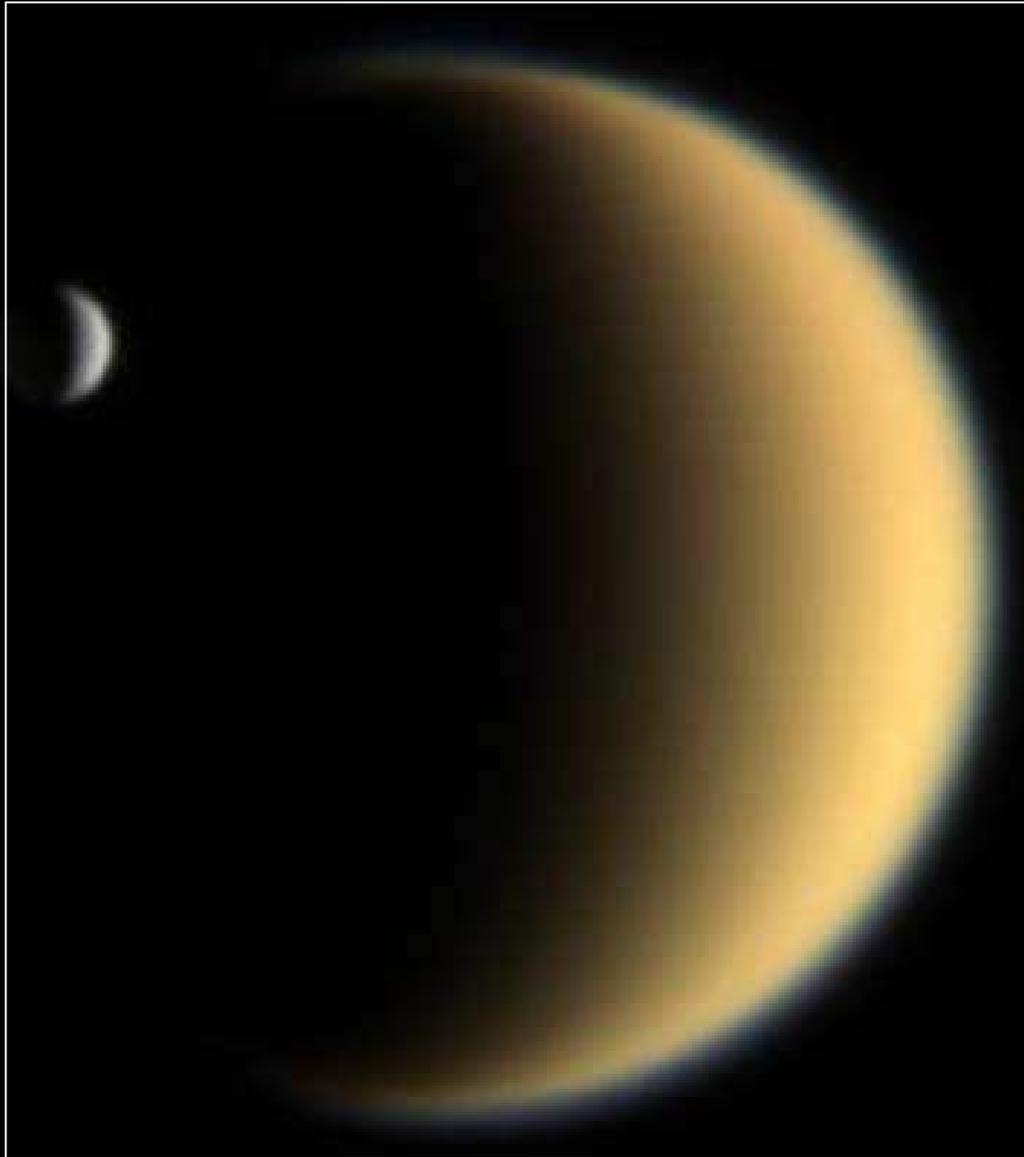


La classification géologique du système solaire

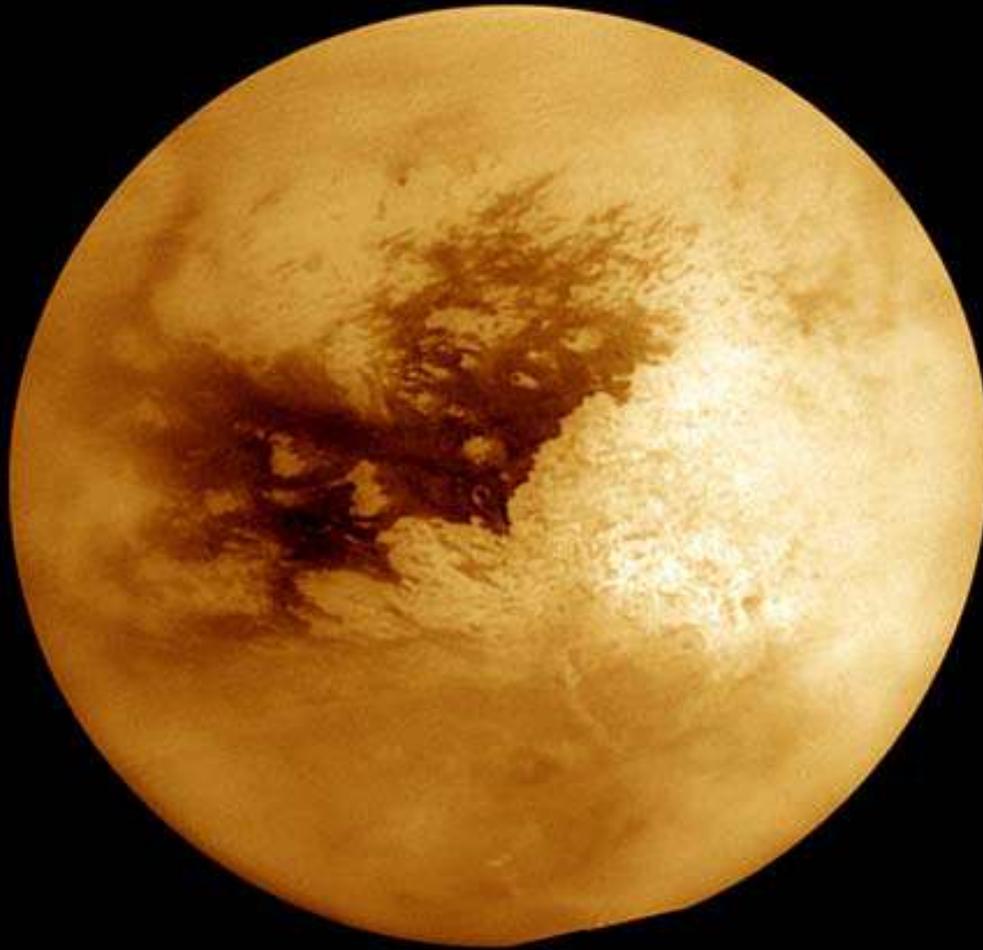


**Les satellites de glace :
grande variété de
taille, certes, mais
identité de
composition. Tous ces
satellites de Saturne
ont une densité
d'environ 1,5.
Ils sont constitués
(approximativement)
d'un mélange de
3 volumes d'eau
+
1 volume de roche**

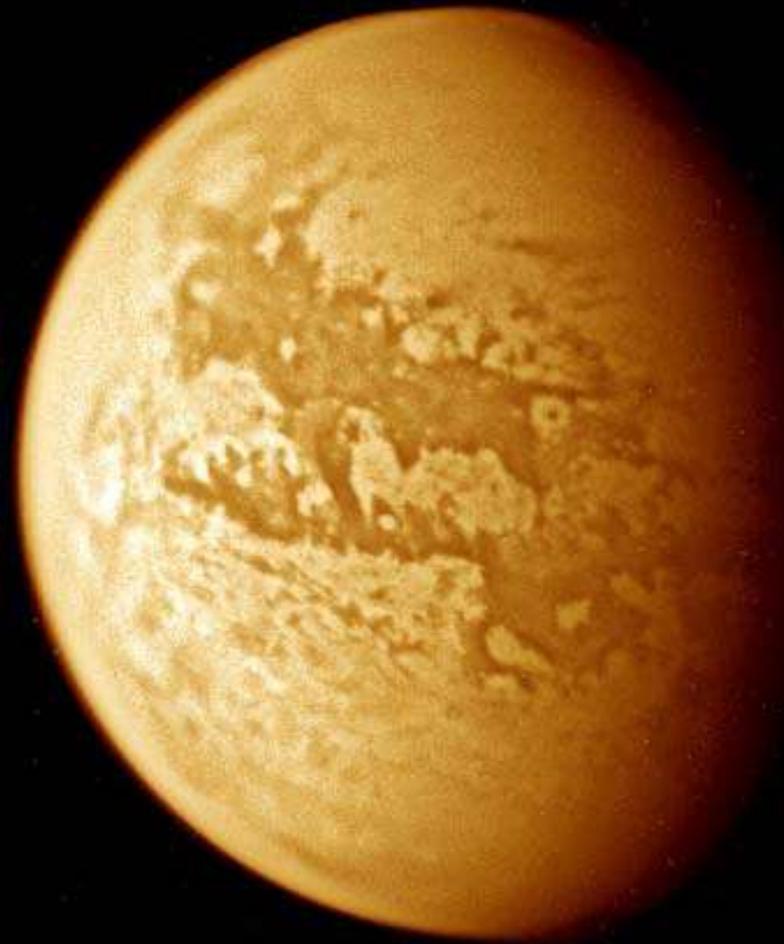
**Un exemple de « gros » satellite (de Saturne)
principalement constitué de glace :**



**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 Gany-
mède, plus gros que
Mercure). C'est le seul
satellite du Système
Solaire avec une
atmosphère dense (N_2 ,
 CH_4 et aérosols de
macro - molécules organiques**

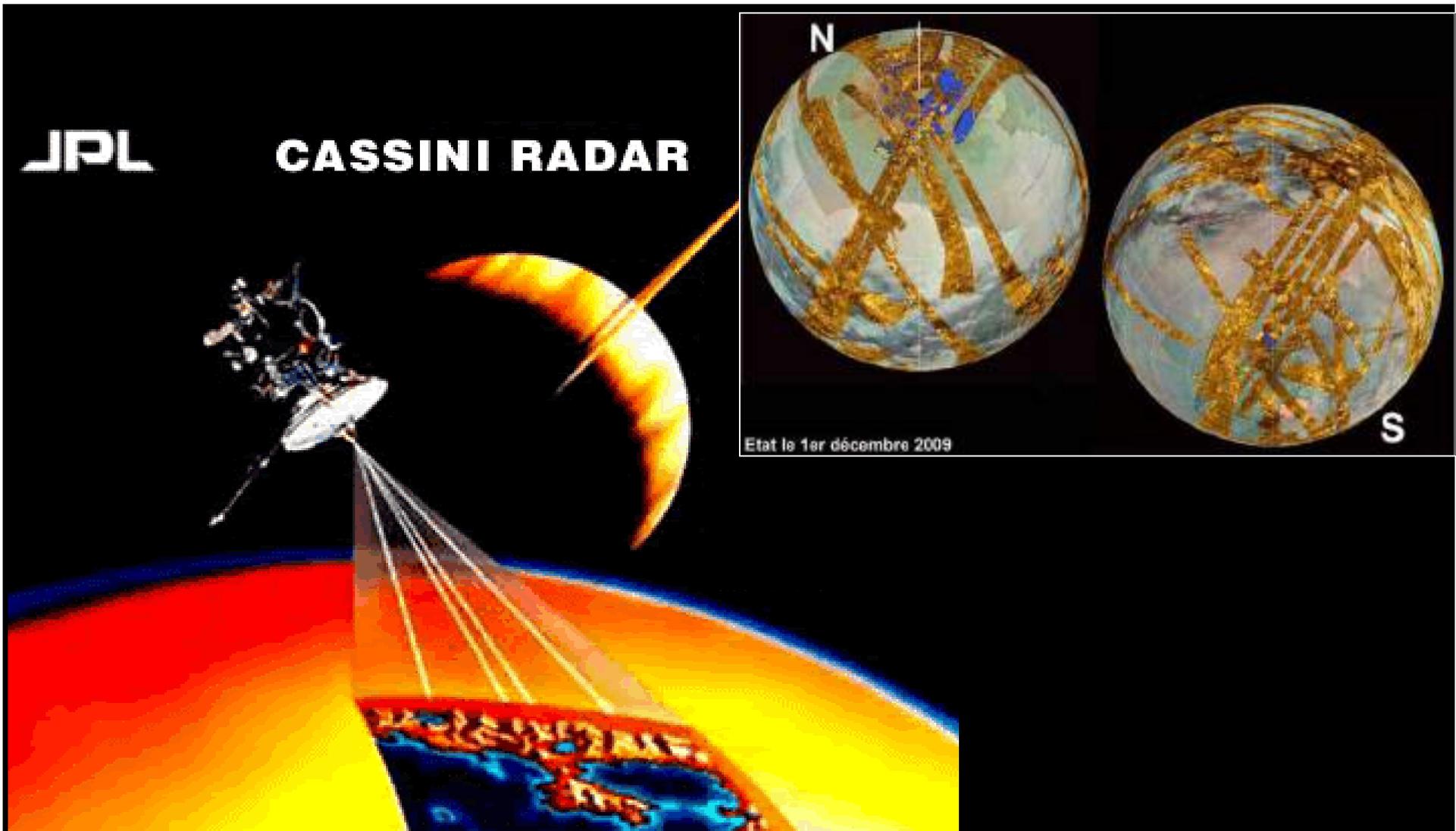


février 2005



avril 2005

Voilà deux vues Infra-Rouge, avec la couleur qu'on connaît de la surface. Peut-être ce qu'on verrait à l'œil nu depuis l'espace, si il n'y avait pas de nuages.



Pour voir la surface : le radar. Plus d'une trentaine de passages. Mais on ne voit que des bandes. Qu'est-ce qu'on découvre ?