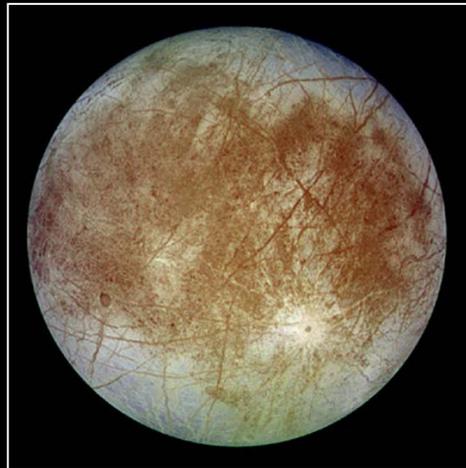
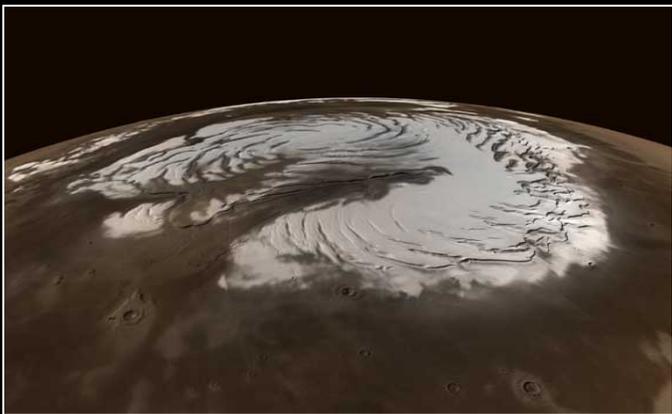
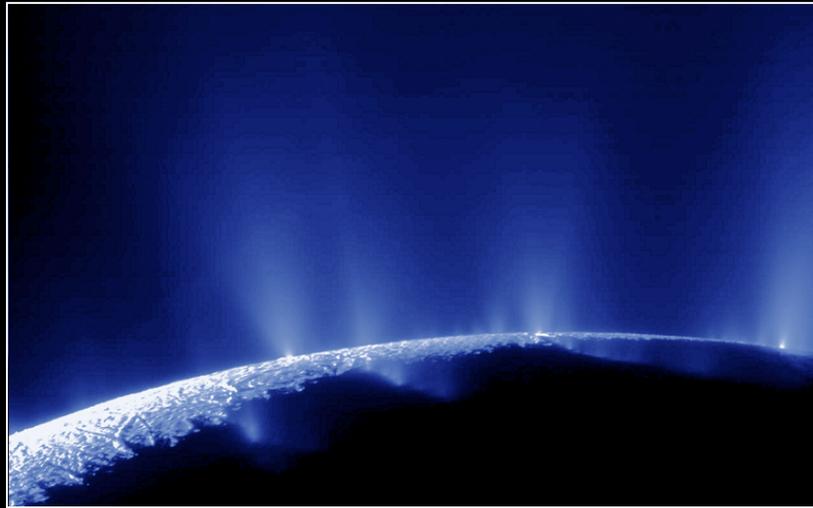


# L'eau dans le système solaire

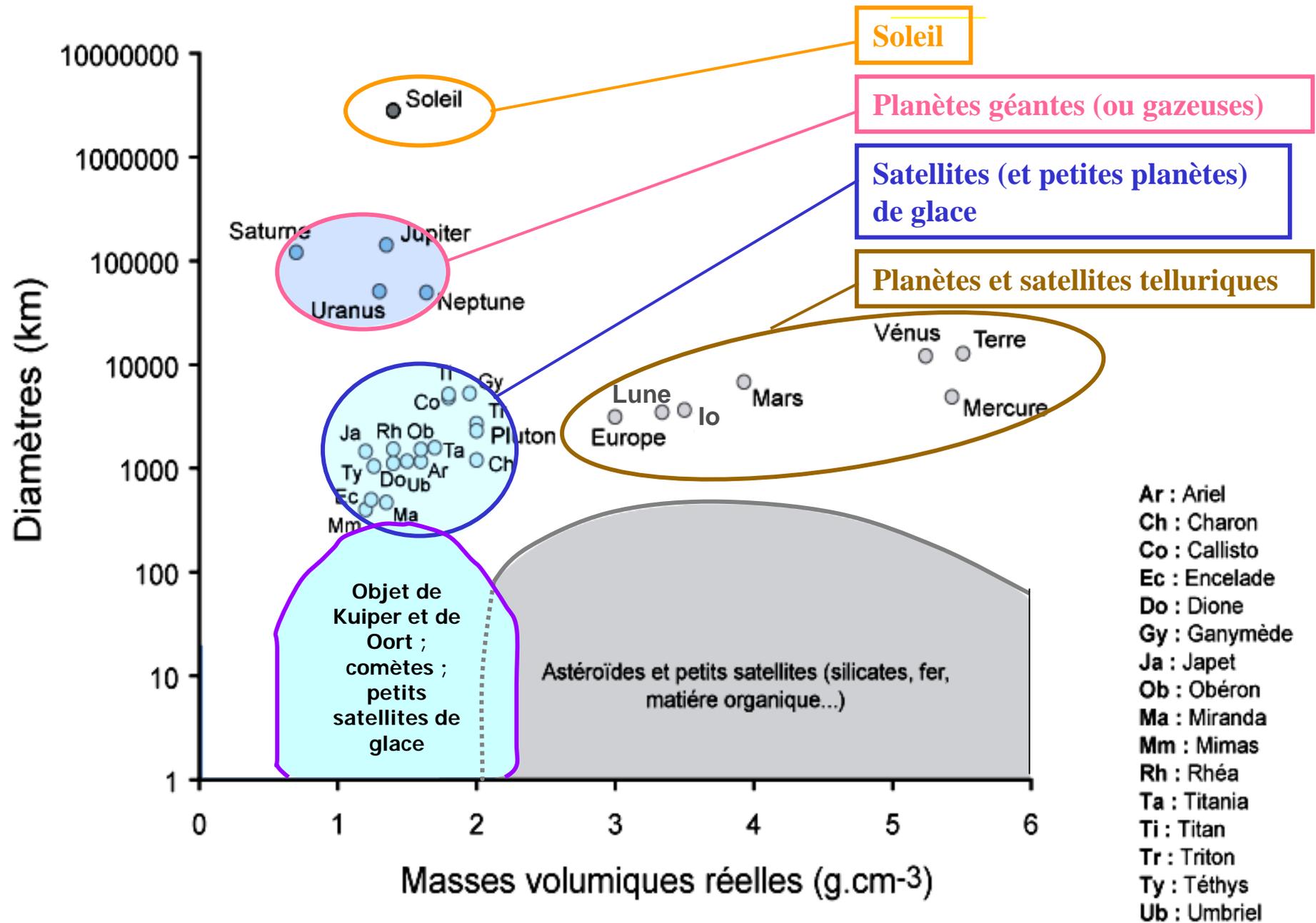


Pierre Thomas, ENS Lyon

Orléans, 14 avril 2011



**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

# L'eau sur Terre : 3 sites principaux :

$\sim 10^{21}$  kg  
= 1 000 000 000 000 000 000 kg  
= 1/1000 de la Terre



Je n'en  
dirais pas  
plus !



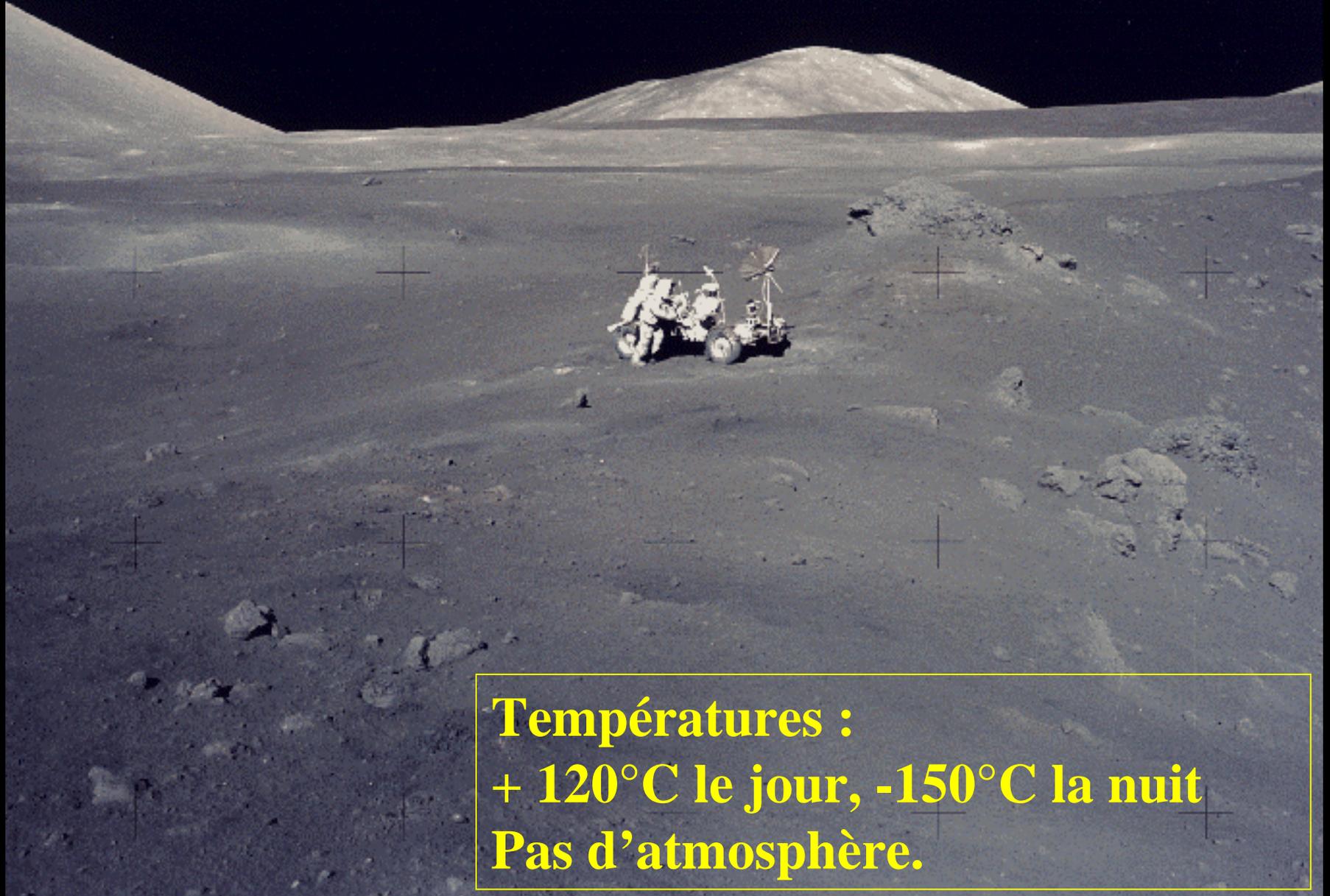
$\sim 10^{21}$  kg

$\sim 10^{19}$  kg

Rappel : Terre  
=  $6.10^{24}$  kg

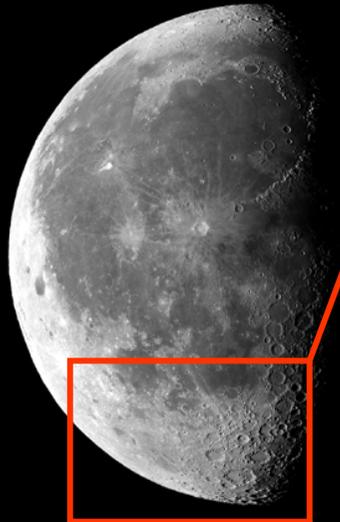


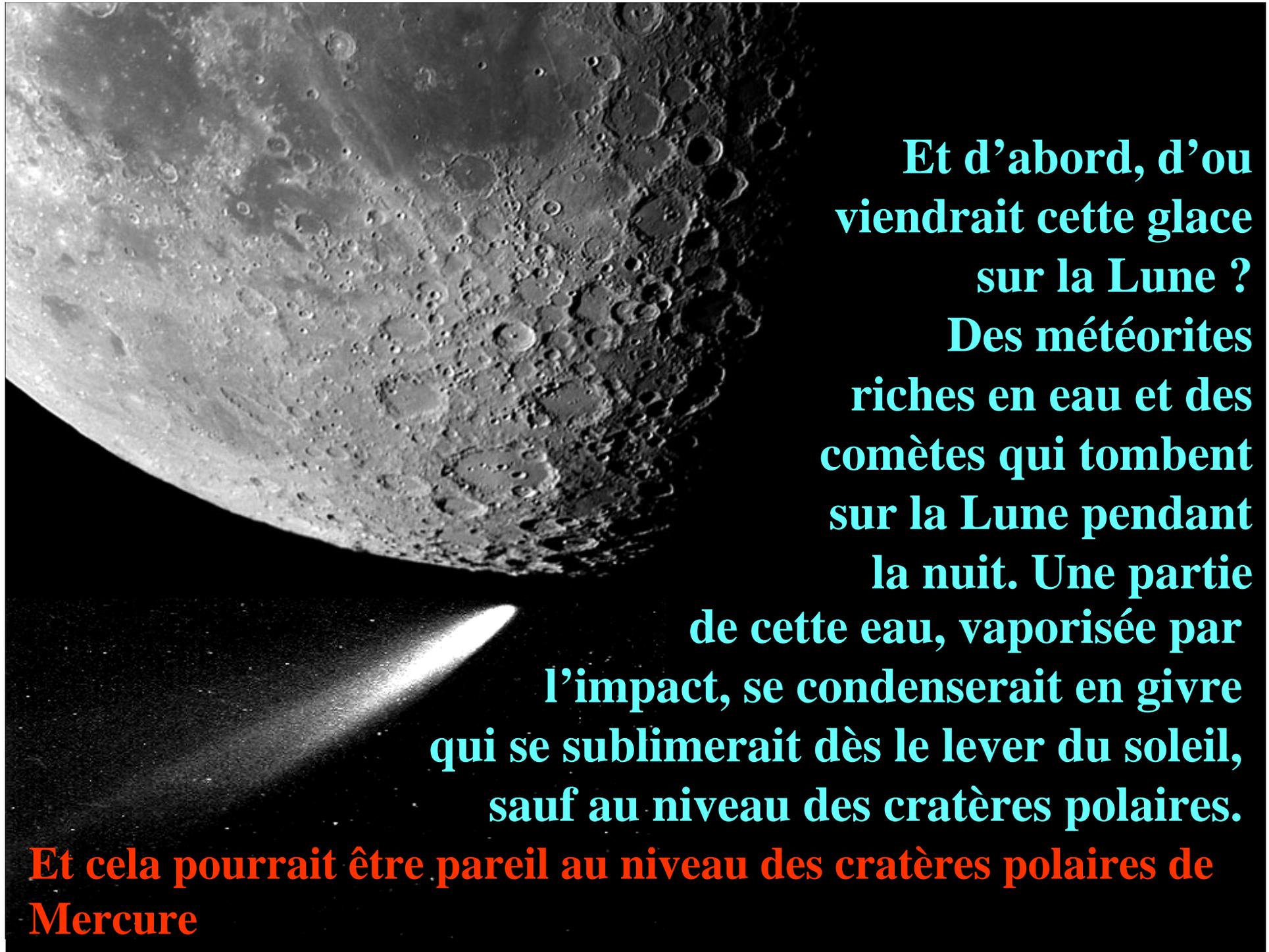
**L'eau sur la Lune : y en a pas, encore que ... !**



**Températures :**  
**+ 120°C le jour, -150°C la nuit**  
**Pas d'atmosphère.**

**Aux pôles de la Lune, les cratères sont plongés dans la nuit et le froid ( $< -200^{\circ}\text{C}$ ) perpétuels. De la glace pourrait y subsister. Y en a t'il ? Comment savoir, comment voir dans ces « trous noirs » ?**



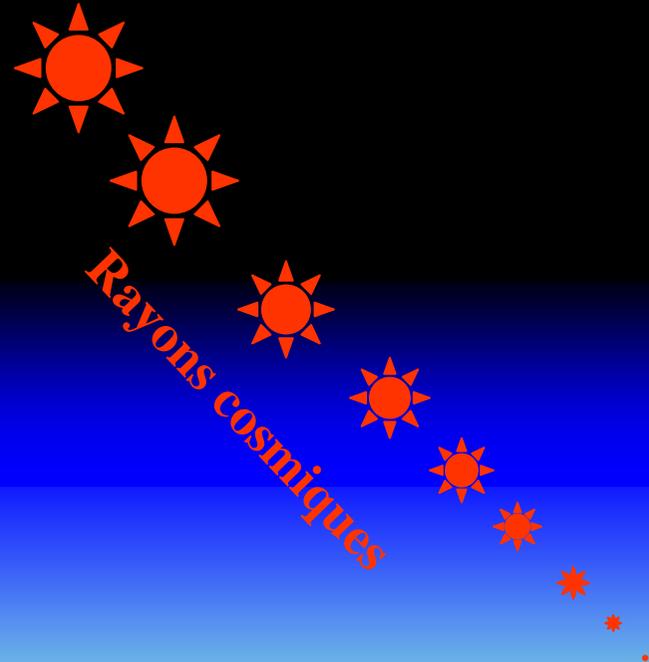


**Et d'abord, d'où viendrait cette glace sur la Lune ?**

**Des météorites riches en eau et des comètes qui tombent sur la Lune pendant la nuit. Une partie de cette eau, vaporisée par l'impact, se condenserait en givre qui se sublimerait dès le lever du soleil, sauf au niveau des cratères polaires.**

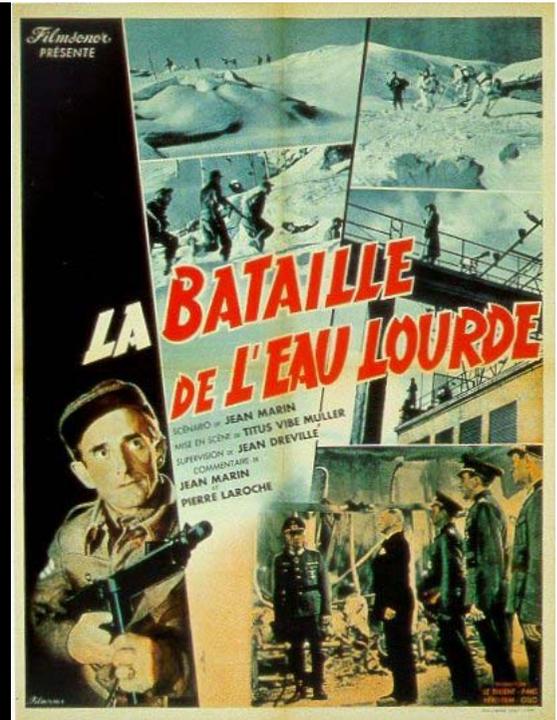
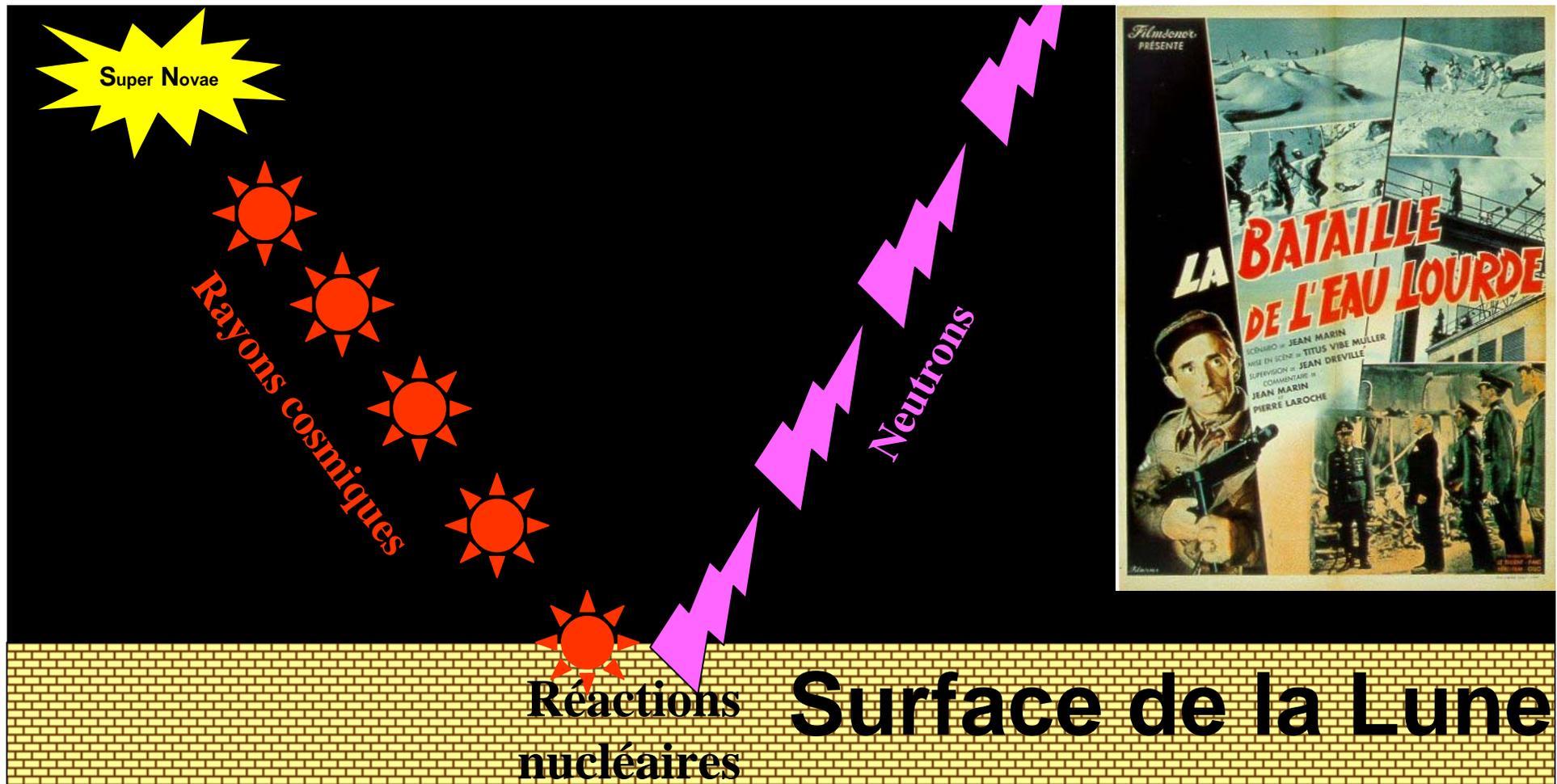
**Et cela pourrait être pareil au niveau des cratères polaires de Mercure**

**Comment trouver de la glace dans ces cratères polaires ? Une utilisant une particularité de la Lune : son absence d'atmosphère et de champ magnétique**

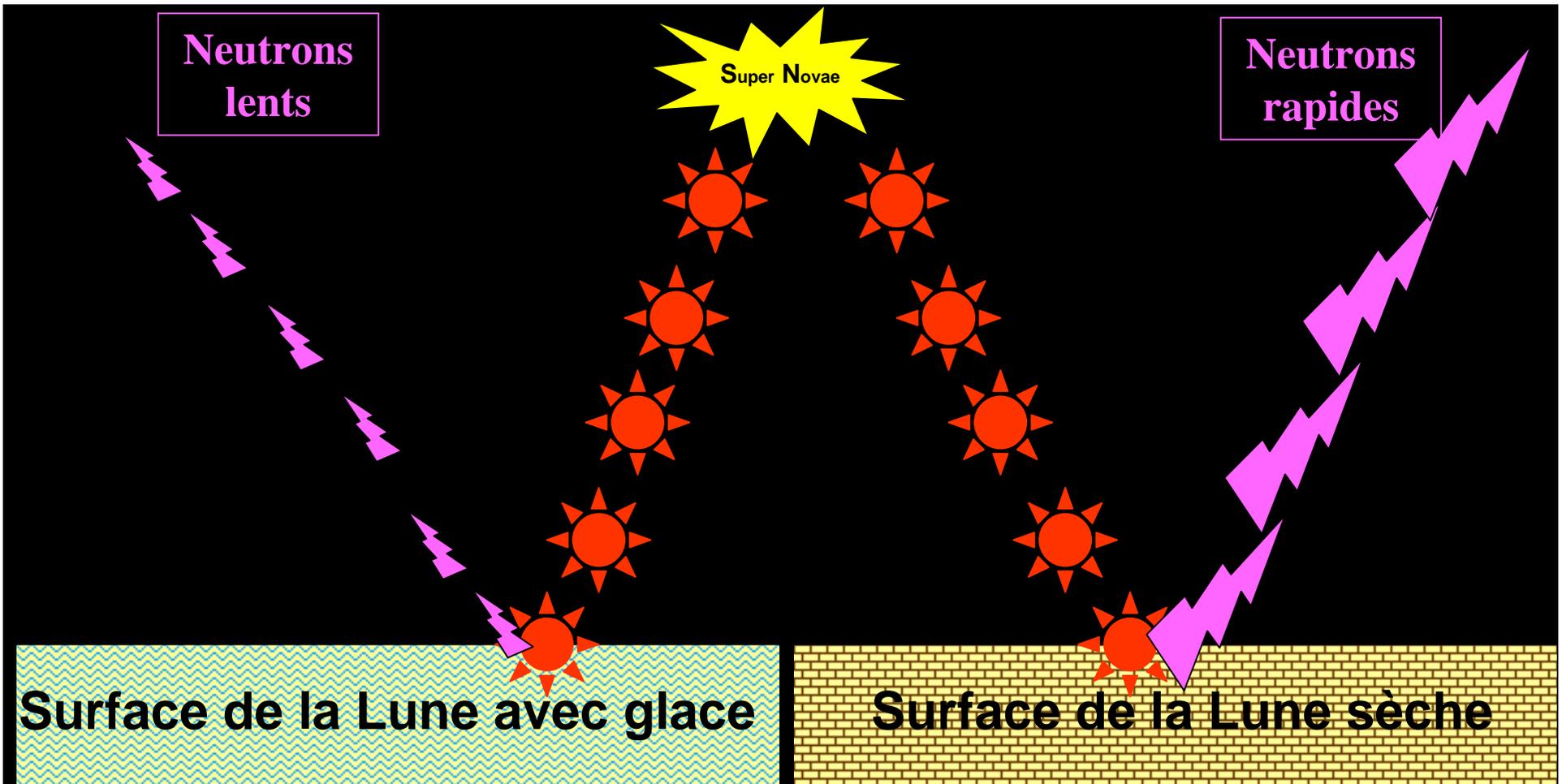


**Surface de la Terre**

**Sur Terre, l'atmosphère (et le champ magnétique)  
« arrêtent » les rayons cosmiques**



**Sur la Lune, pas d'atmosphère ni de champs magnétique. Les rayons cosmiques frappent le sol, ce qui produit des neutrons « rapides ». Or, l'Hydrogène (en particulier son isotope nommé Deutérium) ralentit les neutrons d'une façon « particulière ». Et il y a de l'Hydrogène dans H<sub>2</sub>O.**

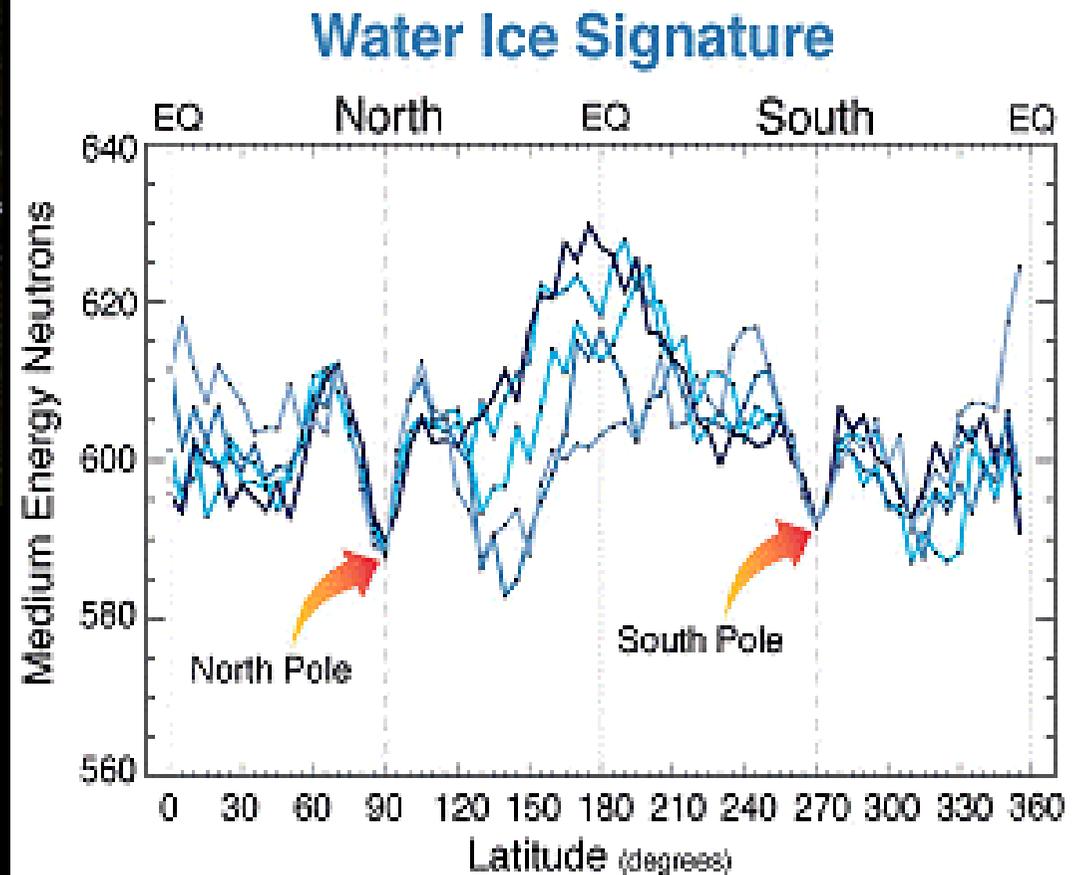


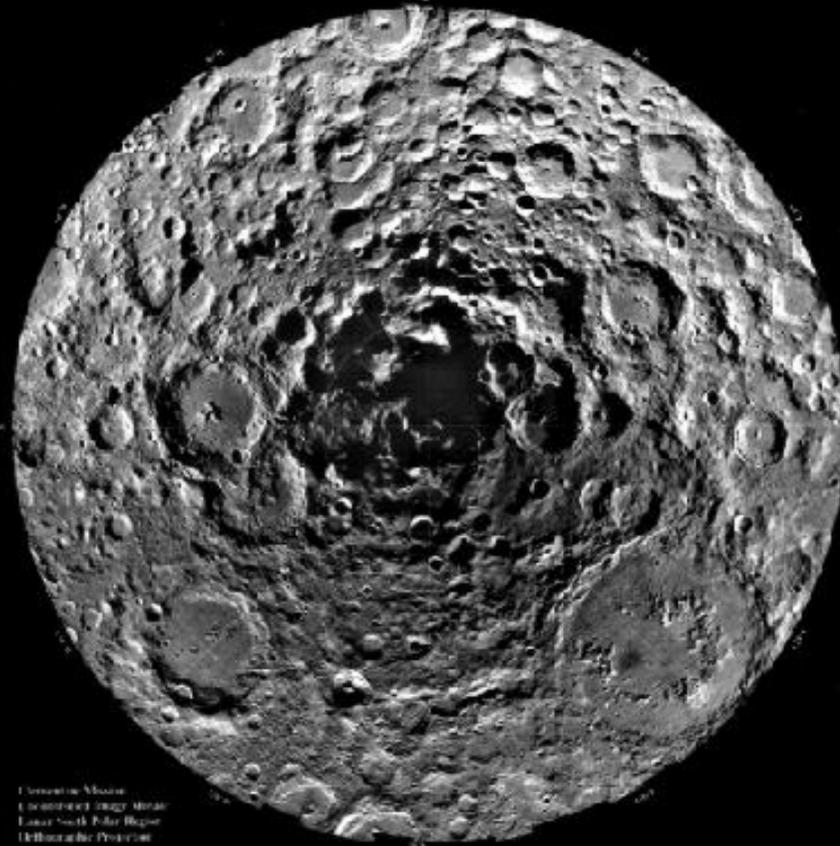
**Si il y a des quantités significatives de glace d'H<sub>2</sub>O dans certaines zones de la Lune, donc de deutérium, les neutrons seront ralentis. Le sont-ils au dessus des cratères polaires ?**



**La sonde Lunar Prospector en orbite polaire autour de la Lune. Elle avait ce détecteur de neutrons, et pouvaient mesurer leur énergie.**

**Au niveau des pôles, les neutrons sont effectivement ralentis**



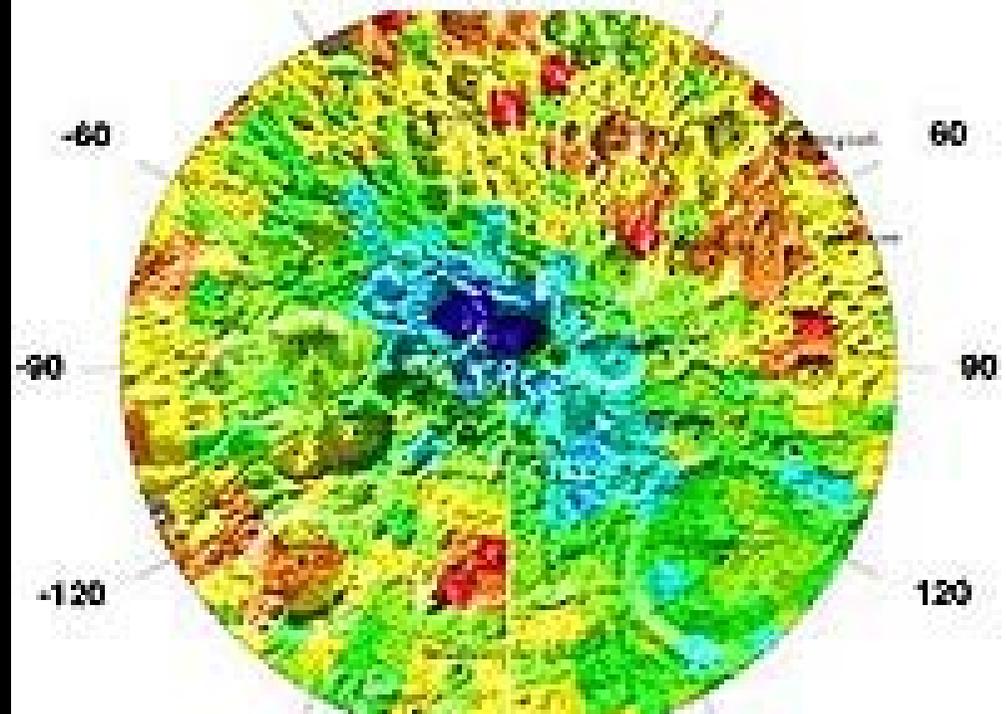


© European Space Agency  
Lunar Reconnaissance Orbiter  
Lunar South Pole Region  
Orbitographic Projection

**Et c'est à l'emplacement de ces cratères que les neutrons sont ralentis. Ces cratères contiendraient de la glace d'H<sub>2</sub>O !**

**Mosaïque de photos prises tout au long d'une journée montrant le Pôle Sud de la Lune. Certains cratères restent perpétuellement à l'ombre**

Lunar South Pole





NATIONAL AERONAUTICS  
AND SPACE ADMINISTRATION

+ NASA Quest  
+ Search Quest

FIND IT @ NASA :

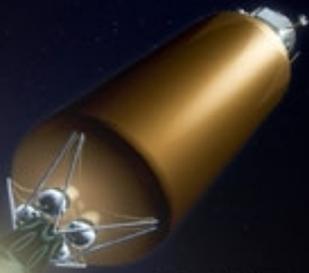
+ GO

Home

Mission

About the Moon

Impact!



**Exploration of the Moon Continues!**

**LCROSS** Lunar CRater Observation and Sensing Satellite

Tech Info

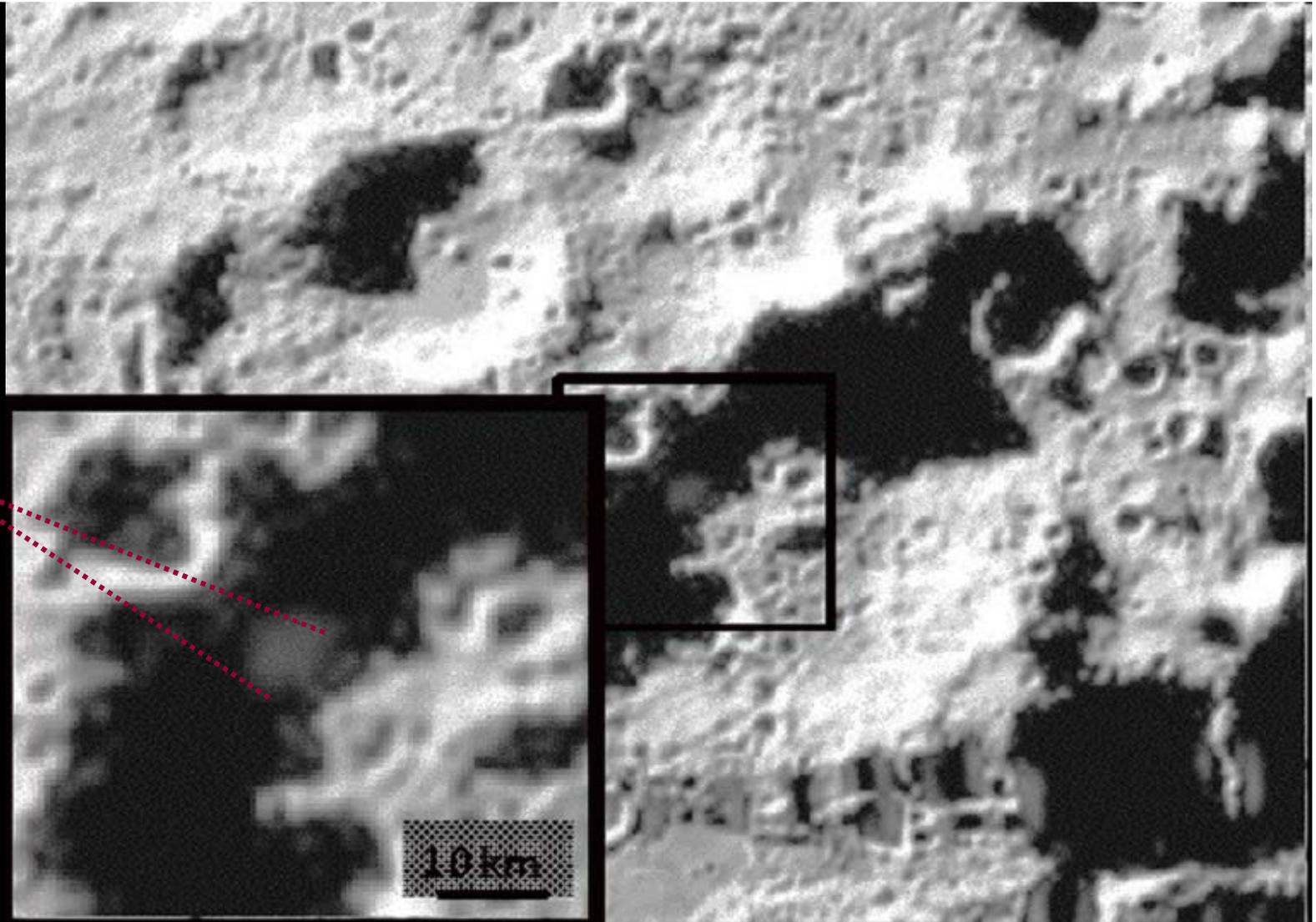
Observations

Education

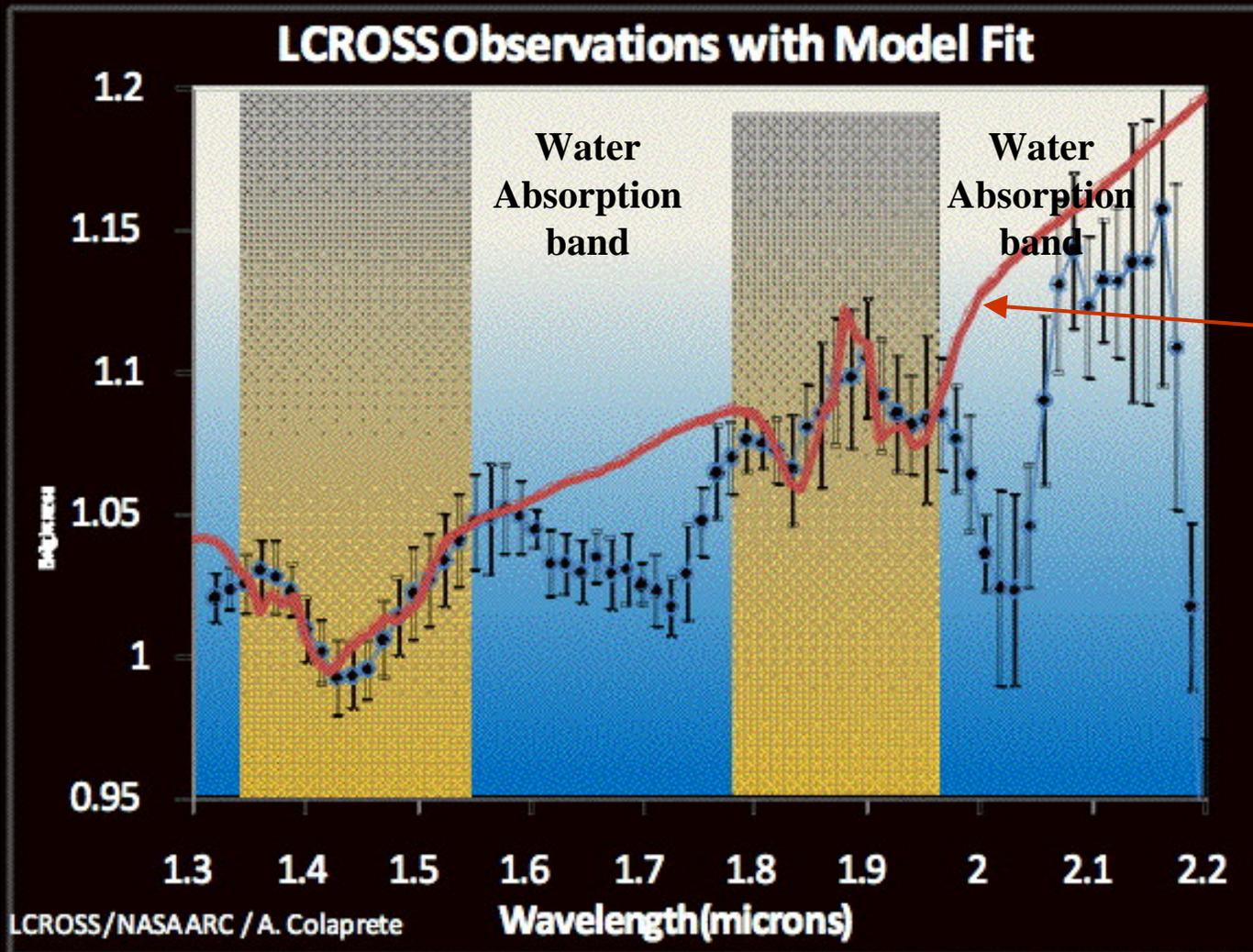
News / Events



**Confirmation : le 3eme étage d'une fusée, suivi par la sonde LCROSS se sont écrasés dans un de ces cratères à fond perpétuellement à l'ombre le 9 octobre 2009. Les panaches éjectés par le 1er impact a été étudiés par LCROSS. 1er et 2eme impact devaient être étudiés par LRO et depuis la Terre.**



**Le panache créé par le 1er impact et vu par LCROSS, 20 secondes après ce 1er impact. Vu la masse et la vitesse de l'impact, il a dû se faire un cratère de 20 m de diamètre pour 3 m de profondeur. Le panache visible ici correspond au plus fins débris issus du cratère**



Surface lunaire standard

Données Nasa News, novembre 2009

**Pour expliquer le spectre Infra rouge observé en analysant la lumière (solaire) réfléchié par le le panache, il faut que ce panache contienne une centaine de litres d'eau plus ou moins vaporisée (résultats préliminaires)**

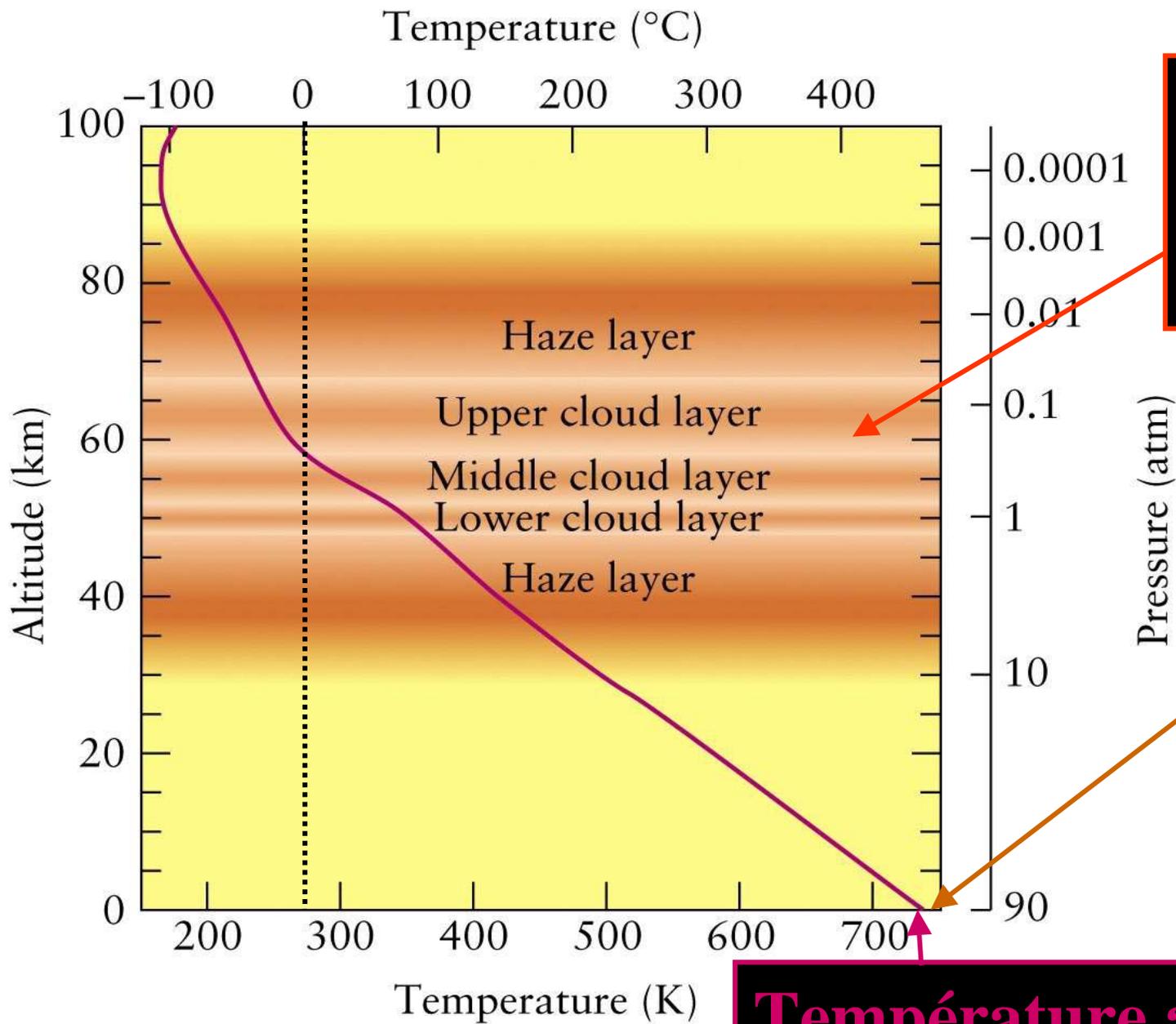


**Colaprete *et al.*, *Science*  
22 October 2010:  
Vol. 330, no. 6003,  
pp. 463 – 468, Anthony**

**The maximum total water vapor and water ice within the instrument field of view was  $155 \pm 12$  kilograms. Given the estimated total excavated mass of regolith that reached sunlight, and hence was observable, the concentration of water ice in the regolith at the LCROSS impact site is estimated to be  $5.6 \pm 2.9\%$  by mass. In addition to water, spectral bands of a number of other volatile compounds were observed, including light hydrocarbons, sulfur-bearing species, and carbon dioxide.**



**Après la Lune  
(et Mercure),  
Vénus,  
entièrement  
recouverte de  
nuage**



**Nuages  
d'acide  
sulfurique**

**Pression  
de  
90 atm.**

**Température au sol de  
450°C (725 K)**

**CO<sub>2</sub> : 96.5%**

**N<sub>2</sub> : 3.5%**

**SO<sub>2</sub> : 0.015%**

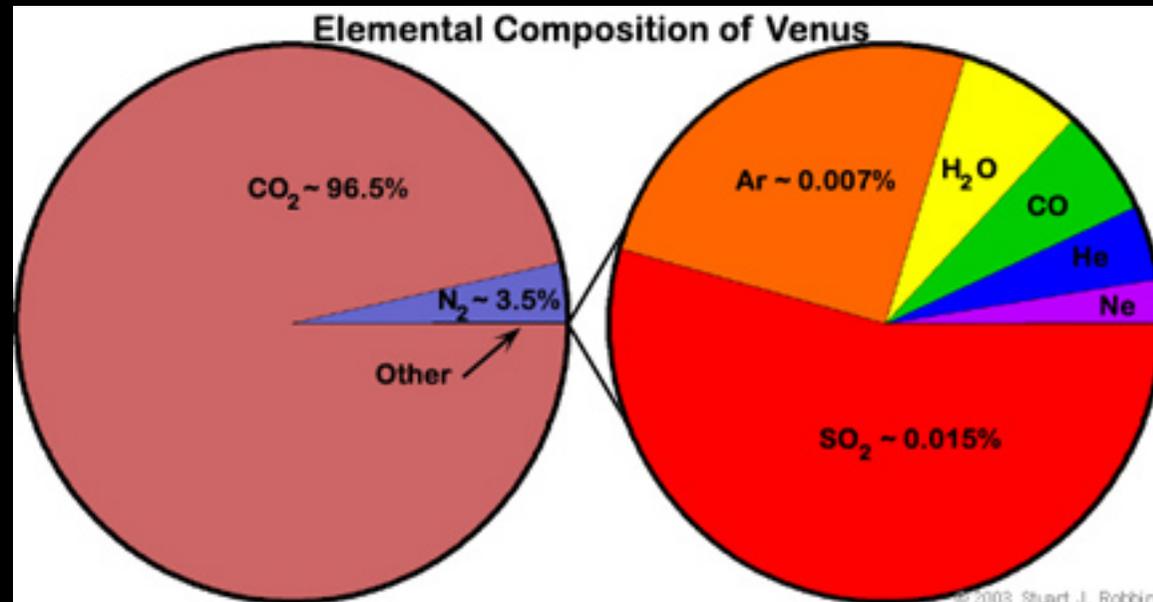
**Ar : 0.007%**

**H<sub>2</sub>O: 0.002%**

**CO : 0.0017%**

**He : 0.0012%**

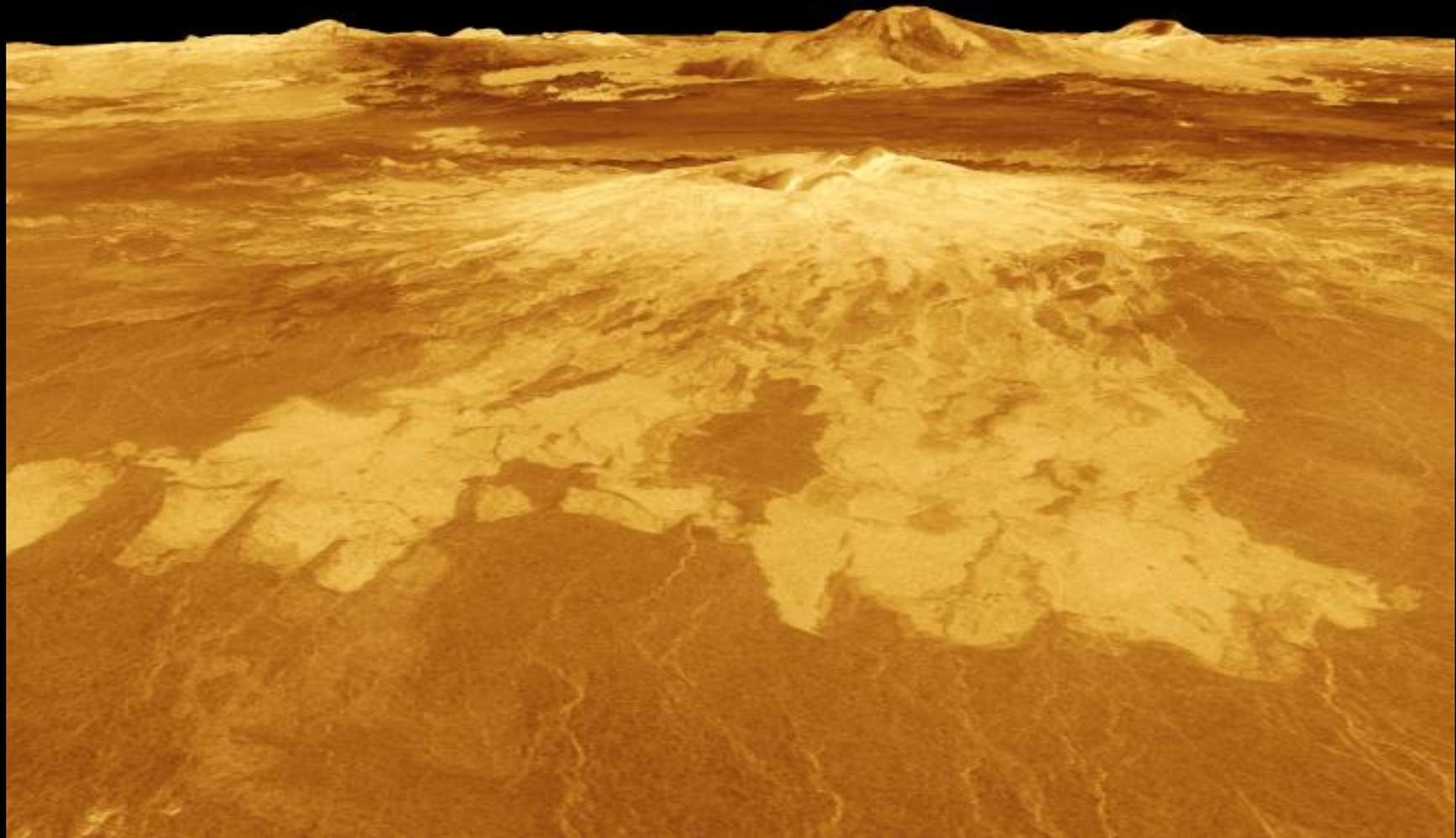
**Ne : 0.0007%**

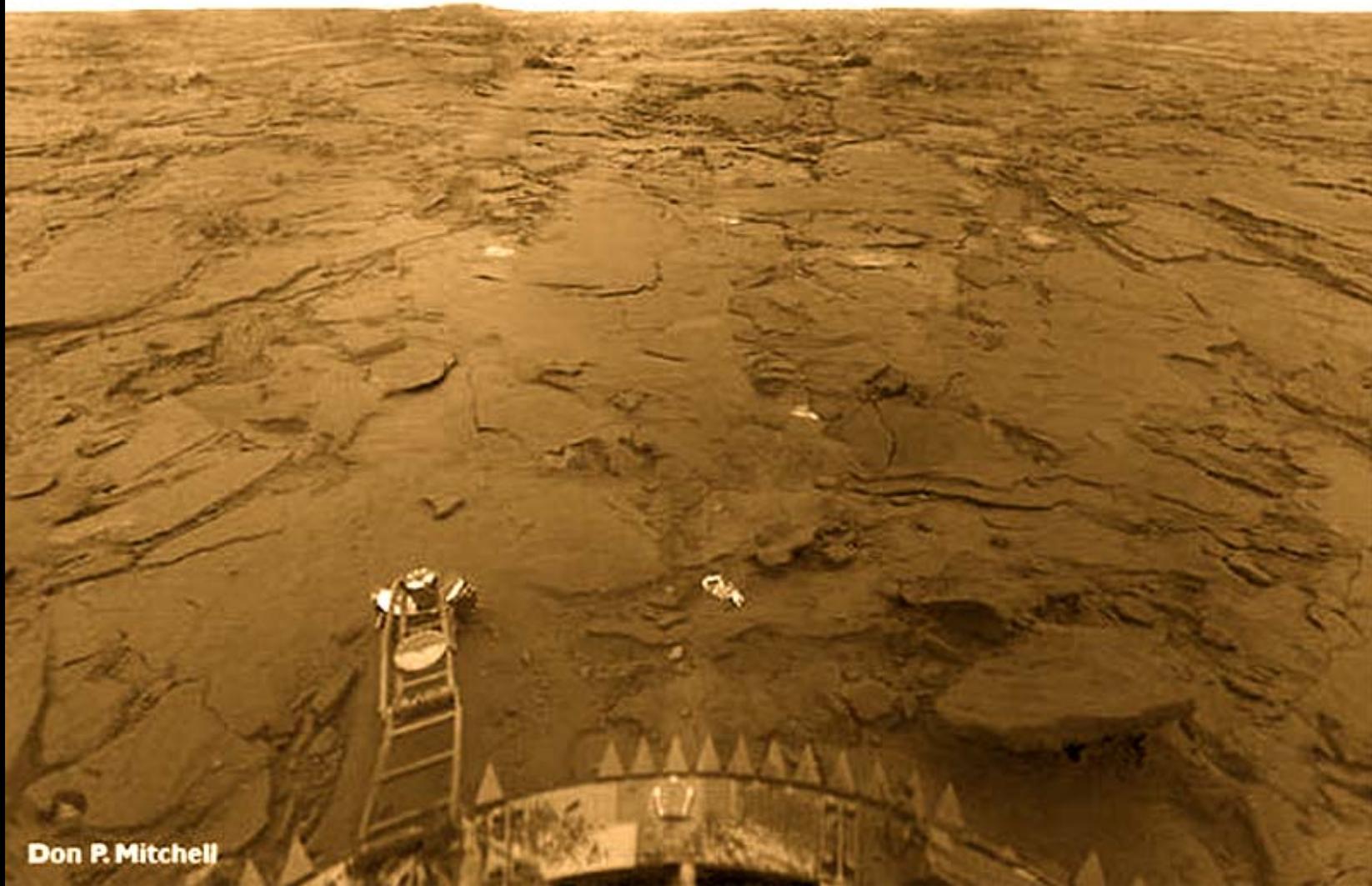


**La composition de l'atmosphère vénérienne :  
0,002% de vapeur d'eau ( $2 \cdot 10^{-5}$ ).**

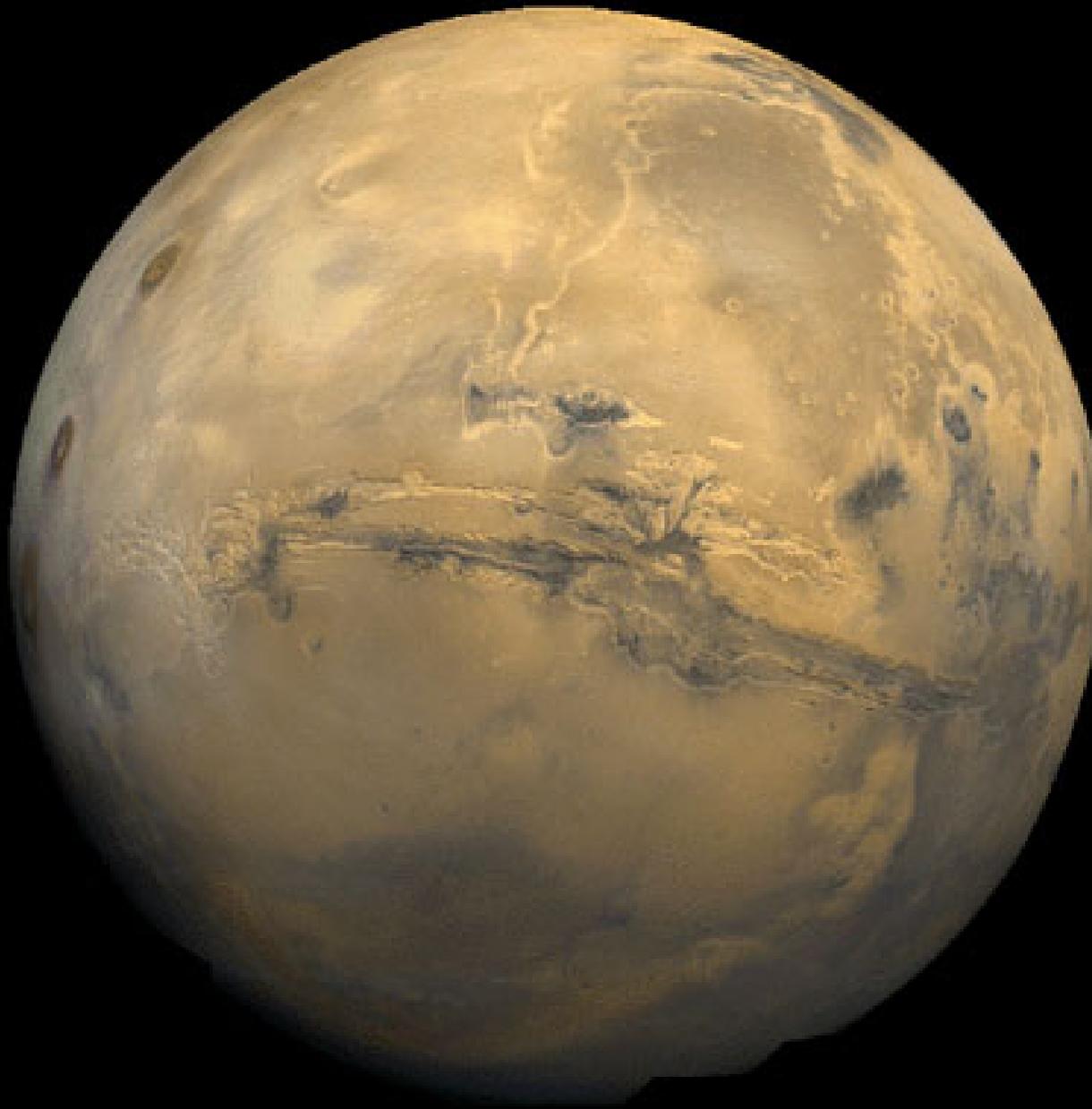
**Si toute cette eau atmosphérique recouvrait la  
surface de Vénus, cela ferait une couche d'eau  
liquide de quelques cm d'épaisseur  
(eau précipitable).**

**Où est partie cette eau vénérienne ? Sans doute photolysée par les abondants UV solaires, avec échappement de l'H<sub>2</sub>**





**Les sols de Vénus, photographiés par des sondes soviétiques, sont rougeâtres, sans doute riches en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . L' $\text{O}_2$  libéré par la photolyse de l'eau y serait piégée.**



# Mars.

**Rappel : la température moyenne est de  $-50^{\circ}\text{C}$ , la pression de 0,6% de celle de la Terre (ce qui règnerait sur Terre à 50 km d'altitude)**



**1666 : Cassini découvre des calottes polaires sur Mars.**

**Pour lui, c'est « évidemment » de la neige ou de la glace d'eau.**

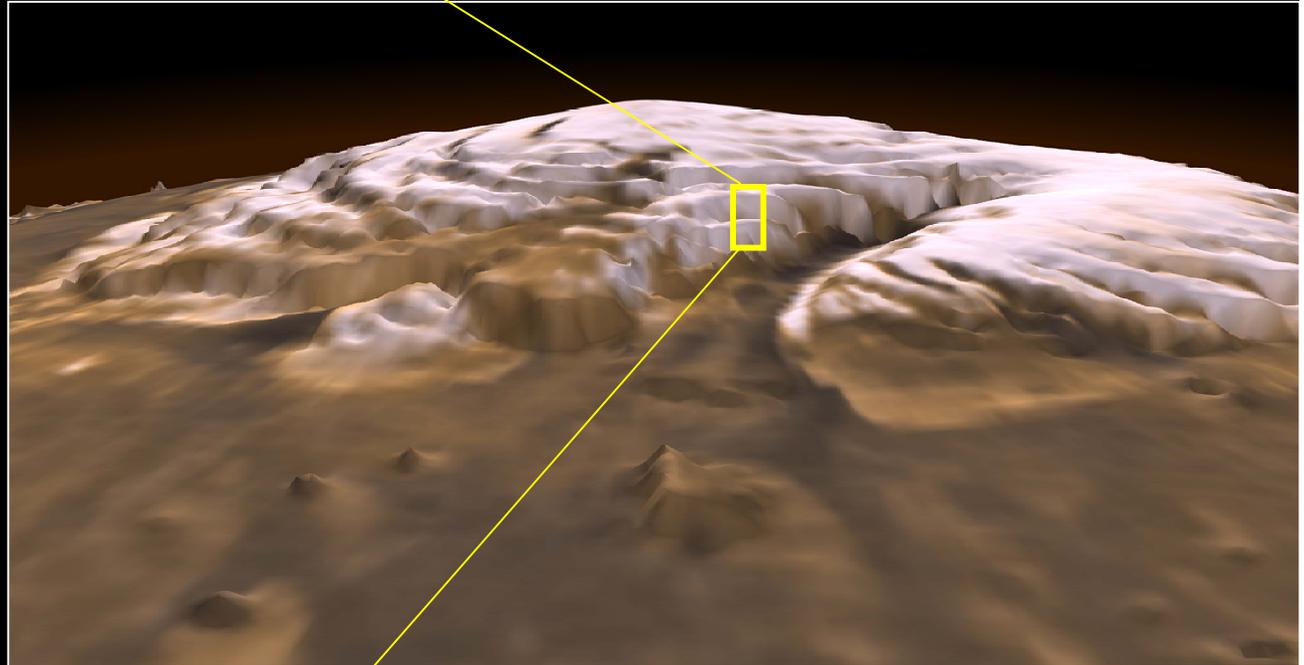
**La détermination spectrale de la glace d'H<sub>2</sub>O a lieu pour la 1<sup>ère</sup> fois en 1964**

**Etudions ces calottes polaires !**

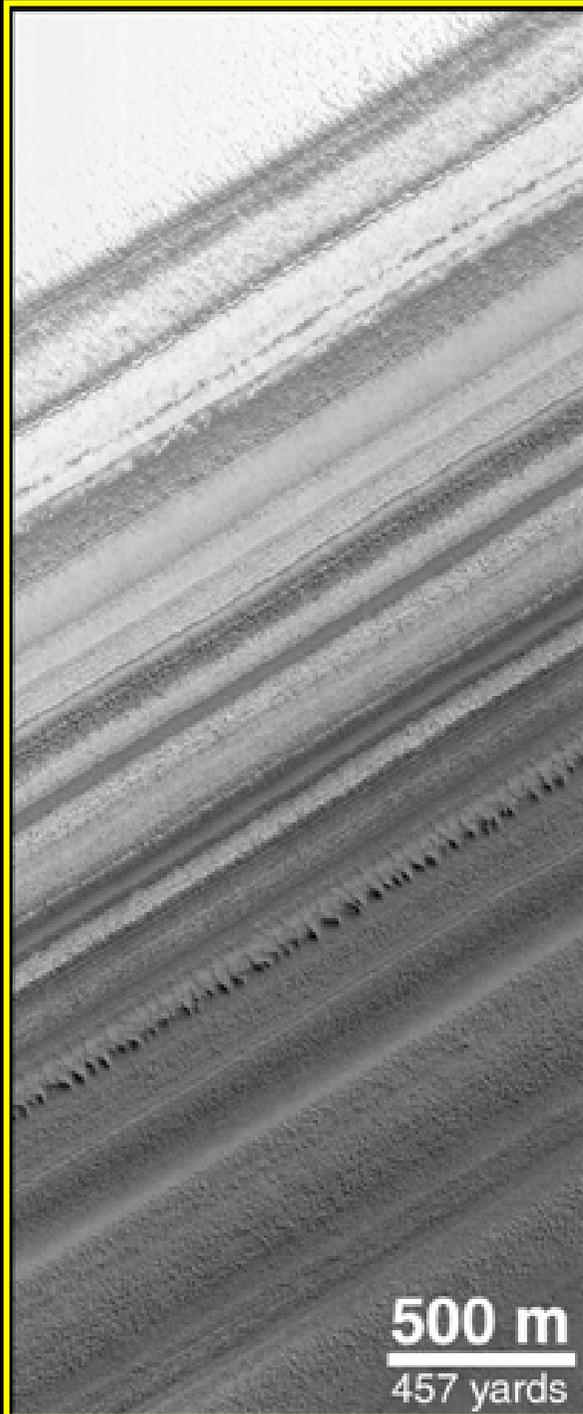
**Voici la calotte polaire nord d'été.  
(cette calotte à la taille de celle du Groenland).**



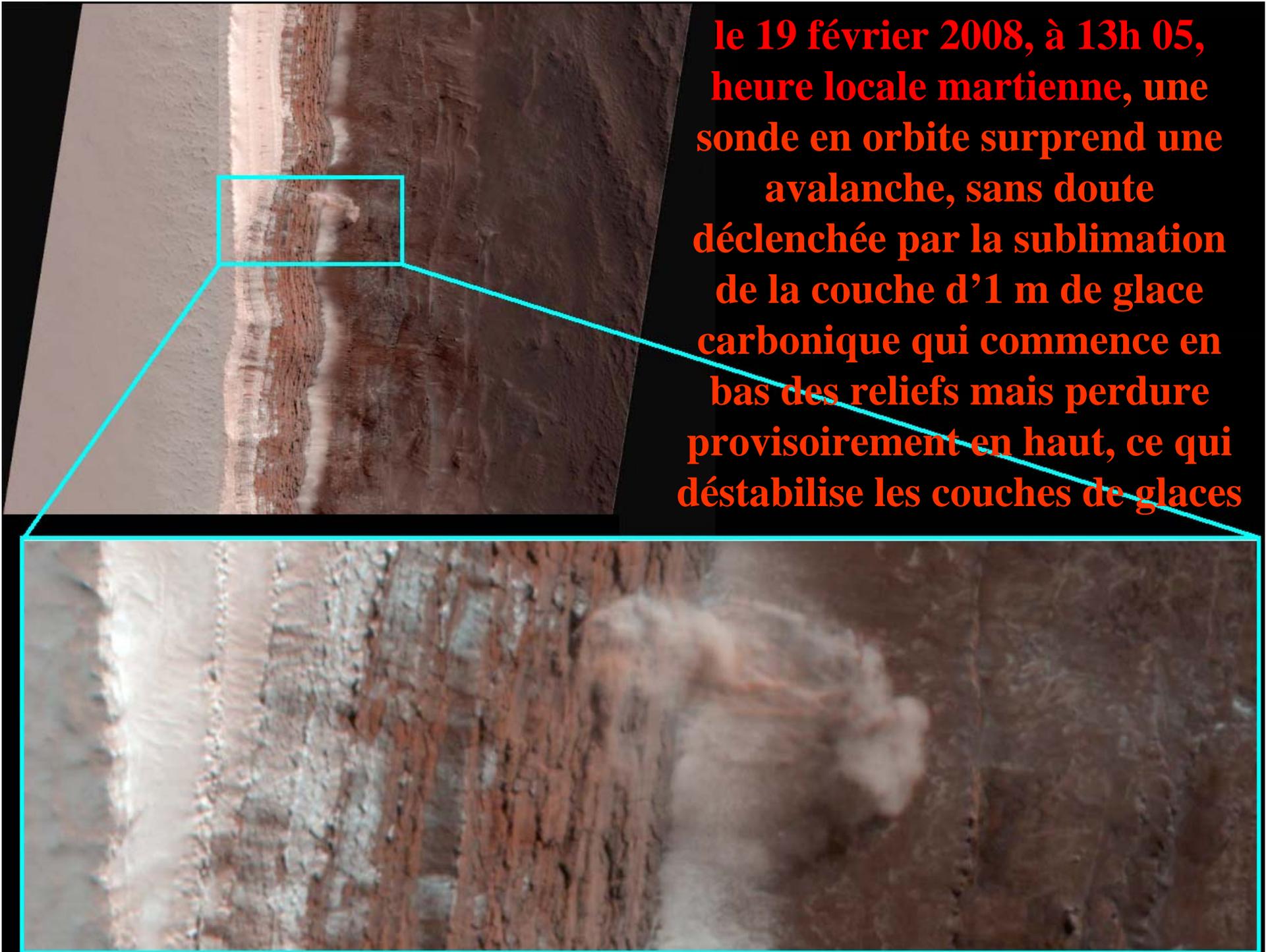
**Les résultats des sondes « récentes » en orbite : on peut étudier les calottes polaires avec un luxe de détail.**

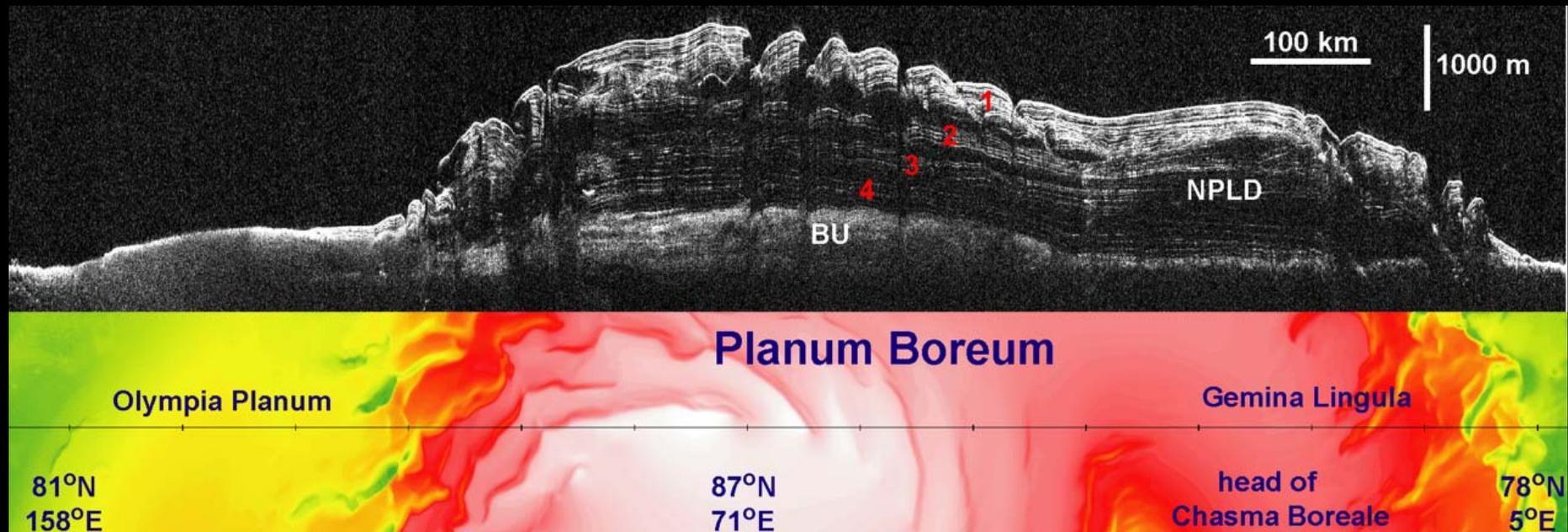


**Les falaises bordières montrent des falaises (ici 1000m) qui permettent de voir que la calotte est constituée d'une succession de couches de glace d'H<sub>2</sub>O plus ou moins riche en poussières**



**le 19 février 2008, à 13h 05,  
heure locale martienne, une  
sonde en orbite surprend une  
avalanche, sans doute  
déclenchée par la sublimation  
de la couche d'1 m de glace  
carbonique qui commence en  
bas des reliefs mais perdure  
provisoirement en haut, ce qui  
déstabilise les couches de glaces**

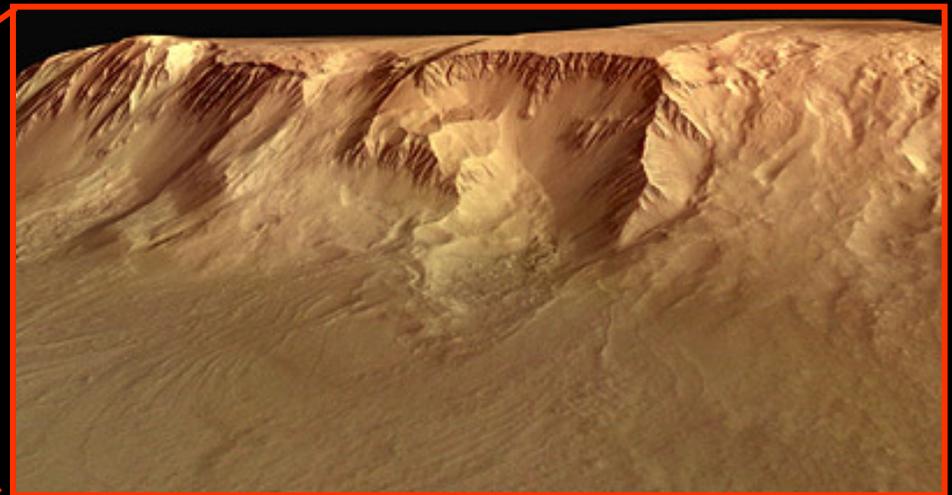
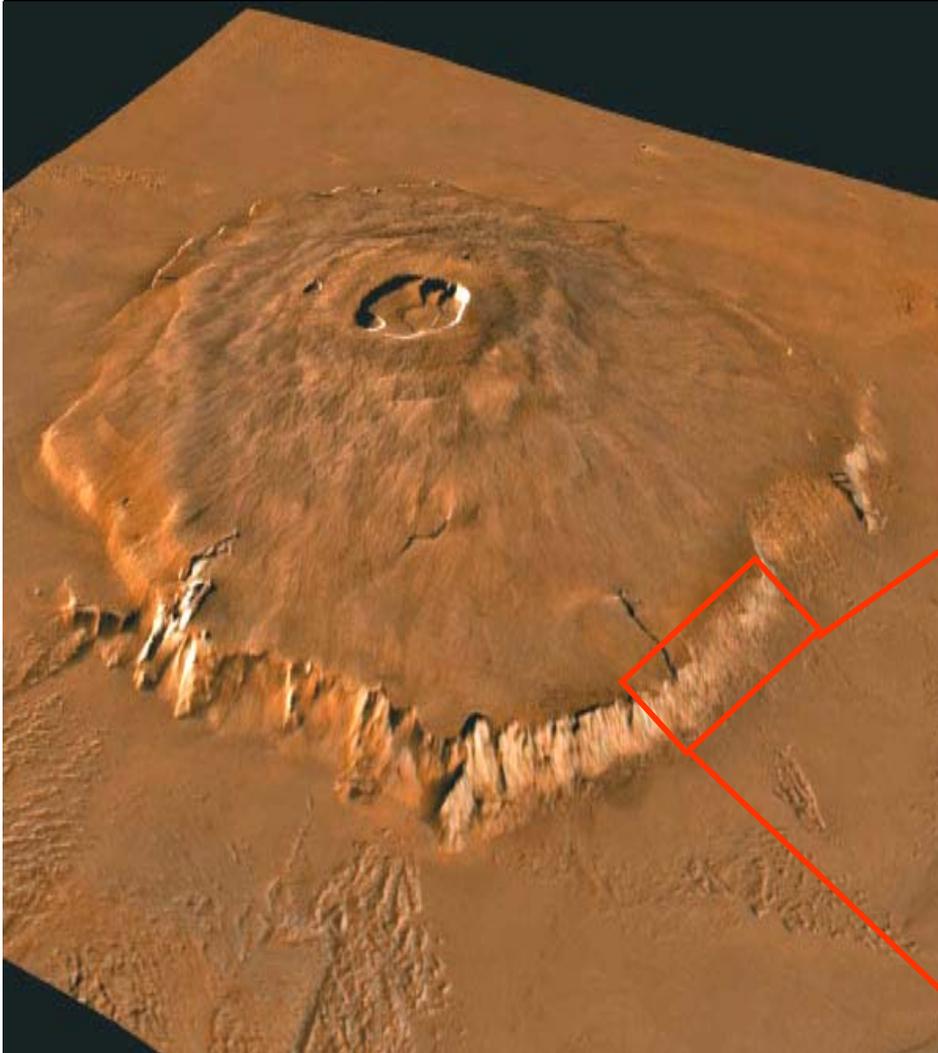




**Deux sondes martiennes en orbite disposent d'un radar. Voici une coupe radar globale de la calotte permanente nord. On y verrait 4 « cycles ».**

# Y a-t-il eu des calottes anciennes ?

Premier exemple : sur les flancs d'Olympus Mons, le plus grand volcan martien ( $d = 600 \text{ km}$ ,  $h = 26 \text{ km}$ ), situé à l'équateur



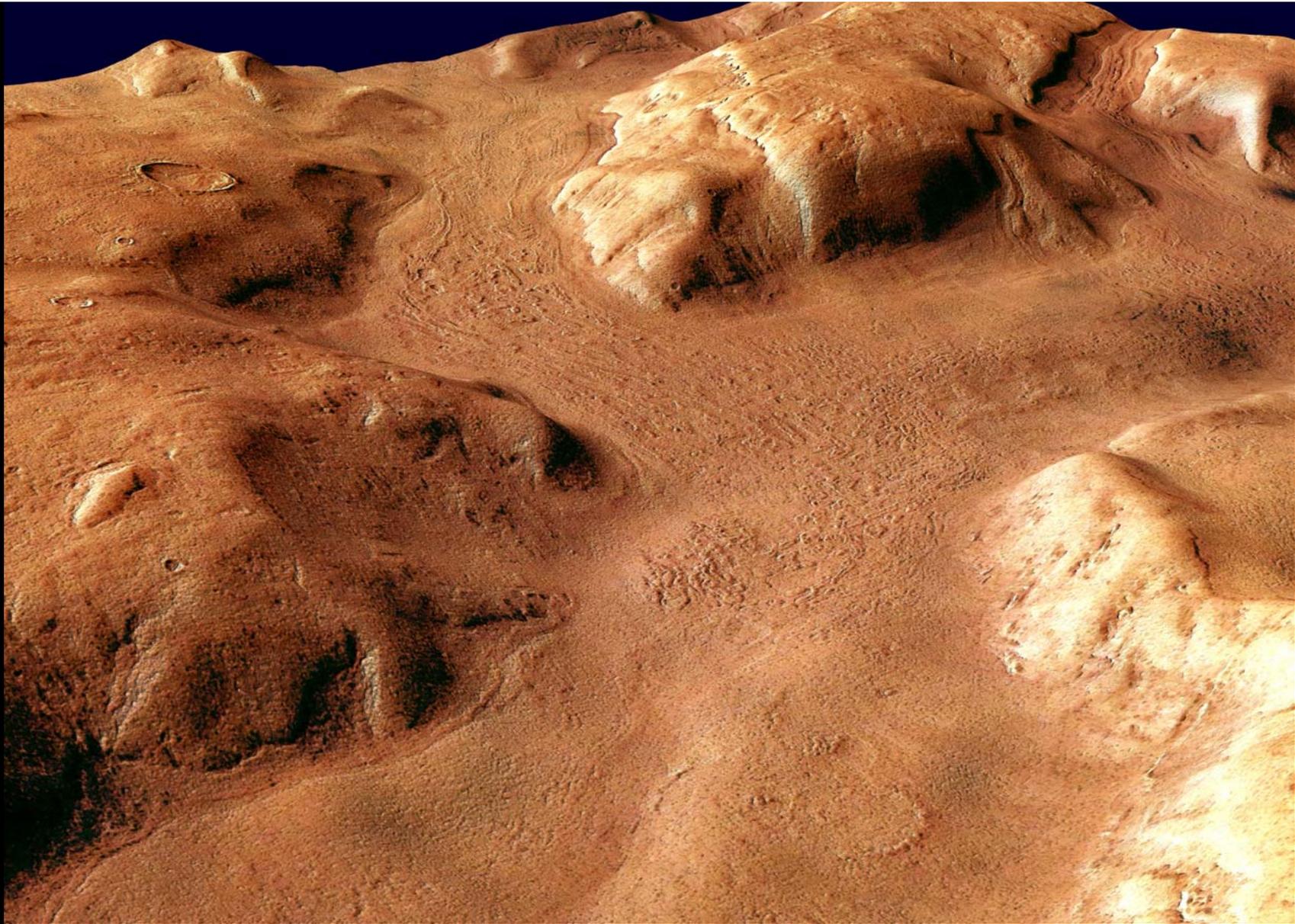


Flancs d'Olympus Mons



Flancs d'une  
montagne antarctique

**Il y a eu des glaciers sur les flancs  
d'Olympus Mons, il y a moins de 10 Ma.**



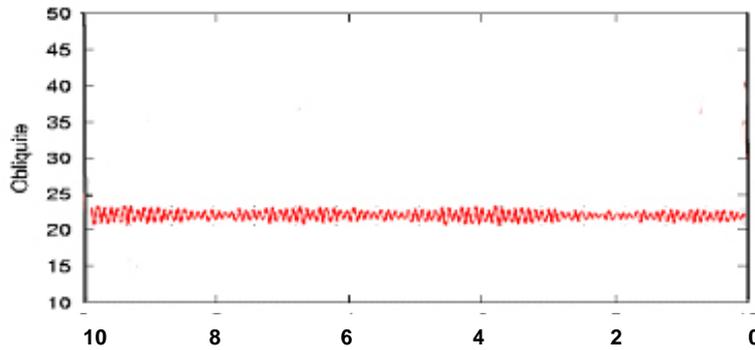
**Autre glacier de la région de Reuil Vallis,  
autres montagnes équatoriales.**

## Obliquité (II)



Terre

Dynamique régulière

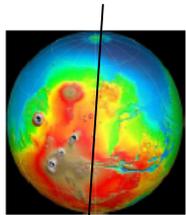


Périodes dominantes:

~41 000 ans

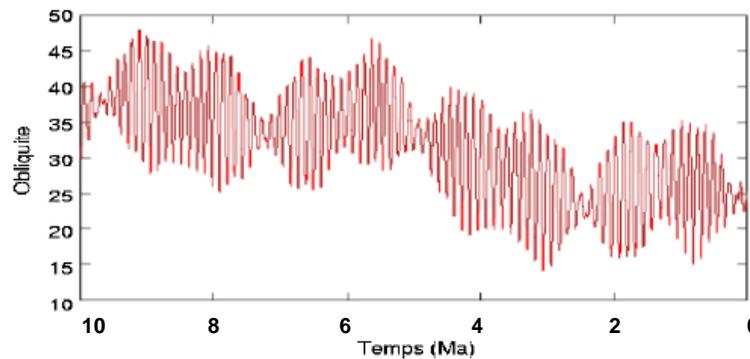
~39 600 ans

Modulation: ~ 1.2 Ma



Mars

Dynamique chaotique



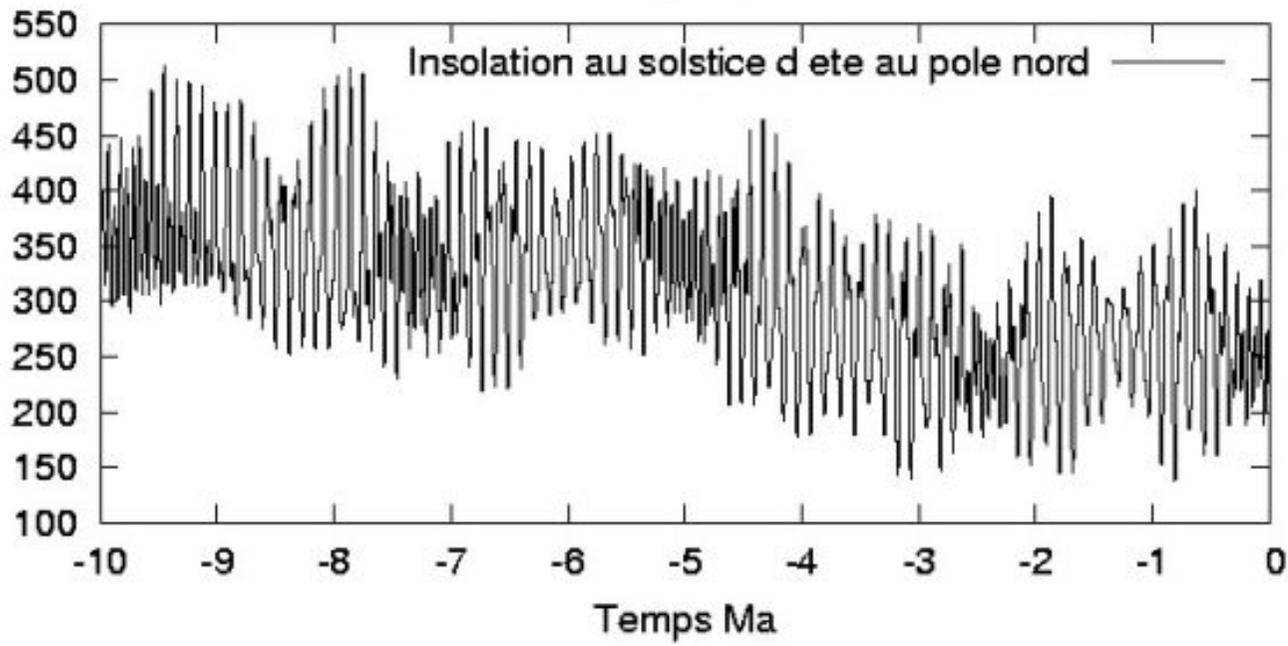
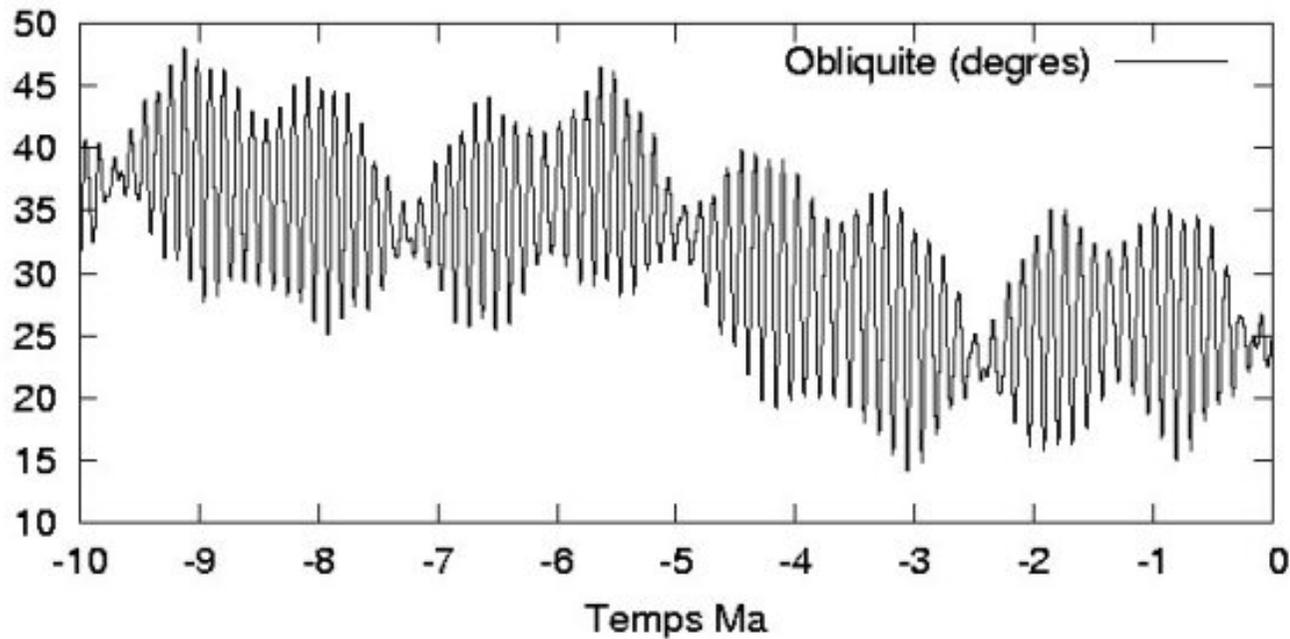
Mouvement  
chaotique entre 0 et  
80°  
(Laskar et Robutel,  
1993)

Période dominante  
~ 120 000 ans

**Sur Terre,**  
**l'inclinaison**  
**de l'axe de**  
**rotation par**  
**rapport à**  
**l'écliptique**  
**est**  
**« bornée »**  
**par l'action**  
**forte de la**  
**Lune**

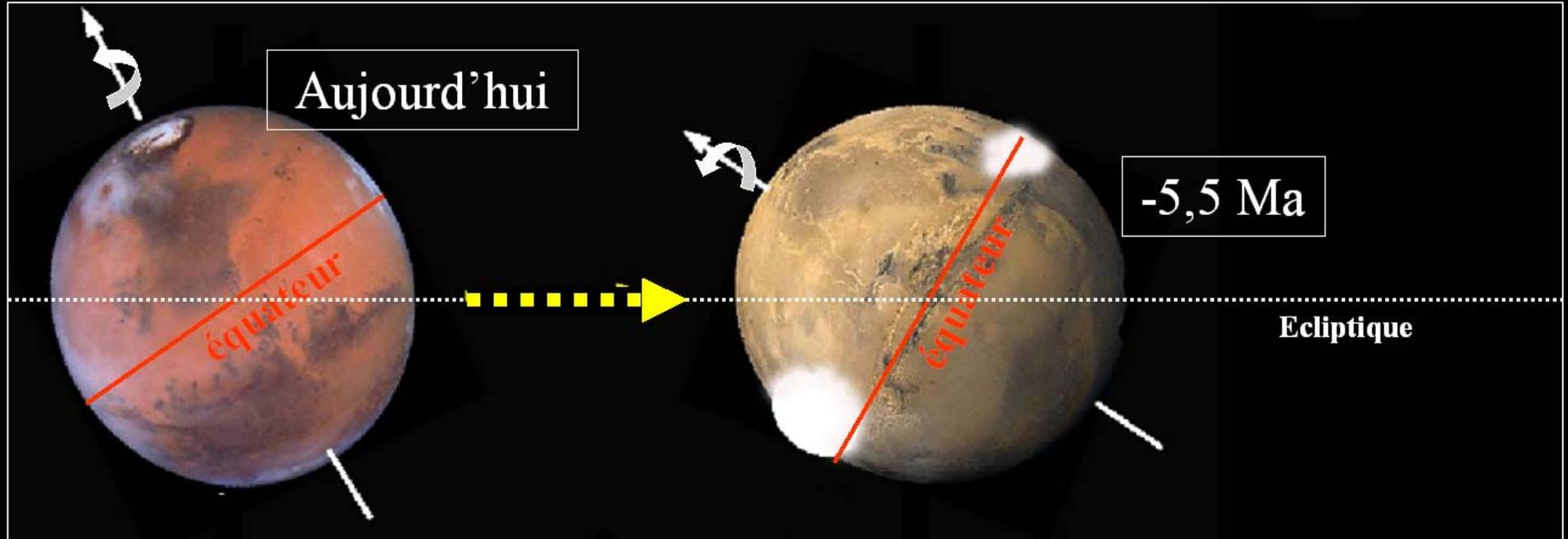
**Sur Mars,**  
**cette**  
**inclinaison**  
**est**  
**chaotique et**  
**non bornée**

**L'action du soleil et des astres voisins (entre autre sur le bourrelet équatorial) fait varier l'inclinaison de l'axe de rotation des planètes**

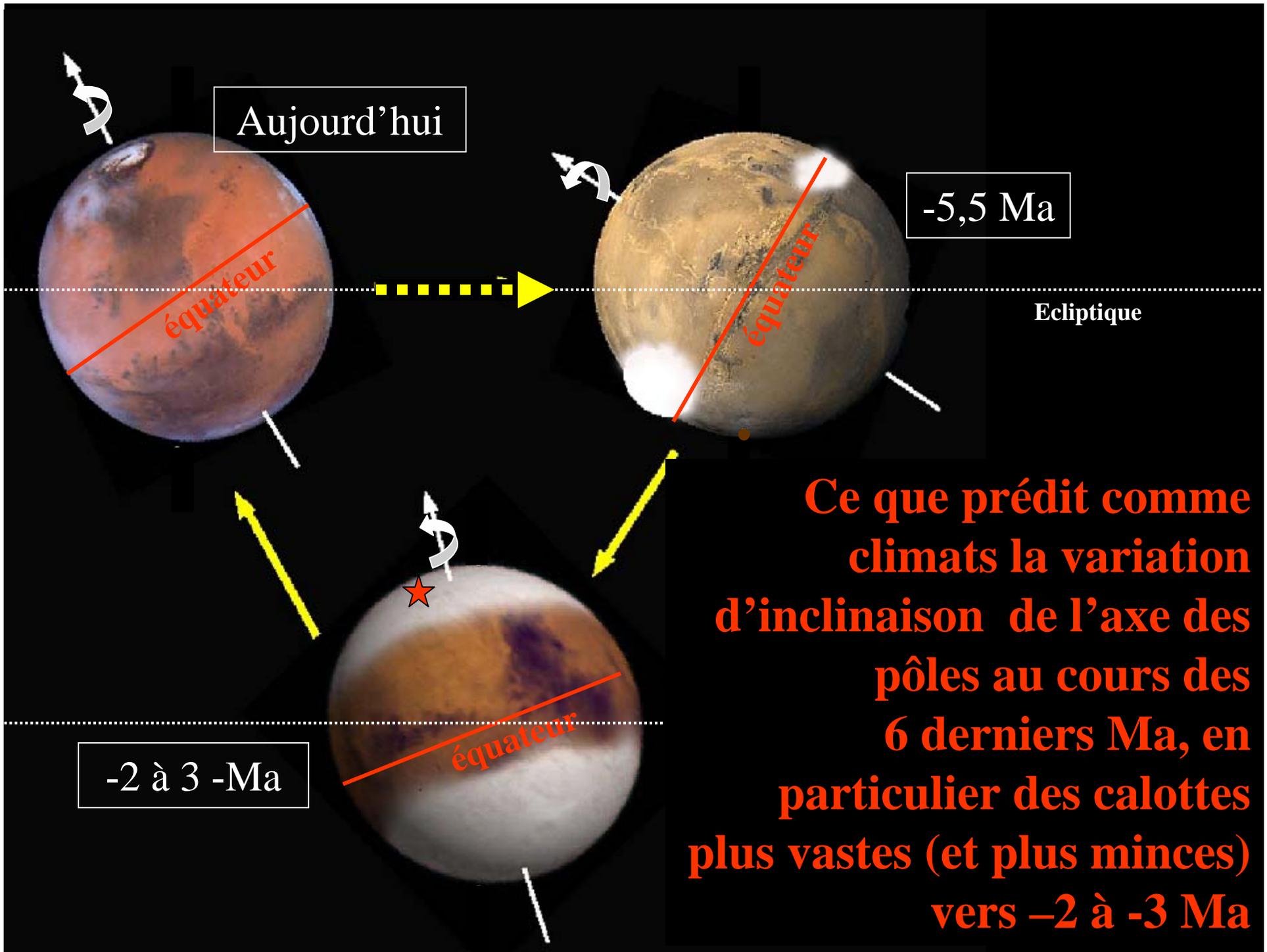


**Sur les 10 derniers millions d'années, les calculs montrent l'inclinaison de Mars a varié entre 15° et 45°. Avant, c'est « incalculable » (basculement chaotique)**

**Cela a entraîné une variation d'insolation polaire l'été de 150 à 500 W/m<sup>2</sup>**



**Et quand l'axe est très incliné (comme il y a -5,5 Ma), ce n'est pas aux pôles que la température moyenne est la plus froide, mais à l'équateur, en particuliers sur les montagnes équatoriales. La glace aura tendance à quitter les pôles (par sublimation) pour se condenser à l'équateur.**



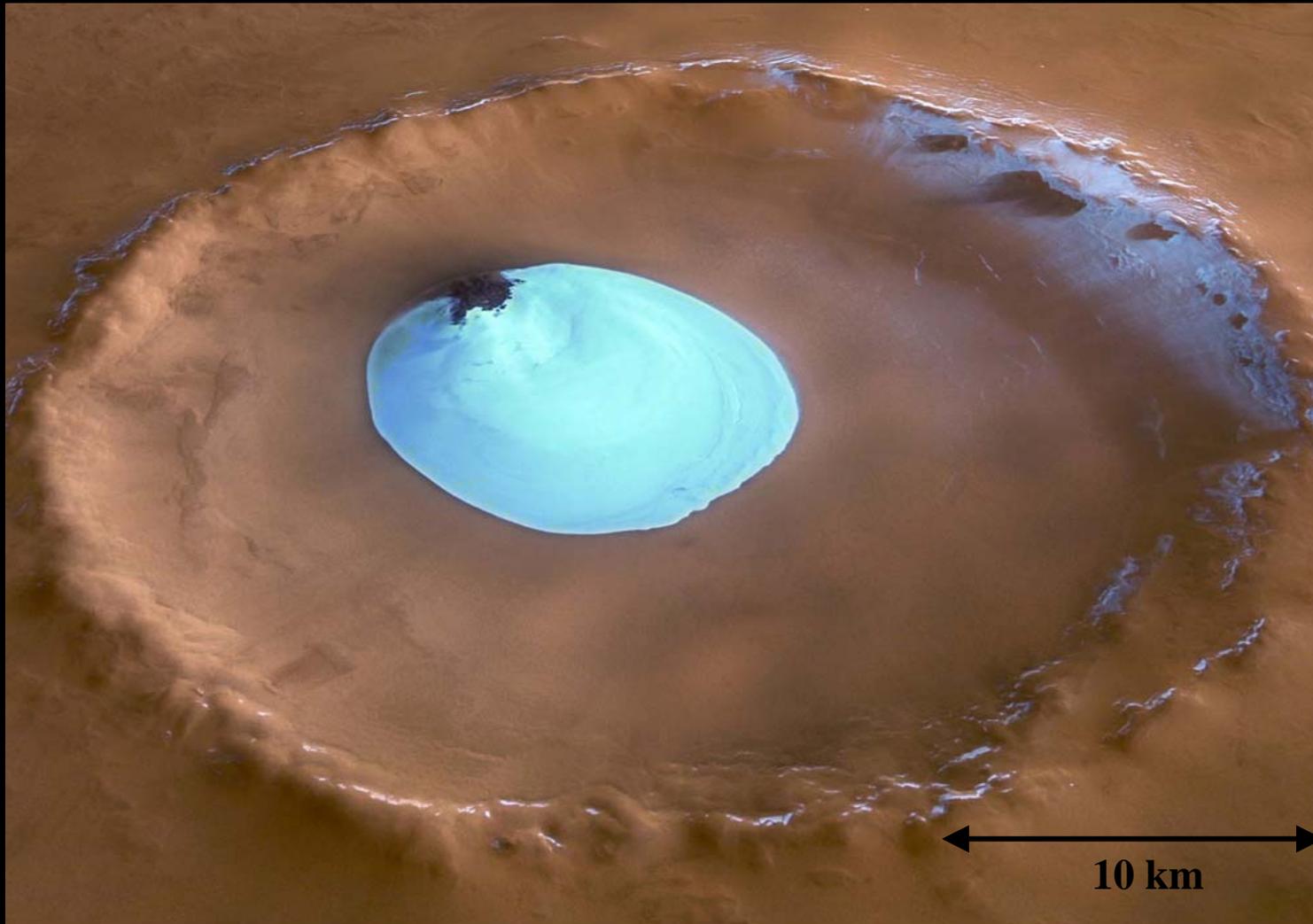
Aujourd'hui

-5,5 Ma

-2 à 3 -Ma

Ecliptique

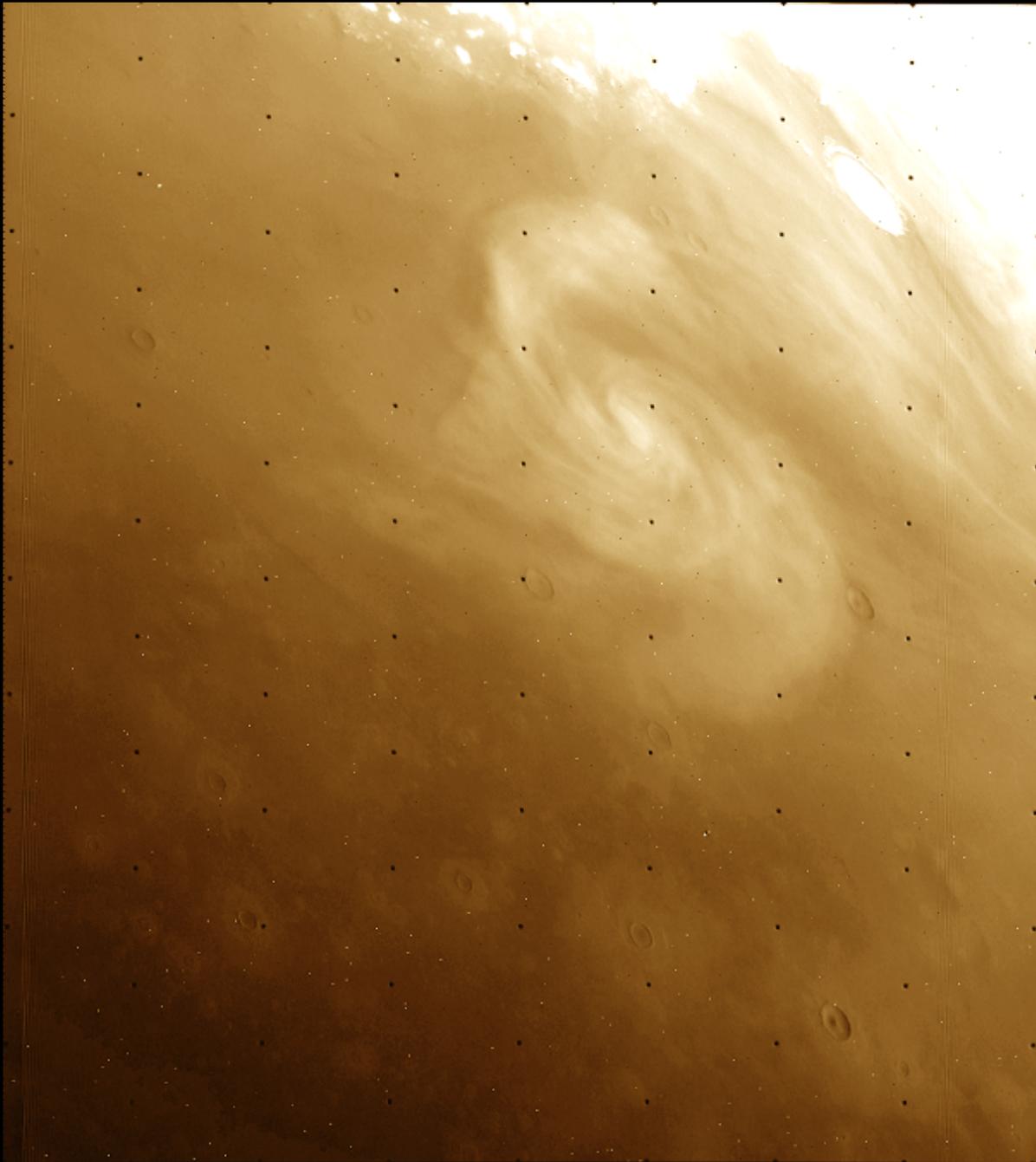
**Ce que prédit comme climats la variation d'inclinaison de l'axe des pôles au cours des 6 derniers Ma, en particulier des calottes plus vastes (et plus minces) vers -2 à -3 Ma**



**Et voici, au fond d'un cratère ( $70^{\circ}$  N) ce qu'on pourrait un reste « permanent » de cette « calotte transitoire ». Noter que comme tous les versants « à l'ombre » au petit matin, ses flancs nord sont recouverts de givre ou de neige.**

# Dans l'atmosphère

La vapeur  
d'eau  
représente  
0,021% de  
l'atmosphère,  
soit une couche  
de  $12 \mu$  d'eau  
précipitable



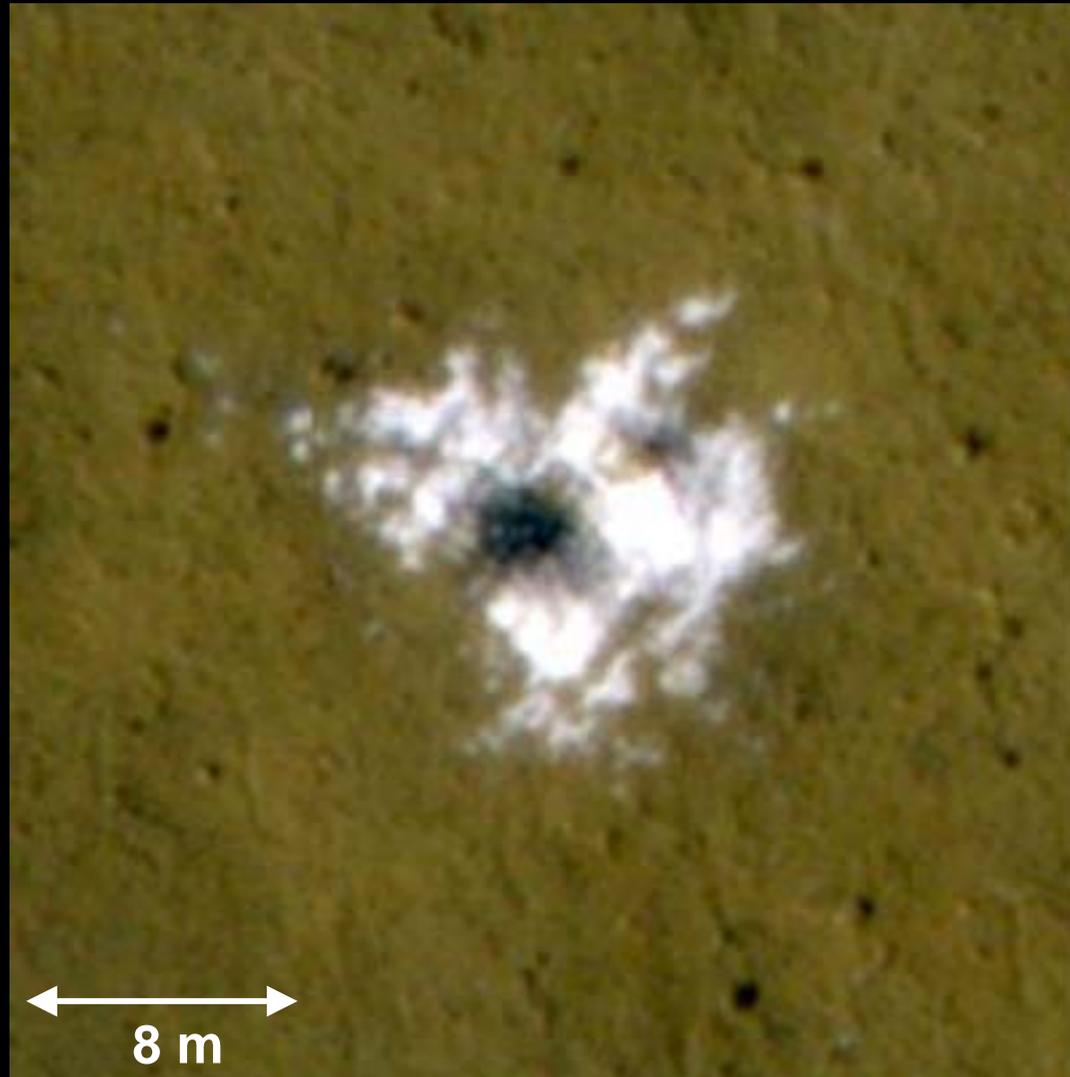


**Ce passage  
glace  $\leftrightarrow$  vapeur d' $H_2O$   
se voit très bien pour les  
latitudes supérieures à  
 $45^\circ$ , où le paysage se  
recouvre de givre toutes  
les nuits d'hivers, givre  
qui se sublime en début  
de matinée. La  
température lorsqu'il y a  
ce givre montre qu'il ne  
s'agit pas de glace  
carbonique, donc sans  
doute de glace d' $H_2O$**

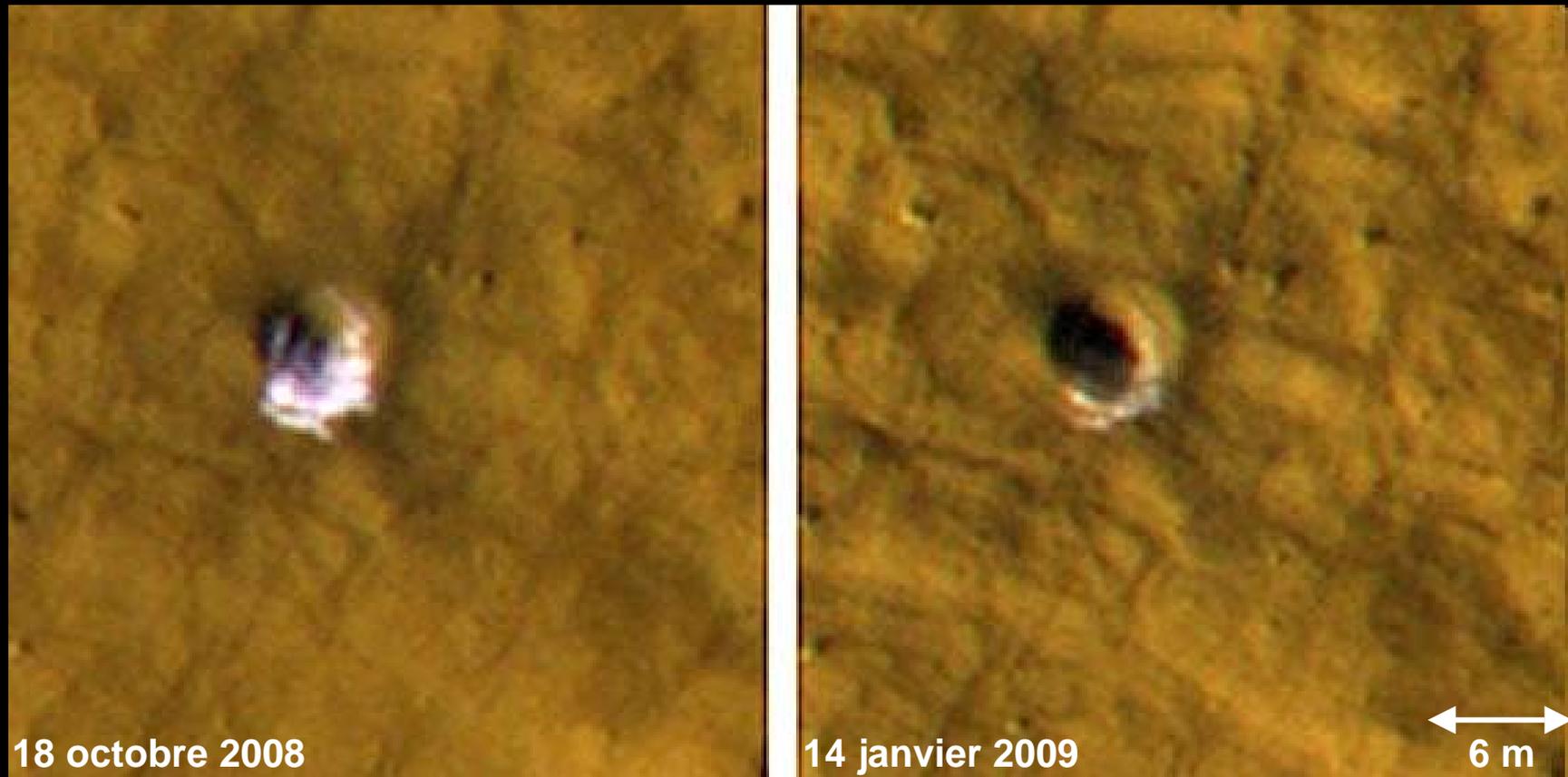
Photos Viking, 1976-1977



**Sur Mars, il tombe parfois des « petites »  
météorites, laissant des traces qu'on voit  
« apparaître » entre deux survols**



**Les plus « grands » de ces cratères « actuels » sont souvent entourés d'éjectas blancs, que les spectres IR révèlent être fait de glace d'eau. Ce cratère a été creusé en 2008. Il mesure 8 m de diamètre, pour 1,5 m de profondeur. De la glace d'eau existe donc à faible profondeur dans cette région (56° lat. N)**



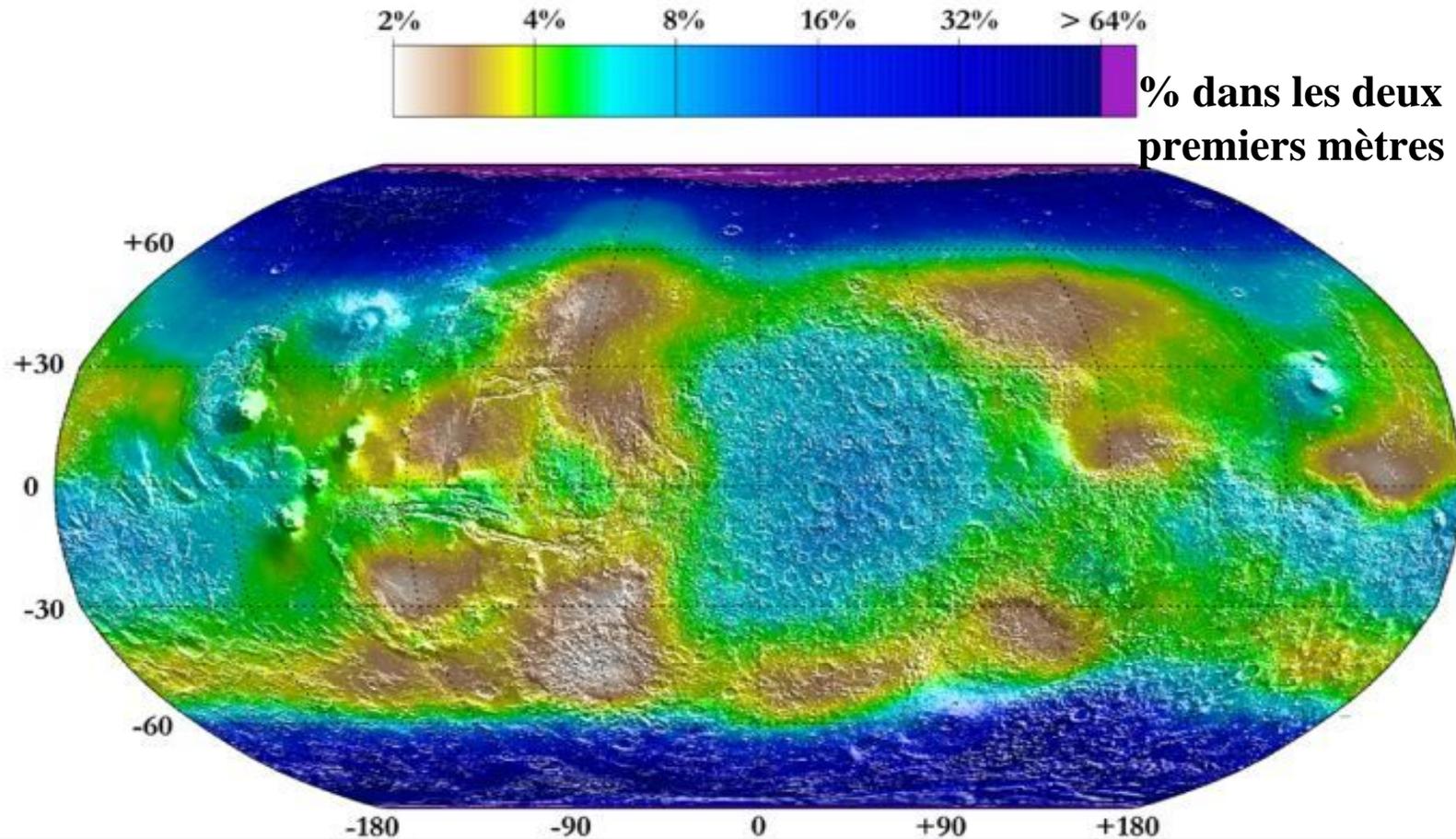
18 octobre 2008

14 janvier 2009

6 m

**Voici un autre petit cratère récent ( $D = 6\text{ m}$ ,  $P = 1,3\text{ m}$ ) creusé entre le 22 décembre 2007 et le 5 juillet 2008. Le 18 octobre, une image Haute Résolution montre de la glace vive, quasiment sublimée le 14 janvier 2009. De la glace stable en profondeur (mais instable en surface) existe donc en ce site à moins de 1,3 m de profondeur par  $43^\circ$  lat. N.  
Comment quantifier cette glace de la sub-surface ?**

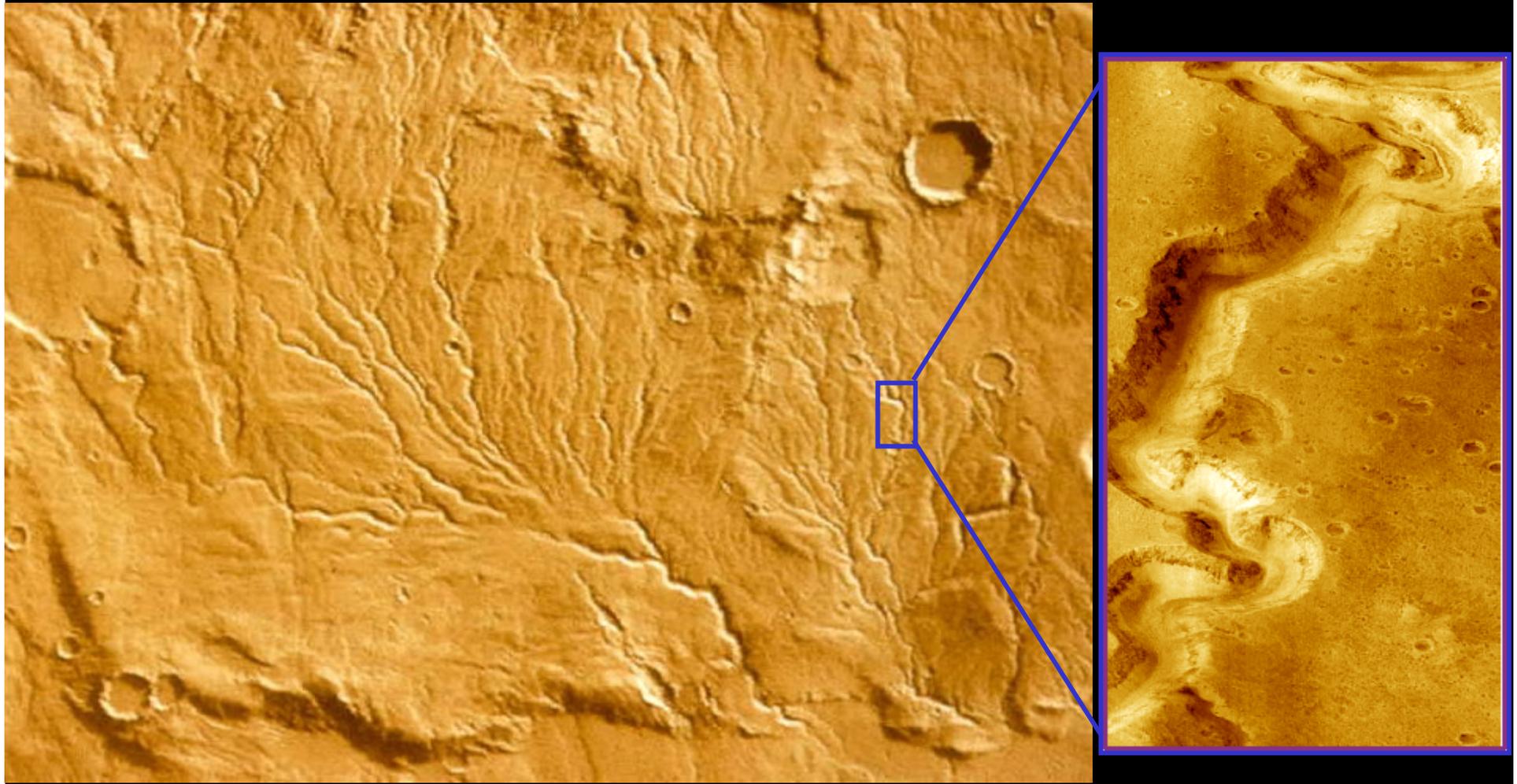
## Lower-Limit of Water Mass Fraction on Mars



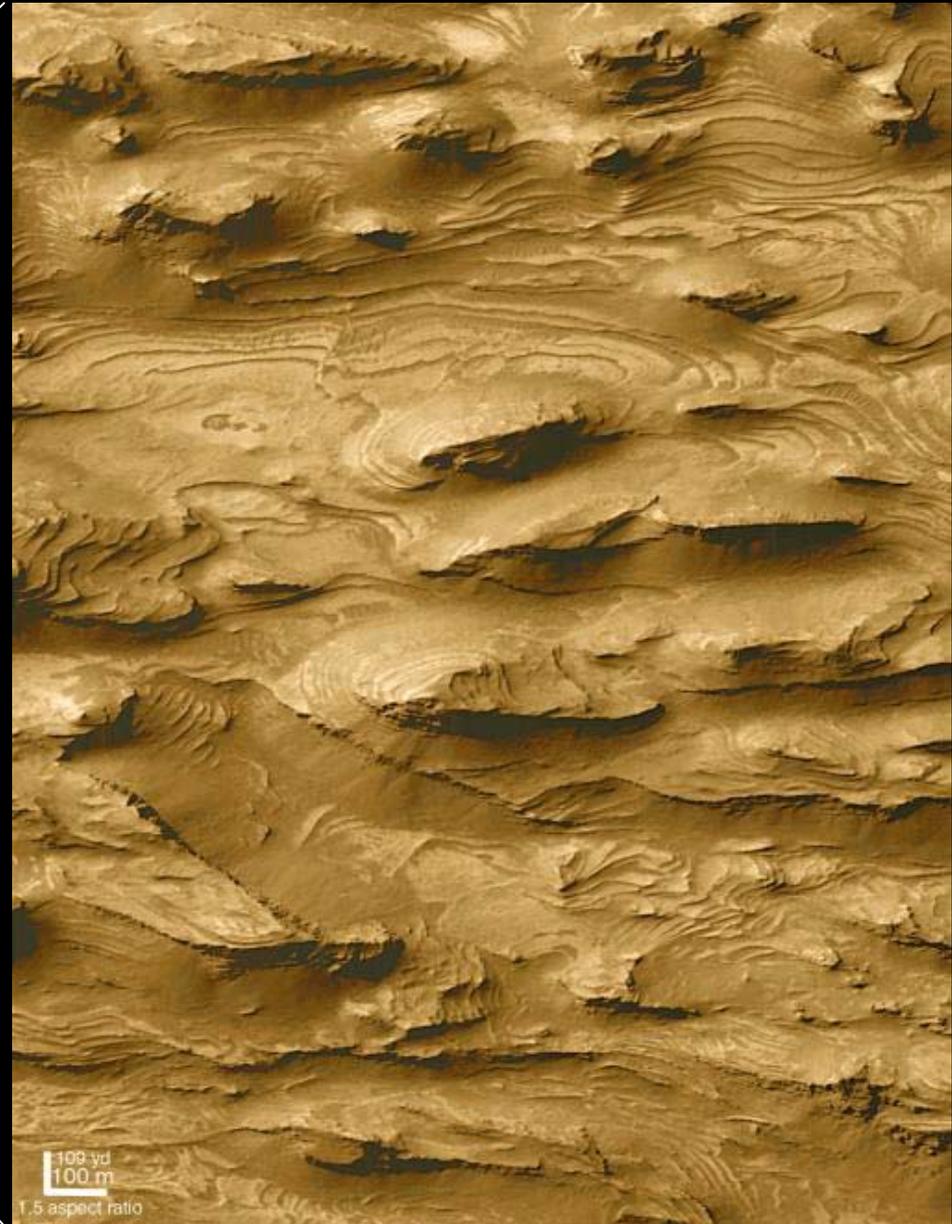
**Avec les neutrons émis par le sol sous l'action du rayonnement cosmique, on voit qu'il y a beaucoup d'H<sub>2</sub>O (de glace vu la température) dans le sous-sol superficiel, ou du moins beaucoup de Deutérium, et en particulier au-delà de 60° lat. N et S**



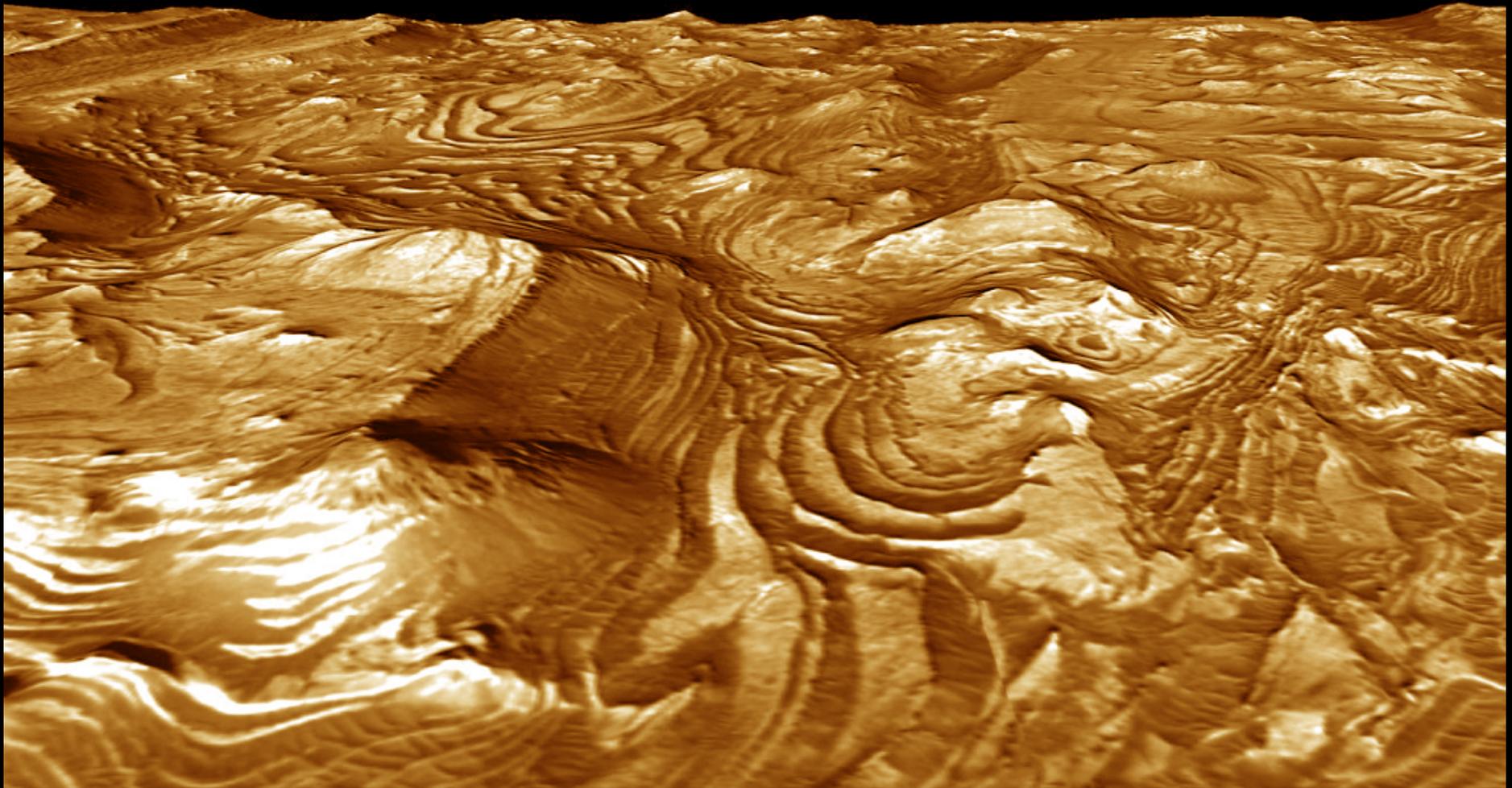
**Il y en a  
dans le  
sous-sol  
profond.  
Les  
cratères y  
font  
« sploch »**



**Elle a coulé à la surface dans un passé lointain  
(-3,8 / -3,5 milliards d'années), avec affluents,  
méandres...**



**Elle a déposé  
des couches et  
des strates  
sédimentaires**

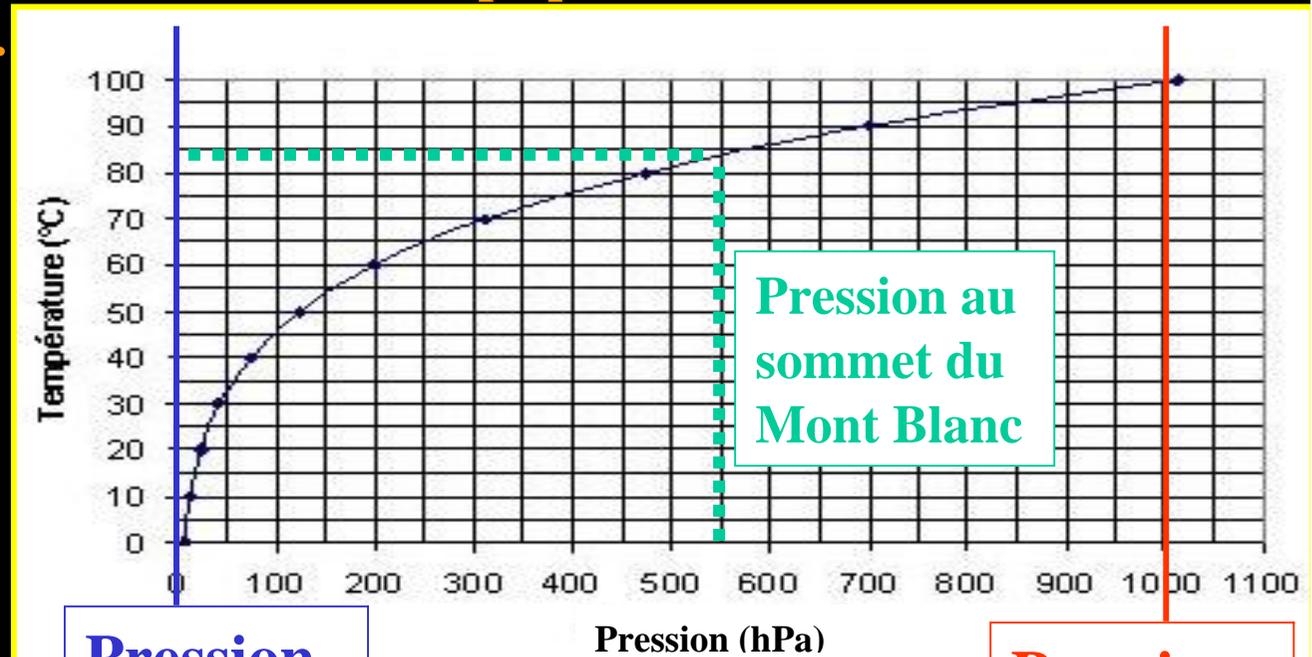
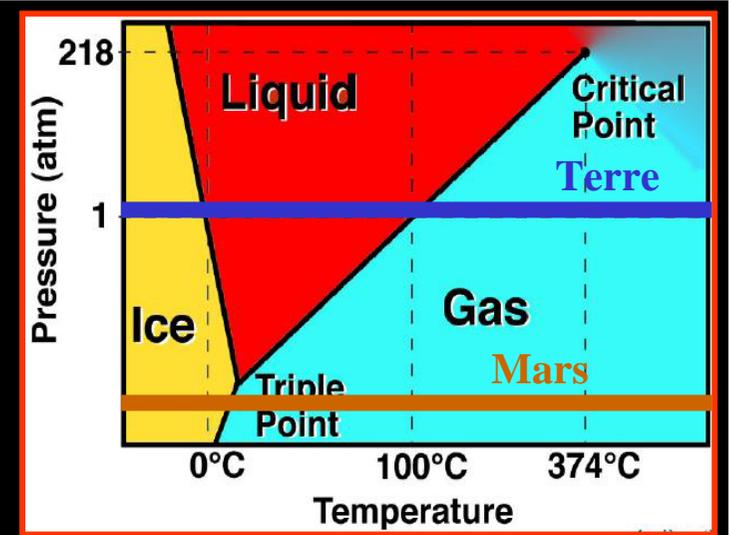


**Les mêmes en vue rasante, avec raies spectrales (IR) d'évaporites (sulfates) . Et on a trouvé dans les vieux terrains les raies spectrales (IR) des argiles, preuve d'une altération aqueuse.**

Sur Mars, la pression actuelle de de 6 hPa.  
 A cette pression, l'eau ne peut pas être liquide.  
 Elle est en glace et/ou en vapeur. Et comme il fait  
 en moyenne  $-50^{\circ}$ , elle est surtout en glace, avec une  
 très faible proportion de vapeur.

Que se passe t'il si on renverse sur Mars de l'eau  
 « tiède », issue d'une thermos pressurisée ? L'eau  
 boue et gèle à la fois !

Les traces d'H<sub>2</sub>O liquide doivent dater d'une époque où  
 P et T étaient plus élevées.



Pression  
sur Mars

Température  
d'ébullition de l'eau en  
fonction de la pression

Pression  
sur Terre

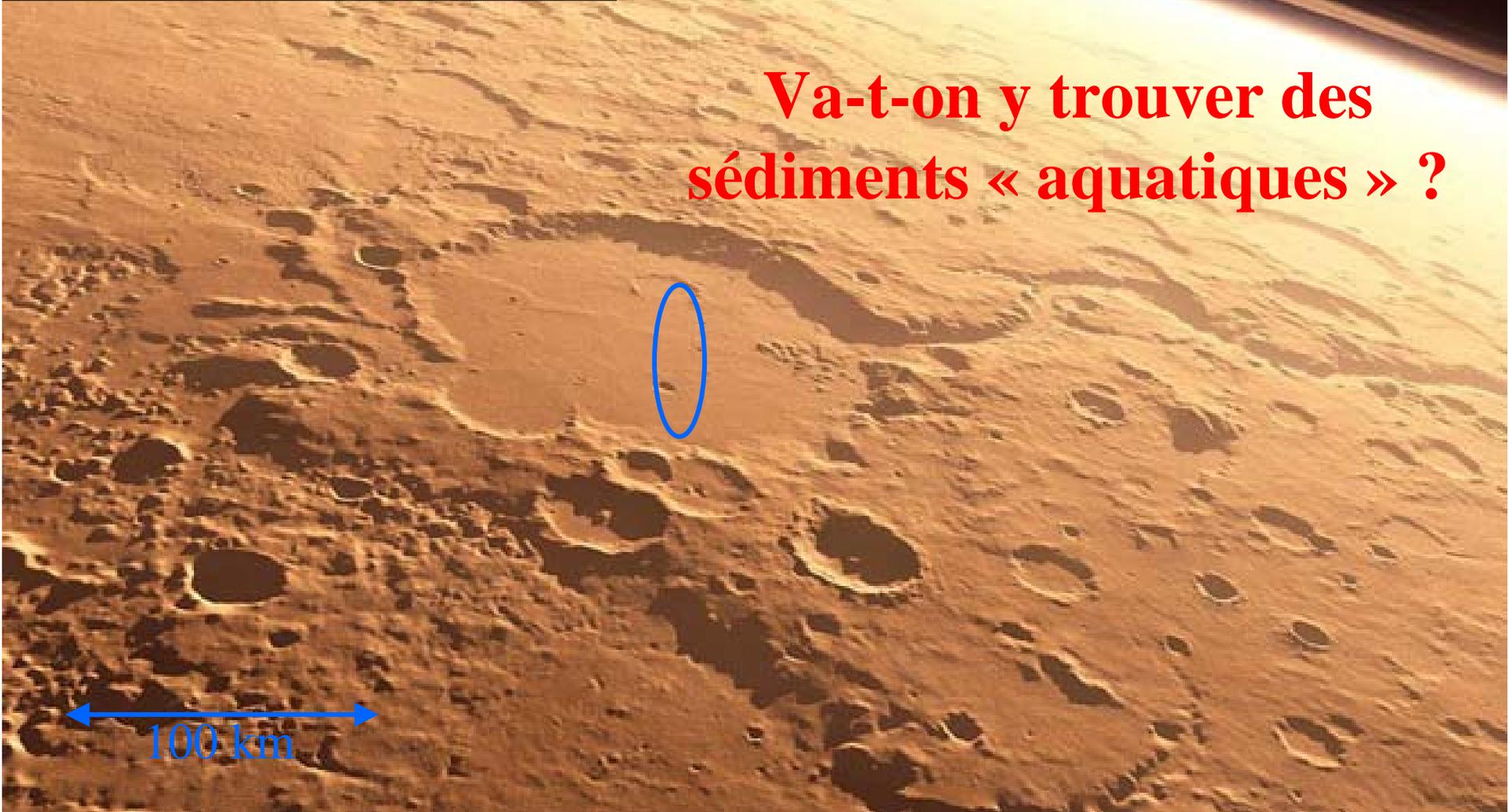


**Les résultats des 3 robots Nasa  
(ceux concernant l'eau)**

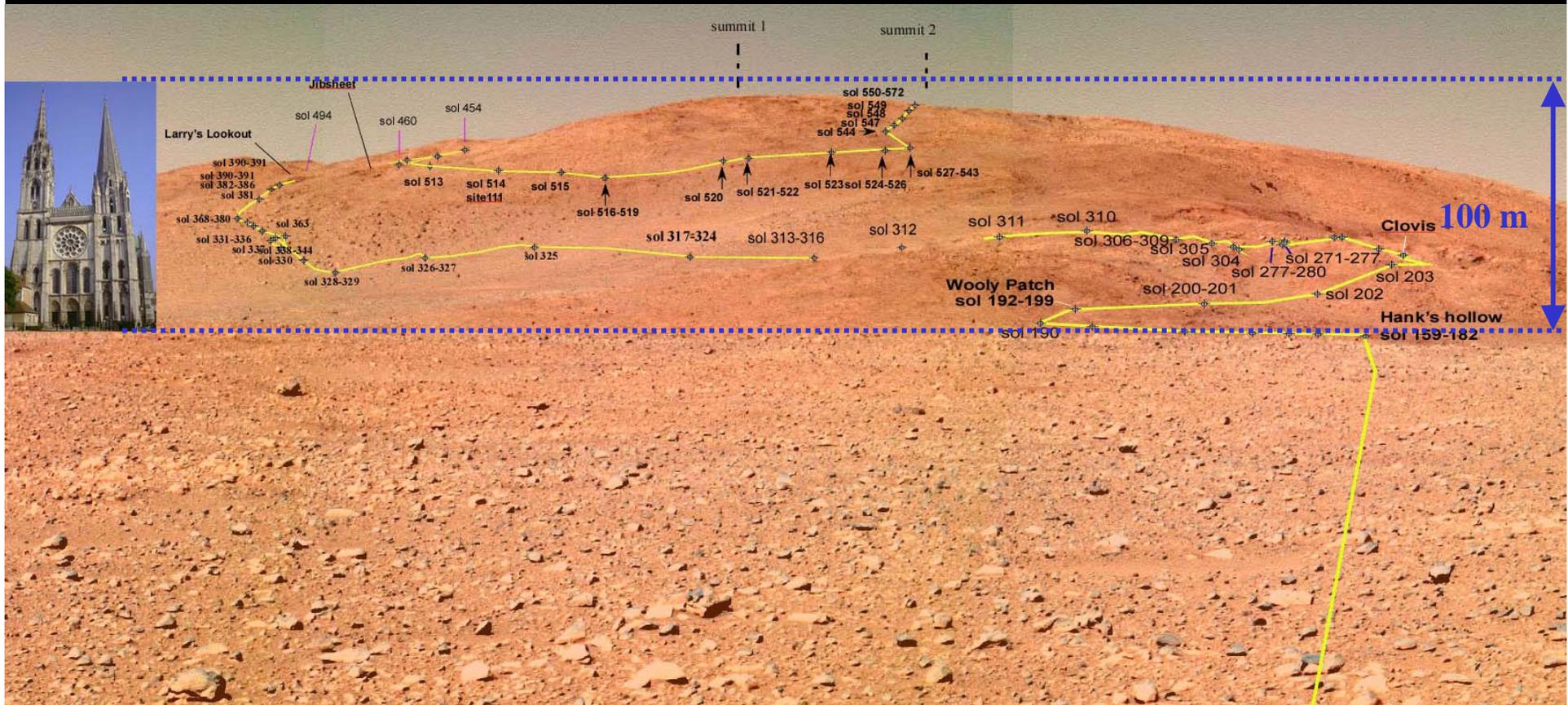


**Voilà où s'est posé le 1er robot mobile, Spirit, au fond du cratère Gusev, probable ancien lac.**

**Va-t-on y trouver des sédiments « aquatiques » ?**



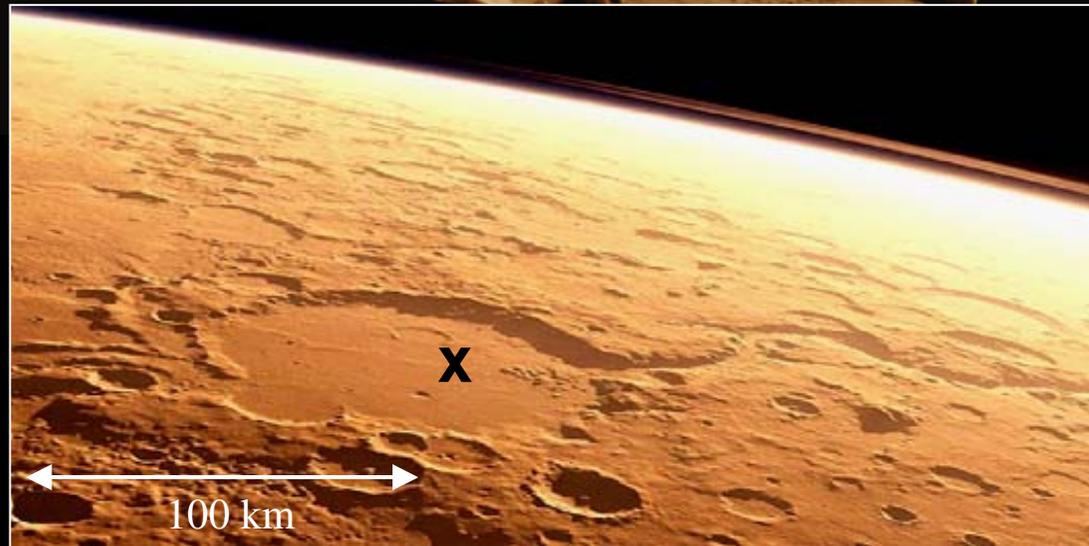
# En janvier 2004, Spirit s'est posé à 3 km de collines



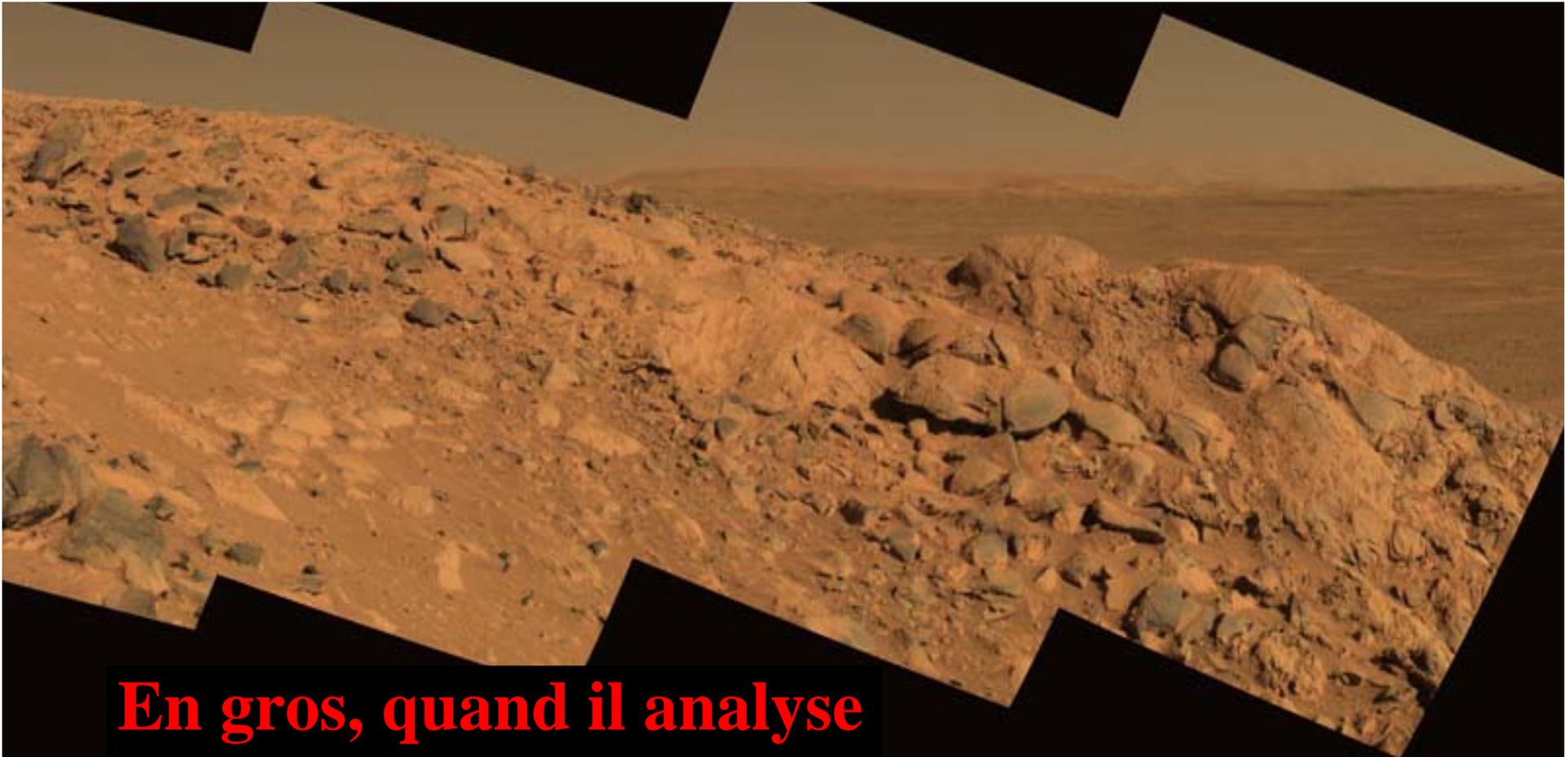
**Il analyse au voisinage du point d'atterrissage, va au pied des collines, y monte, redescend derrière et est maintenant de l'autre coté de ces collines, enlisé, après avoir parcouru au total plus de 10 km**



Sol 519

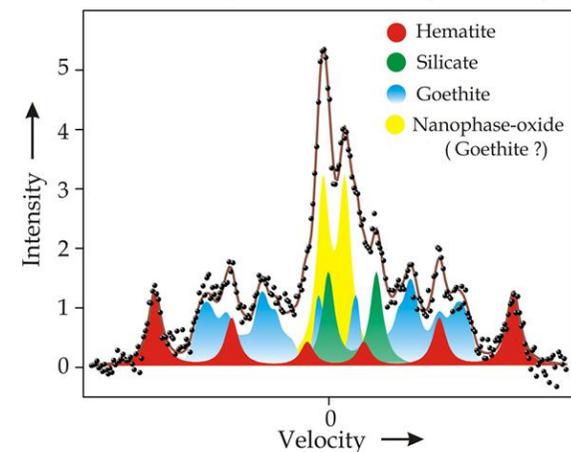


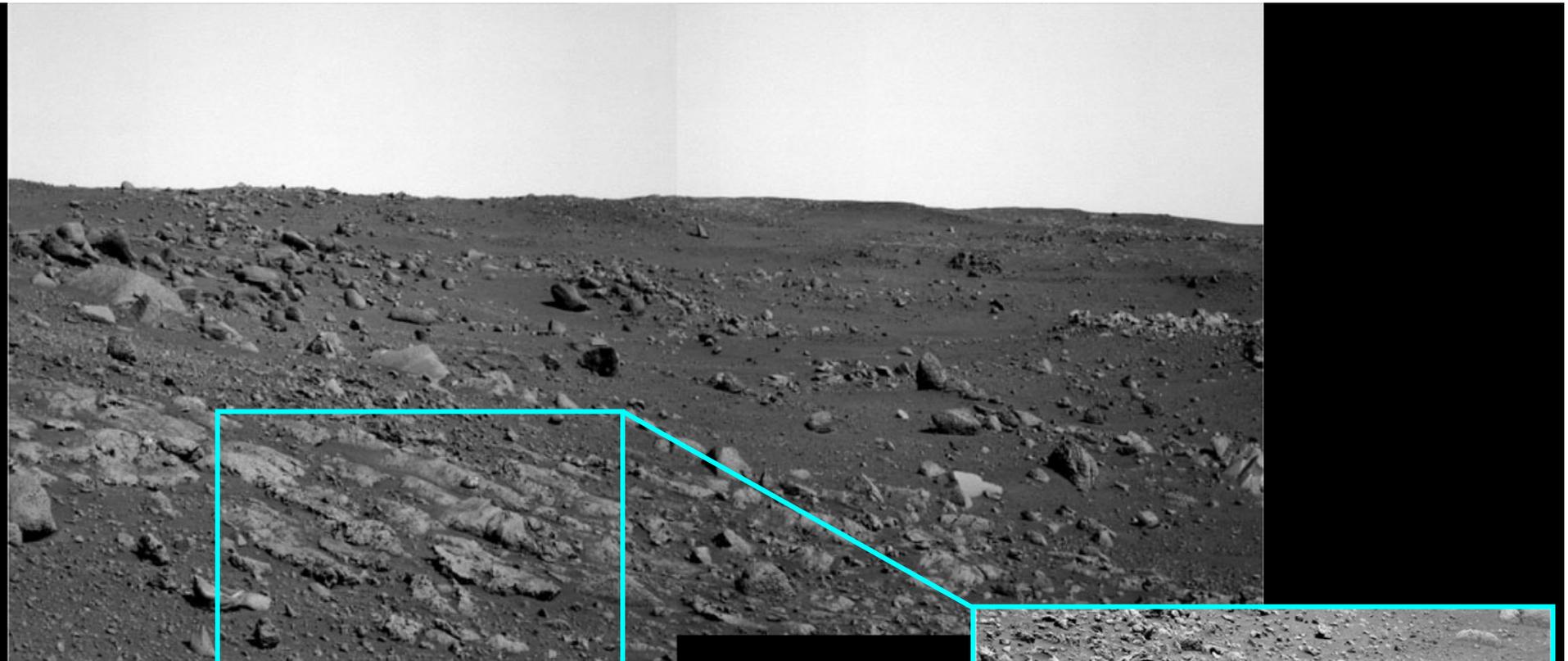
**Avant de parler d'eau,  
un paysage : quand il  
fait clair, on découvre  
les bords du cratère  
Gusev, à 50 km de là.**



**En gros, quand il analyse  
(plaine ou colline), il trouve du  
basalte. Quelle déception !  
Parfois, il y a des preuves que  
ce basalte a été altéré par de  
l'eau, maigre consolation.**

Mössbauer Spectrum of Clovis (200 - 220K)



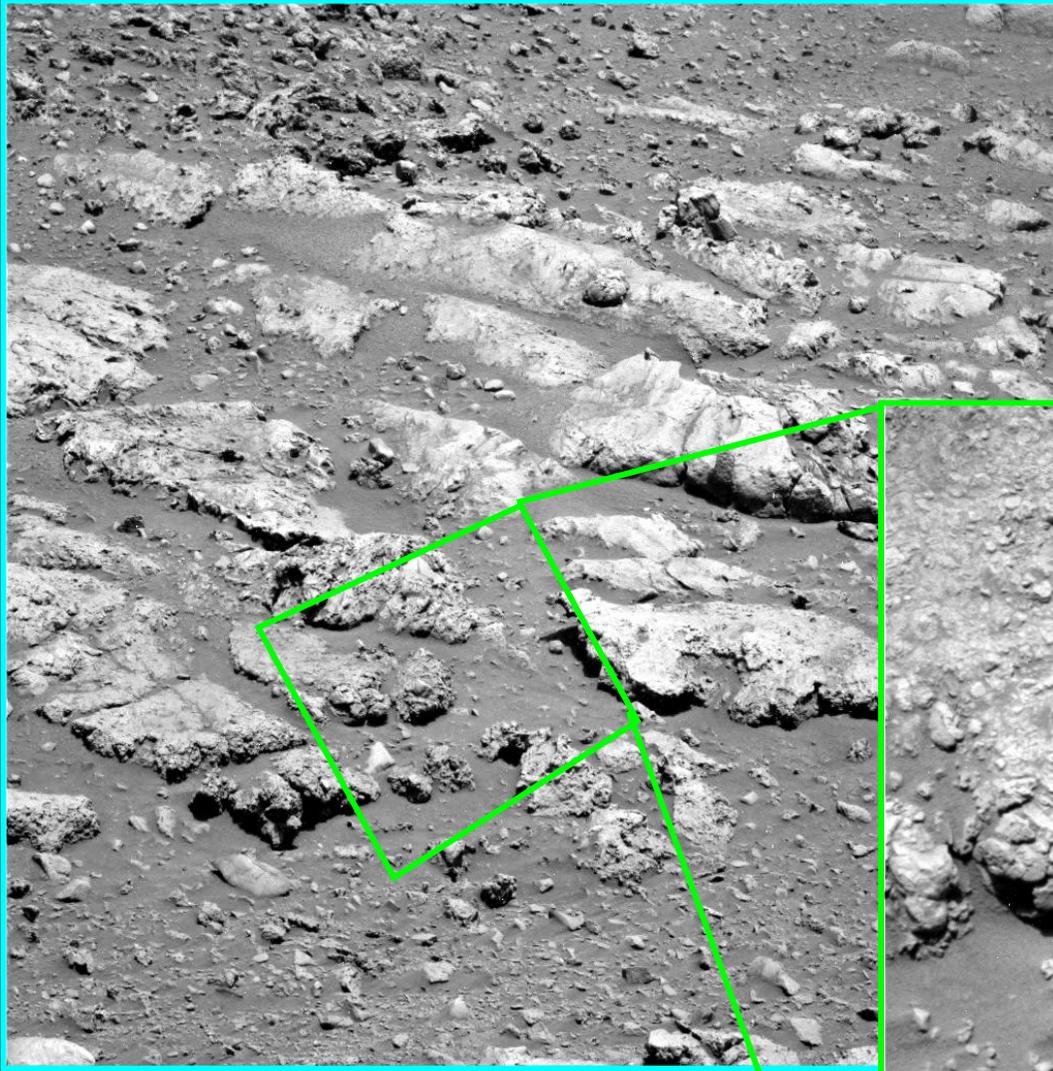


**Près du sommet, de  
nouveaux affleurements**

**Détaillons cet  
affleurement vaguement  
stratifié**

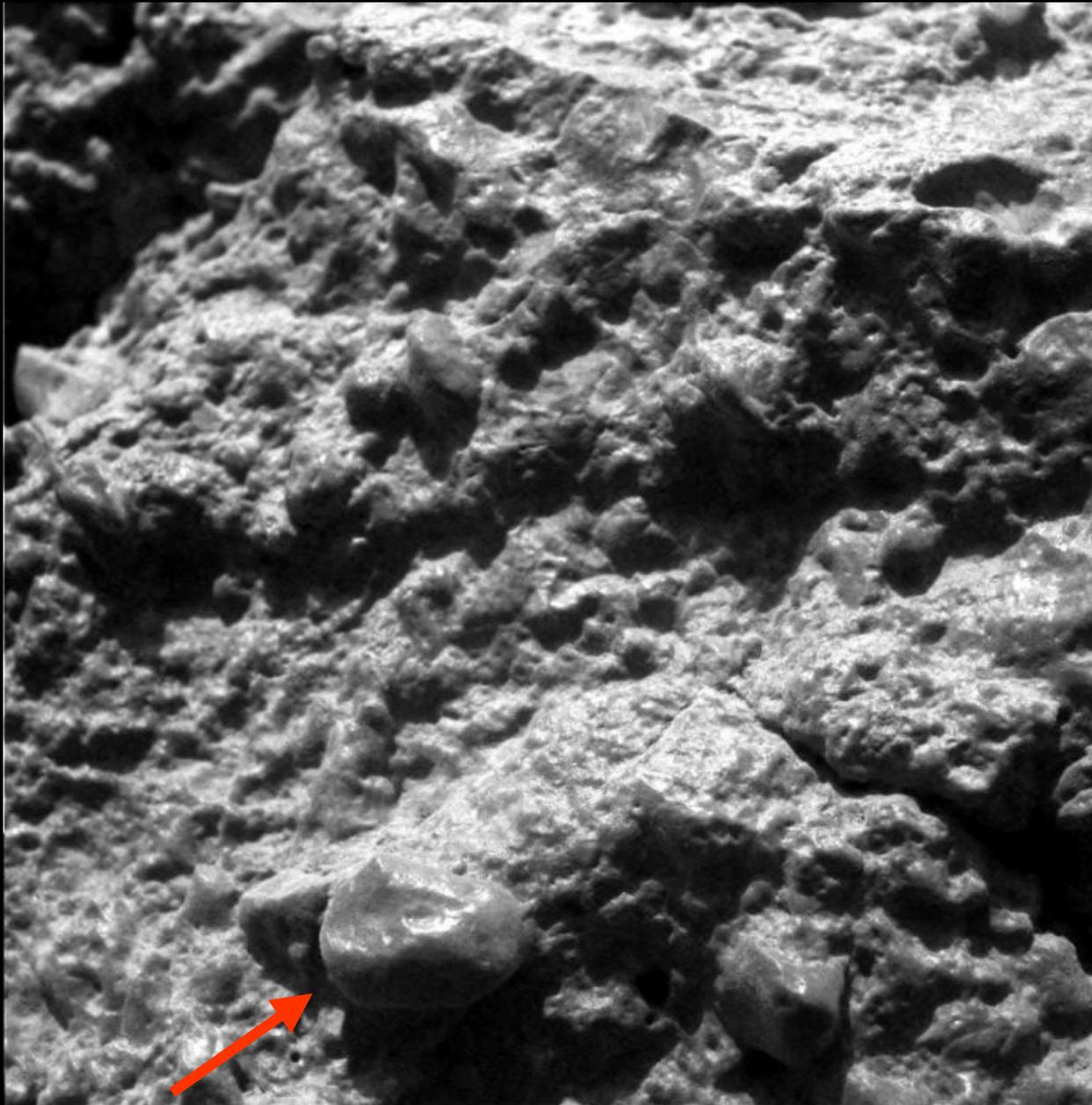


**Approchons nous !  
Les strates sont  
faites de brèches !**



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



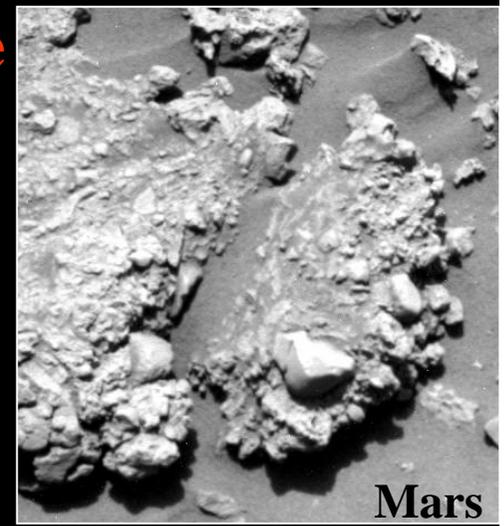


**Certains  
« galets » de  
la brèche  
sont  
arrondis. Ils  
ont été  
« roulés » par  
de l'eau ou  
dans du  
matériel  
« boueux »**

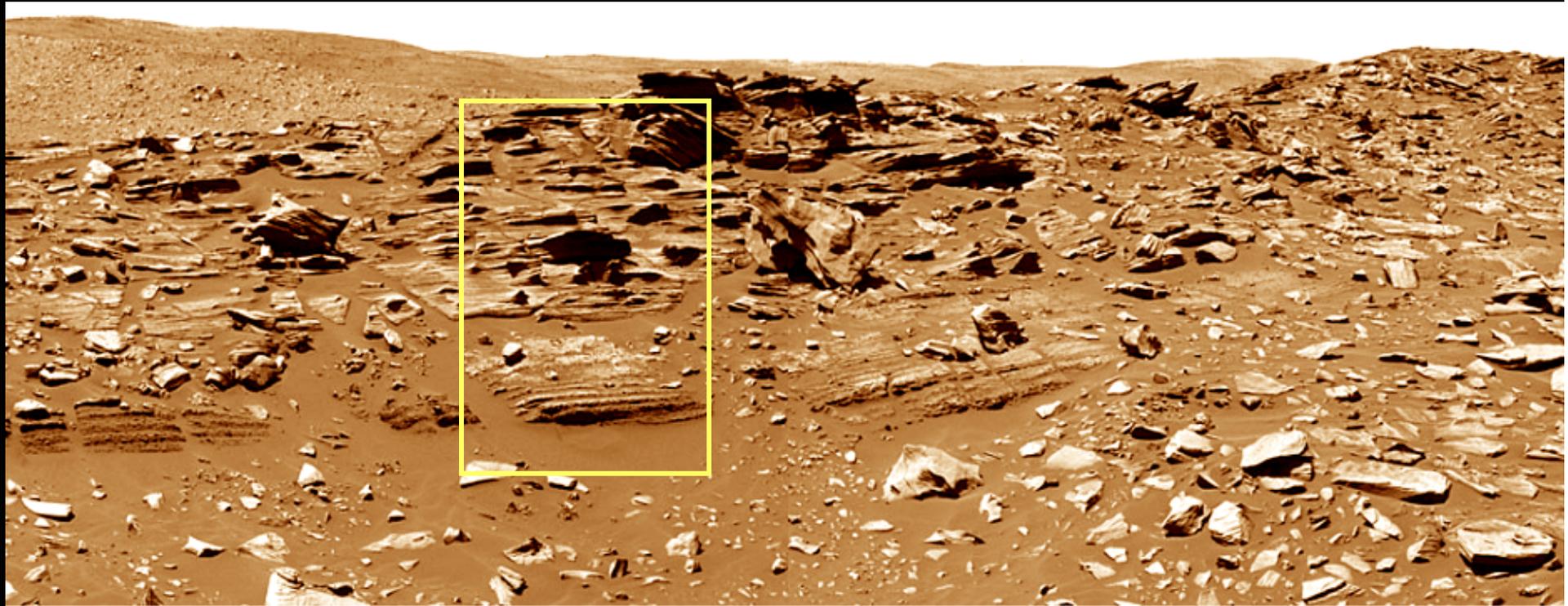


Terre

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



Mars



**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 ?**

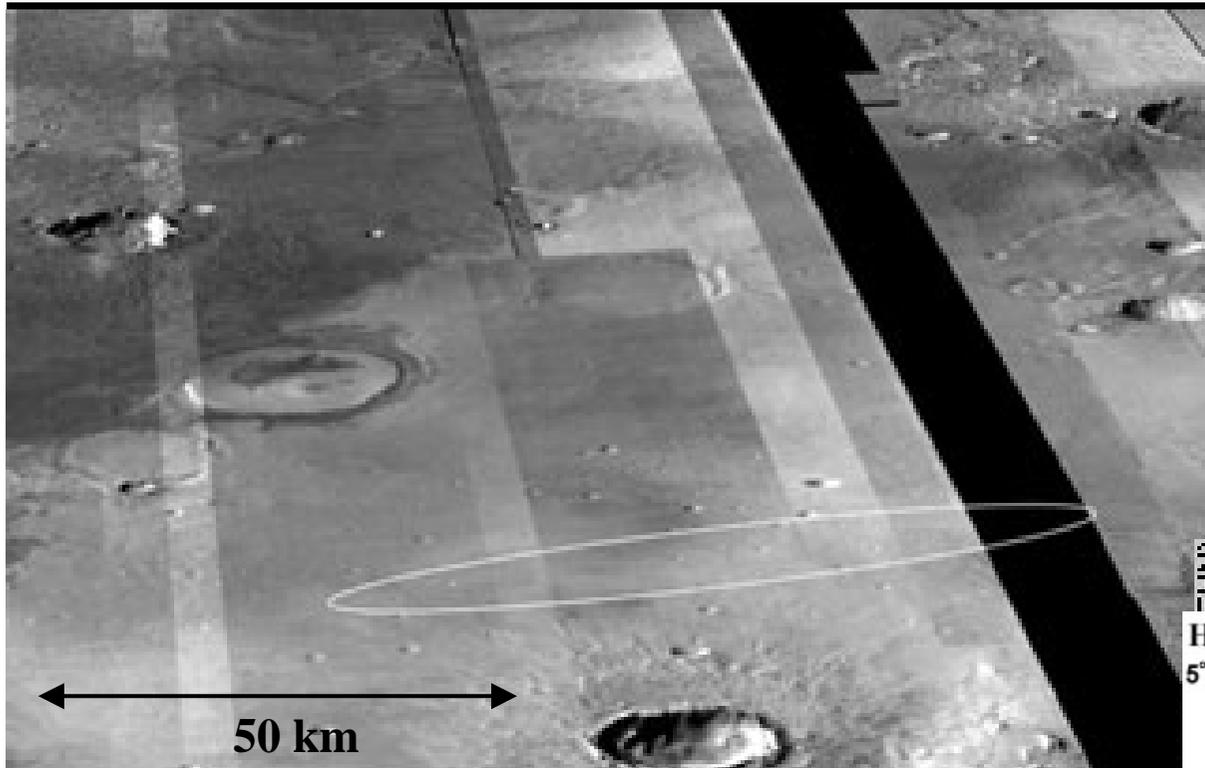


**A des figures de chocs dues à la chute d'objets pesants, éjectés par des éruptions explosives**

**Et qui dit volcanisme explosif dit gaz, donc très probablement vapeur d'H<sub>2</sub>O.**

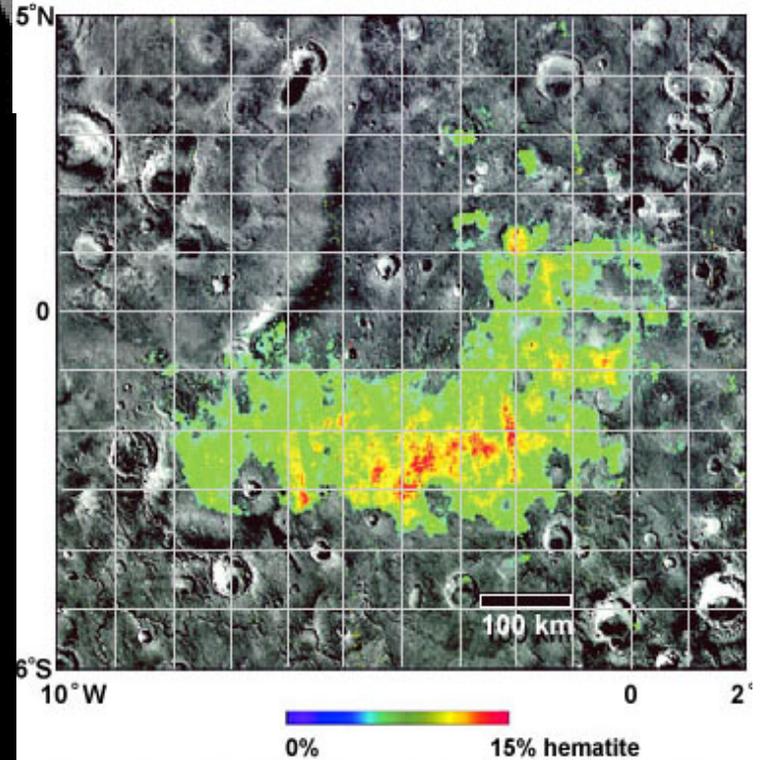
**Ce 1er robot, Spirit, est maintenant « mort » depuis 2 ans.**

# Opportunity

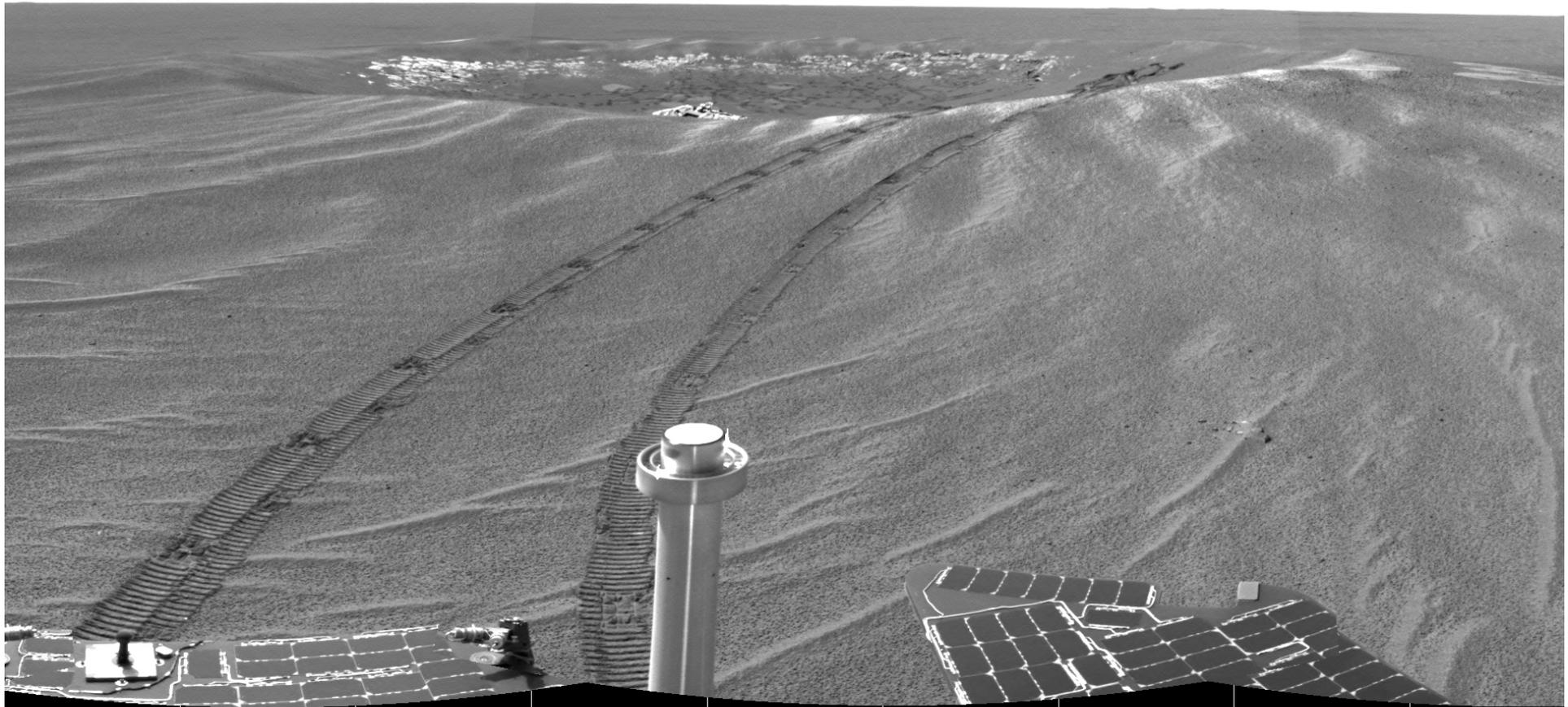


Opportunity, le 2eme robot mobile, s'est posé dans une plaine, Meridiani Planum, que des études orbitales montraient très riche en hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  = « rouille »), minéral suggérant la présence d'eau liquide passée.

HEMATITE DISTRIBUTION MAP FROM TES DATA



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



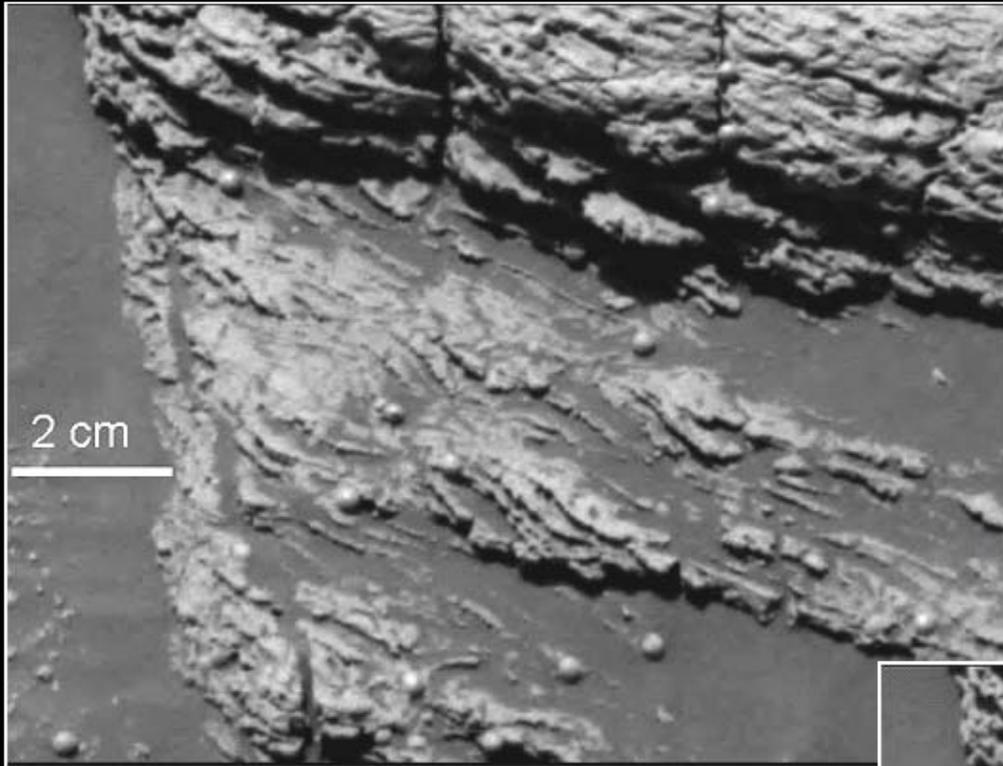
**La plaine « Méridiani », le petit cratère Eagle (d = 20m, profondeur de 2 m) dans lequel s'est posé Opportunity, et les traces qu'il a fait pour en sortir au bout de 2 mois.**



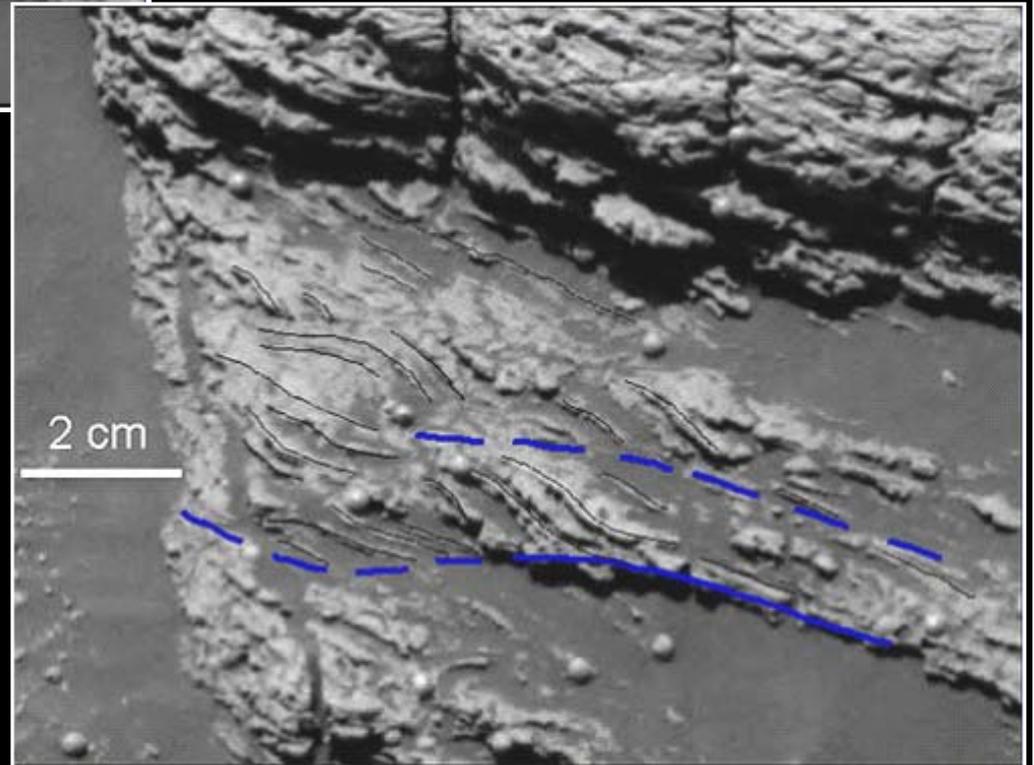
↑ «Falaise»  
de 75 cm  
↓ de haut

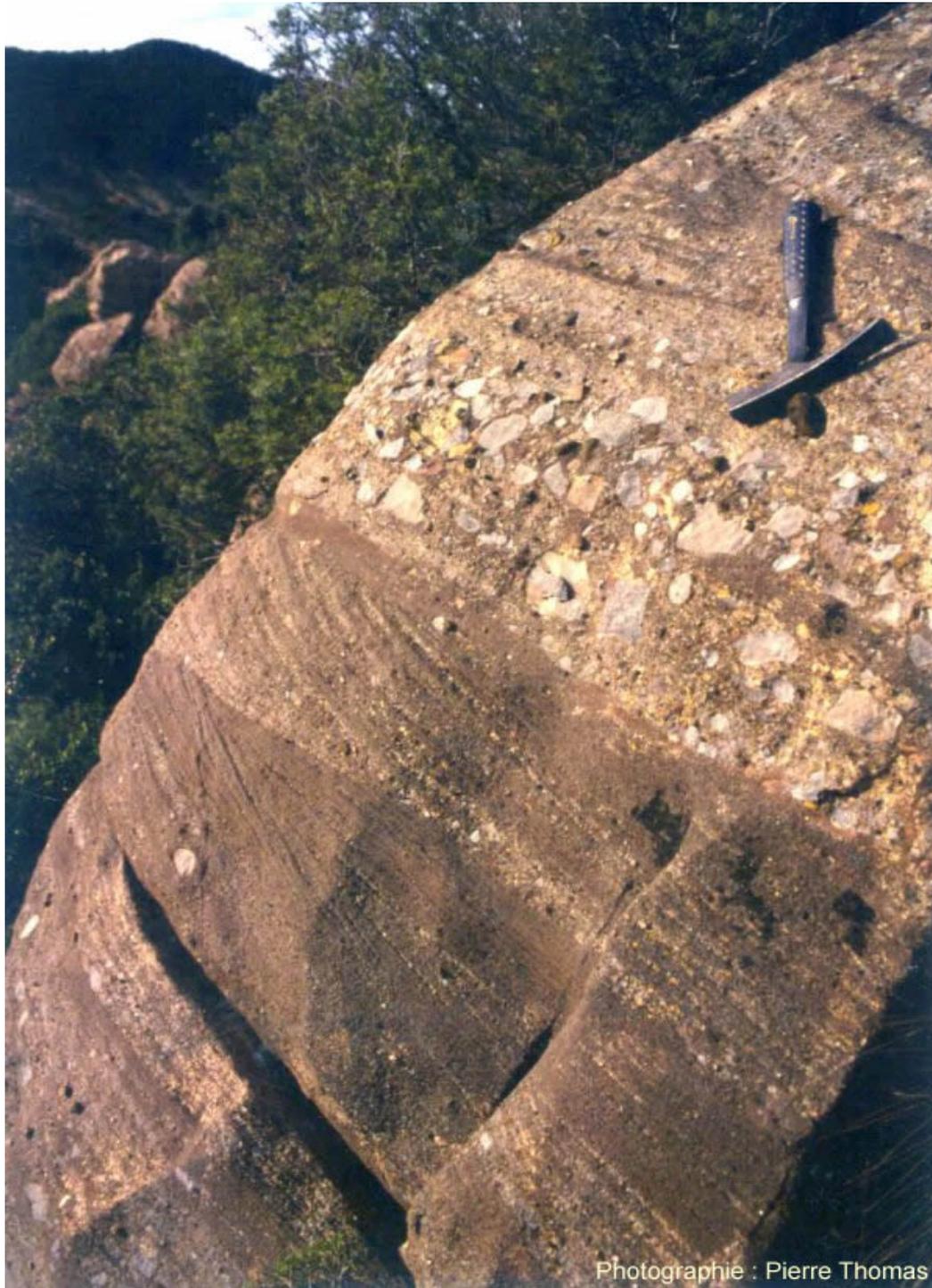
**Dans ce cratère Eagle, pour la 1ere fois, on voit des affleurements (on n'avait pas encore trouvé ceux des Columbia Hills). Et pas n'importe quel affleurement : des strates ! Le jackpot !! Mais des strates de quoi ? Des laves, des cendres volcaniques, des sédiments ? Et si ce sont des sédiments, sont-ils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

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



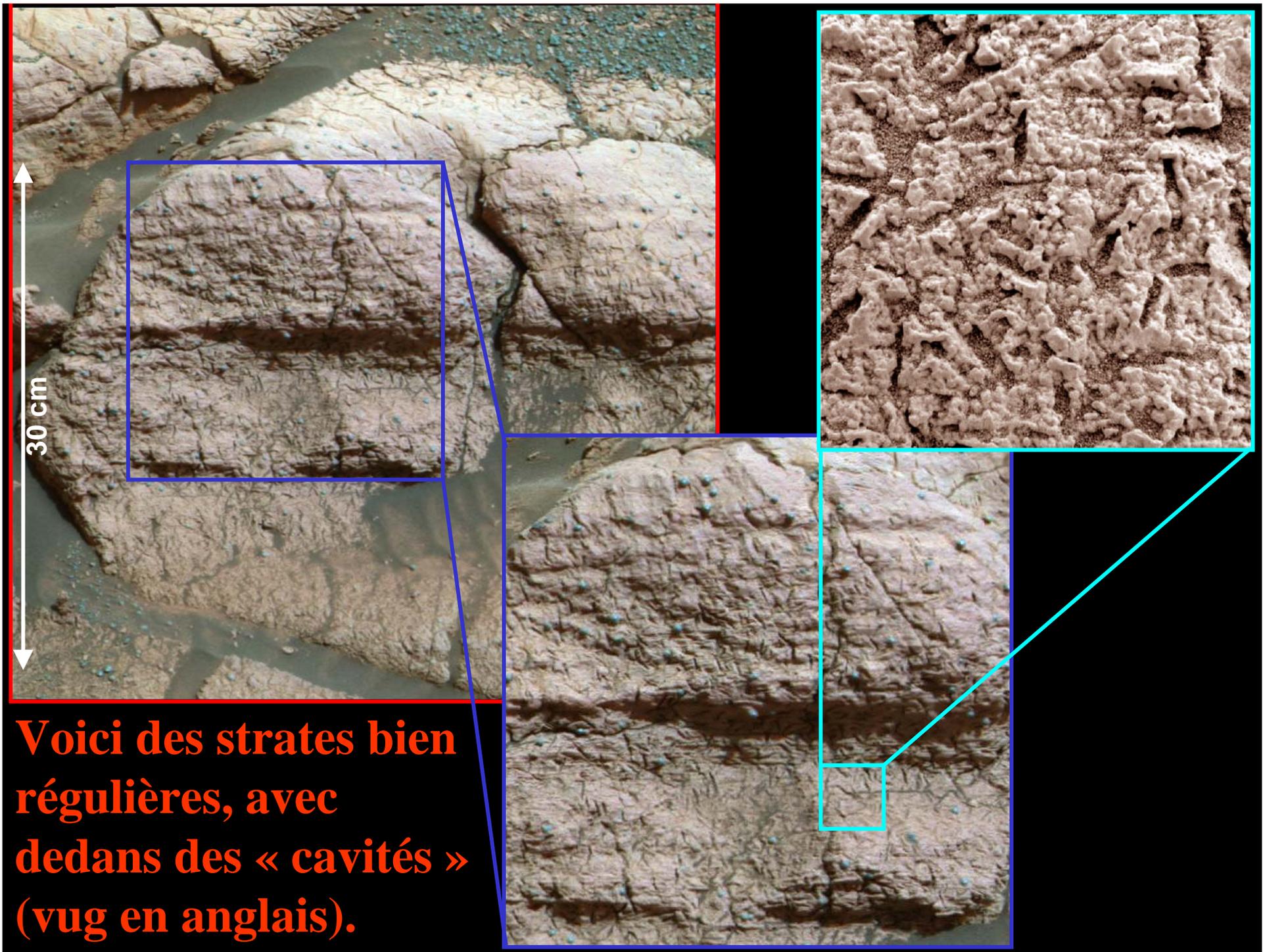
**Et des sédimentologues patentés nous affirment que se sont des stratifications faites sous un courant d'eau**

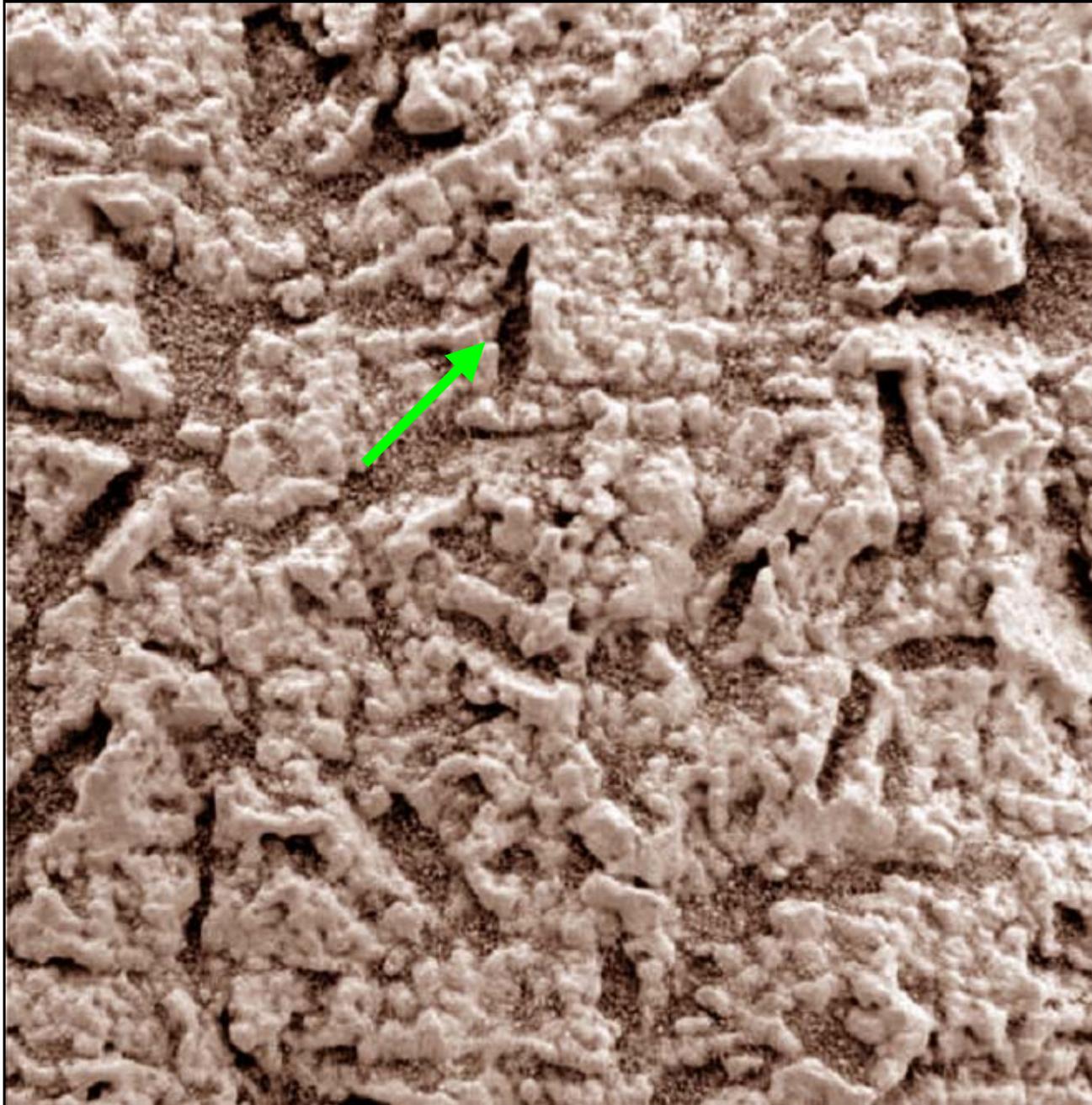




Photographie : Pierre Thomas

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



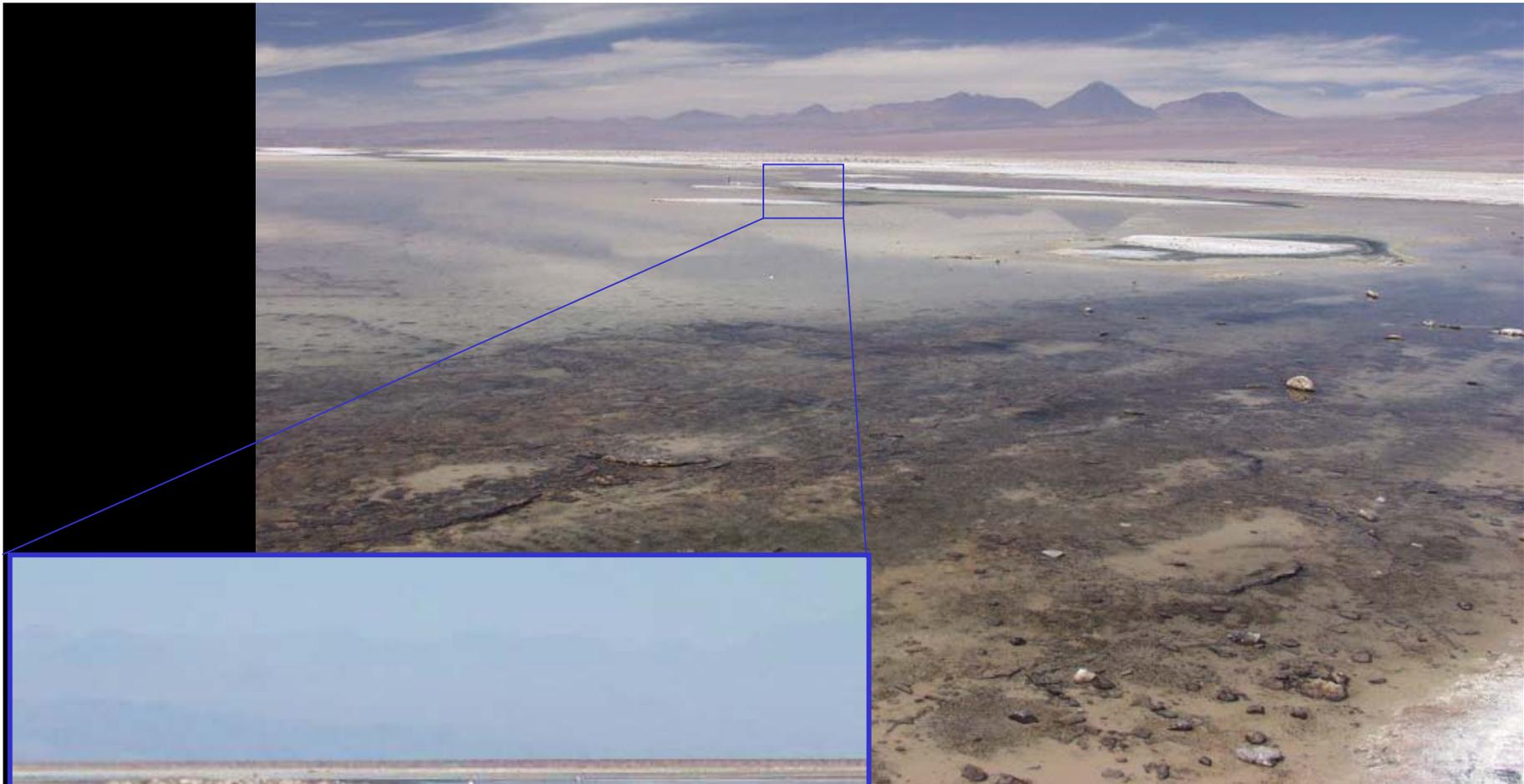


**Les « vugs » ?  
Parfois ils ont  
des formes  
«géométriques»  
rappelant  
furieusement la  
forme des  
cristaux de  
gypse (roche se  
formant par  
évaporation  
d'une mer ou  
d'un lac salé)**

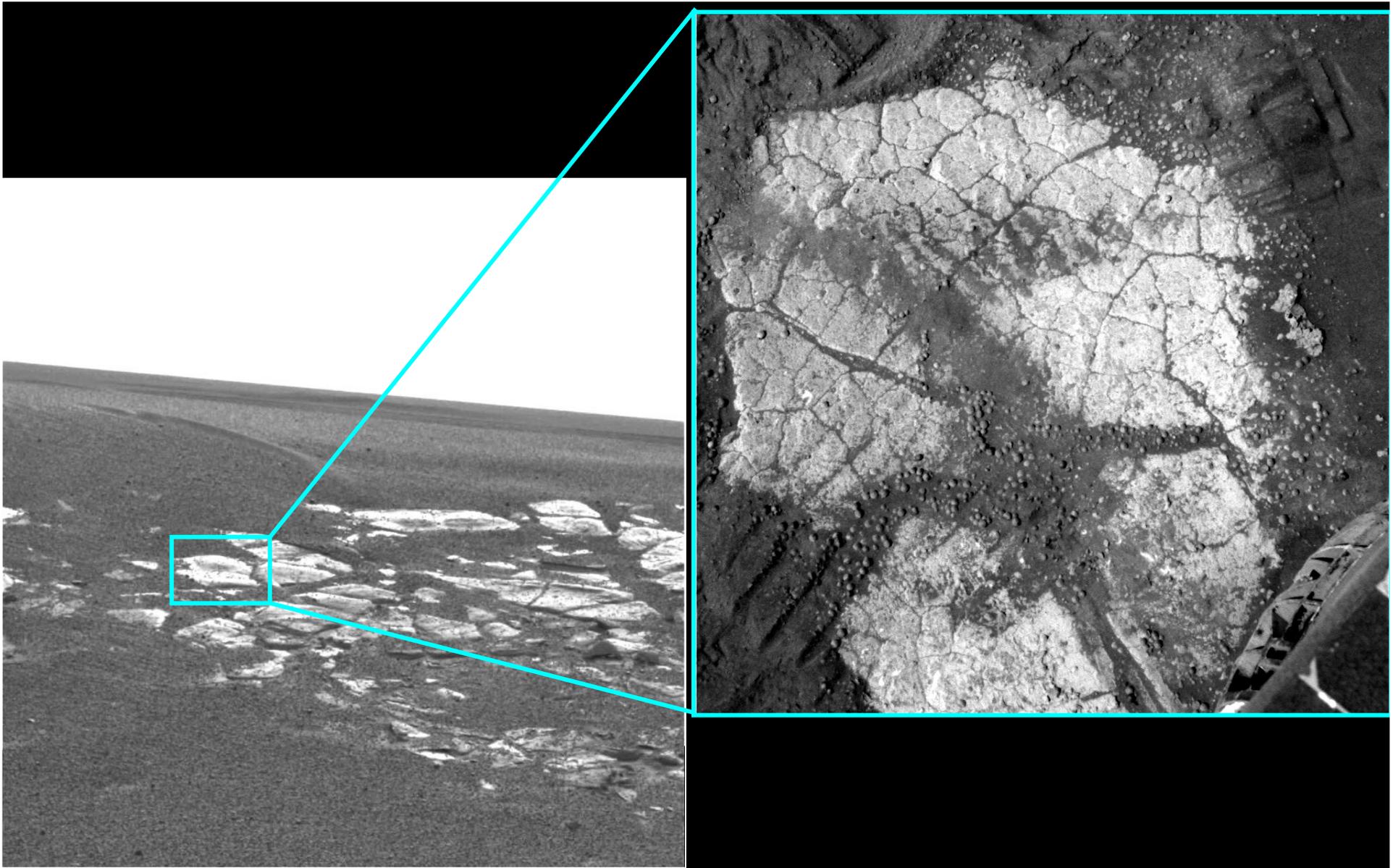
**Les « vugs » ressemblent à des pseudomorphoses de gypse et autres sels**



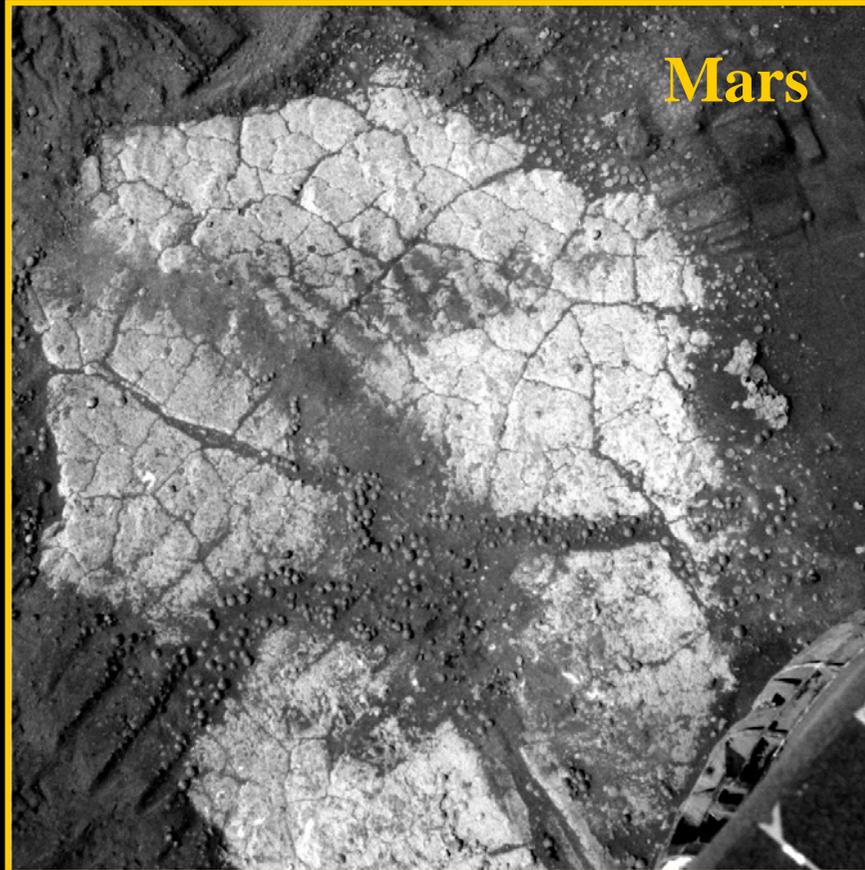
*(ressemblance indiquée sur Planet-Terre la veille de la publication des analyses)*



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

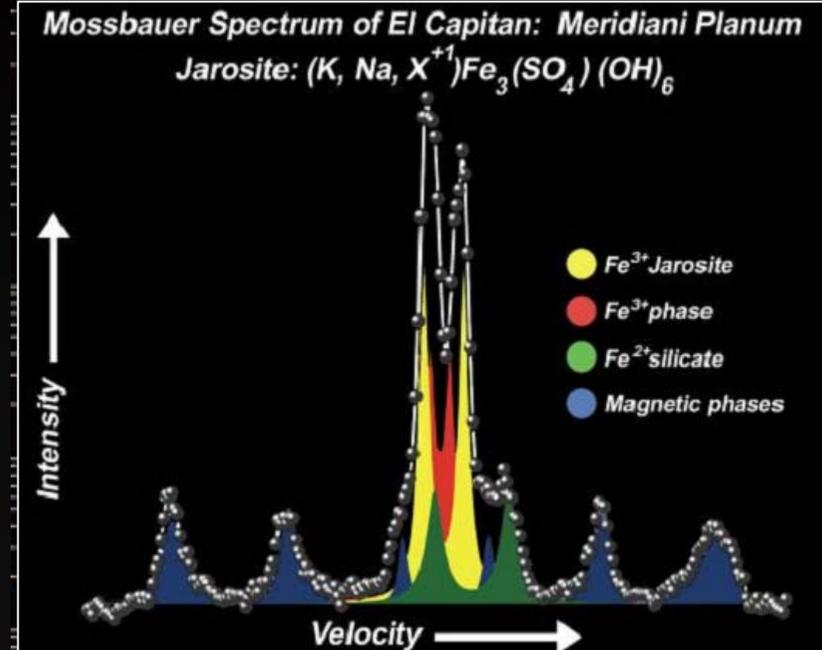
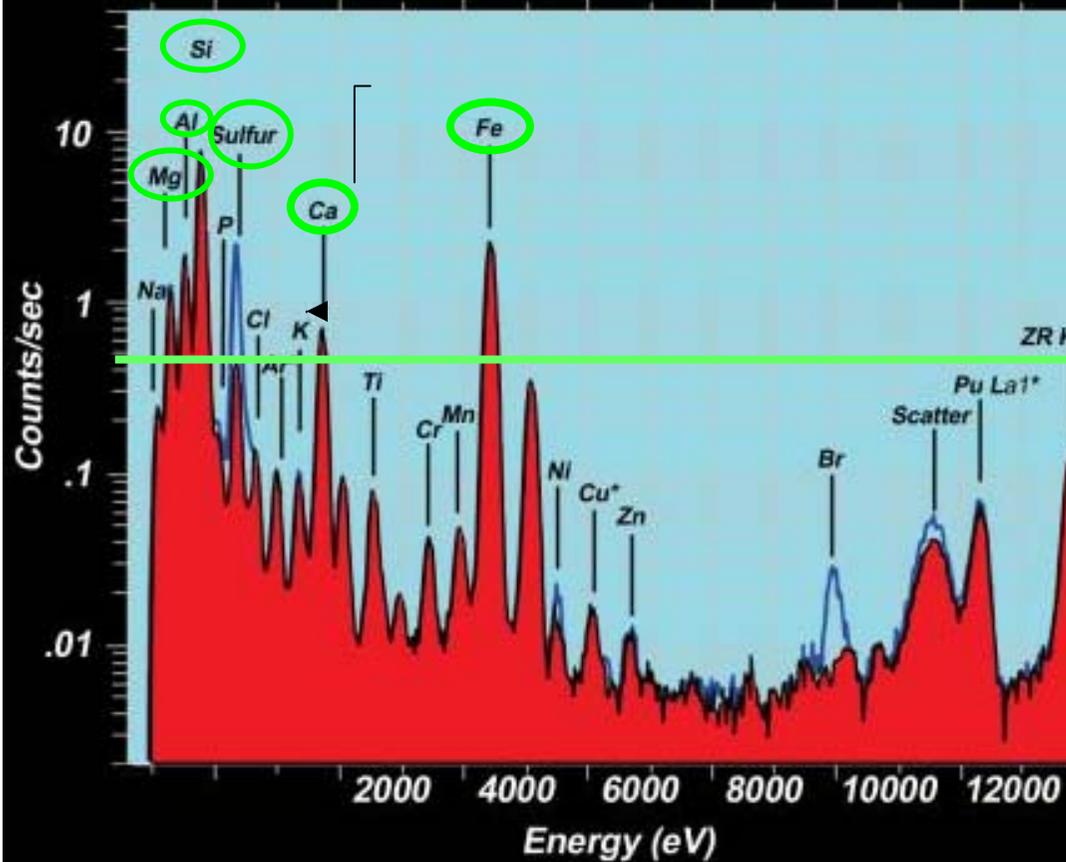


**Allons voir maintenant là où l'on voit les couches  
« par dessus » !**



**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

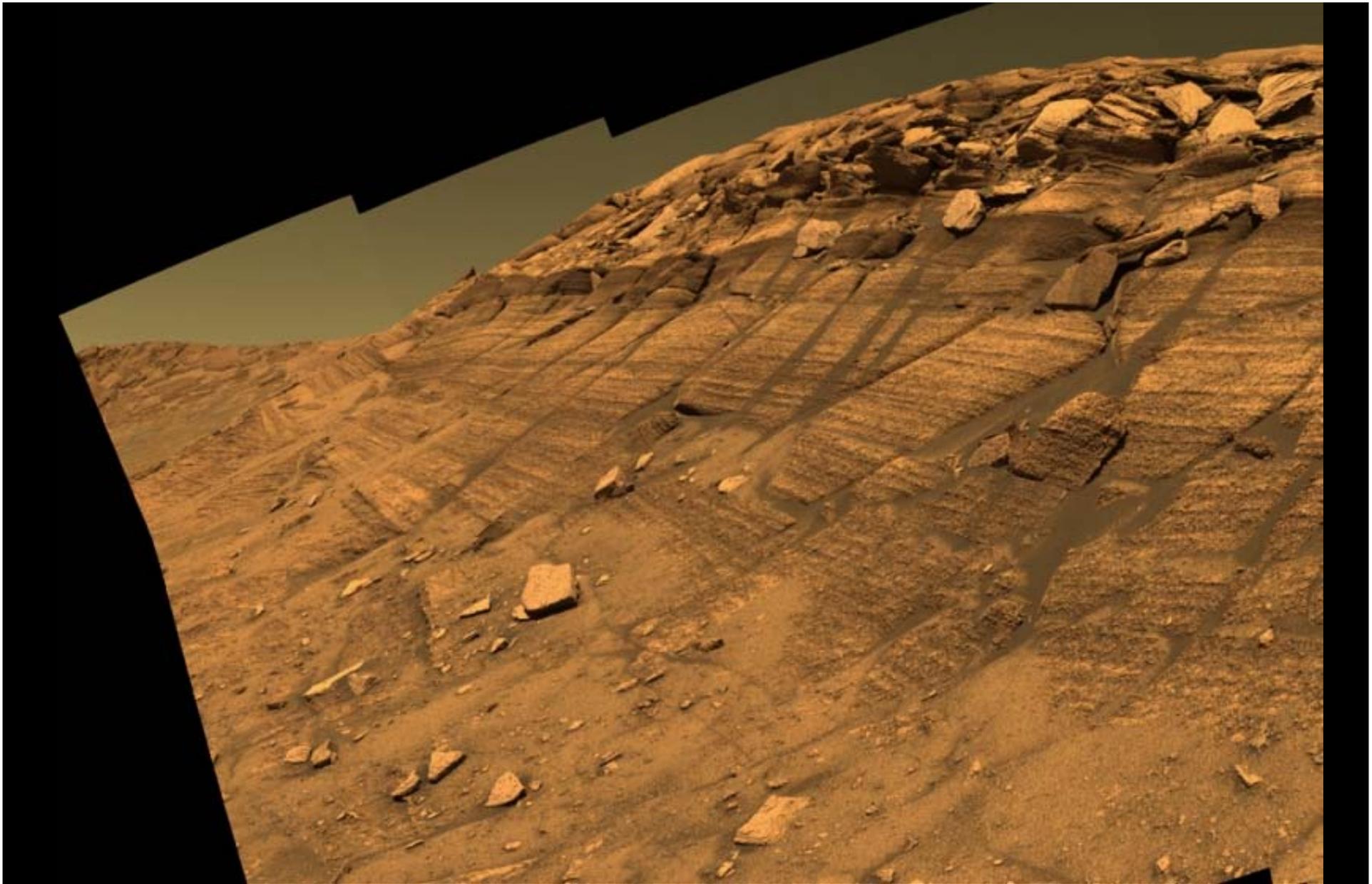


**Analyse chimique globale : des alumino-silicates hydratés (chimie d'argile) riches en Fe, Mg, Ca et S. Analyse minéralogique : la roche « globale » contient de l'hématite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ± hydraté), un sulfate potasso-ferrique hydraté ...**

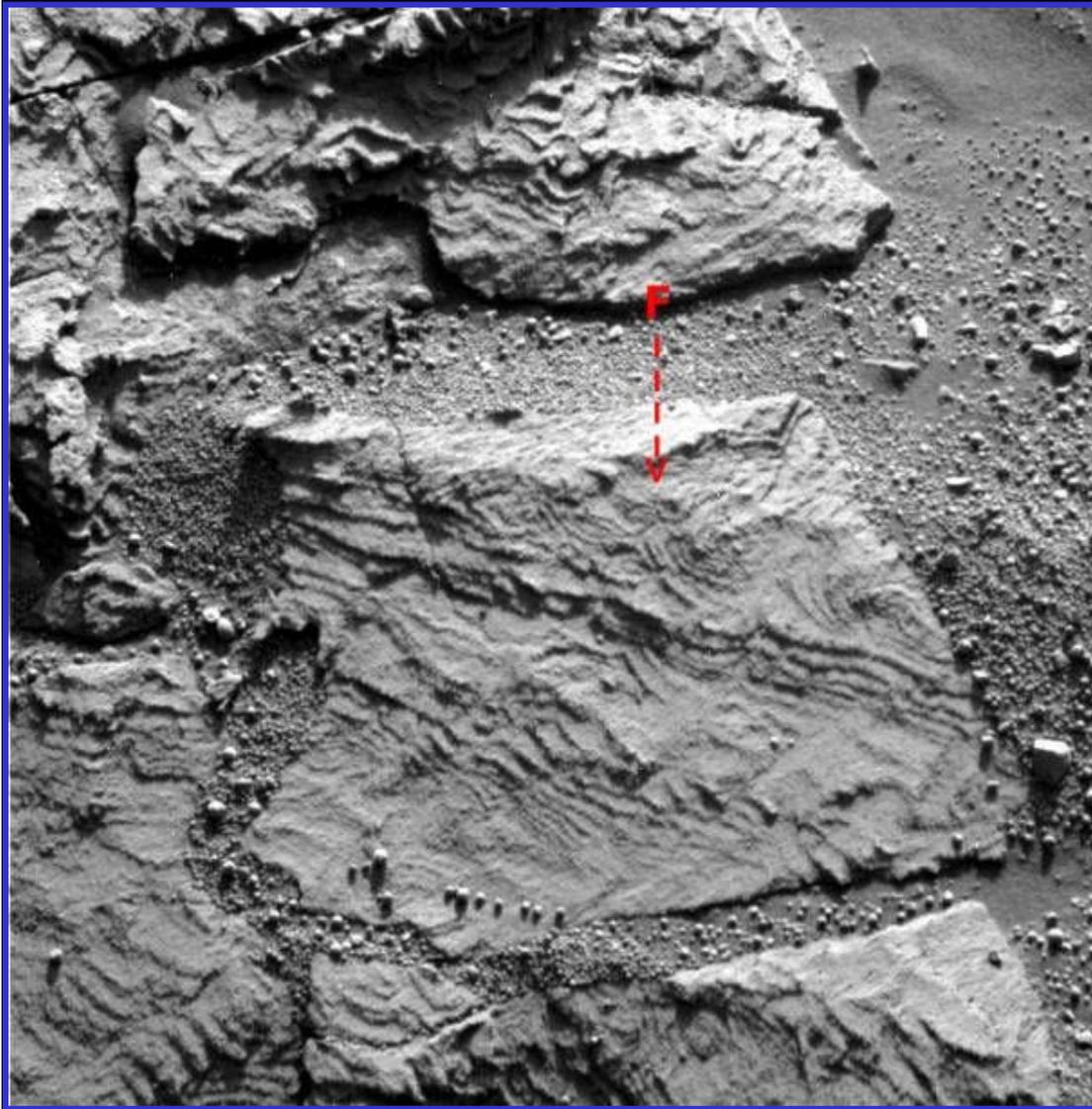


**Après avoir quitté le cratère, Opportunity roule dans une plaine où les fentes de retrait (dessiccation ?) semblent être la règle.**





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



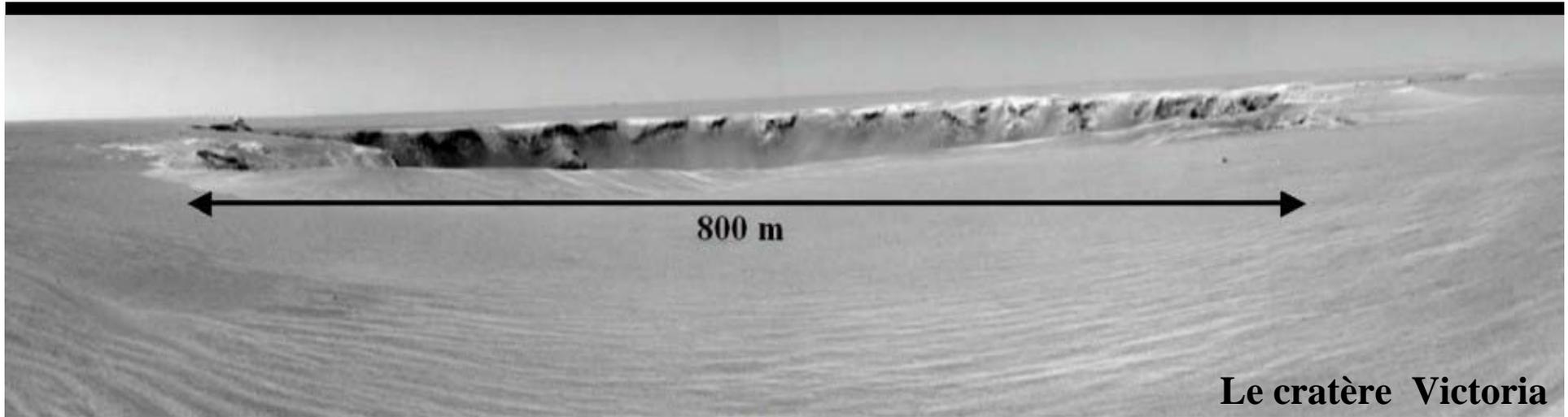
**Dans ce secteur, vues en section, les strates sont parfois « festonnées ». Sur Terre, on connaît de telles states festonnées**



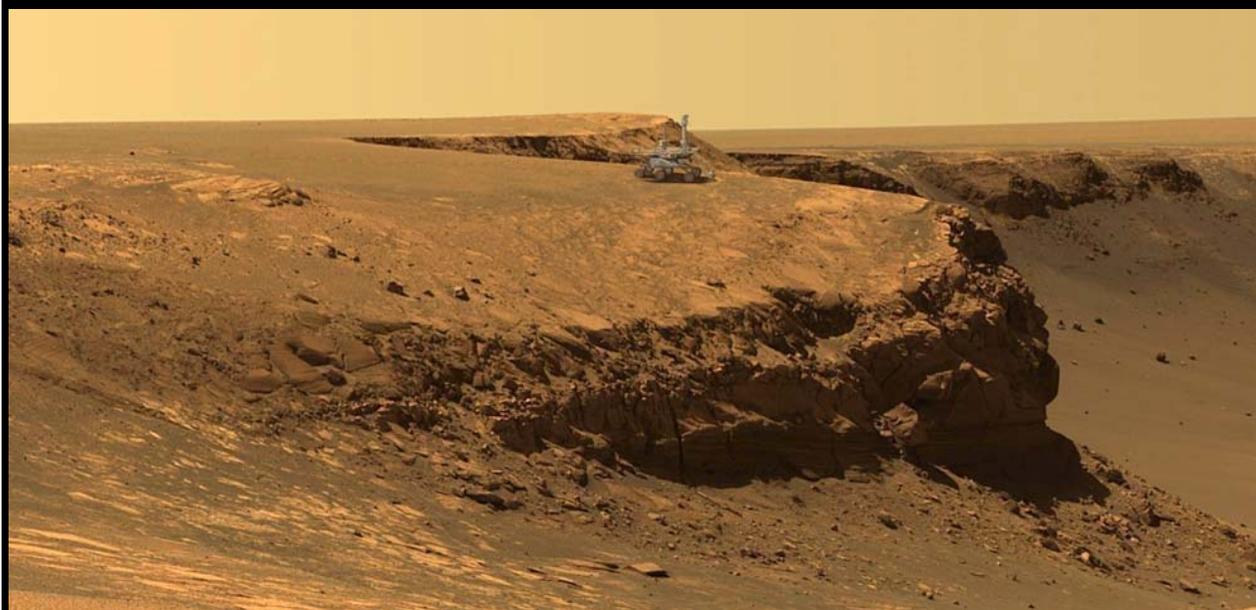


**Sur Terre, de tels festons, symétriques, indiquent que la boue s'est déposée dans de l'eau clapotante, sous une profondeur d'eau de quelques cm.**



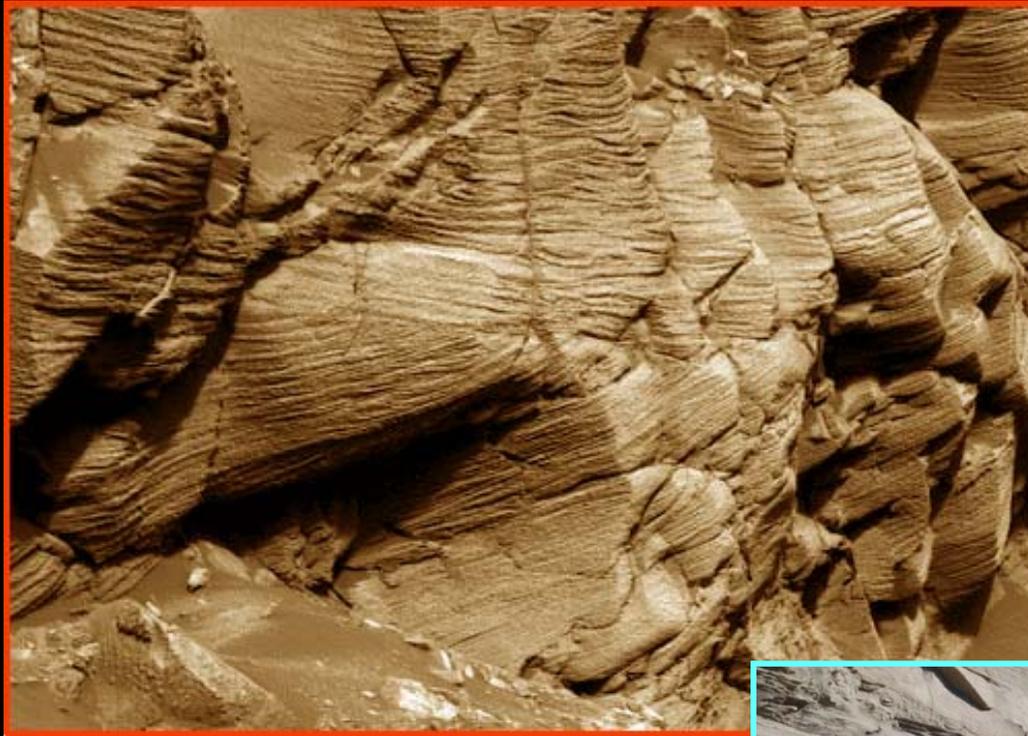


Le cratère Victoria



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

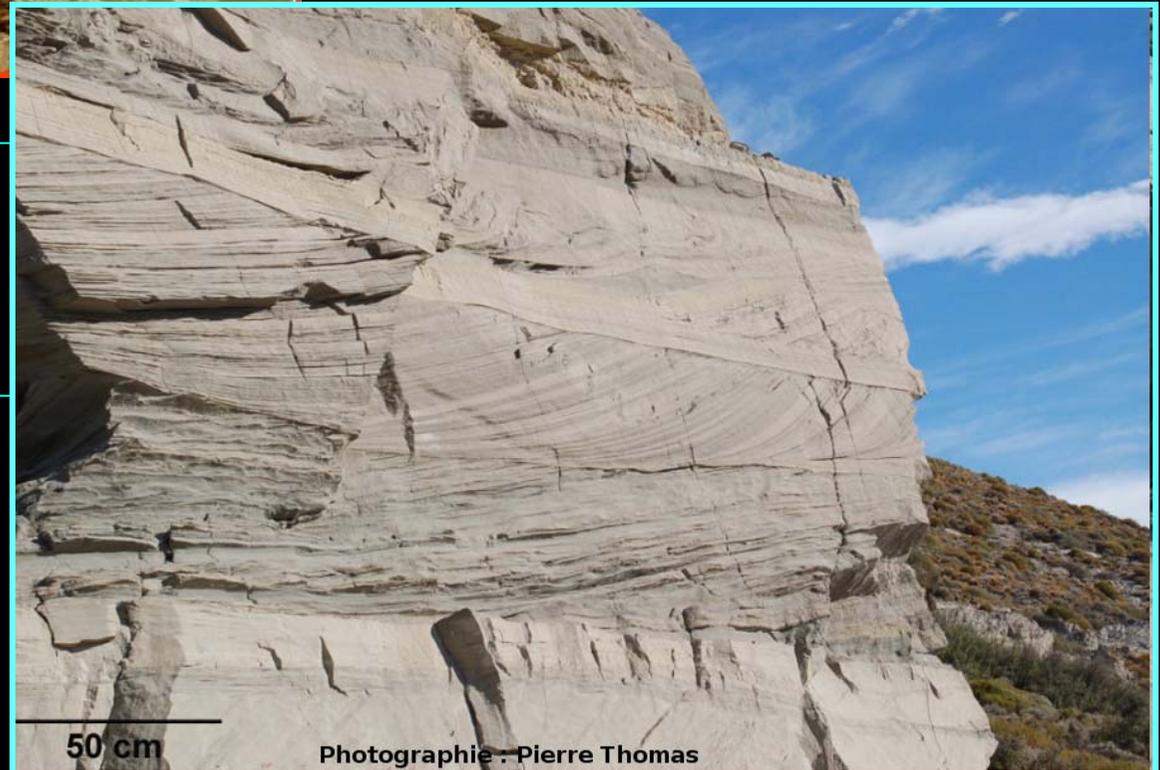
**en avoir exploré les bords, Opportunity commence à y descendre. On va passer de 7m à 30m de succession de couches ! Que va-t-on découvrir ??**

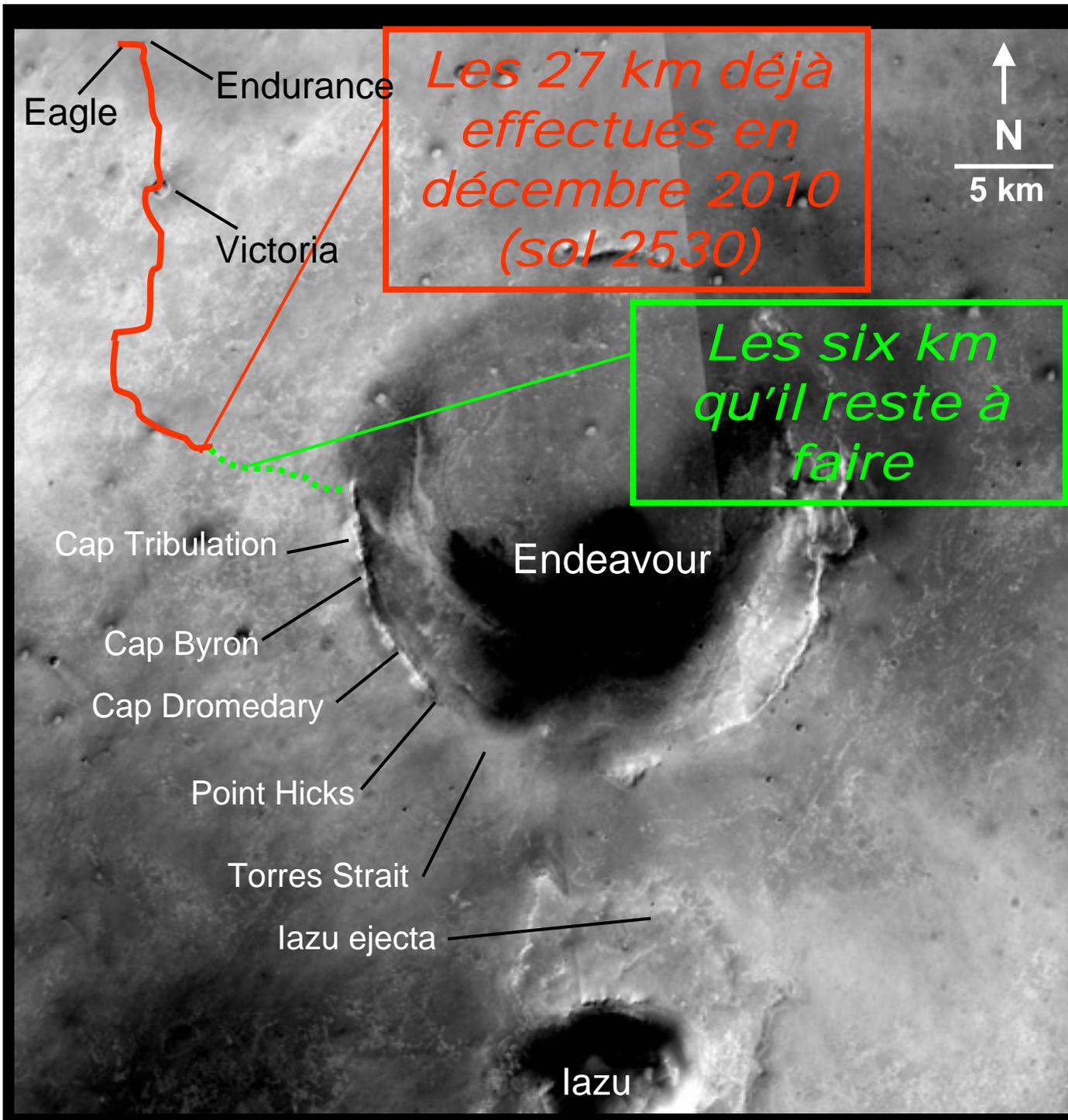


**On y voit et analyse à  
peu près la même  
chose que  
« d'habitude » ! C'est  
beau, mais  
« décevant »**

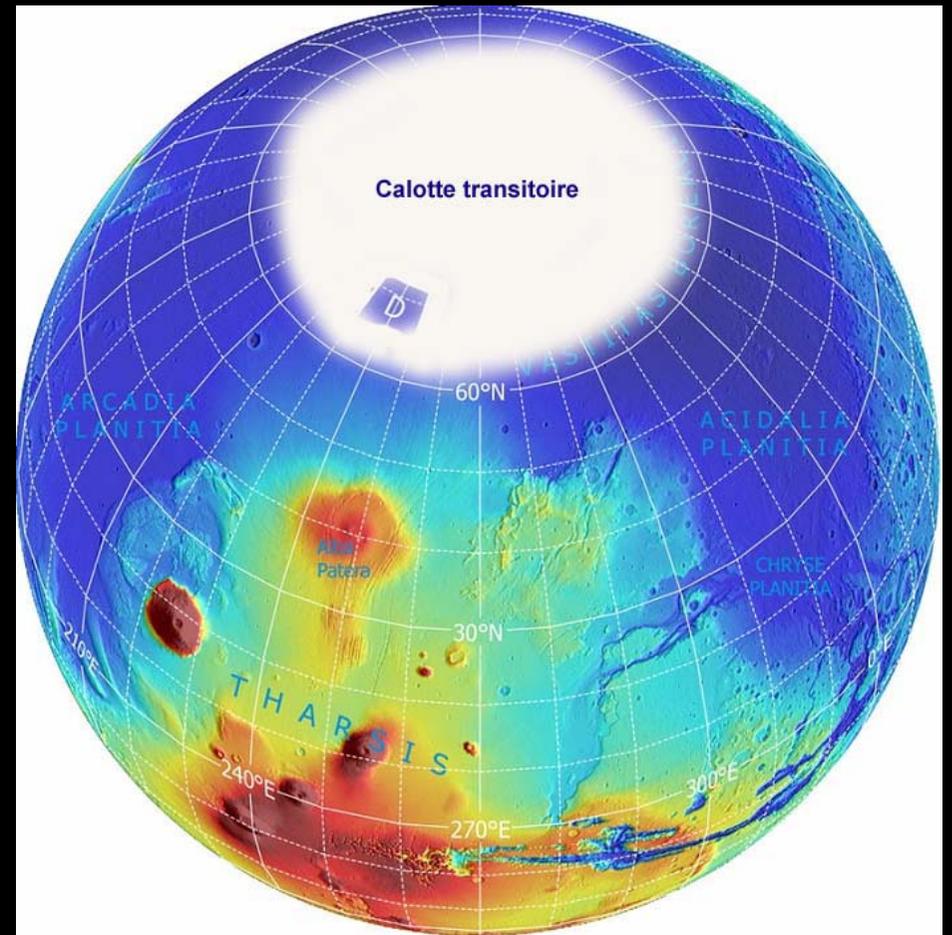
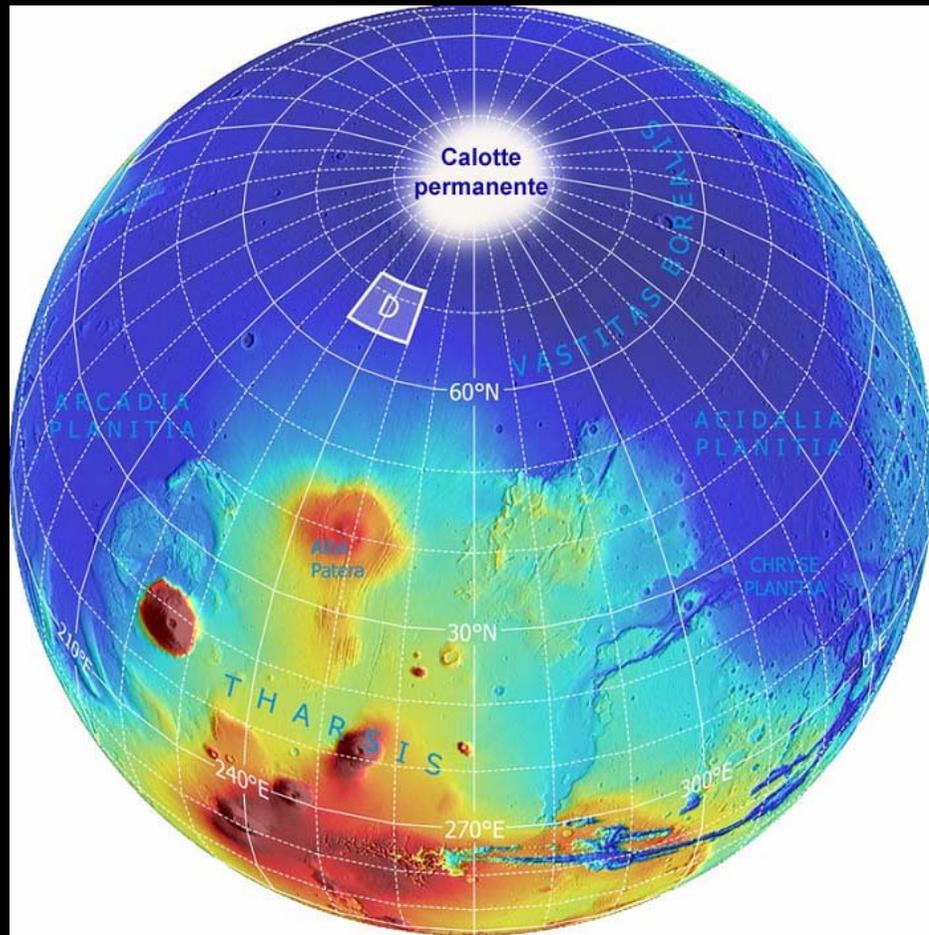
**Je ne peux pas  
m'empêcher de faire  
cette comparaison !**

**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.**

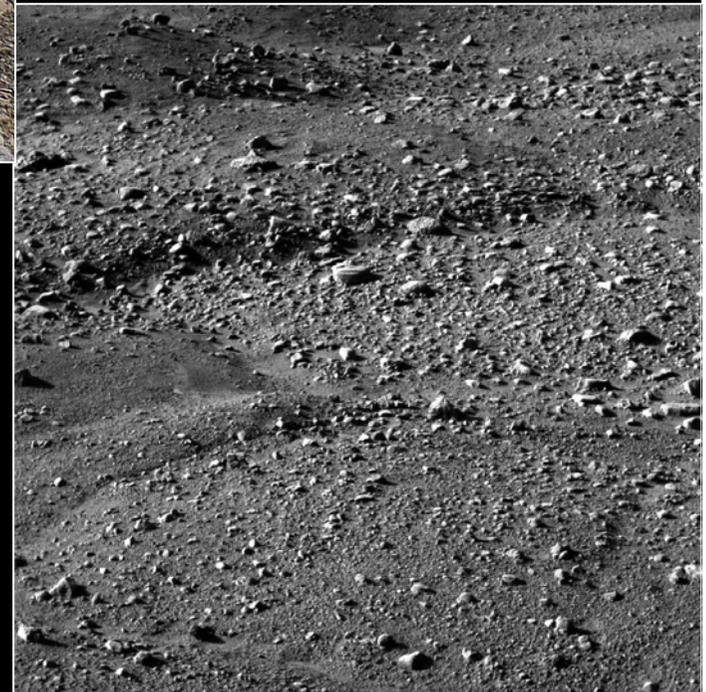


**Le paysage : un  
sol polygonal, à  
perte de vue,  
avec des  
polygones de  
dimension  
métrique**



**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 !**



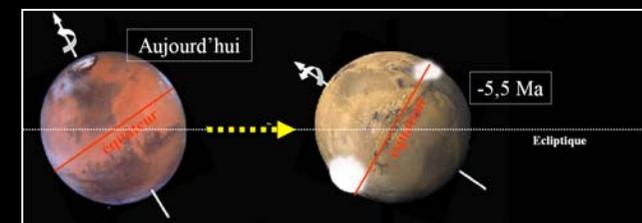
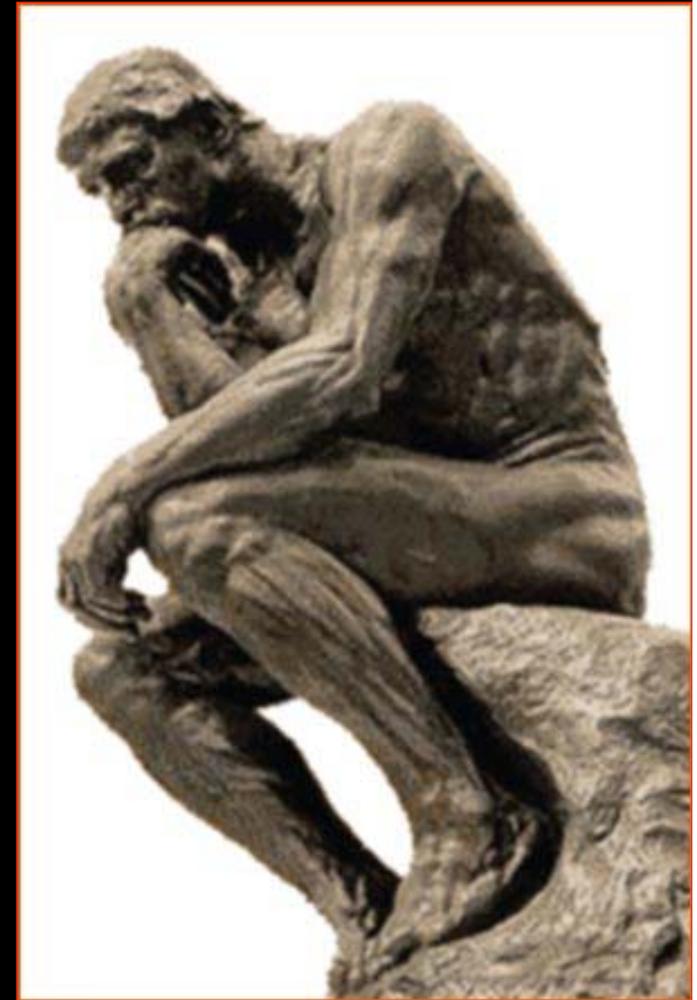
Depuis l'atterrissage, en plein été, la température oscille entre  $-25^{\circ}\text{C}$  le jour et  $-80^{\circ}\text{C}$  la nuit ! Et ça baisse avec l'arrivée de l'automne.

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 ??

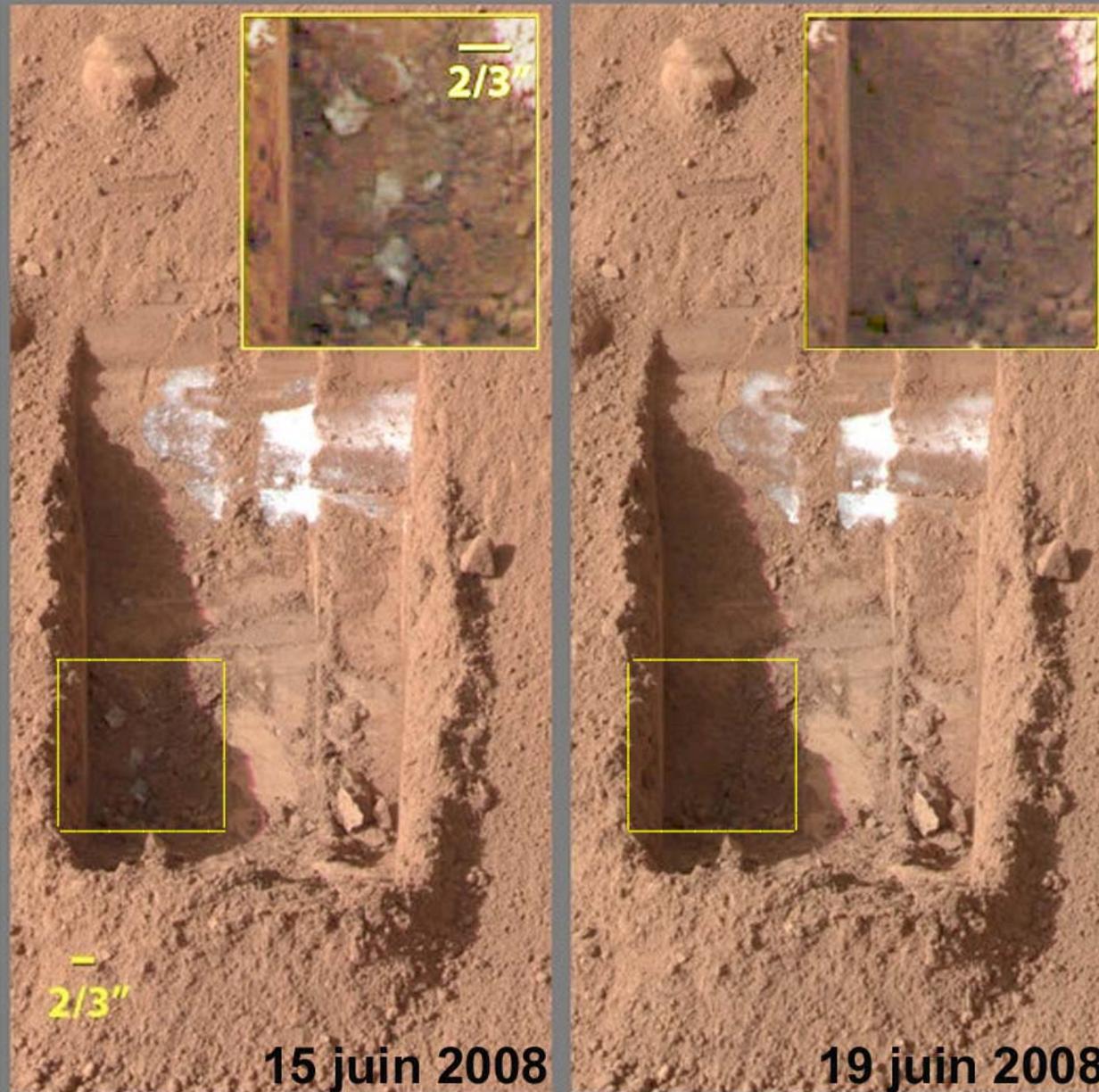




**Avec une  
« pelle » (5 cm  
de large) au  
bout d'un bras  
articulé,  
Phoenix creuse  
des petites  
tranchées.  
Dans les  
tranchées  
comme dans le  
contenu de la  
pelle, on voit  
une substance  
blanche. Sels  
ou glace(s) ?**

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<sub>4</sub> ...)  
des sels**

**(SO<sub>4</sub><sup>-</sup> ...), 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)**

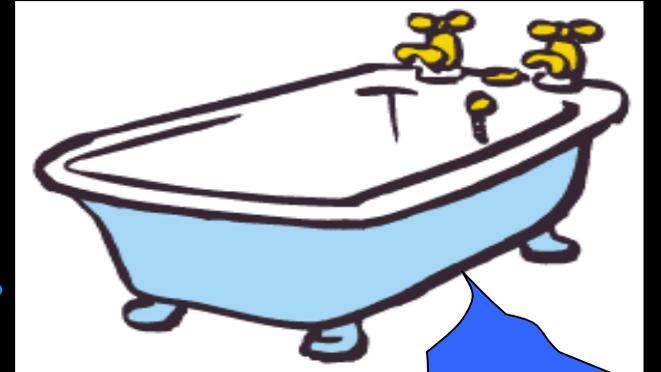
**Résultats des analyses :**  
la glace est bien de la  
glace d' $H_2O$ , eau qui a  
un Ph basique de 8-9, qui  
contient des ions divers  
(magnésium, sodium,  
potassium, chlore et  
perchlorate). Le sol  
contient des argiles  
jusqu'à 5% de carbonate  
de calcium. Tout cela  
révèle un « passé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



Petit chimiste vert analysant le  
sol de Mars

**Pourquoi n'y en a t'il plus d'H<sub>2</sub>O 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 4,4 à 4-3,8 Ga, il y avait de l'eau liquide pérenne à la surface de Mars.**



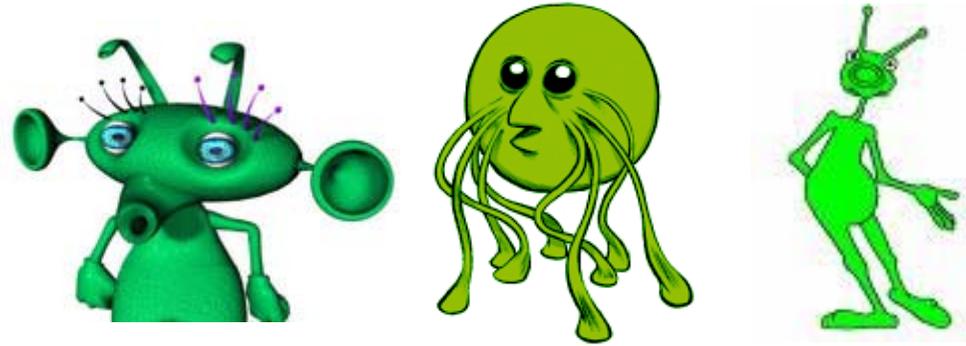
**\*Entre 4-3,8 et 3,5-3 Ga, période de transition.**

**Il y en avait plus ou moins en fonction de l'intensité du volcanisme qui fournissait du CO<sub>2</sub> 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 ...)**

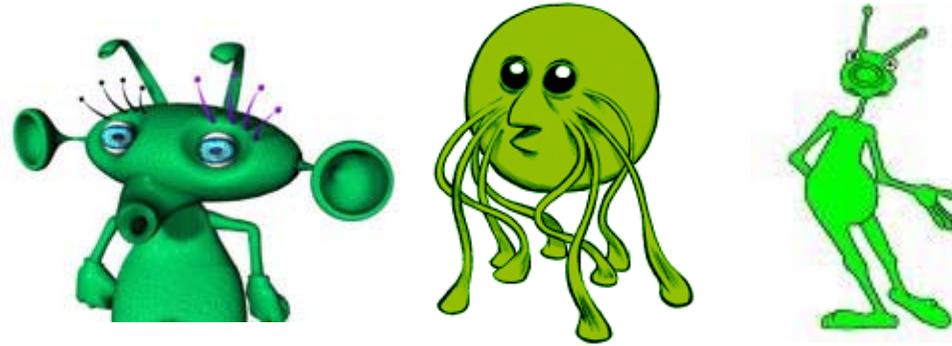
**\*Mais il en reste beaucoup dans le sous-sol, gelée près de la surface, sans doute liquide en profondeur**

**Plus vieilles traces  
de vie sur Terre**



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

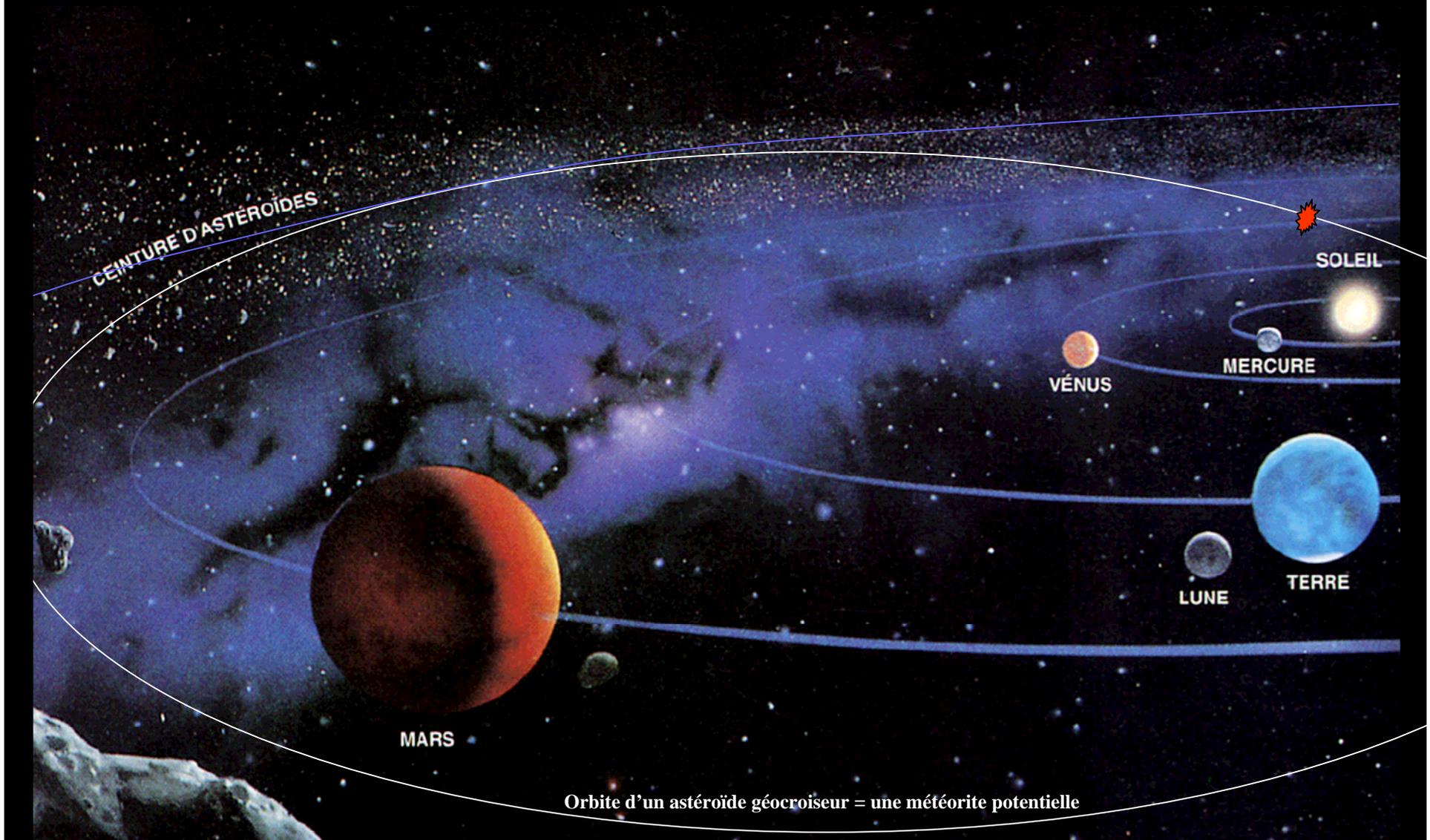
# Plus vieilles traces de vie sur Terre



**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 ?



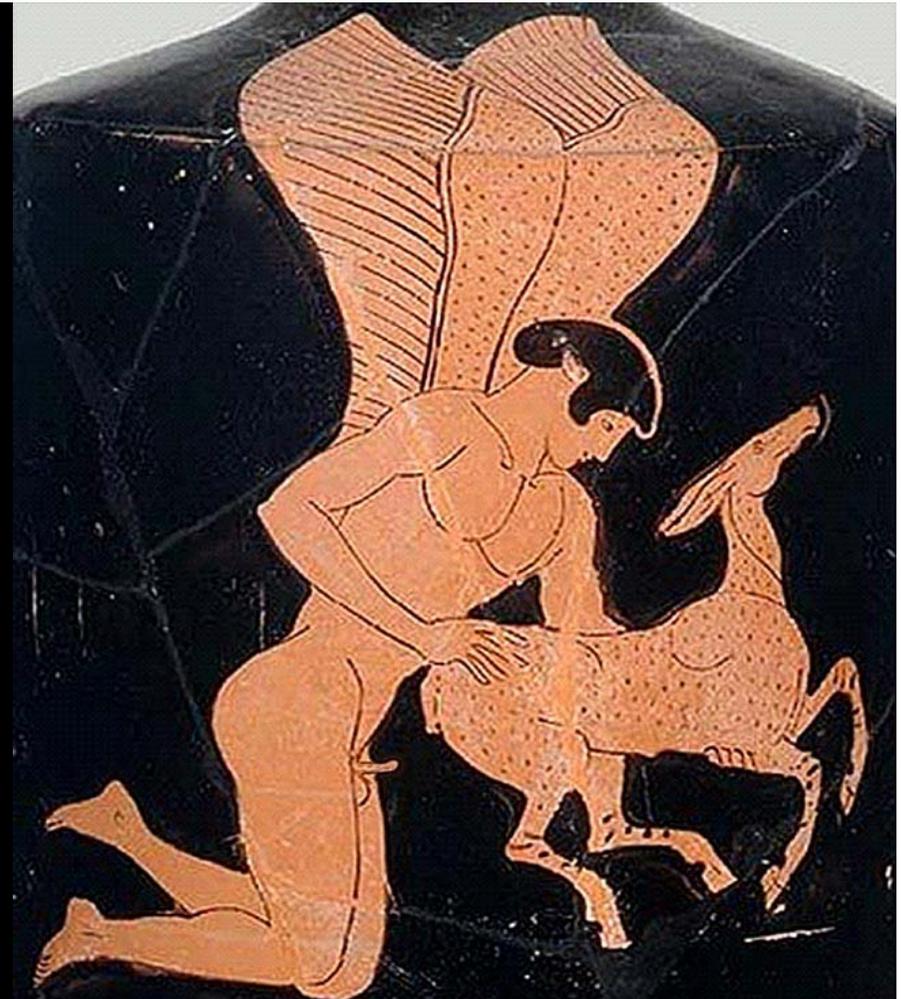
Orbite d'un astéroïde géocroiseur = une météorite potentielle



**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

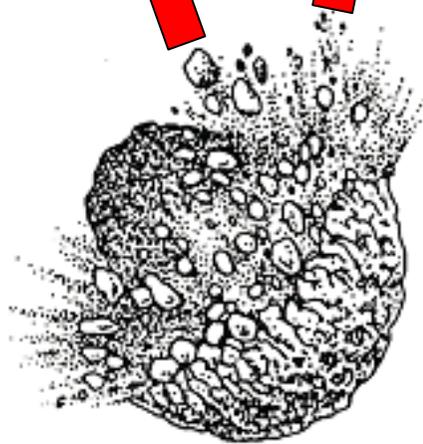
**Je rappelle que le noms des planètes, des astéroïdes (découverts depuis longtemps) ... sont tirés des mythologies « péri-méditerranéennes ». Ceux découvert récemment ont des noms tirés des mythologies de tous les continents.**

**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

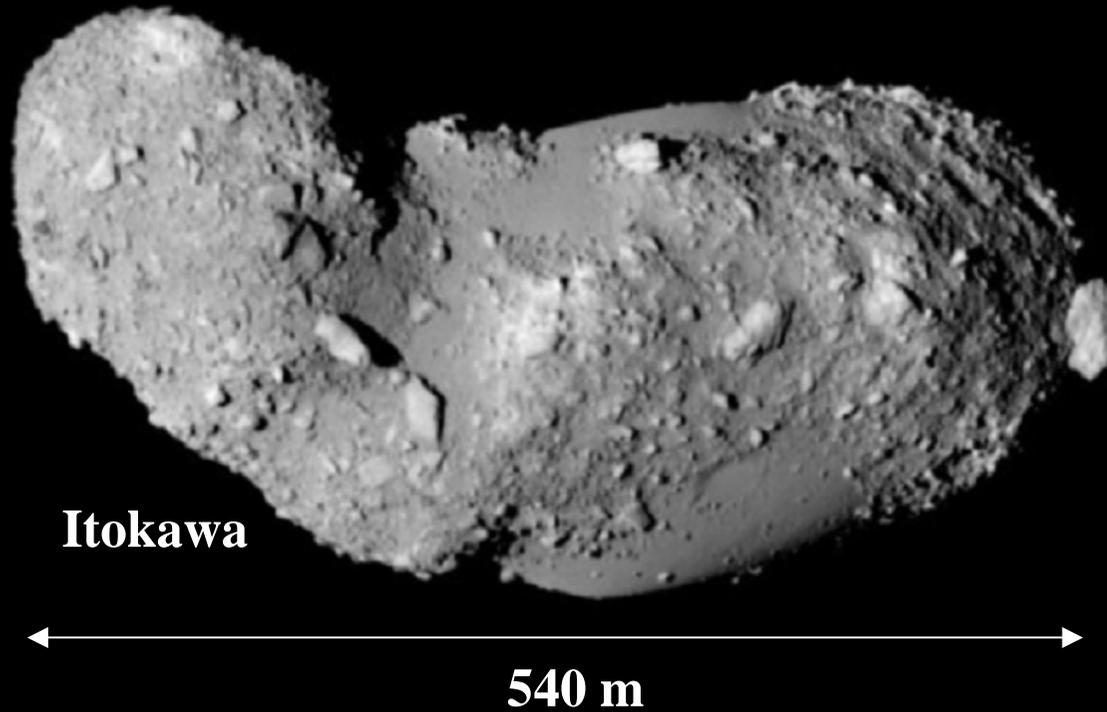


Reassembly by mutual gravity



Rubble pile model

# Les météorites en sont des fragments.

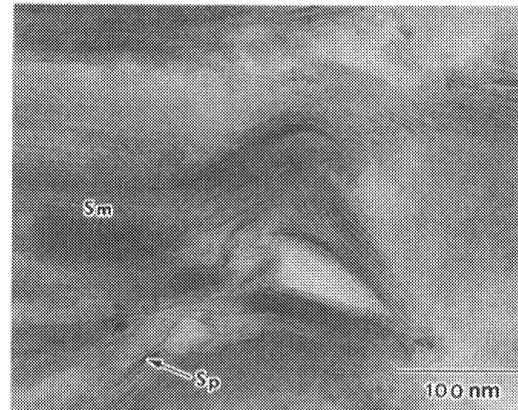


Et les météorites sont des roches  
contenant un peu d'eau  
(de 0,1 à 10% d'H<sub>2</sub>O, le maximum)

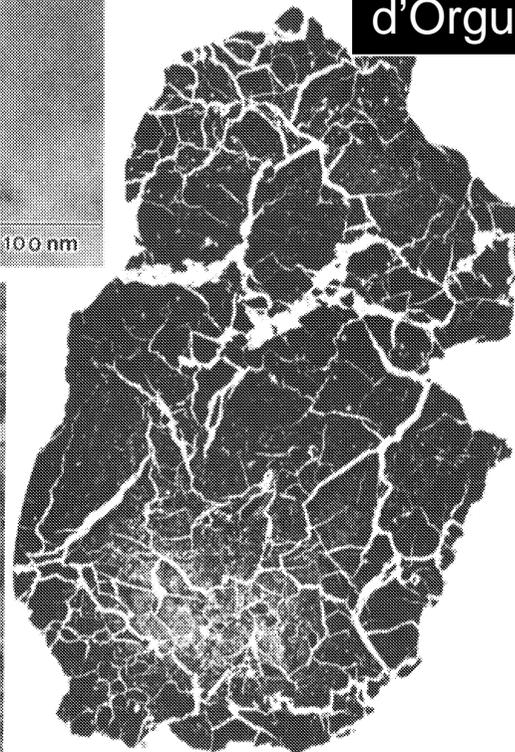


**L'eau dans les météorites . Il y en a jusqu'à 10%, inclus dans des minéraux hydroxylés (argiles, serpentines...) Ces météorites se sont formées (ou ont été altérées) en présence d'H<sub>2</sub>O, à T < 300°C**

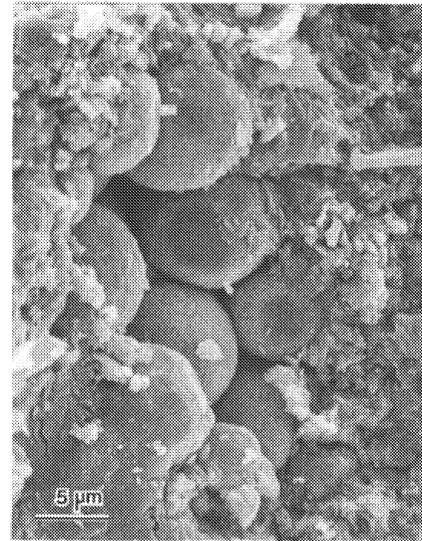
Image TEM:  
Smectite (argile) et  
serpentine

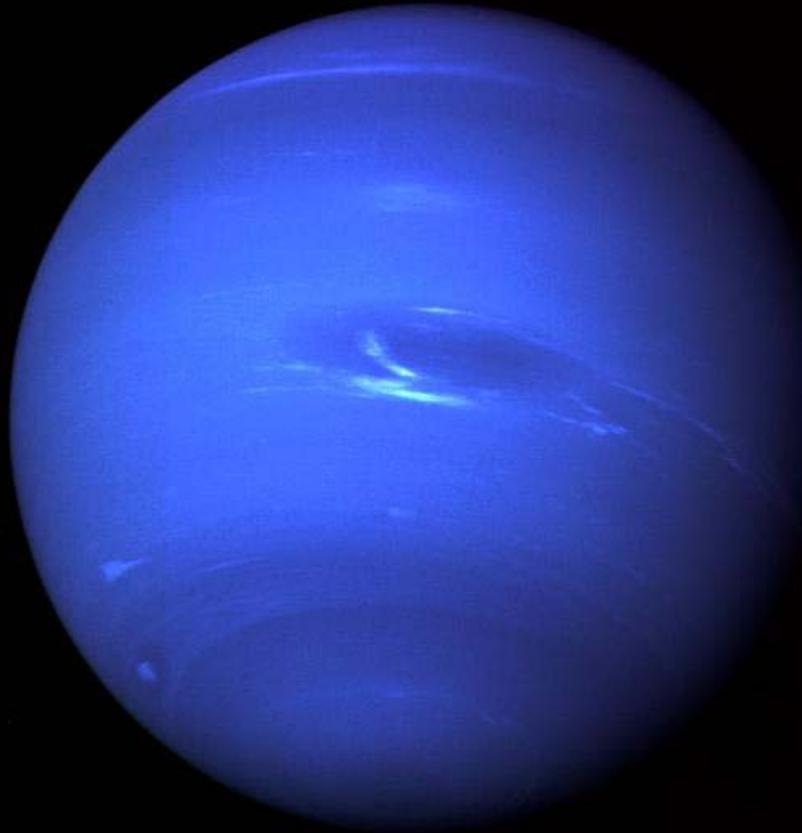


Veines de phosphates  
dans la chondrite  
d'Orgueil



Spherules de  
magnetite,  
oxyde de fer





## Au delà des astéroïdes, les planètes géantes

Caractéristiques de la surface supérieure des nuages

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

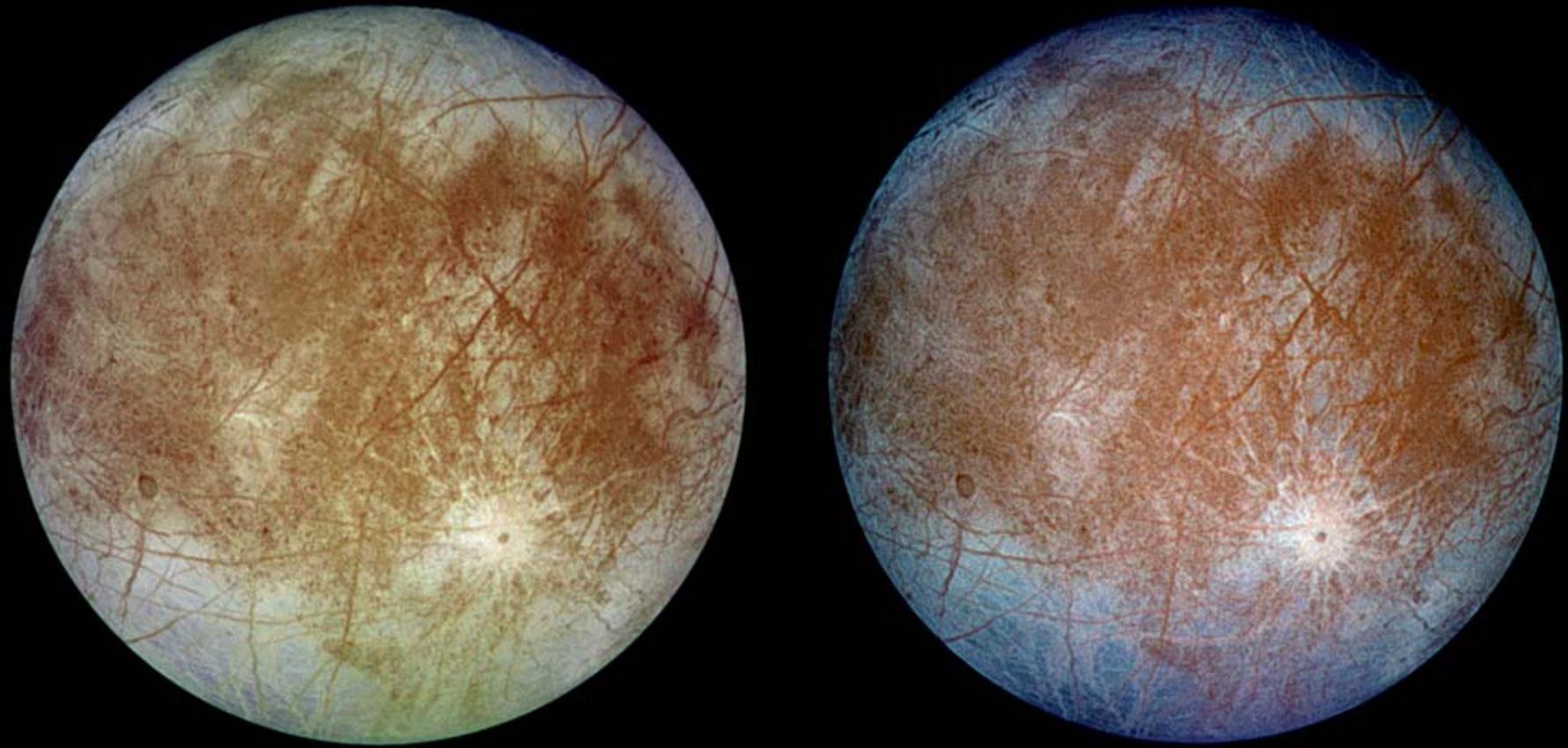
**T = - 150°C  
à - 200 °C**

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

**Europe  
(taille de  
la Lune)**

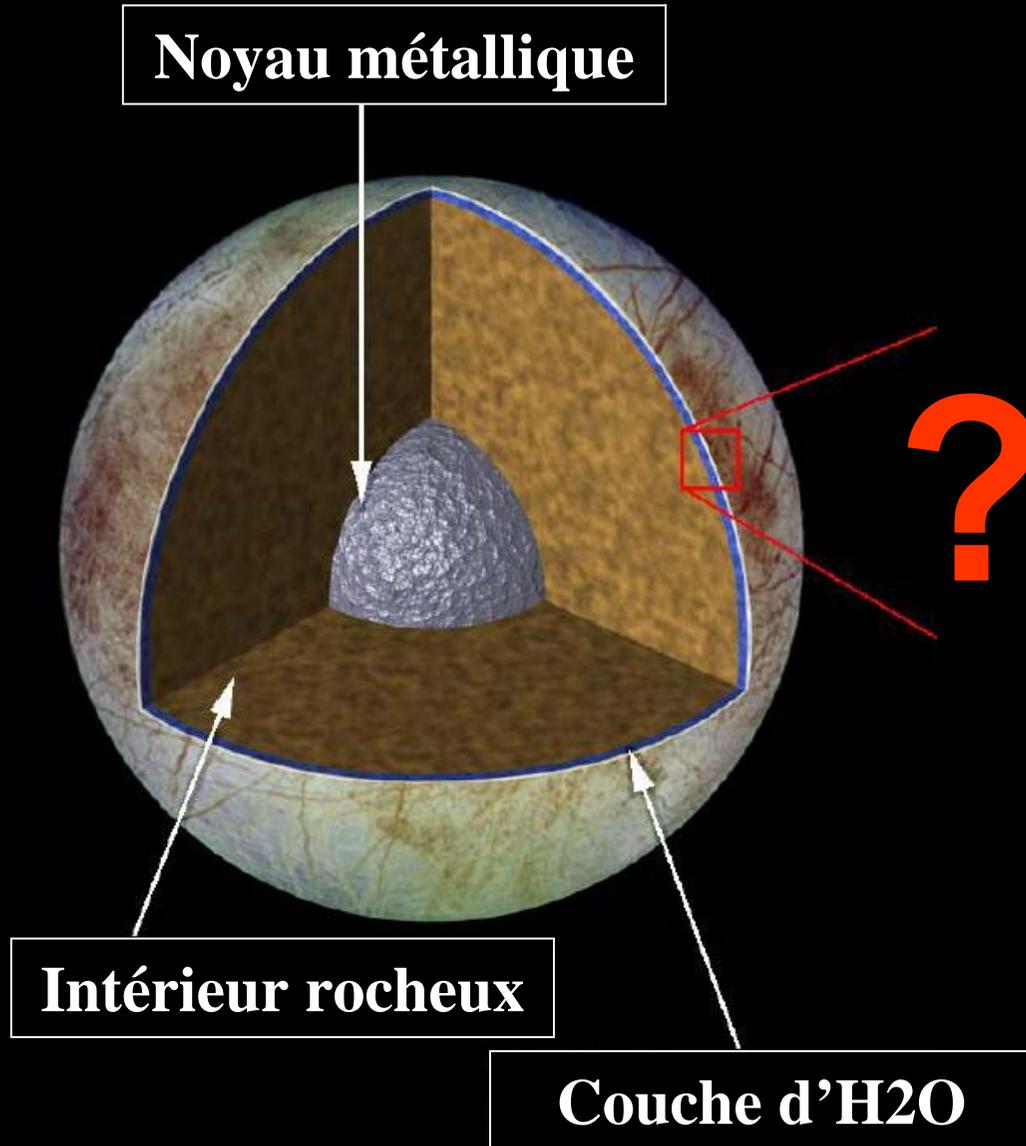
**Les 4 planètes géantes ont des satellites, 17 « gros » (et des dizaines de « petits »). Parmi leurs 17 satellites principaux, un n'est constitué que de roches (Io), un autre est constitué de roches recouvertes de glaces (Europe) et les 15 autres sont constitués majoritairement de glaces. On va en étudier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

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



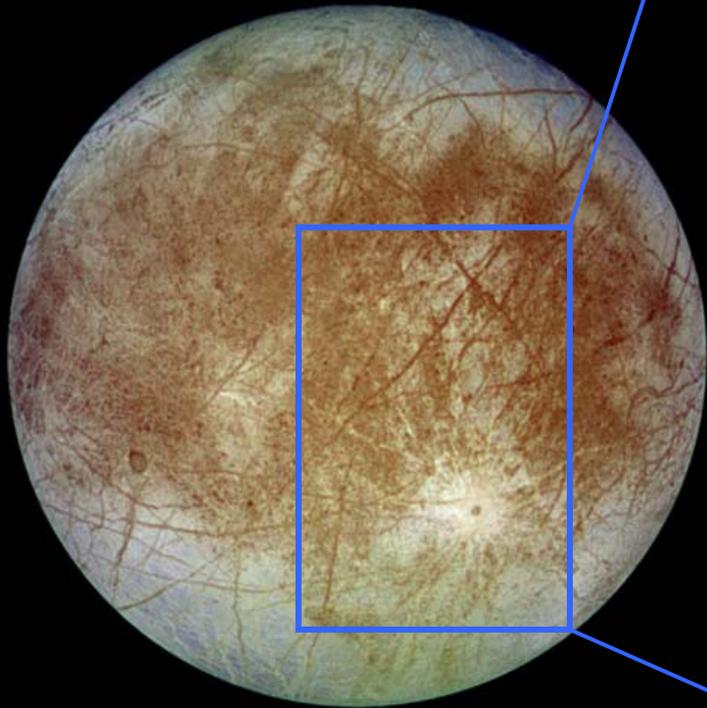
← 3000 km →

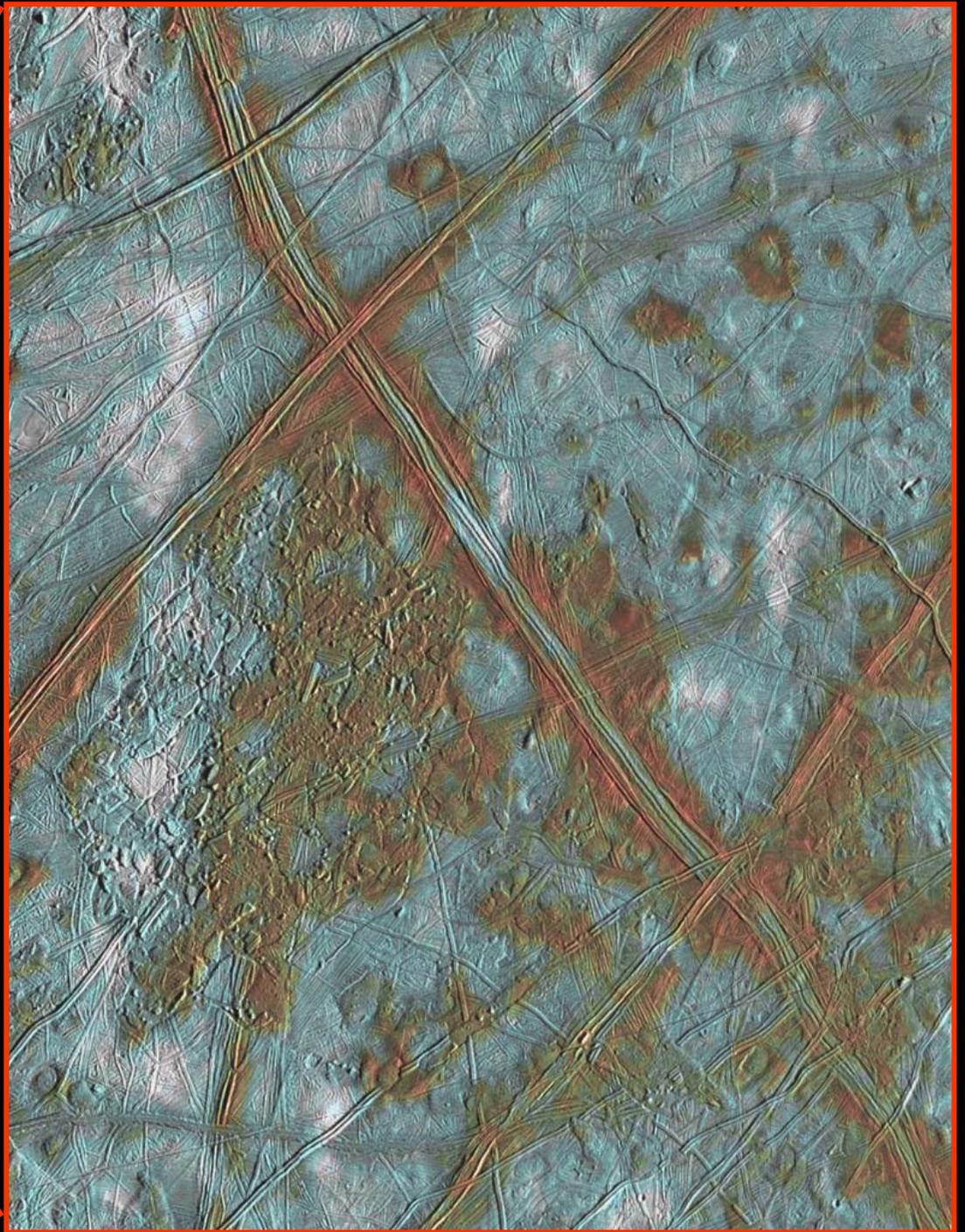
## Europe.



La masse volumique ( $3 \text{ g/cm}^3$ ) 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 au mieux  $-150^\circ\text{C}$  en été au soleil)

**Faisons une  
série de zooms  
sur Europe**



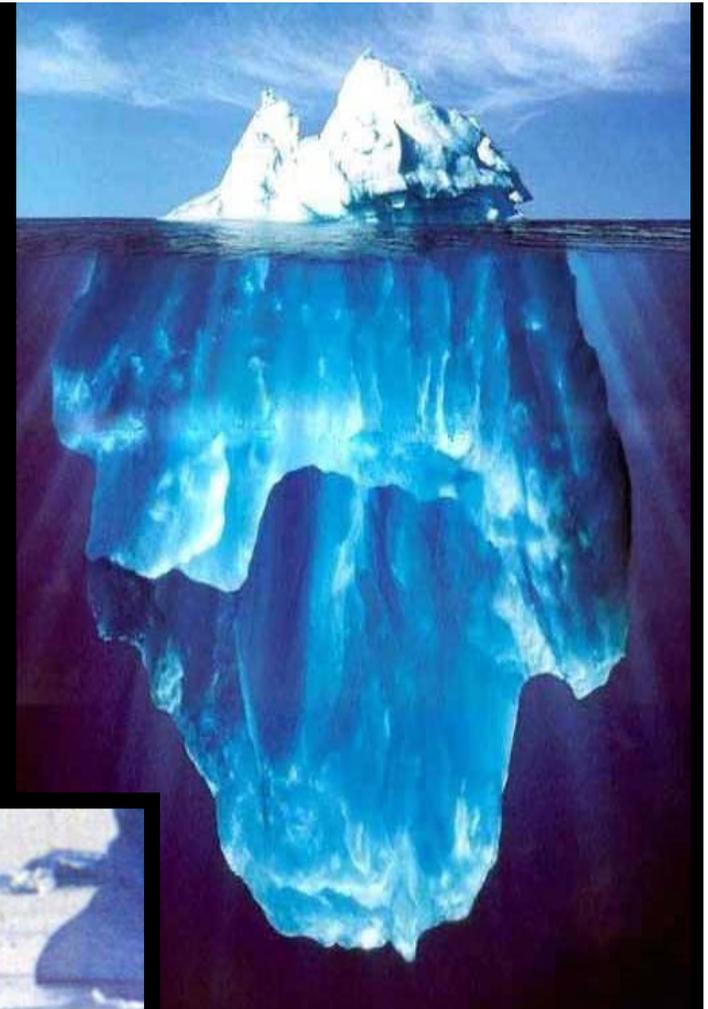


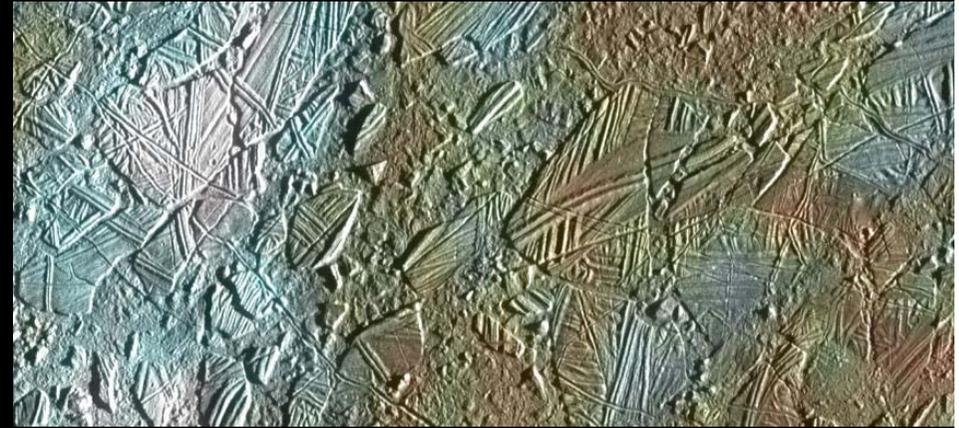


Avouez que  
ça ressemble !

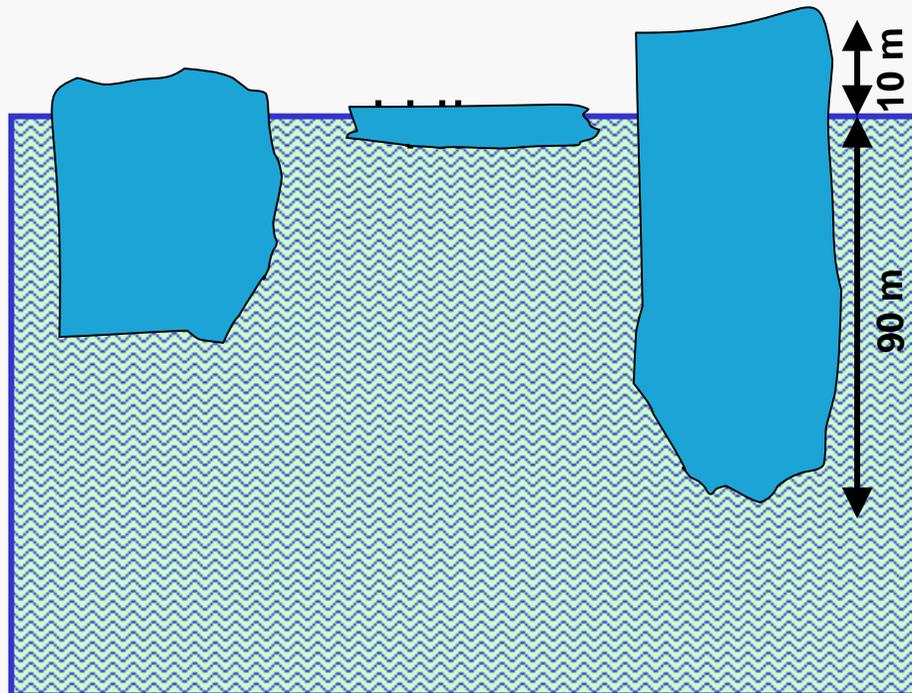


**Avec la hauteur de la partie émergée de l'iceberg, on peut connaître la hauteur totale de l'iceberg**





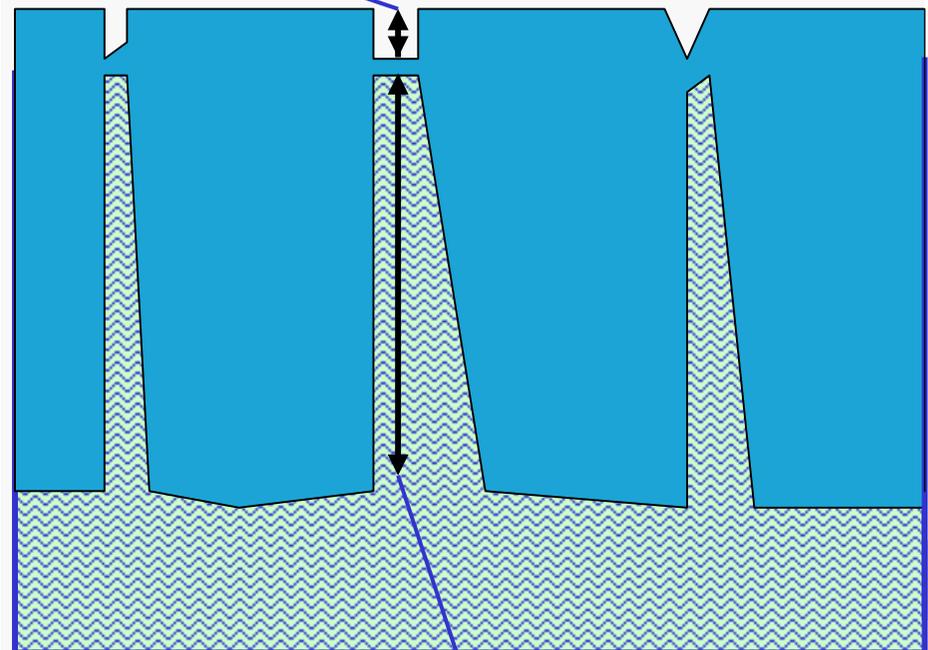
**Terre**



Iceberg : la partie émergée représente 1/10 du total

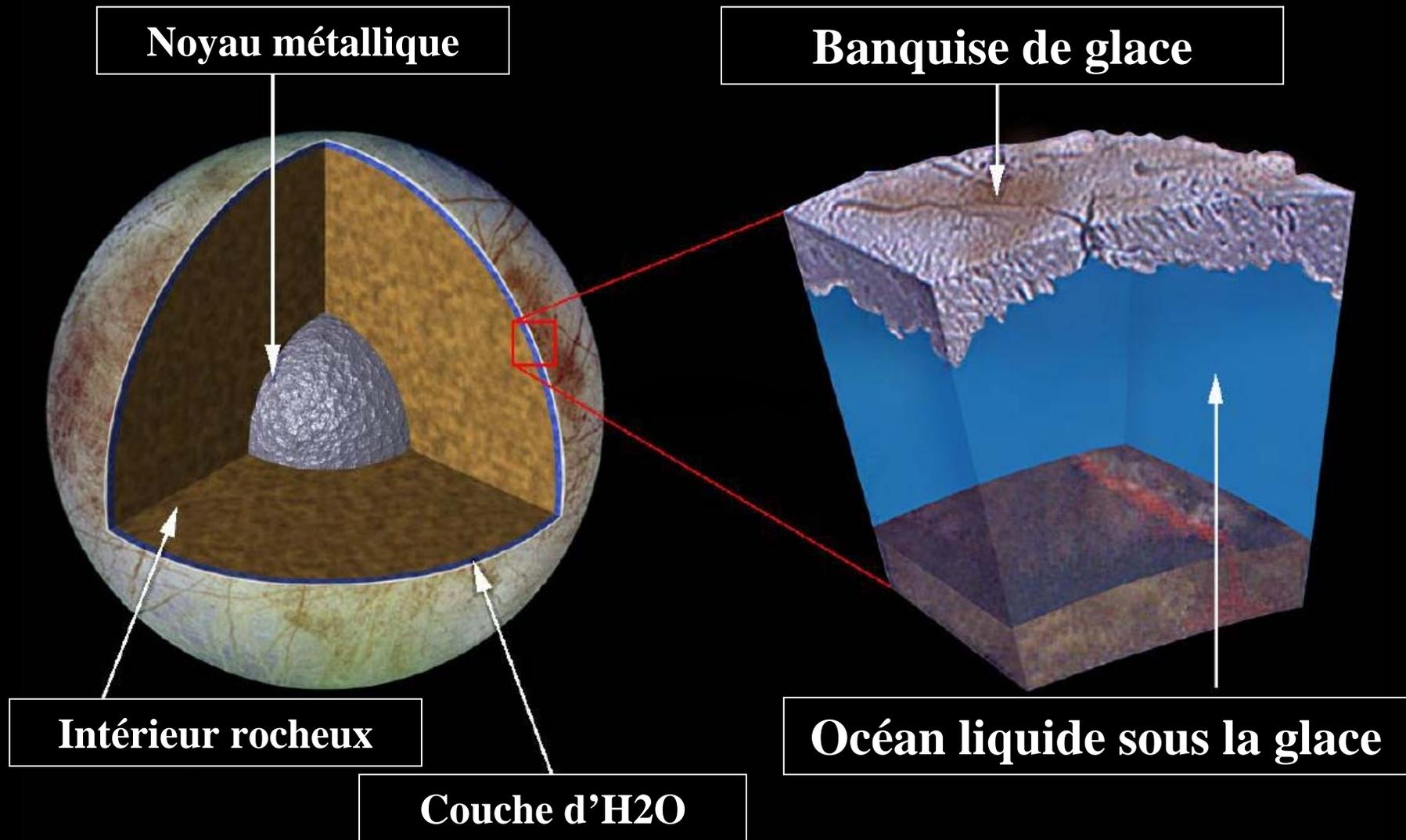
La partie émergée mesure 500 à 1000 m

**Europe**

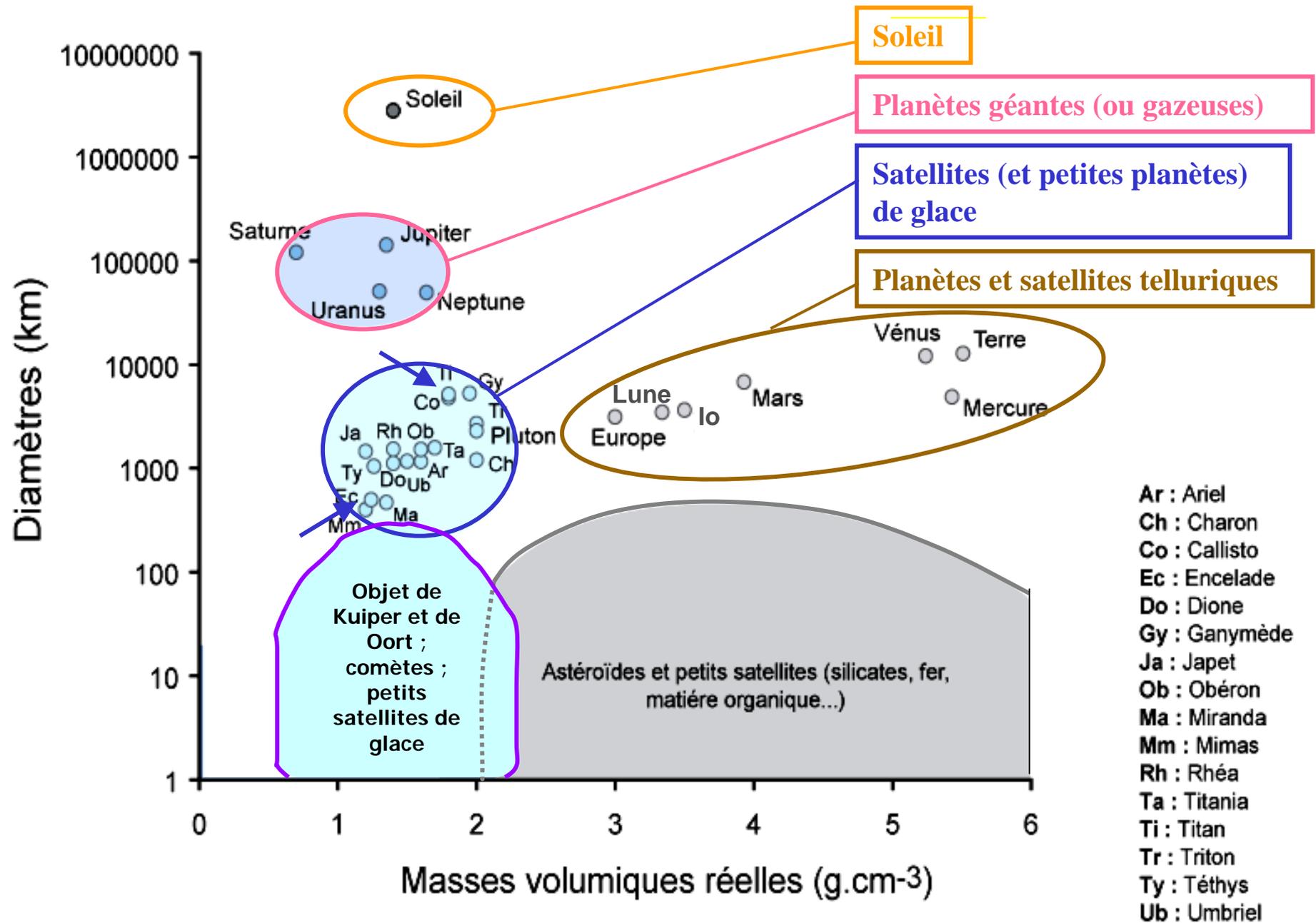


→ la partie immergée représente 5 à 10 km

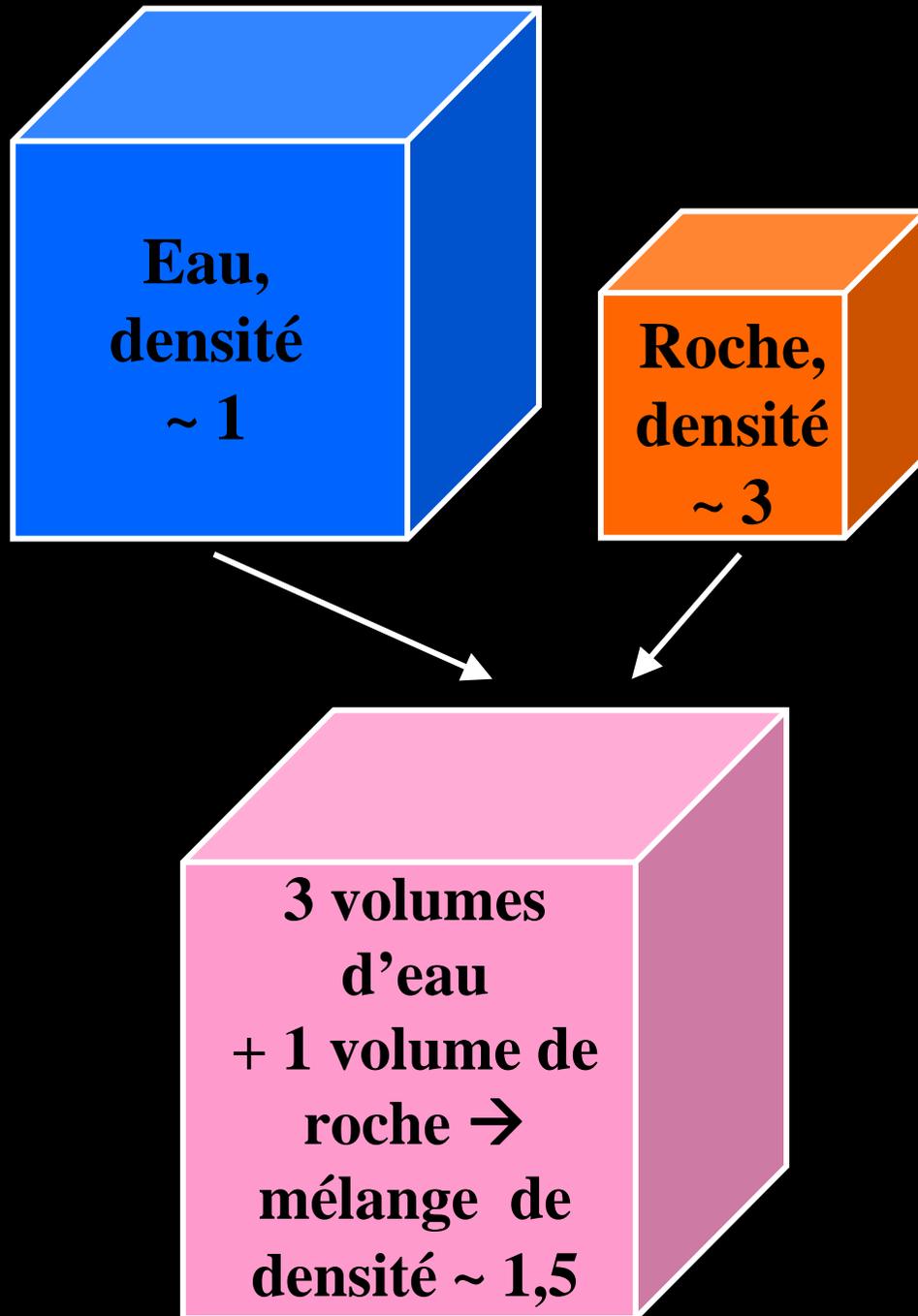
→ Océan liquide de 90 à 95 km de profondeur



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 »

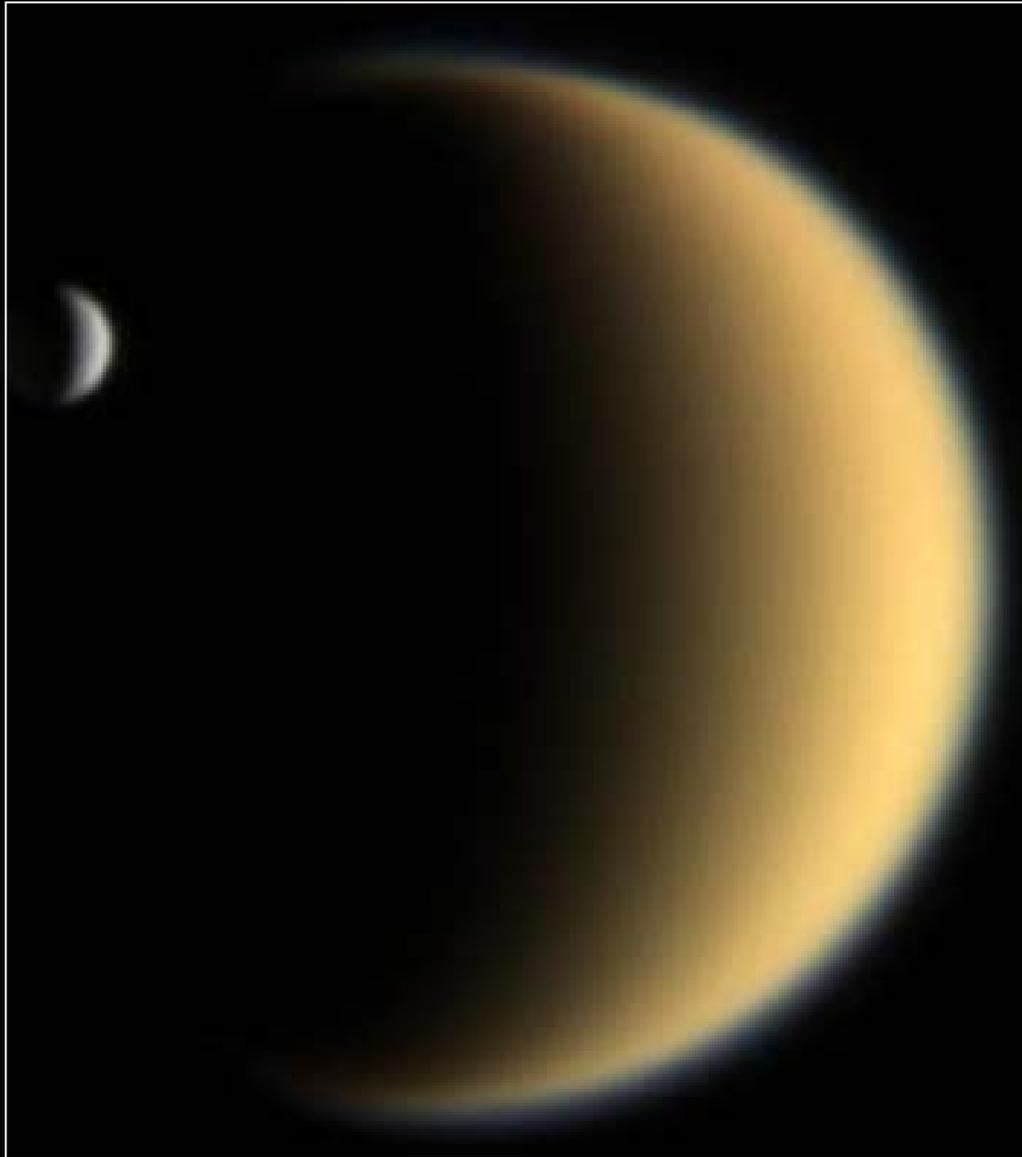


# La classification géologique du système solaire

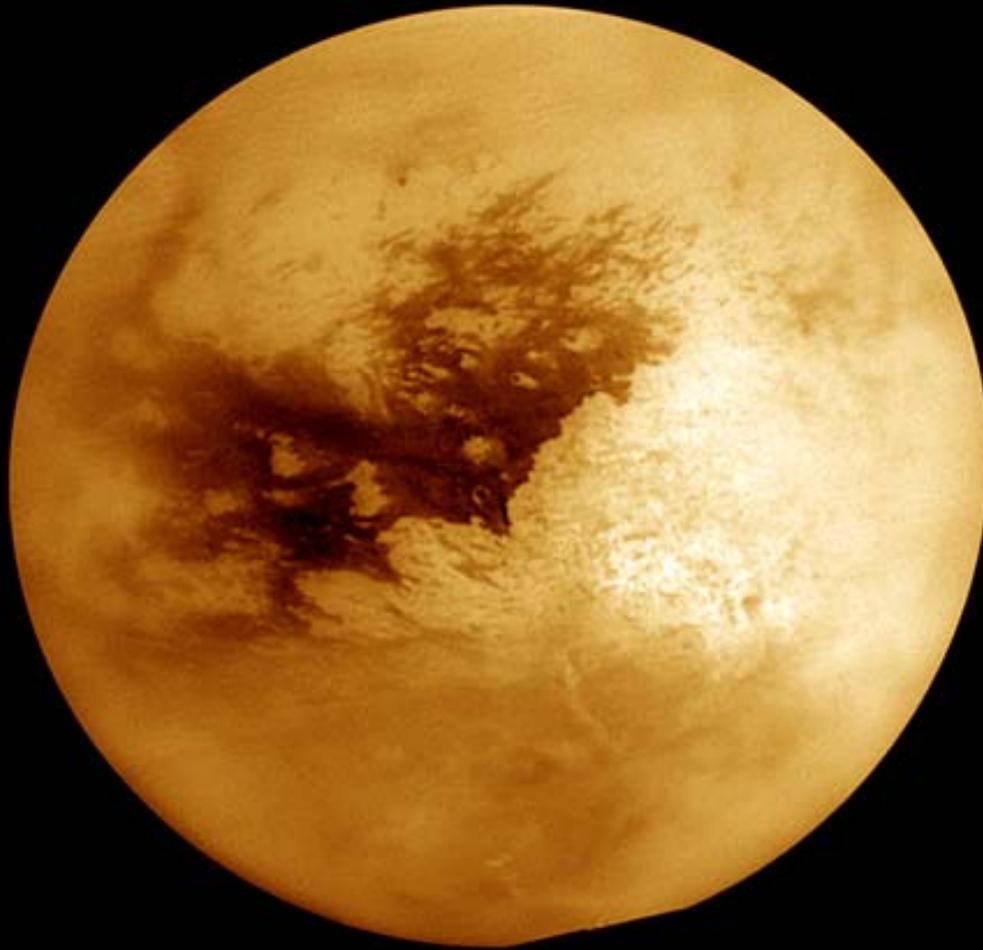


**Les satellites de glace :  
grande variété de  
taille, certes, mais  
identité de  
composition. Tous ces  
satellites de Saturne  
ont une densité  
d'environ 1,5.  
Ils sont constitués  
(approximativement)  
d'un mélange de  
3 volumes d'eau  
+  
1 volume de roche**

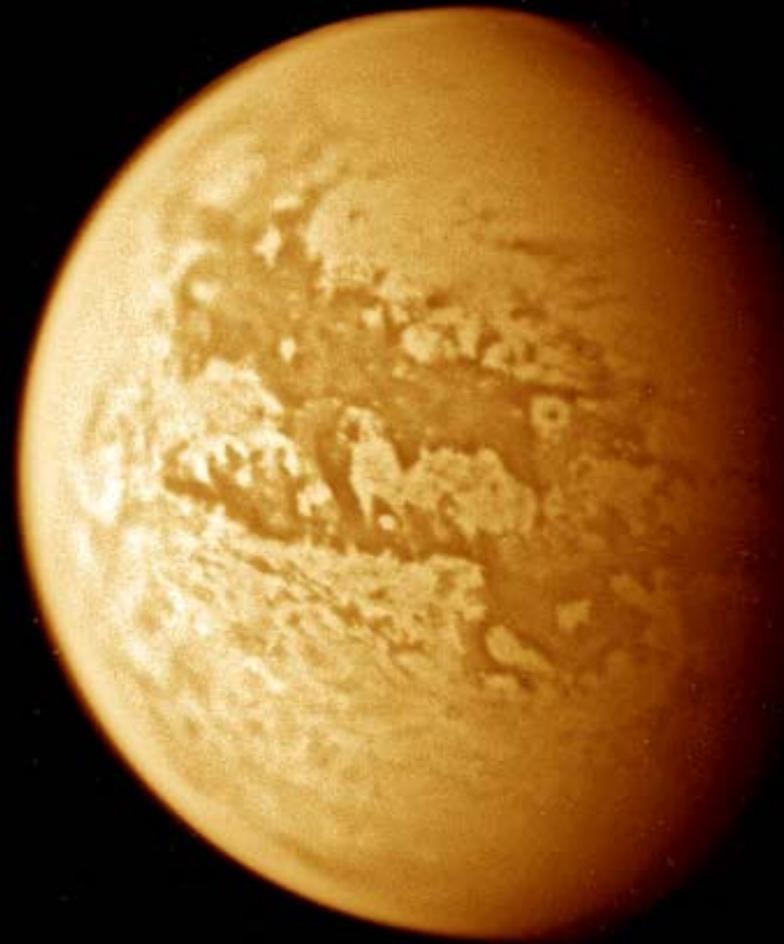
**Un exemple de « gros » satellite (de Saturne)  
principalement constitué de glace :**



**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**

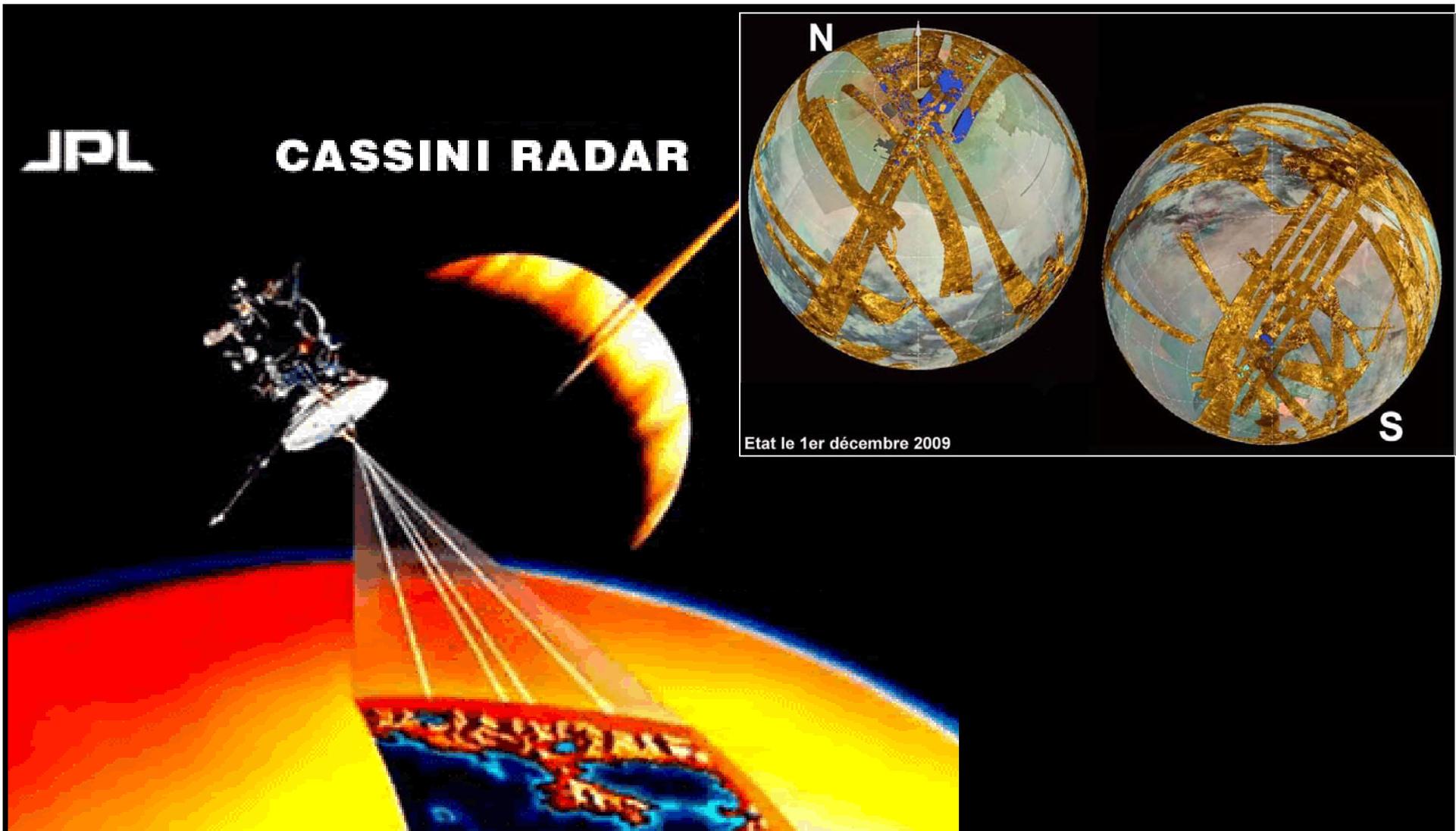


février 2005



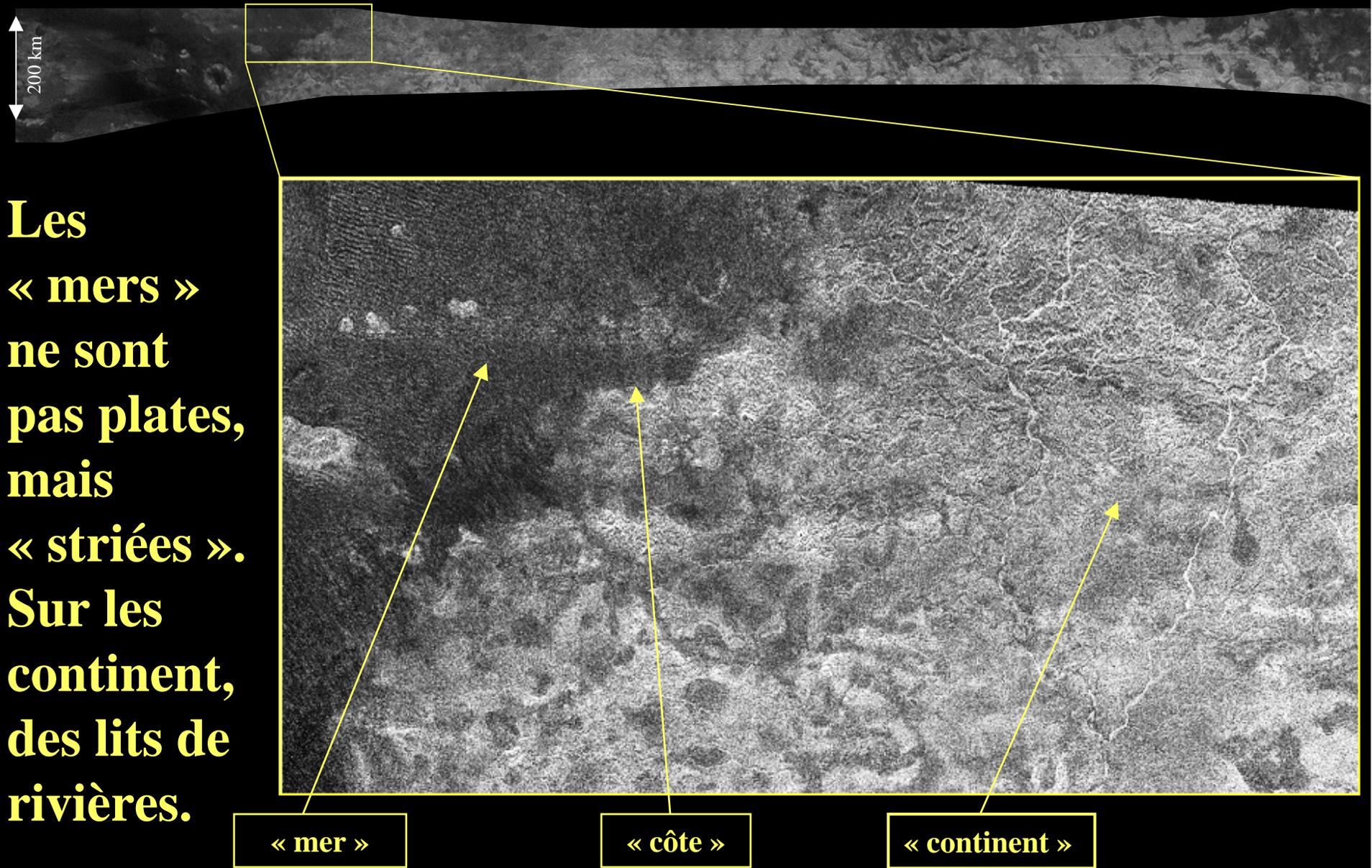
avril 2005

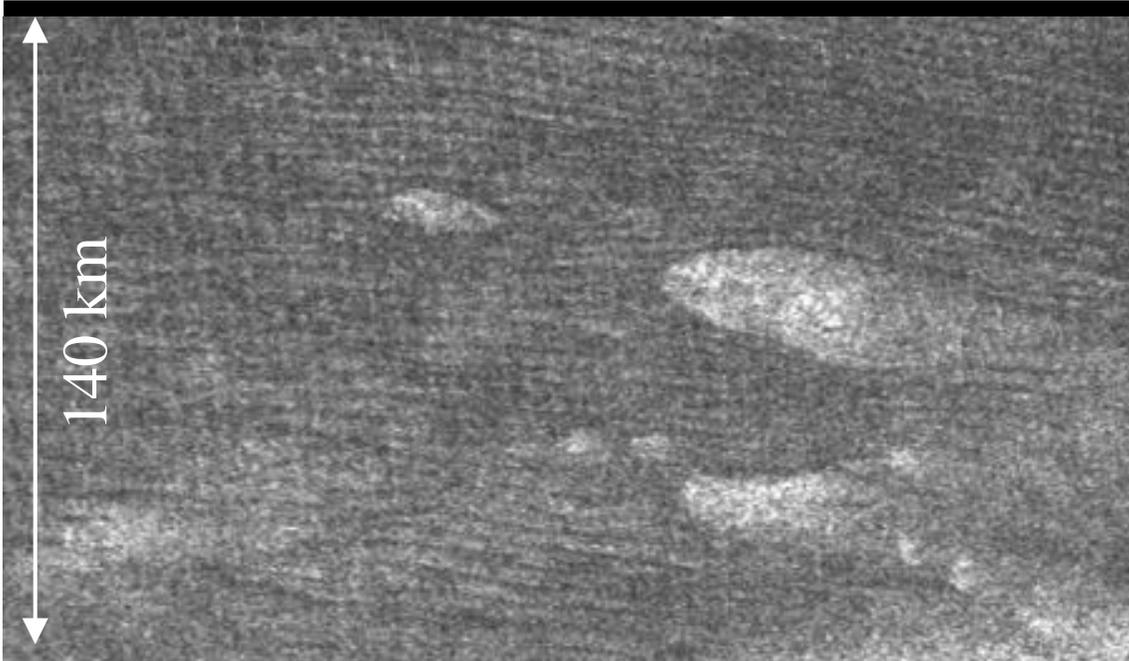
**Voilà deux vues Infra-Rouge, avec la couleur qu'on connaît de la surface. Peut-être ce qu'on verrait à l'œil nu depuis l'espace, si il n'y avait pas de nuages.**



**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 ?**

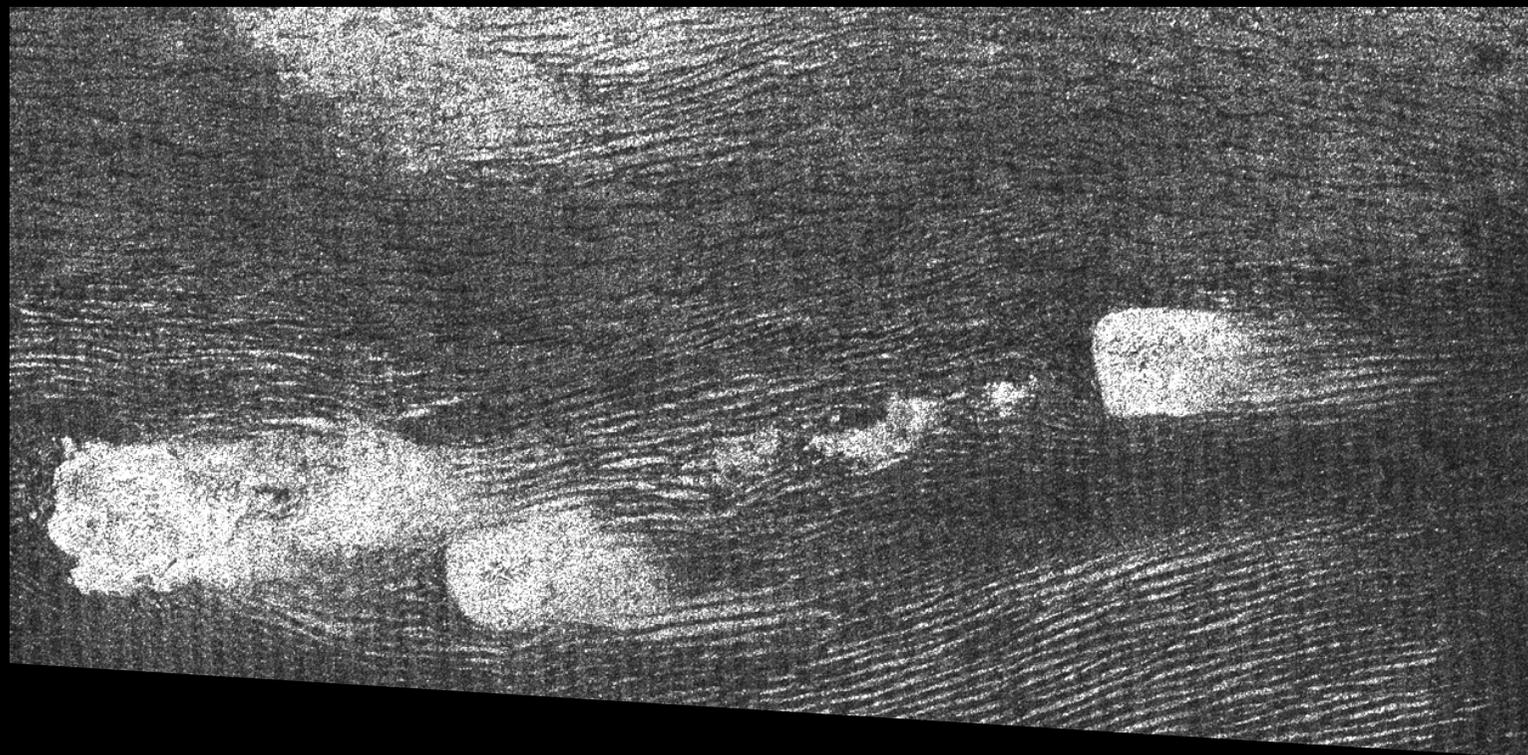
# Exemple d'une bande radar (avril 2005) avec la limite « mer » en sombre et « continent » en clair

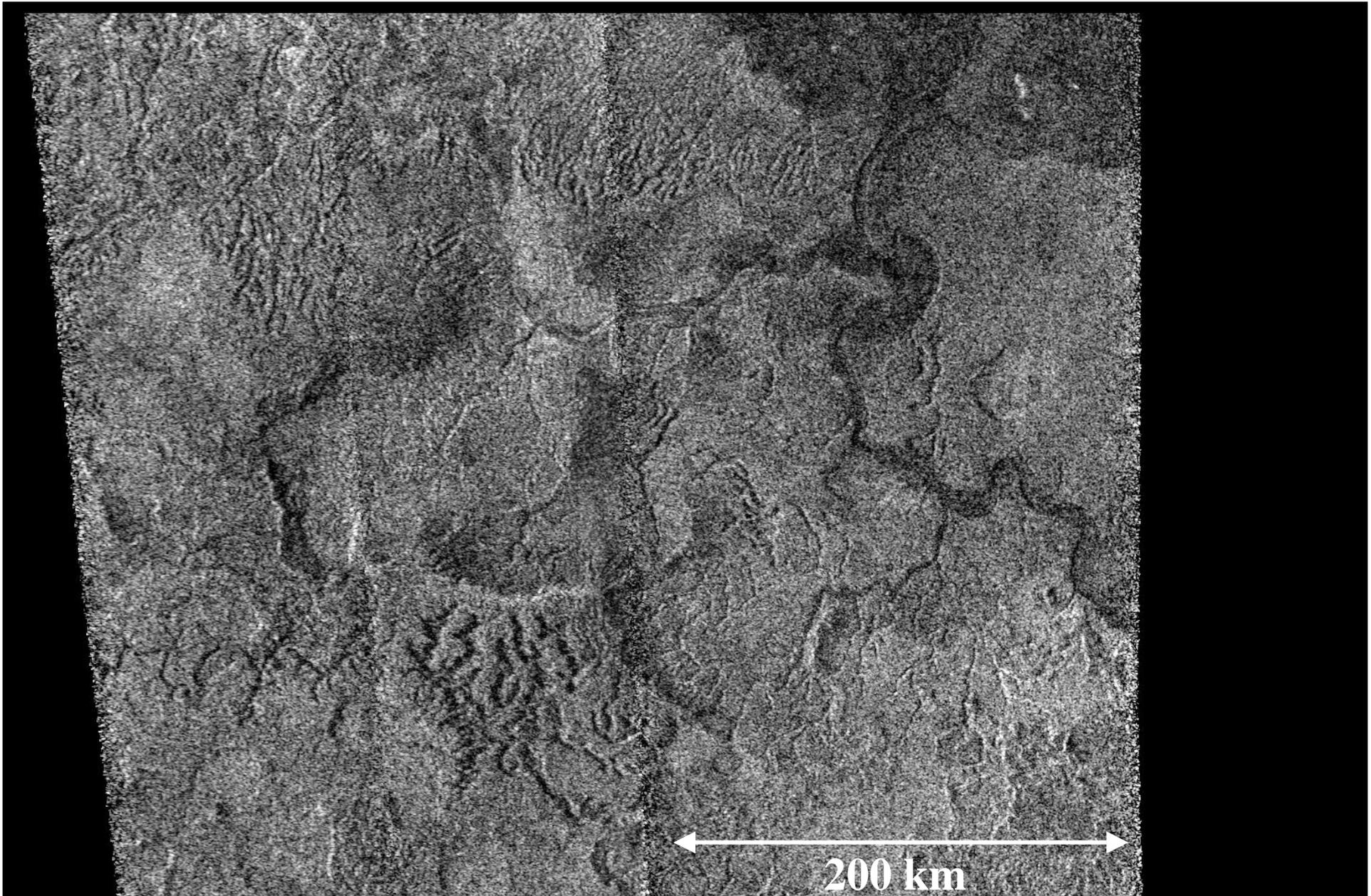




**Ces stries dans les « mers », ce sont des champs de dunes. Il ne s'agit pas de mer de méthane liquide, mais de mers de sable (sable de glace et/ou d'hydrocarbures bien sur) !**

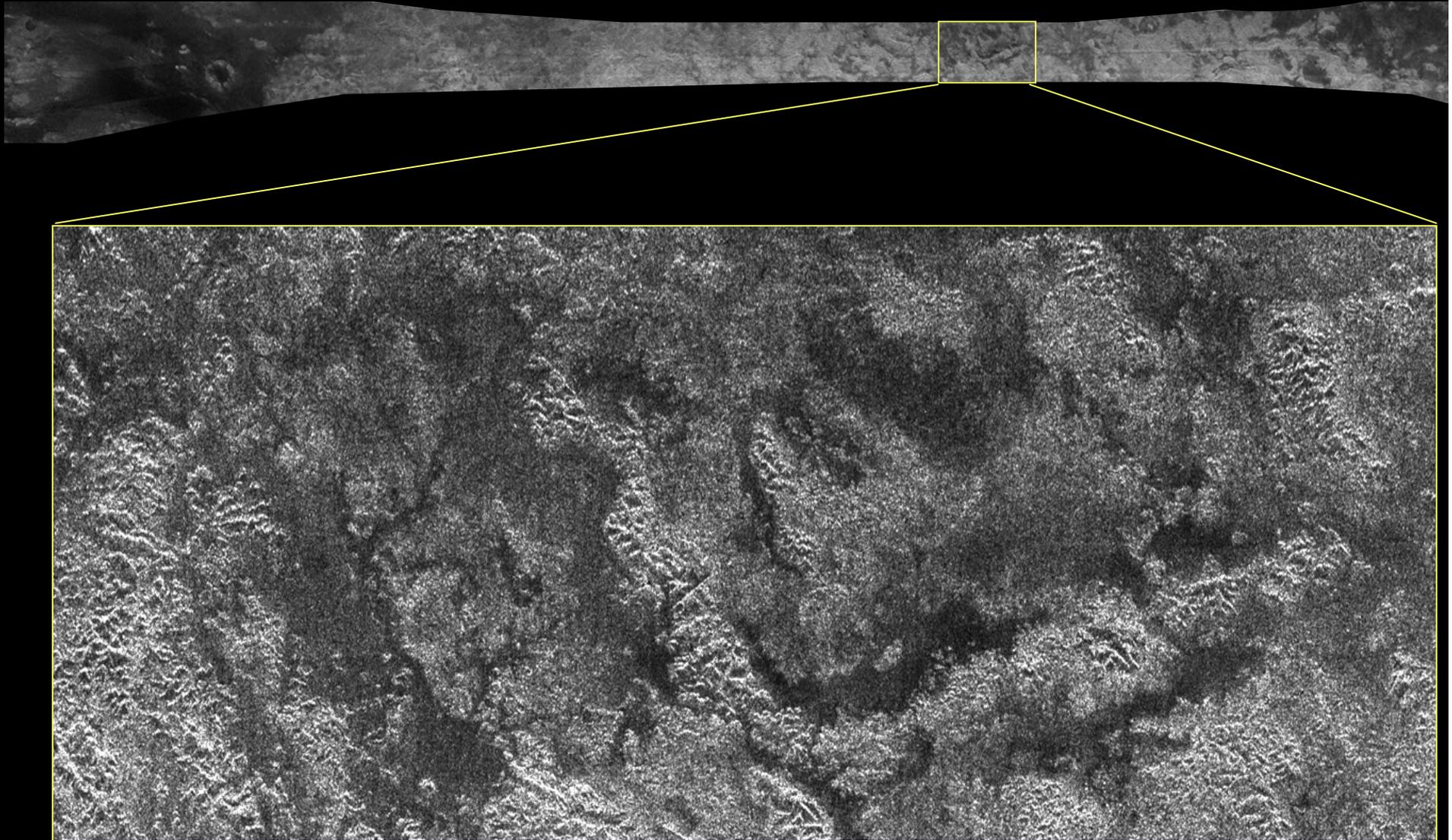
**Détails dans les «mers»**



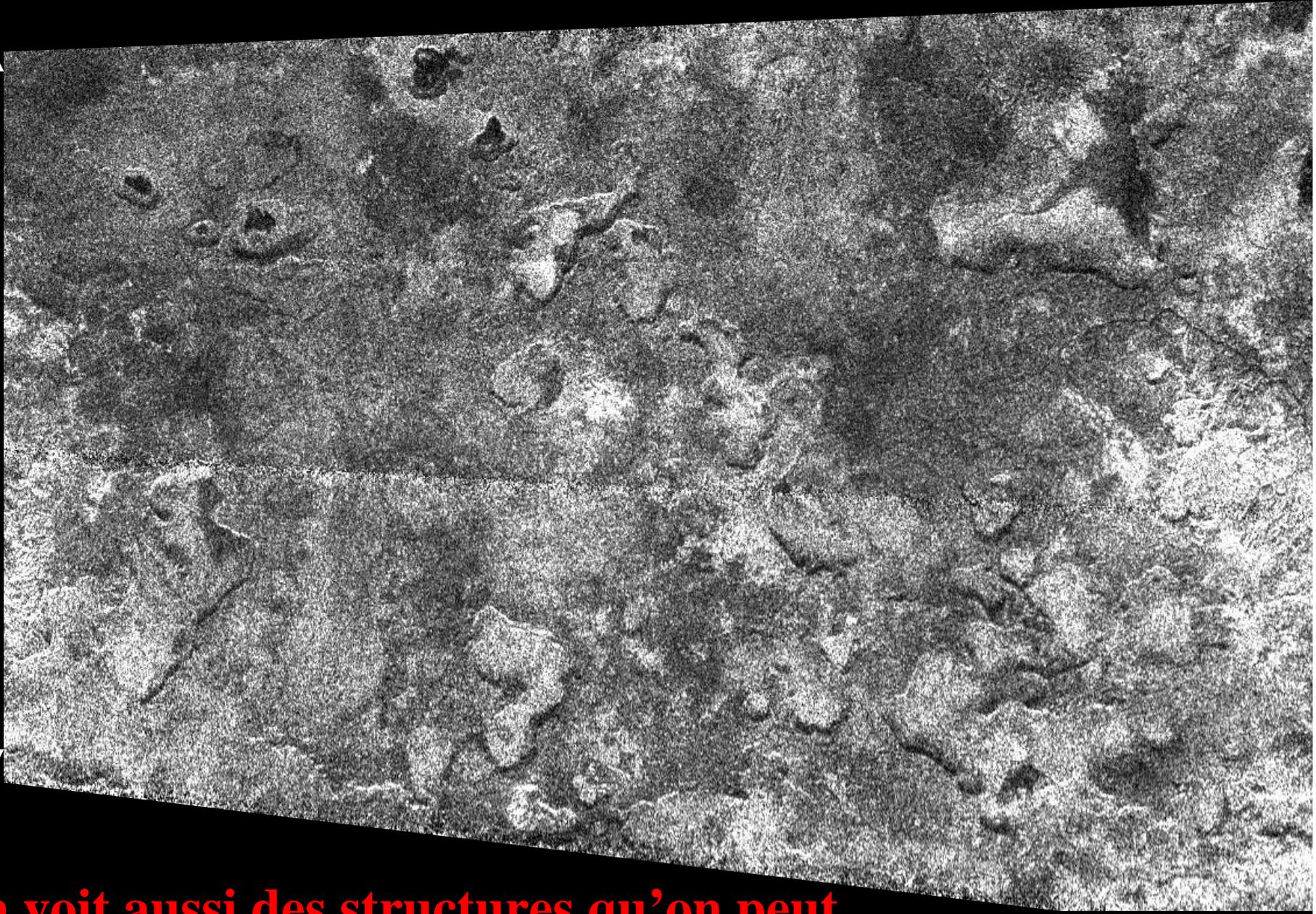


**Sur les « continents, Rivières de CH<sub>4</sub> (ici à sec)  
et méandres**

**Gros plan sur le milieu du « continent » nommé Xanadu.  
Des montagnes, preuve d'un dynamisme et de  
mouvements dans la croûte de glace !**



150 km

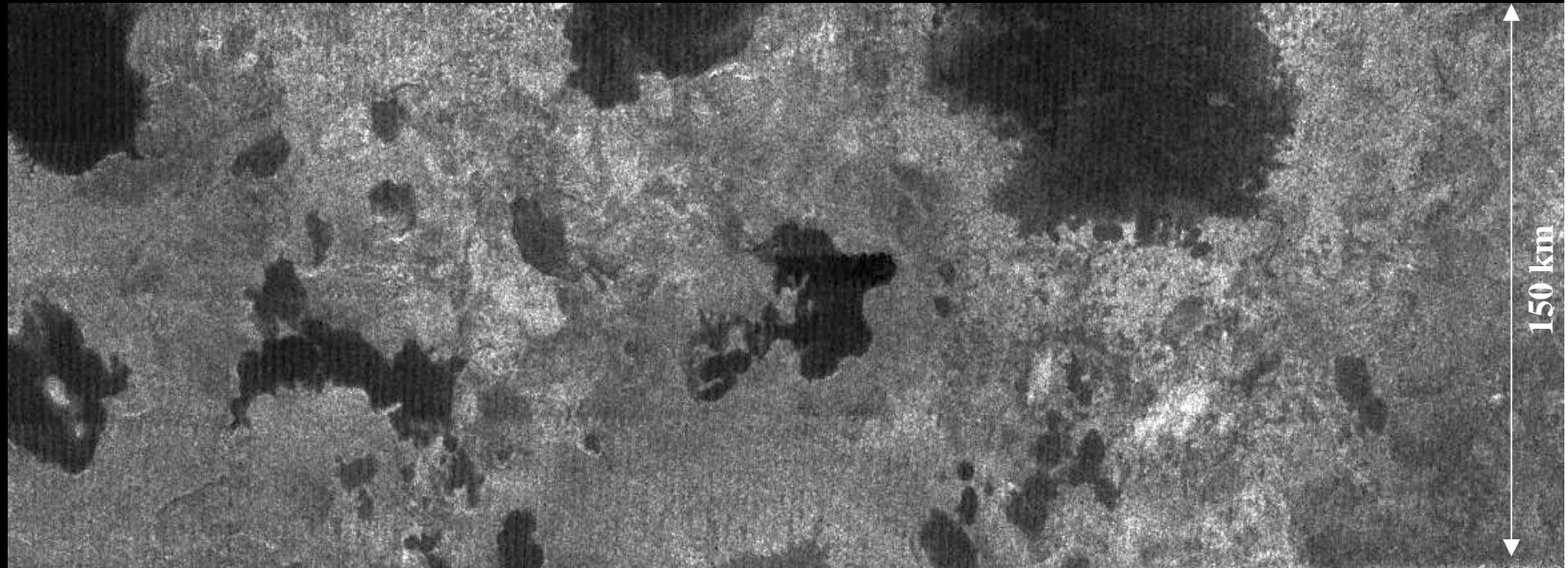


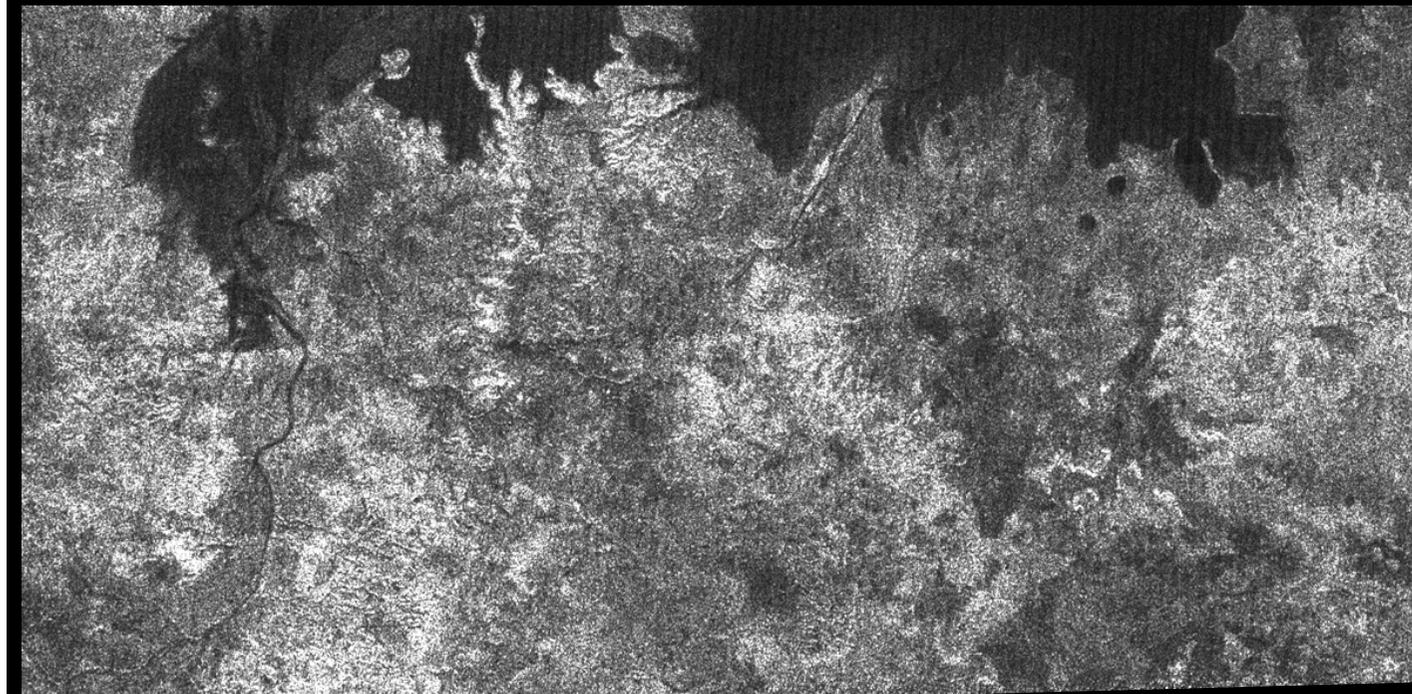
**On voit aussi des structures qu'on peut interpréter comme des caldeiras (cratères volcaniques)**



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

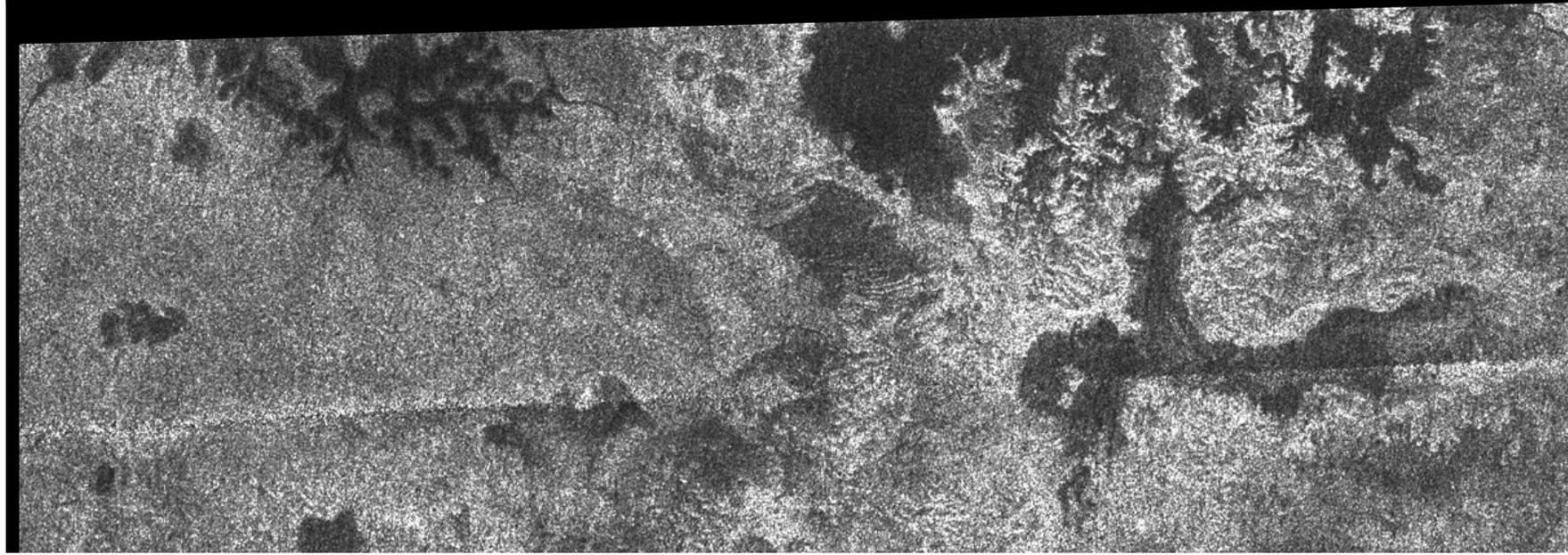
**Et les survols radar de juillet et septembre 2006 (puis beaucoup d'autres depuis), au dessus du Pôle Nord plongé dans la nuit polaire, montrent de très probables lacs, lacs de méthane liquide (ou plutôt d'un mélange méthane-éthane) à  $-190^{\circ}\text{C}$ .**





100 km

**D'autres survols polaires, d'autres lacs. Des lacs de montagnes.**





**Estuaire et delta « titanien »**



**Estuaire et delta  
terrestre (le Var dans  
le lac du Castillon, photo IGN)**



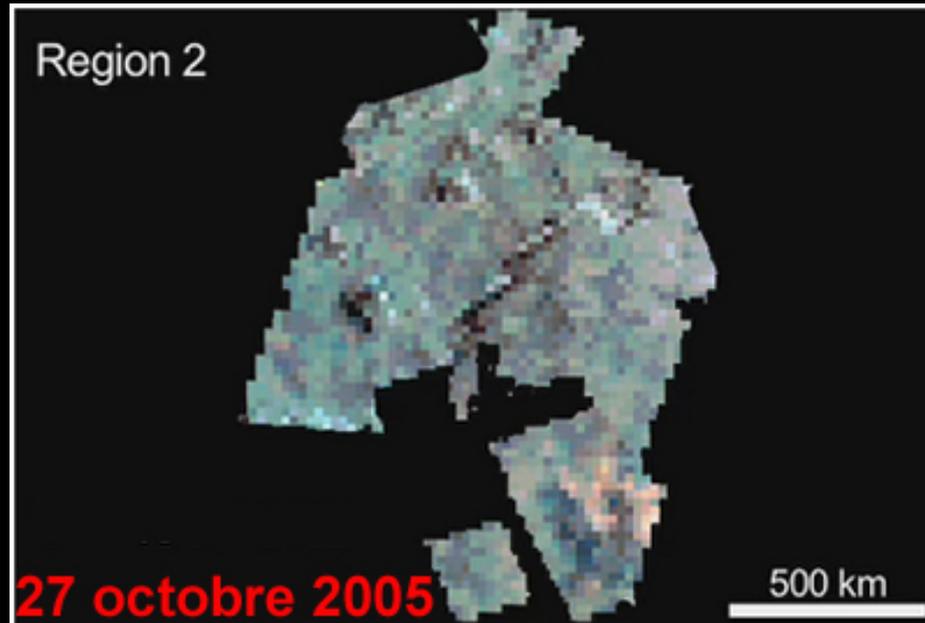
**Voici à quoi pourrait ressembler un paysage polaire de Titan pendant le soleil de minuit : montagnes de glaces salées par des macro-molécules organiques, rivières et lacs d'hydrocarbures légers (méthane et éthane à  $-190^{\circ}\text{C}$ ).**

**Méthane et éthane liquides étant de bons solvants organiques (non polaires il est vrai), on peut y supposer une chimie organique fort complexe, et pourquoi pas plus?**

An infrared (IR) image showing a bright, circular sun at the top center, with its light reflecting off a smooth, dark surface below it, creating a clear, bright arc. The background is dark, suggesting a night or low-light environment.

**Depuis 1 ans,  
c'est le printemps  
au nord, et le  
soleil éclaire le  
pôle, régions des  
lacs. Voici une  
vue (IR) prise le 8  
juillet 2010 où  
l'on voit le soleil  
se réfléchir sur la  
surface lisse du  
plus grand de ces  
lacs polaires.**

**Mais d'où vient ce méthane qui est présent dans  
l'atmosphère et ses lacs, malgré sa destruction ?**



**Le plus bel exemple de  
« volcanisme actif »  
probable, sans doute un  
recouvrement eau +  
matières organiques  
(hydrocarbures lourds),  
vu aux IR.**

Atmosphère, avec nuages, avec pluies de méthane

Couche de glaces « sales »

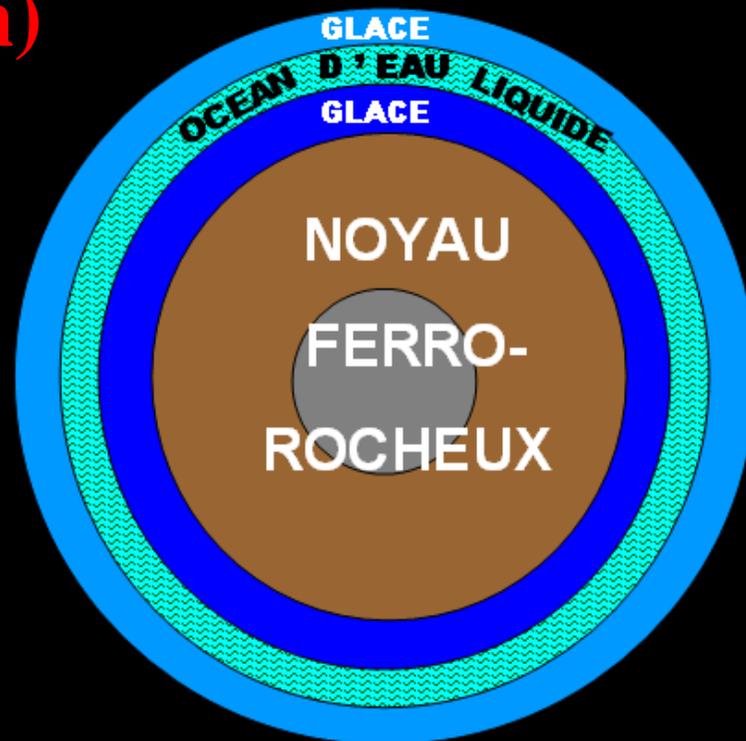
Ganymède, satellite de Jupiter, et sans doute Triton (satellite de Neptune) ont une structure identique et une activité tectono / hydro-magmatique actuelle ou « récente », avec une différence majeure : très peu d'atmosphère sur Triton, et pas du tout sur Ganymède, avec toutes les différences superficielles qui s'en suivent !

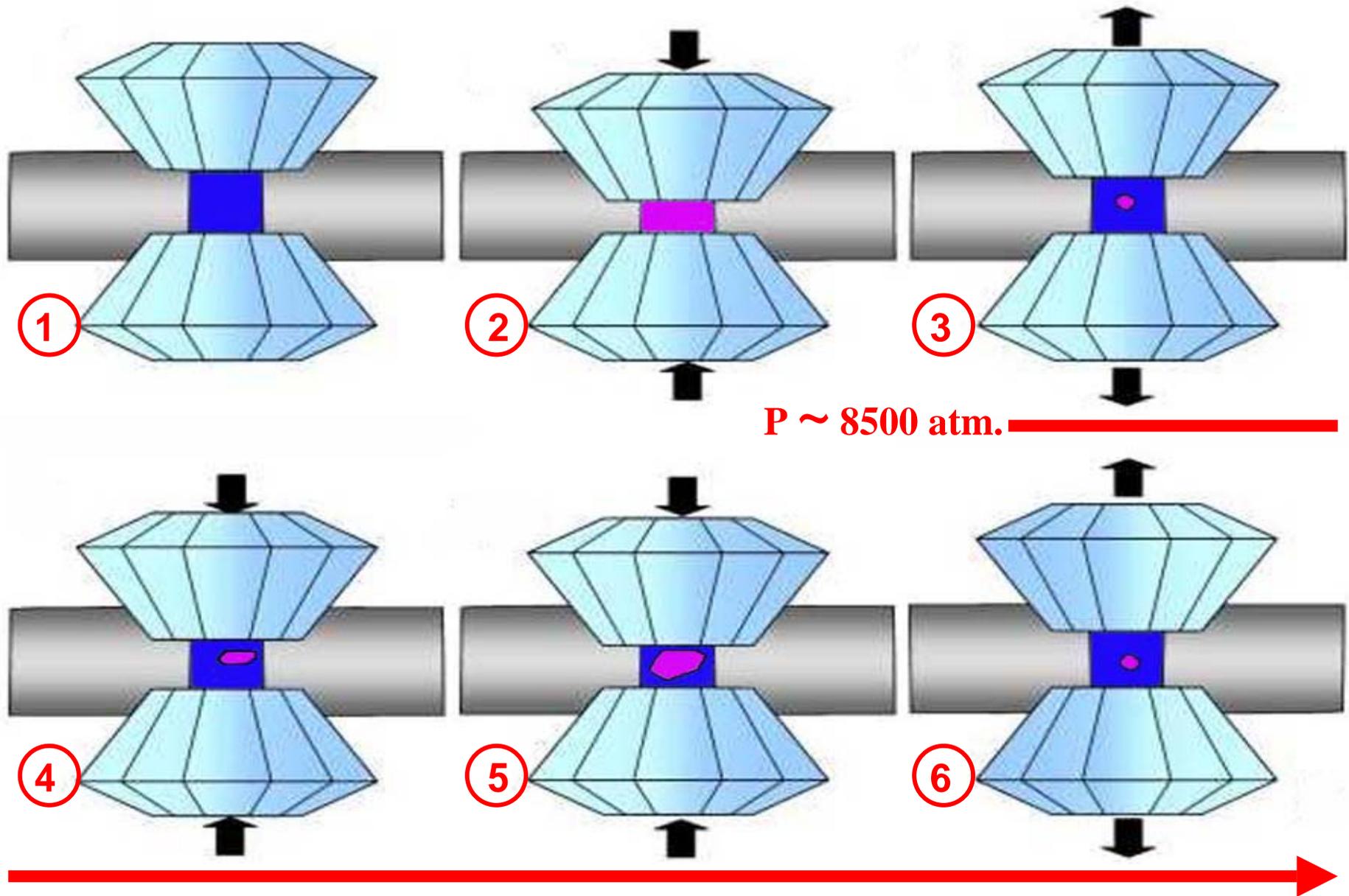
Résumé de la structure probable de Titan

De la glace en surface, normal, il fait  $-200^{\circ}\text{C}$ .  
En profondeur, il fait plus chaud, l'eau est liquide.  
Toujours normal !

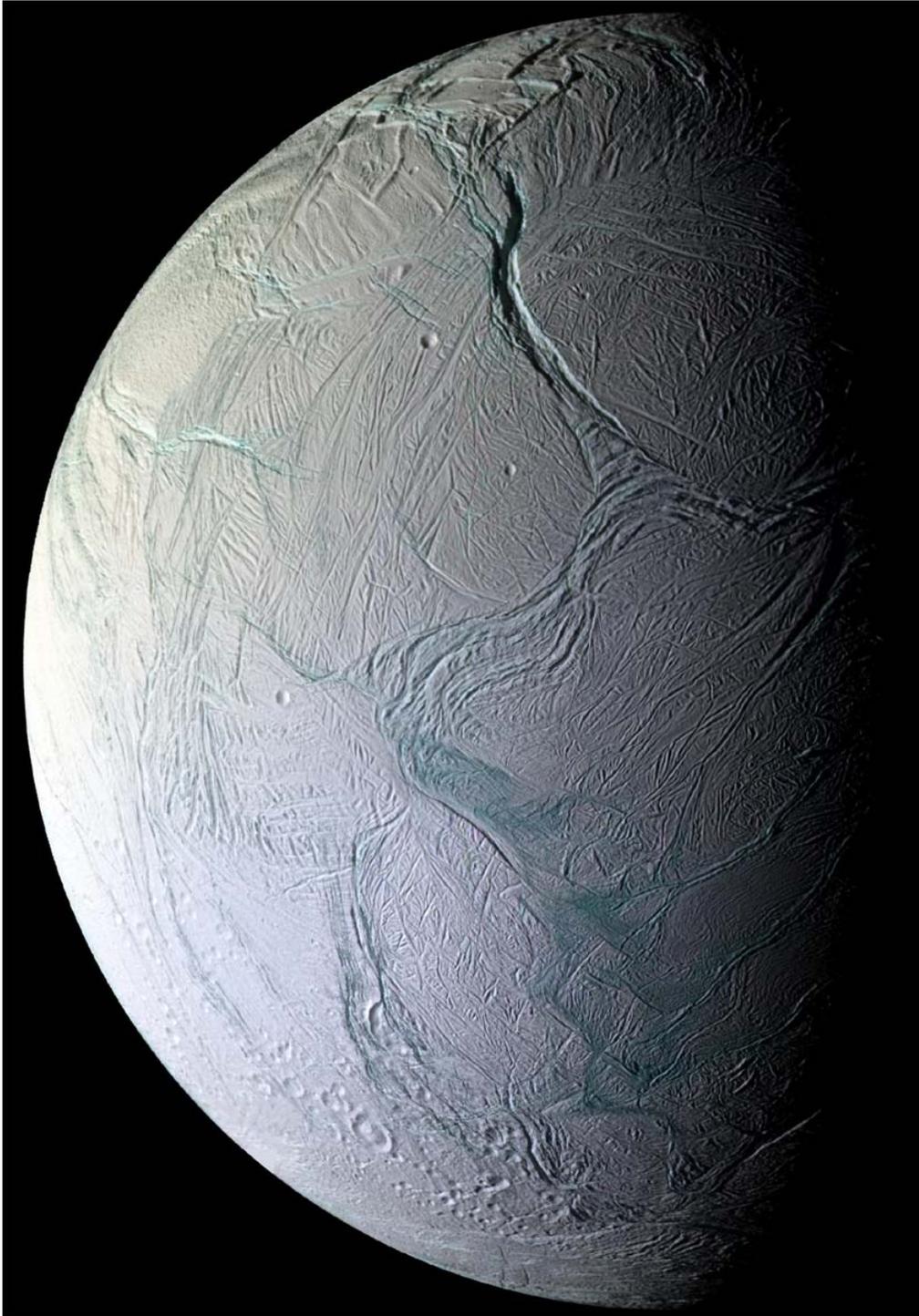
Mais pourquoi une nouvelle couche de glace  
encore plus en profondeur alors qu'il fait encore  
plus chaud ? **A cause de la pression !**

(voir film)

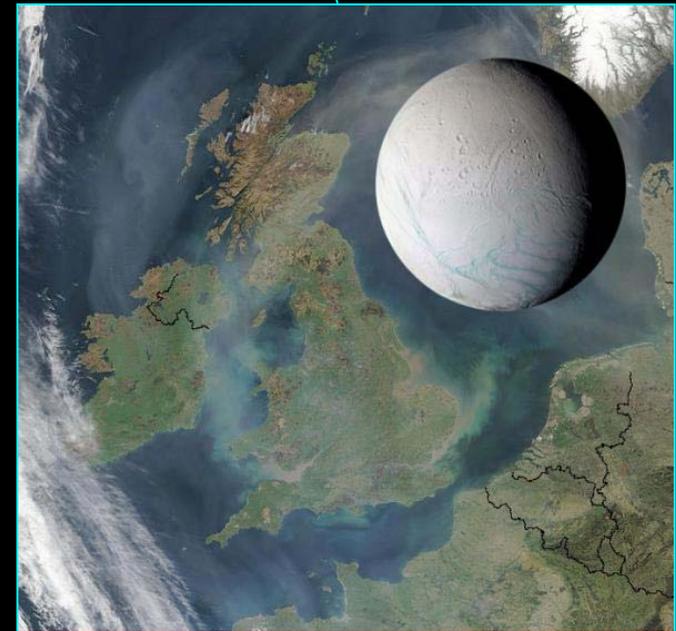


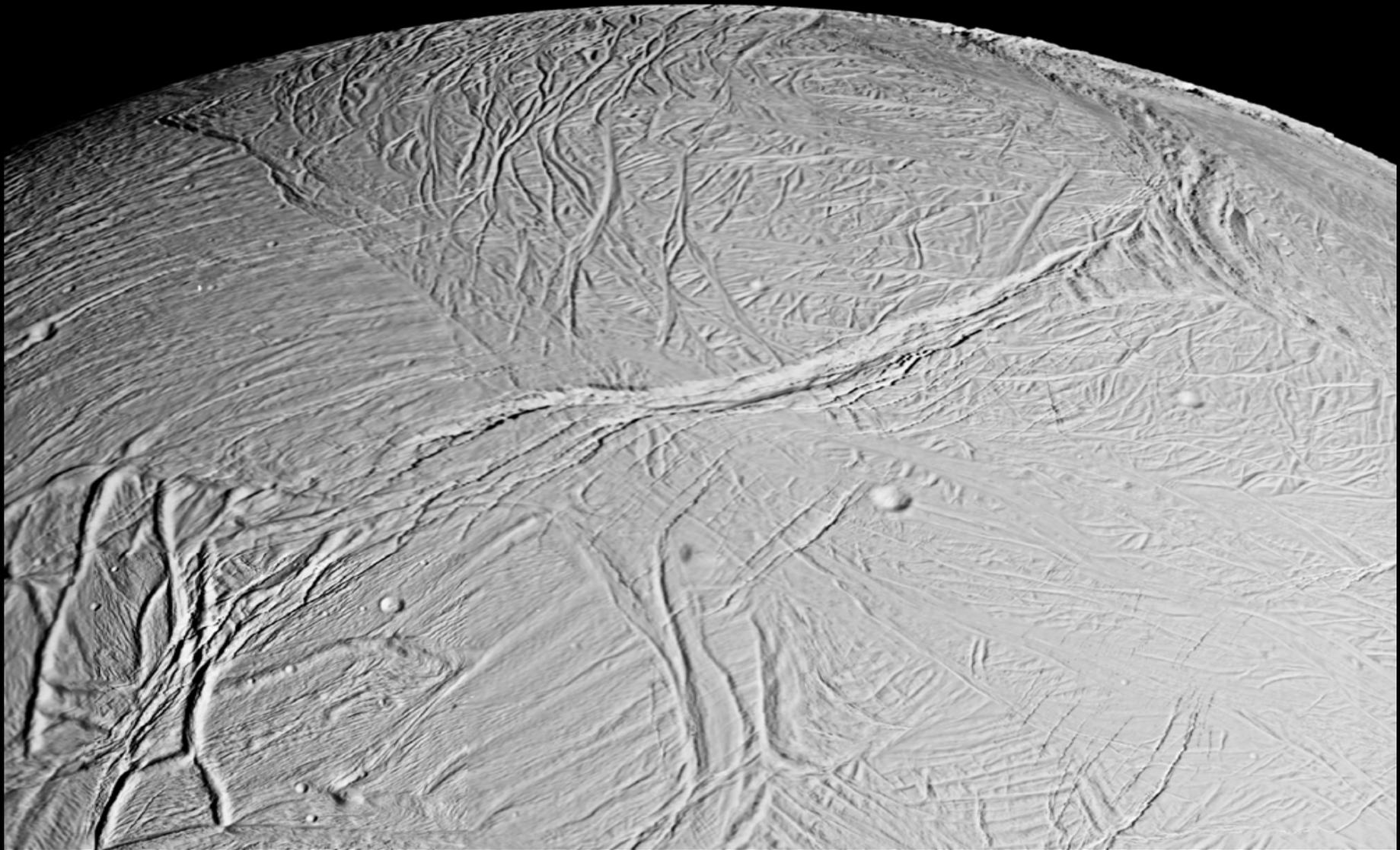


**Principe du film sur la cristallisation de la glace sous pression.  
Le film (cliquer sur la diapo) concerne les étapes 3 et suivantes.**



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

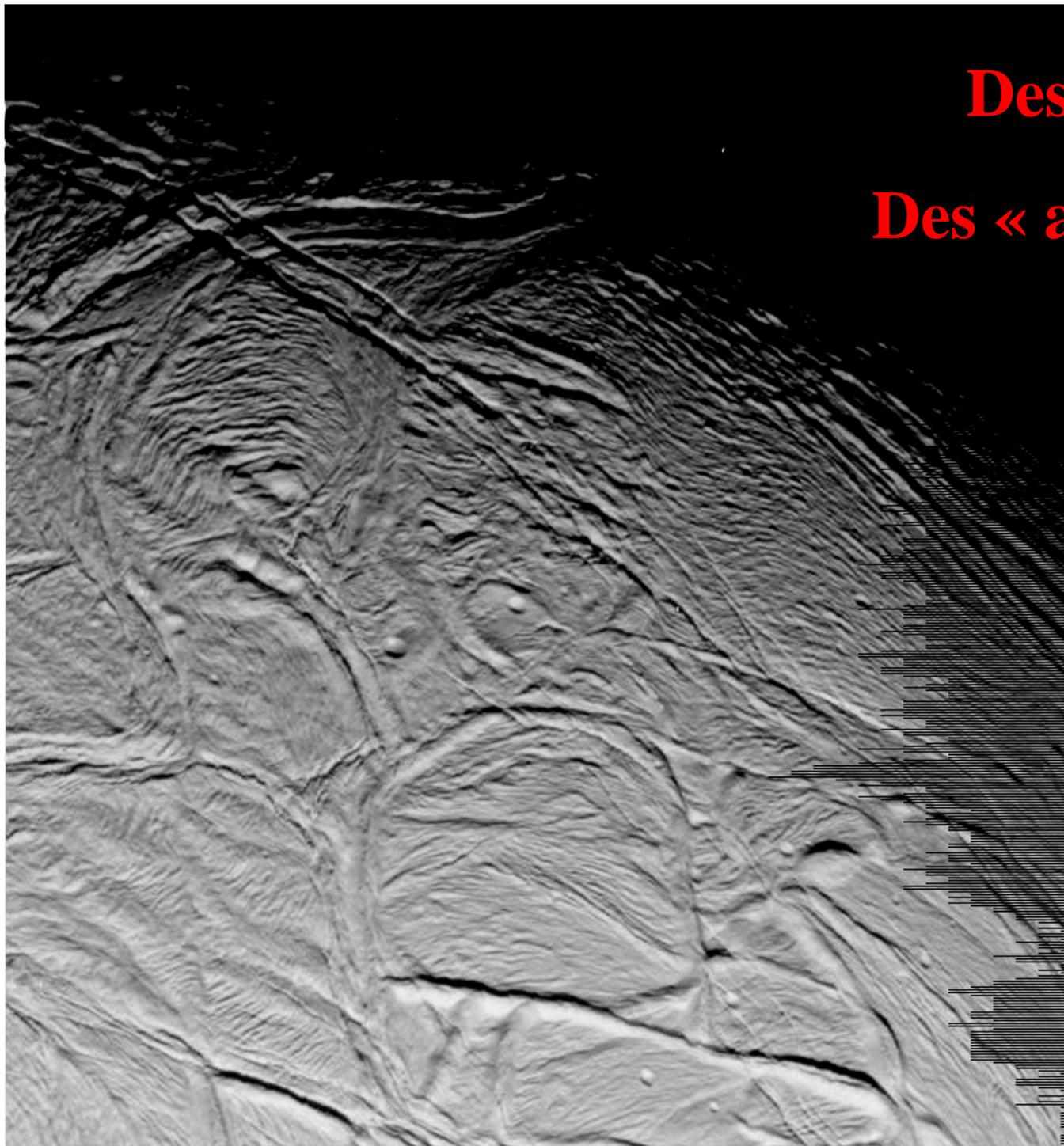


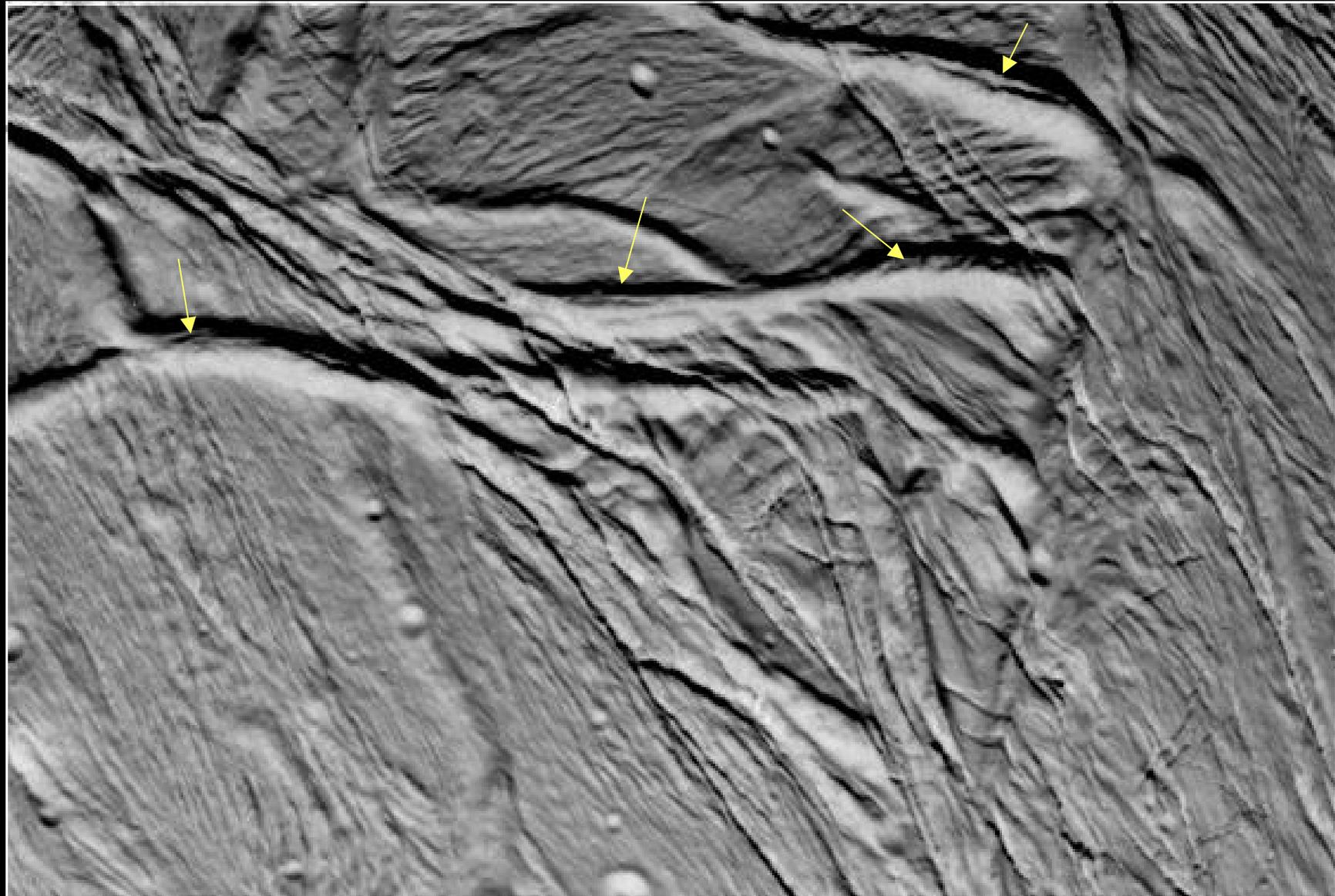


**Des images rapprochées du 1er survol (02 / 2005).  
Quel satellite, quelle activité !!**

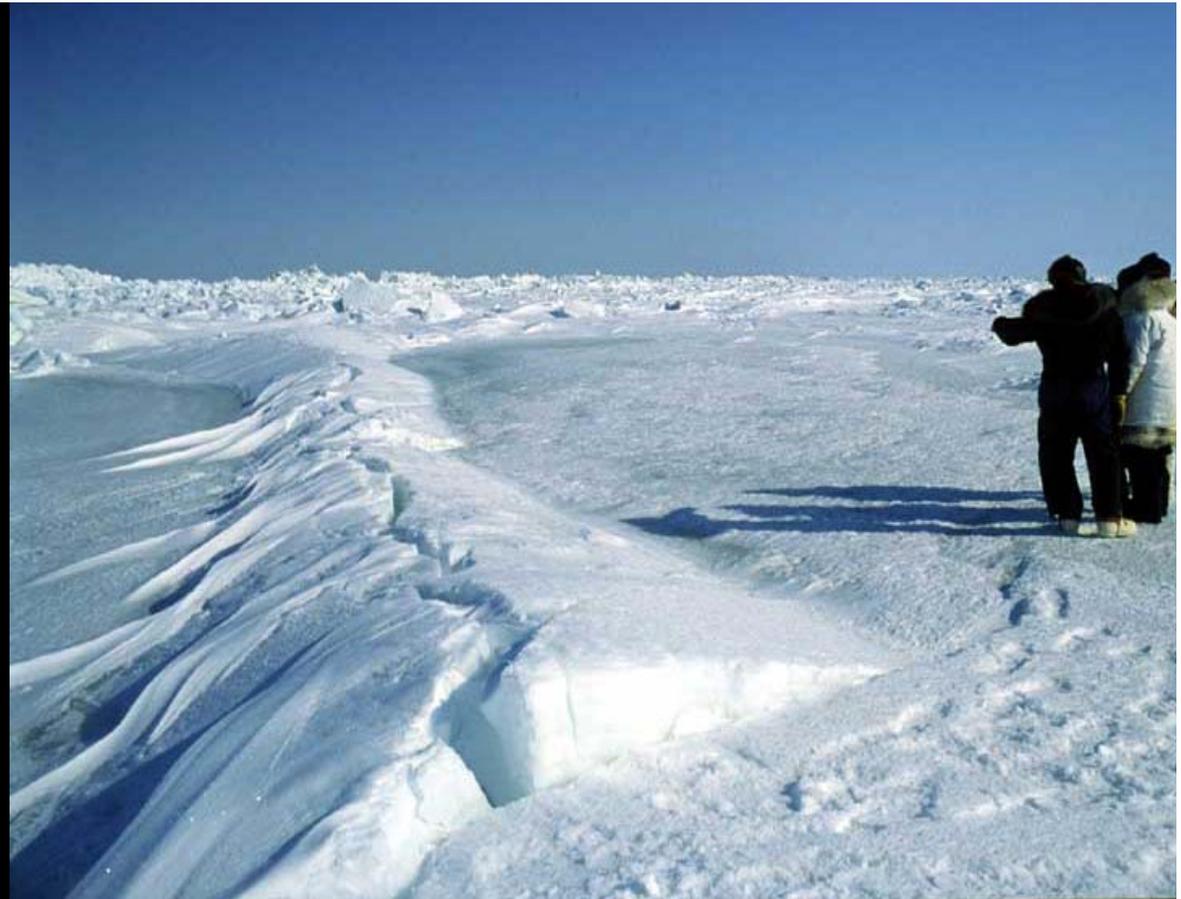
**Des giga-rides .**

**Des « anticlinaux » ??**



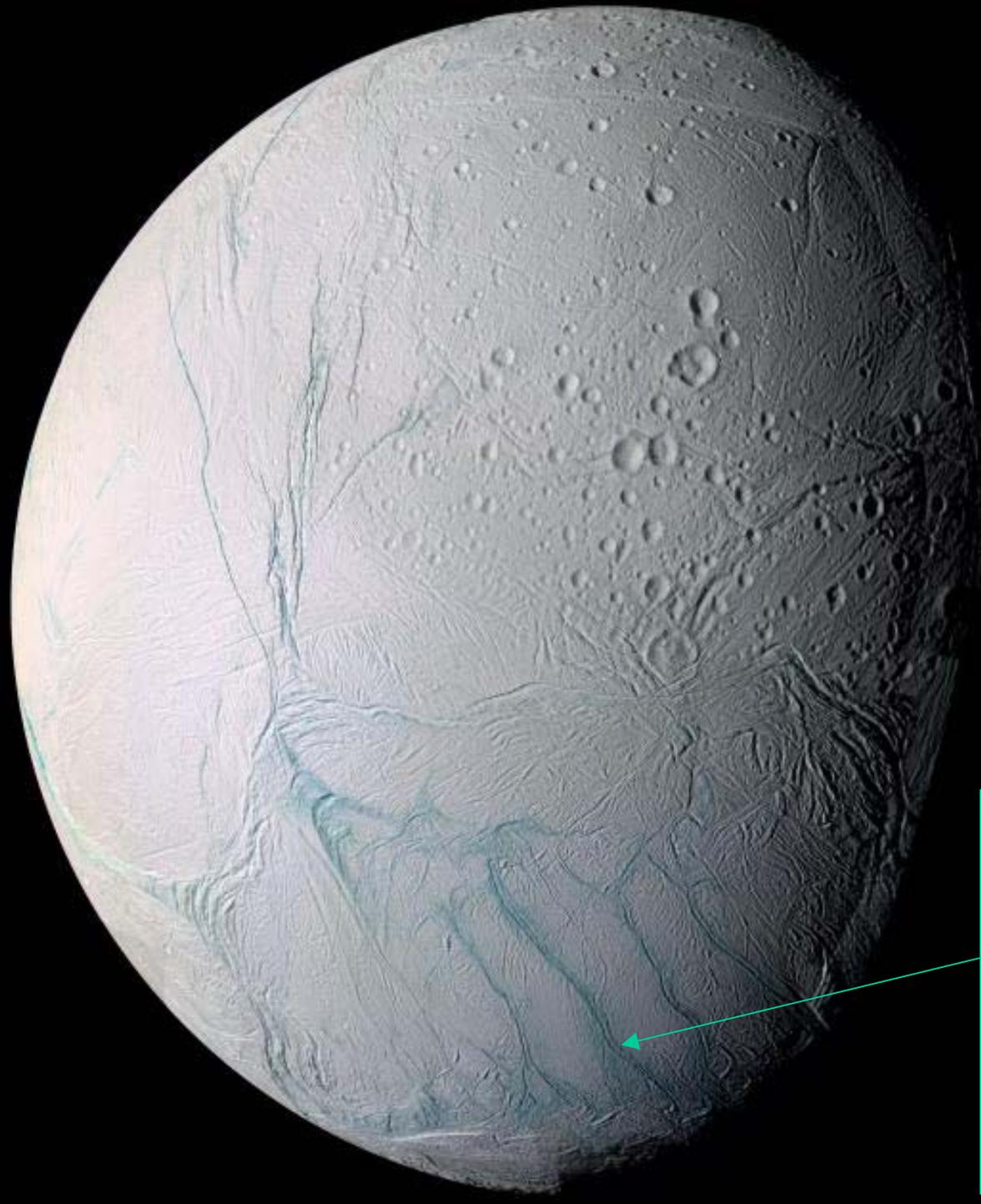


**Détail de ces giga-rides. Parfois, il y a une fracture sommitale.**

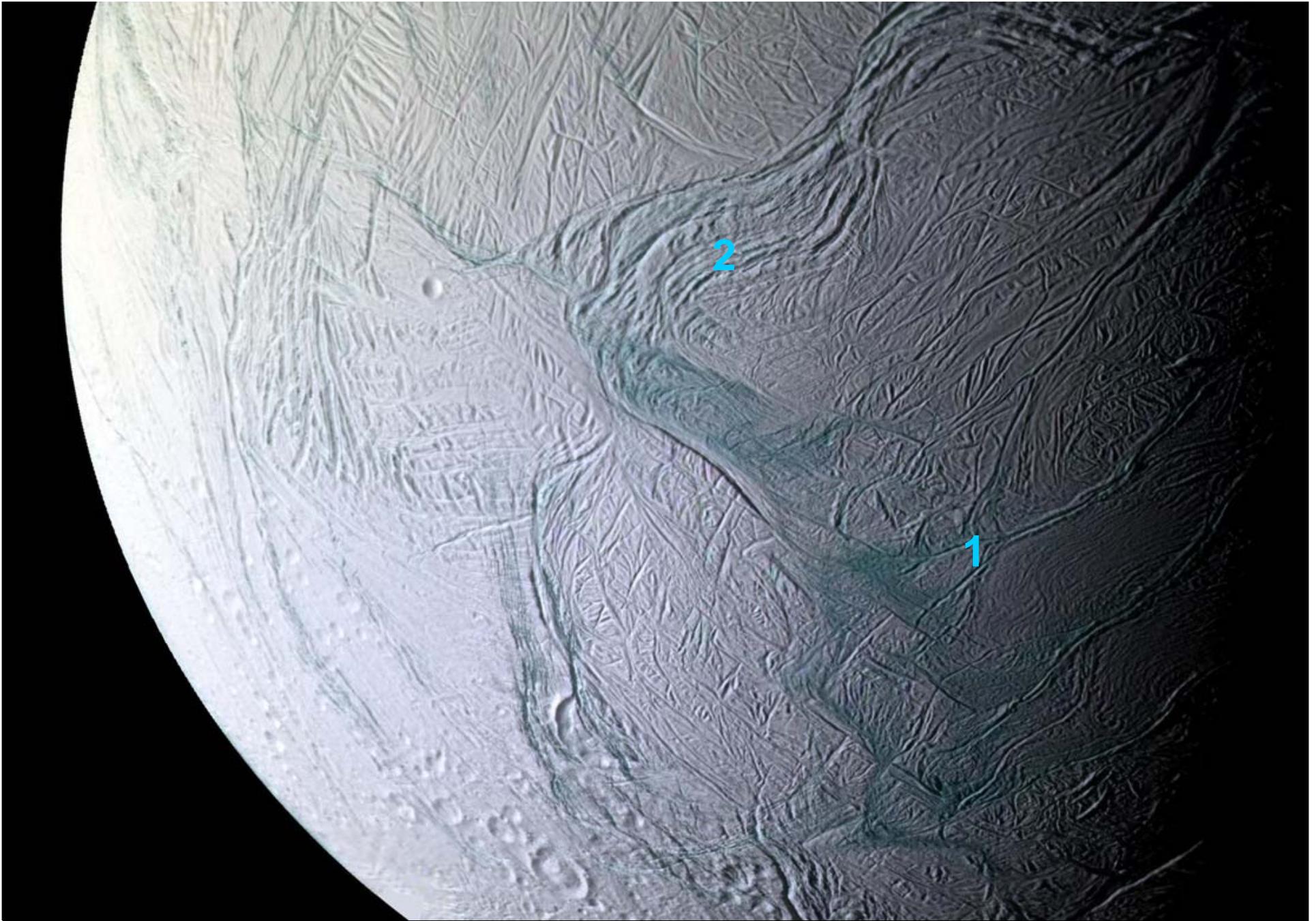


**Cela ressemble à de giga-  
« rides de pression » dont  
voici 2 mini-équivalents  
terrestres, à Hawaï et en  
Antarctique**

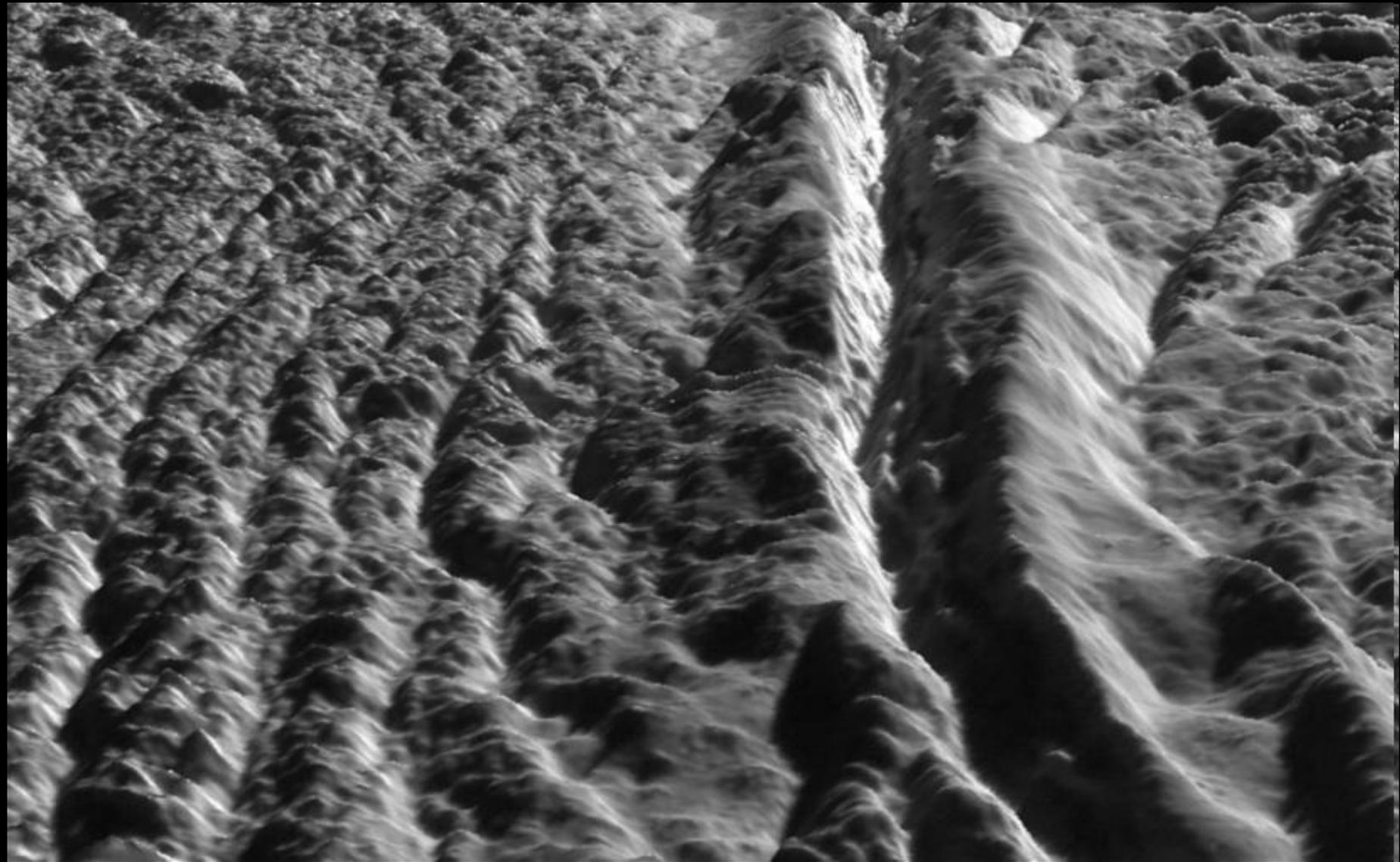
**Le 14 juillet  
2005, Cassini a  
survolé  
Encelade par le  
sud**



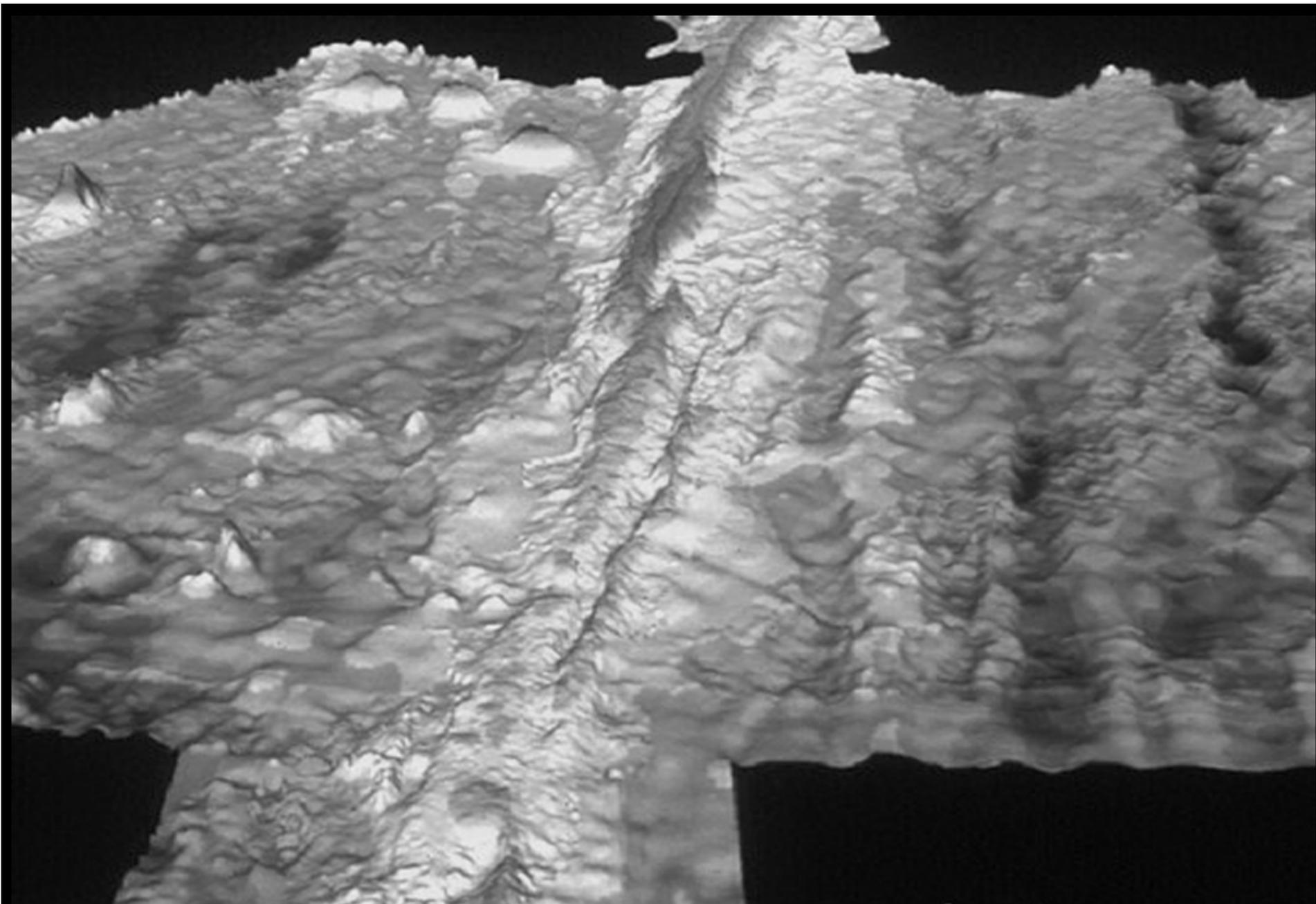
**Le Pôle Sud, région  
avec moins de cratères  
et encore plus  
« tourmentée » que le  
reste, avec des  
« rayures de tigre »**



**Regardons deux détails de cette région près du Pôle Sud**



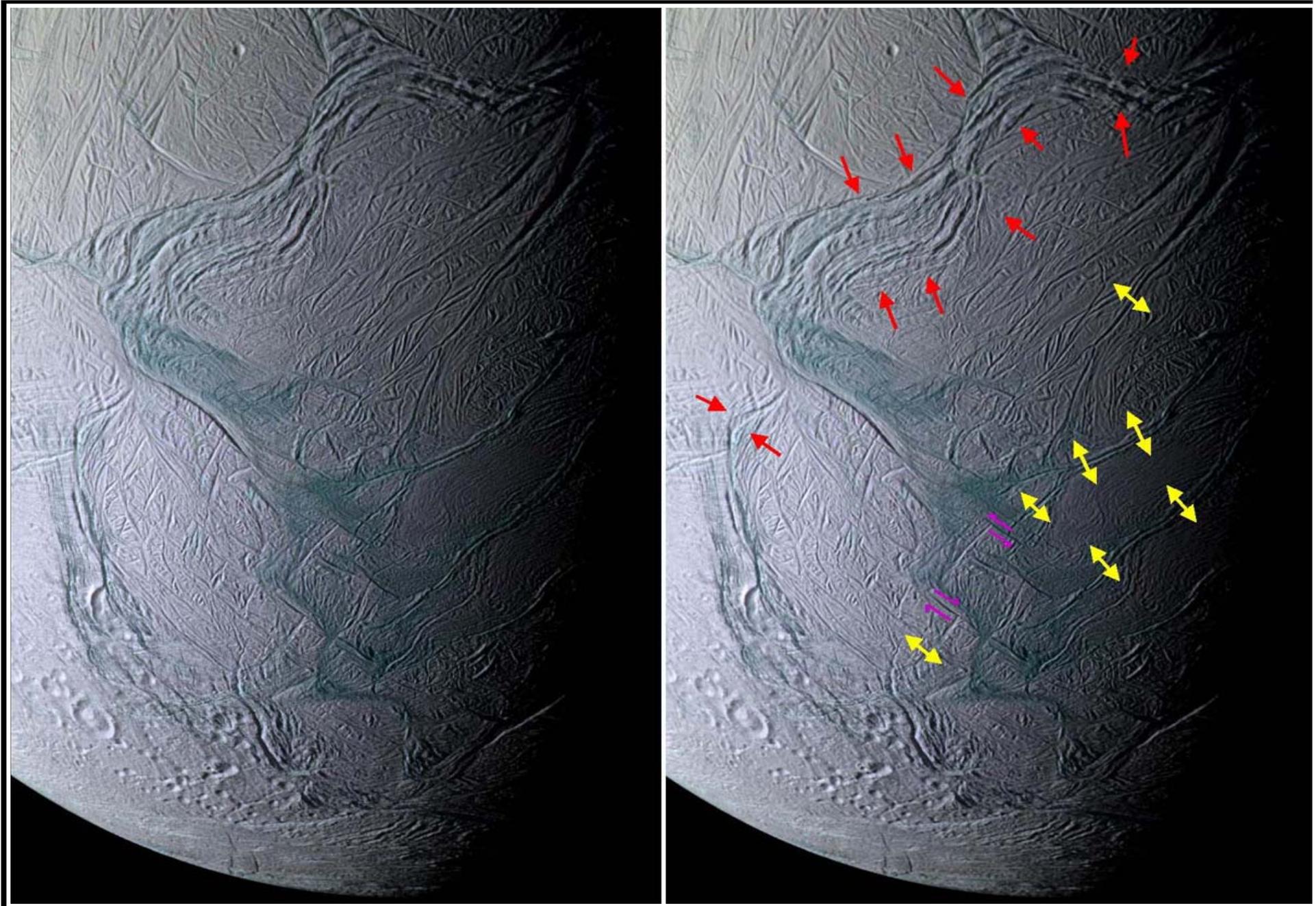
**(1) La « rayure de tigre » Damas, qui ressemble à une dorsale avec vallée axiale (dorsale lente)**



**Un MNT de dorsale terrestre**

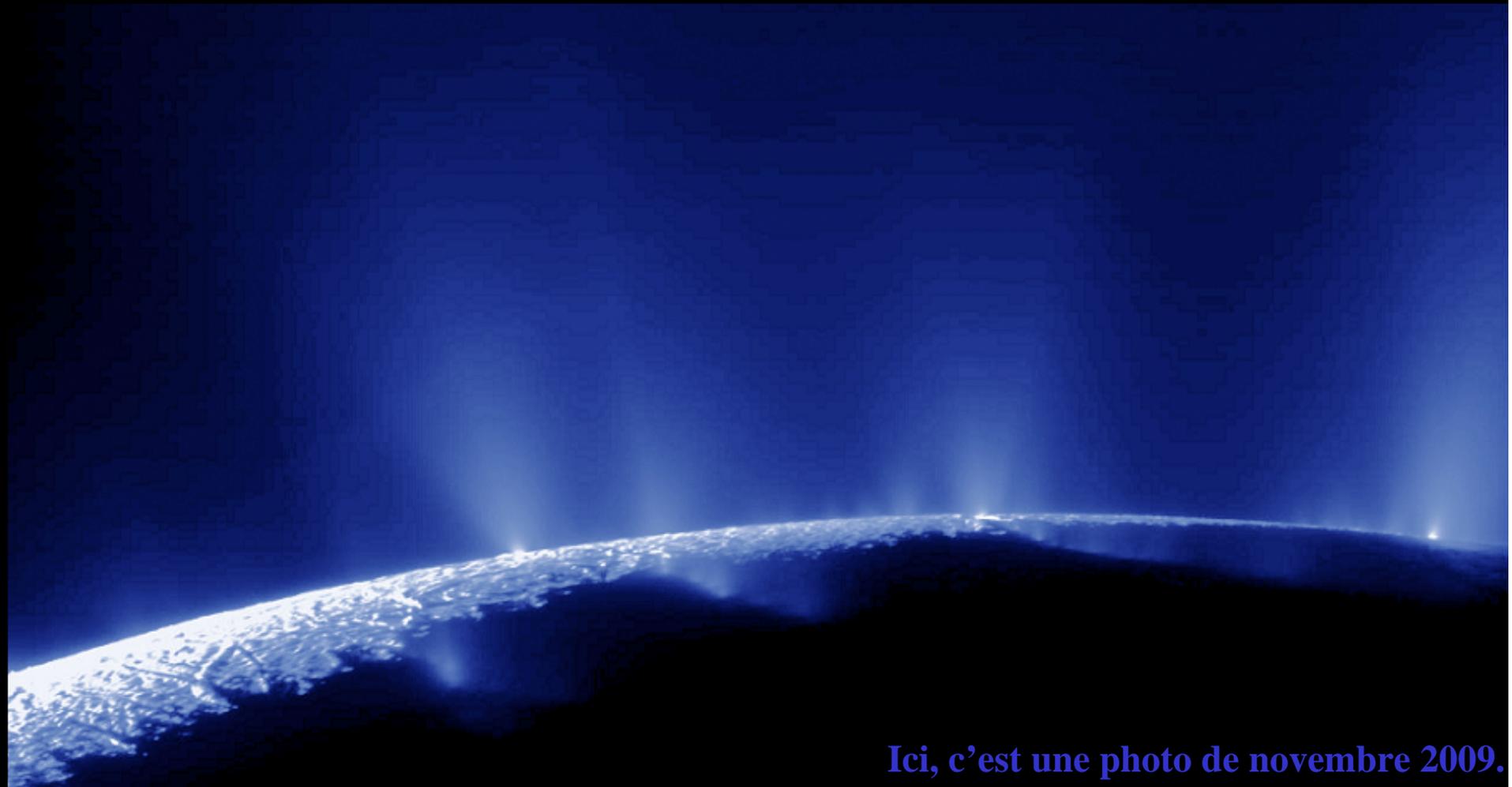


**(2) Ce fragment de Montagne Circum-Polaire ressemble à une chaîne de collision**



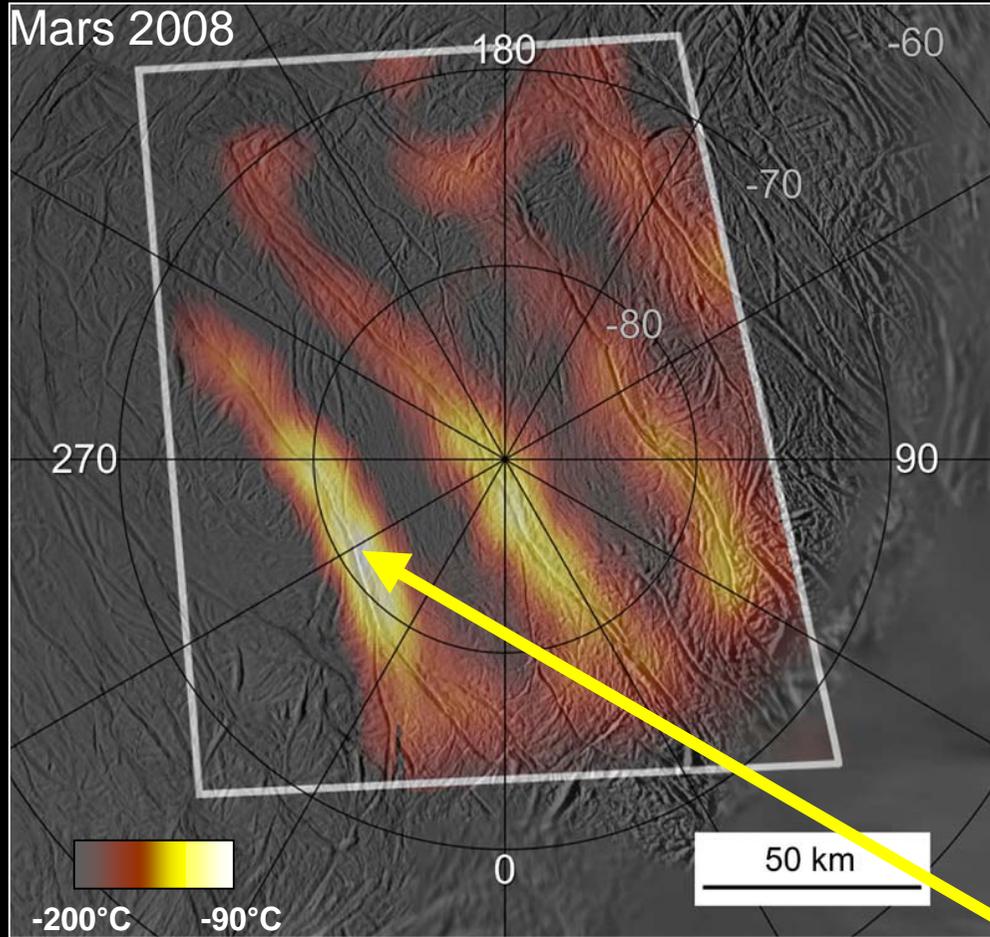
**Une pseudo tectonique des plaques sur Encelade ?**

**Et le 27 novembre 2005, Cassini découvre qu'il y a au dessus du Pôle Sud, des jets de micro-particules (de givre d'H<sub>2</sub>O) qui diffusent la lumière solaire. Il s'agit de volcans (d'H<sub>2</sub>O) actifs (des puristes les appellent geysers).  
Les panaches sortent par les « rayures de tigre ».**

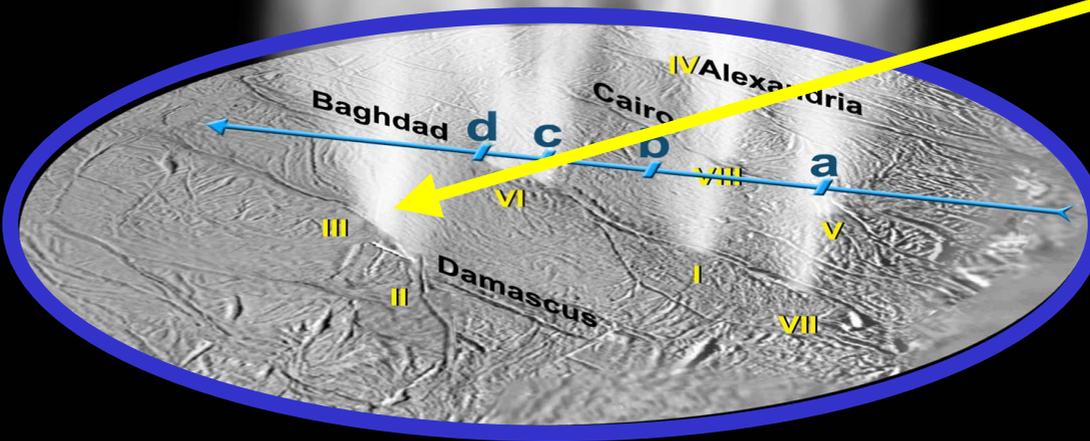
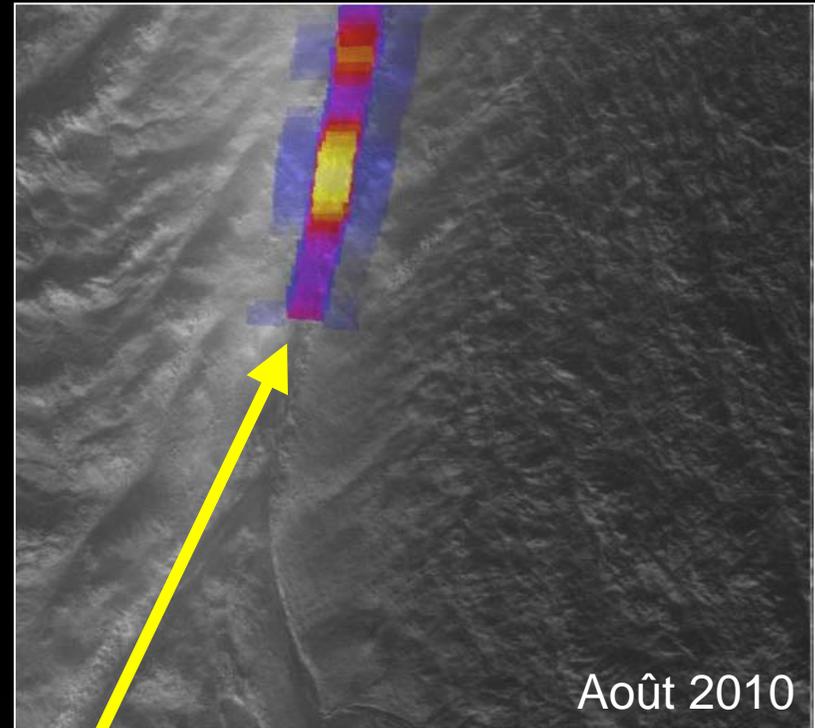


Ici, c'est une photo de novembre 2009.

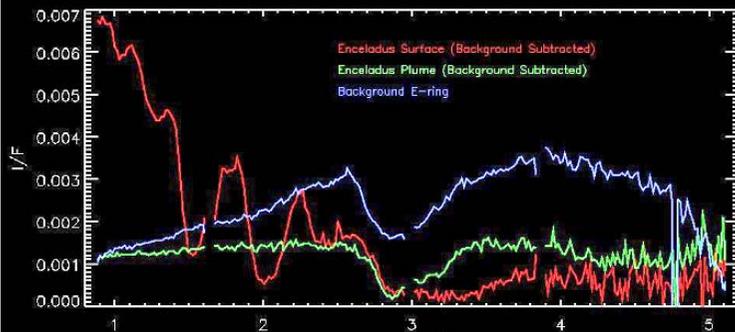
Mars 2008



## Données Infra-Rouge

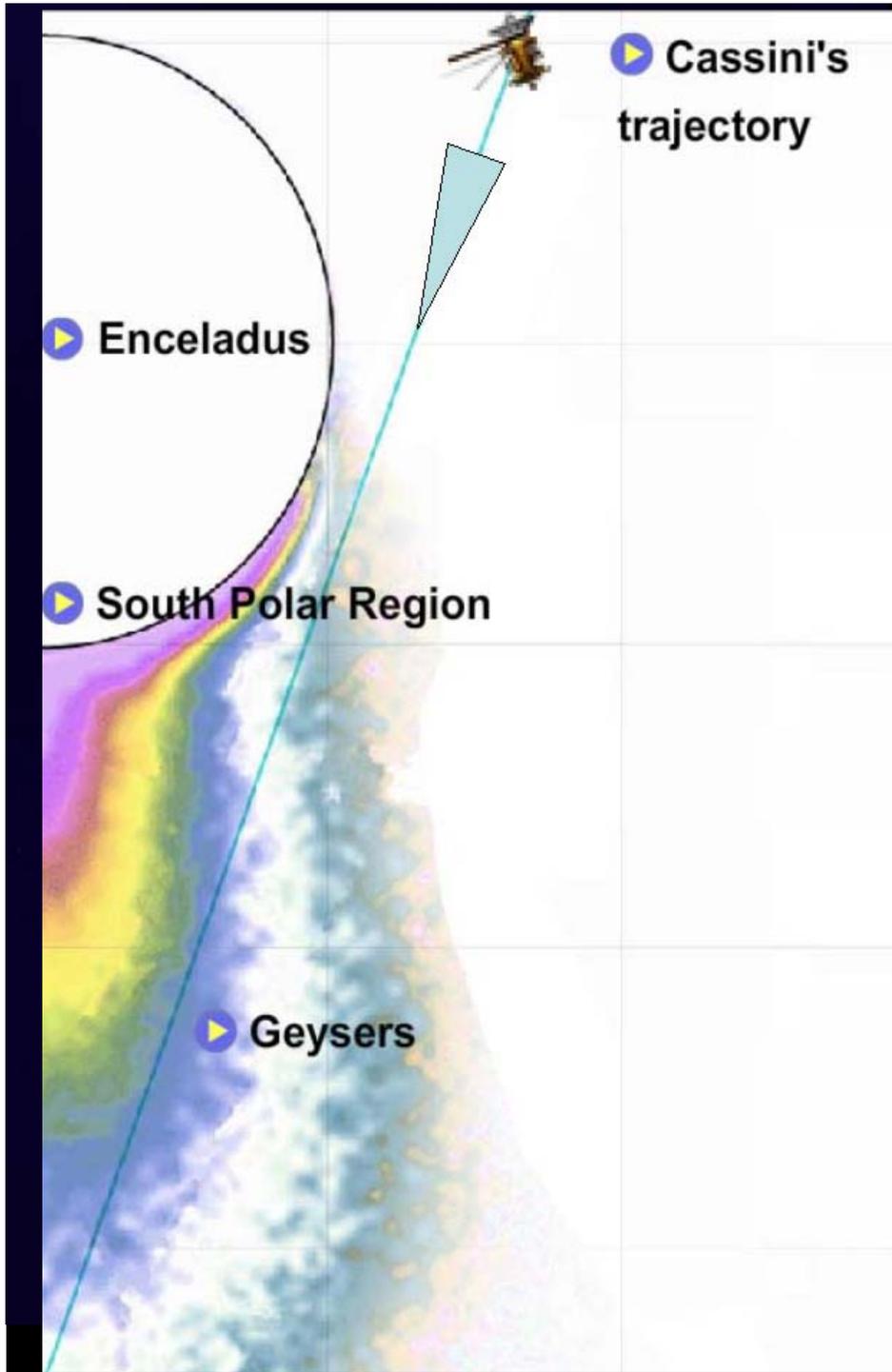


La température des « zones en gris » est de  $-200^{\circ}\text{C}$ . Là où elle est maximale, elle est de  $-83^{\circ}\text{C}$ , soit un excès de  $+117^{\circ}\text{C}$

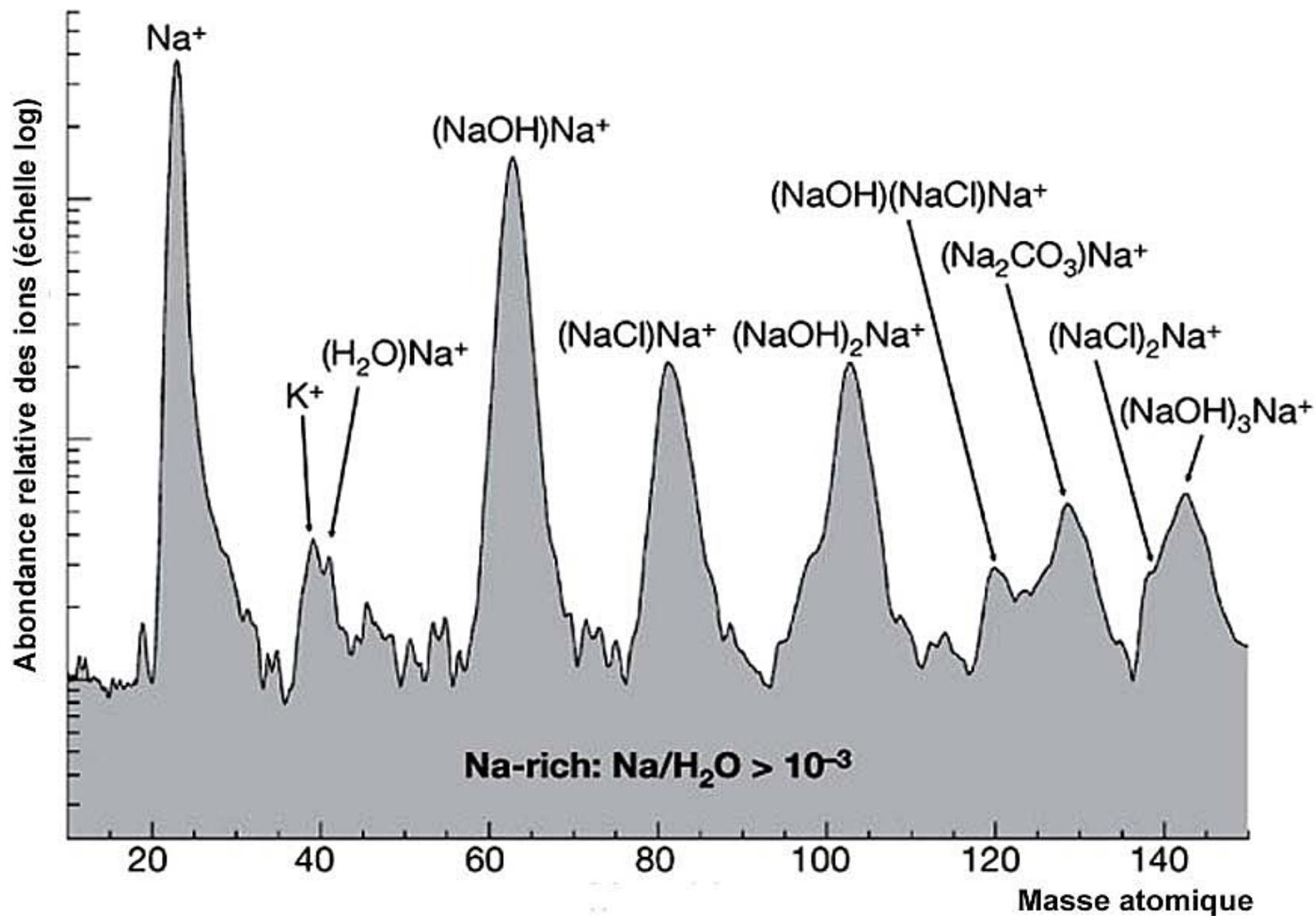


**Le panache de « fumée »,  
aussi grand qu'Encelade lui  
même**

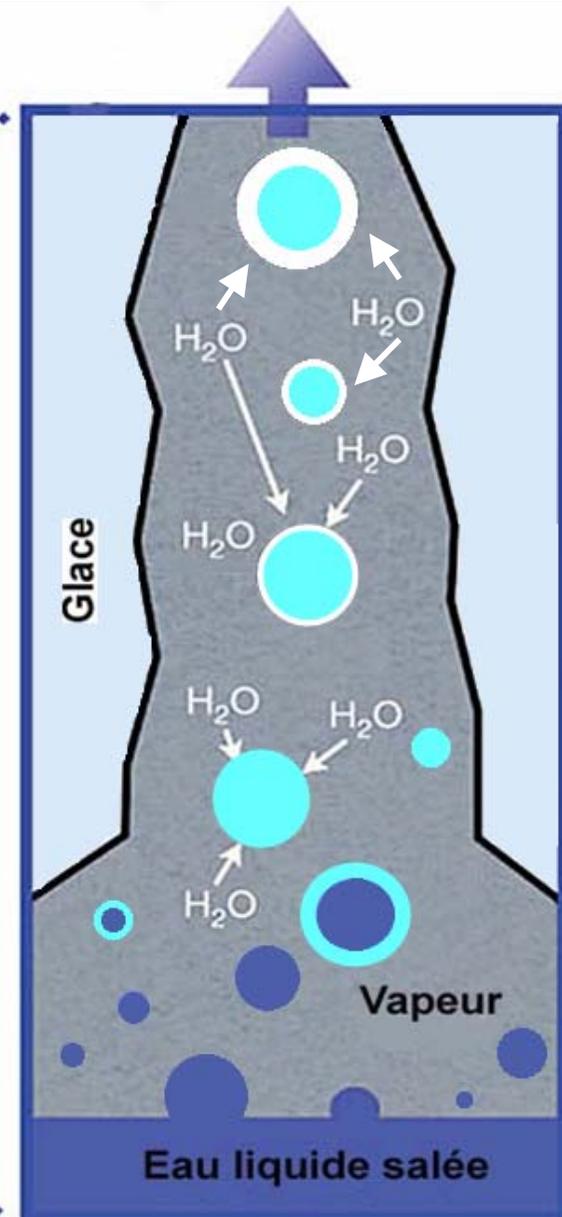
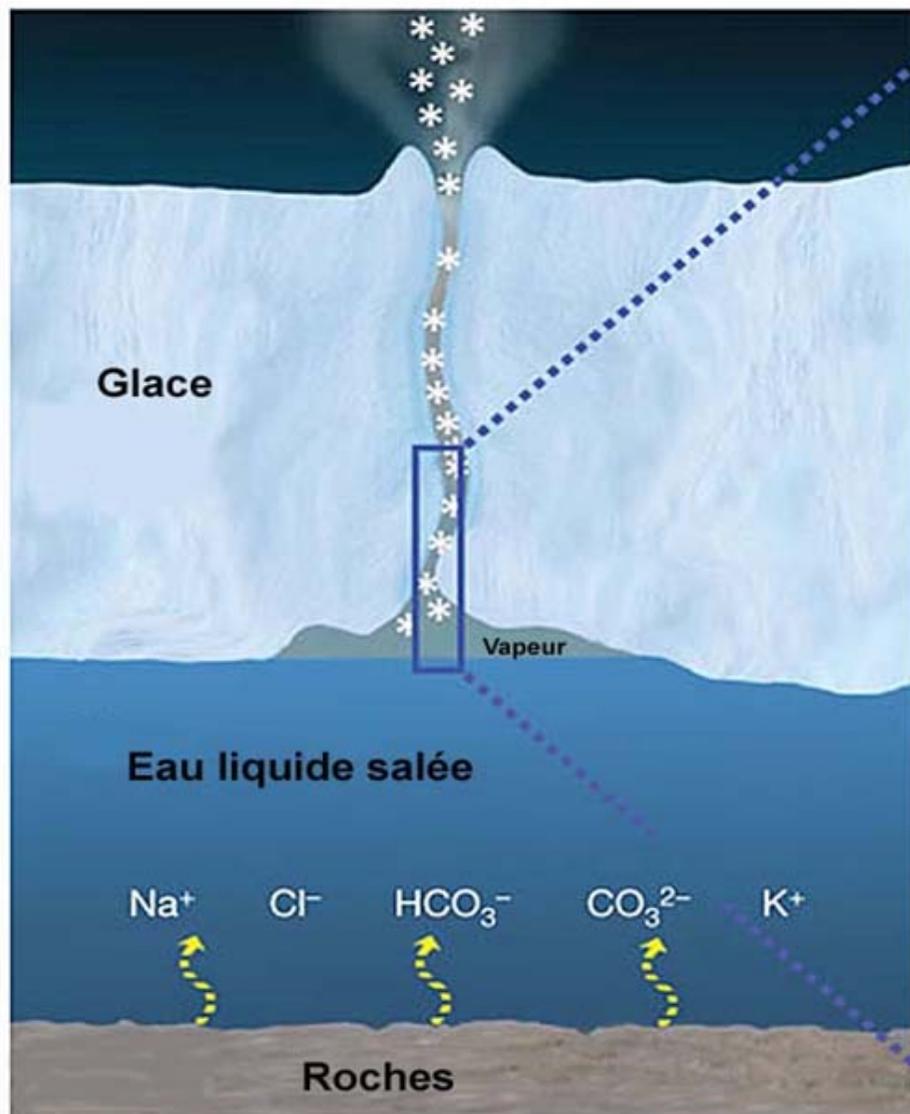
**La même « éruption » 5 ans plus tard (2010). Ce  
qui sort a été analysé « spectralement » : de la  
« fumée » de fines particules de glace d'H<sub>2</sub>O, sans  
raies spectrales du sodium.**



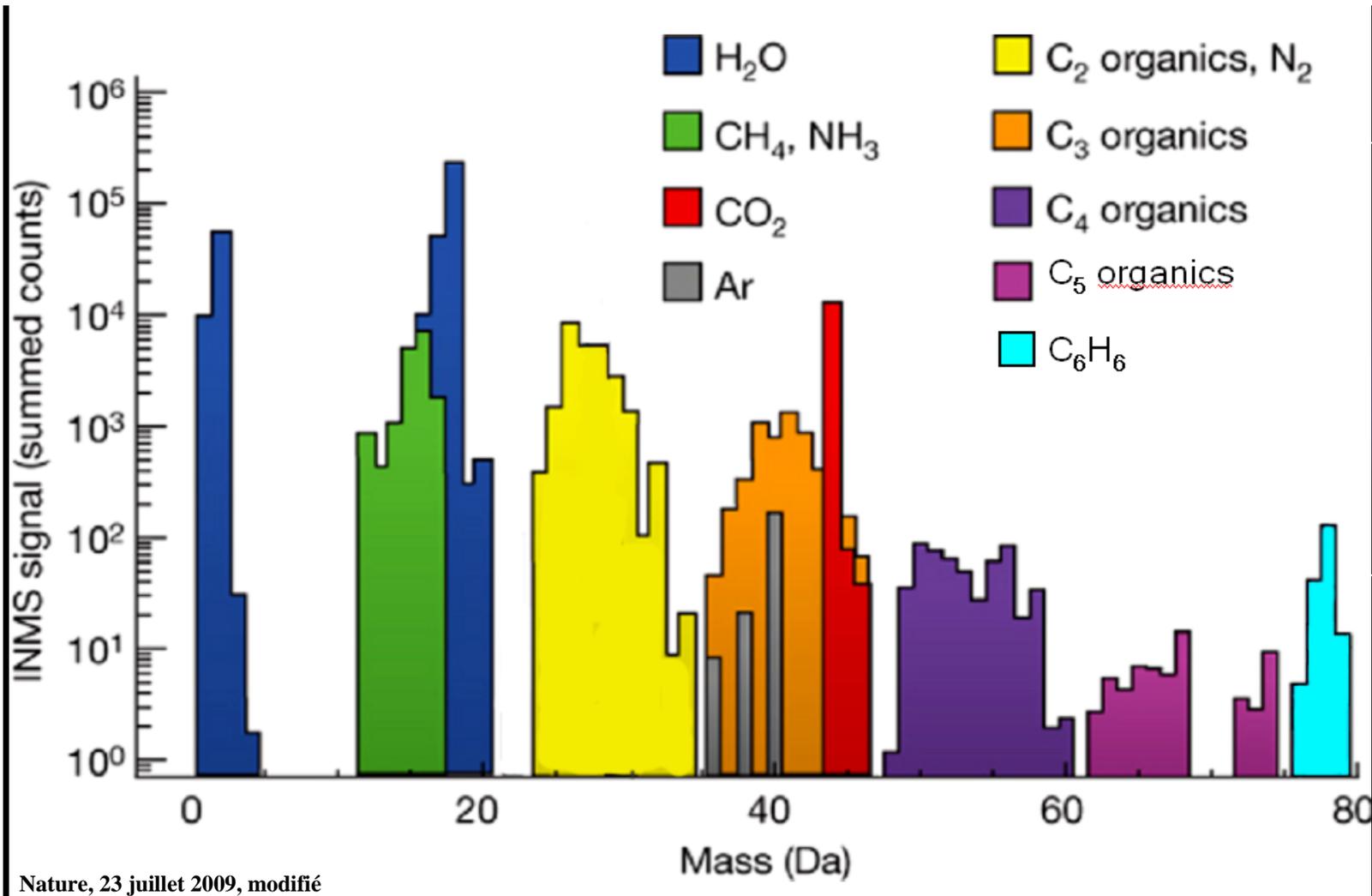
**Des survols ont été re-programmés pour traverser ces panaches « geyseriens ». Tous les instruments destinés à la haute atmosphère de Titan ont fonctionné à plein régime.**



**Le spectromètre de masse indique que quelques % des micro-particules sont constitués de glace salée**



**Ce qui impose la présence d'eau liquide, en contact avec des silicates et avec de la vapeur !**

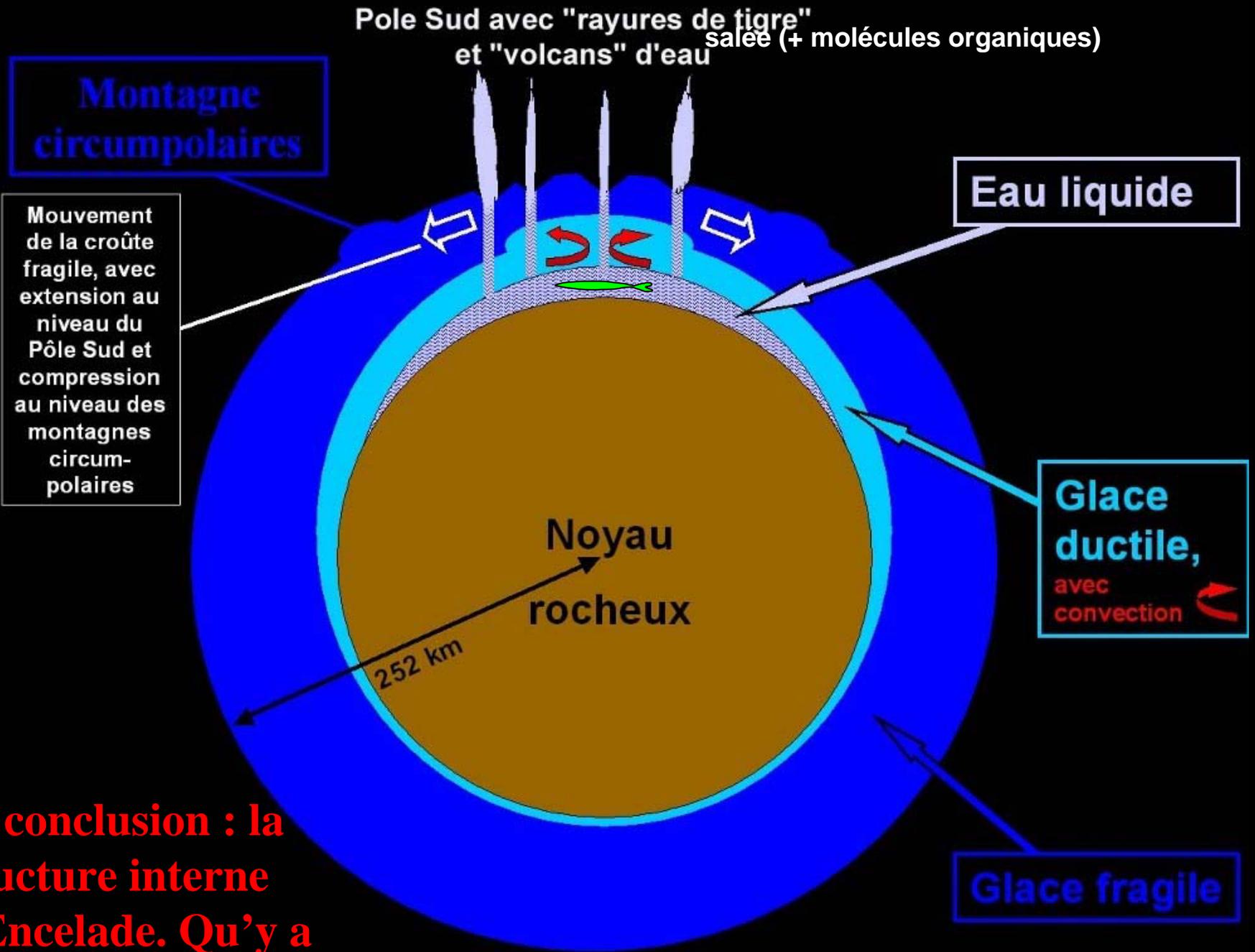


**Premiers résultats concernant la matière organique des panaches : il y en a, en quantité non négligeable, et de fort complexes (jusqu'à C<sub>6</sub>) ! Et en plus il y a de l'ammoniac ! Tout ça, ce sont les molécules précurseuses de la vie !**

**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 !**





Pôle Sud avec "rayures de tigre" et "volcans" d'eau salée (+ molécules organiques)

Montagne circumpolaires

Mouvement de la croûte fragile, avec extension au niveau du Pôle Sud et compression au niveau des montagnes circumpolaires

Eau liquide

Glace ductile, avec convection

Noyau rocheux

252 km

Glace fragile

**En conclusion : la structure interne d'Encelade. Qu'y a t'il dans « l'océan » constitué d'eau salée et « sucrée » ?**

# Parlons un peu des possibilités de vie dans le système solaire (en particulier dans le système saturnien).



Bactéries

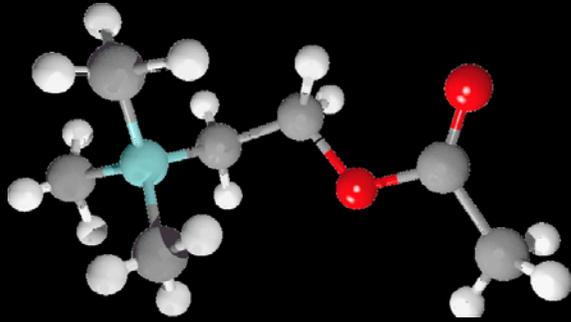


Homo (sapiens ?)

La vie « à la mode terrestre », des êtres/organes les plus simples (bactéries) aux plus complexes (cerveau humain) c'est une suite de multiples réactions chimiques extraordinairement compliquées.

Que faut-il pour que de telles réactions chimiques puissent avoir lieu ?

- (1) des macromolécules complexes, multiples et variées,
- (2) un excellent solvant,
- (3) de l'énergie utilisable.

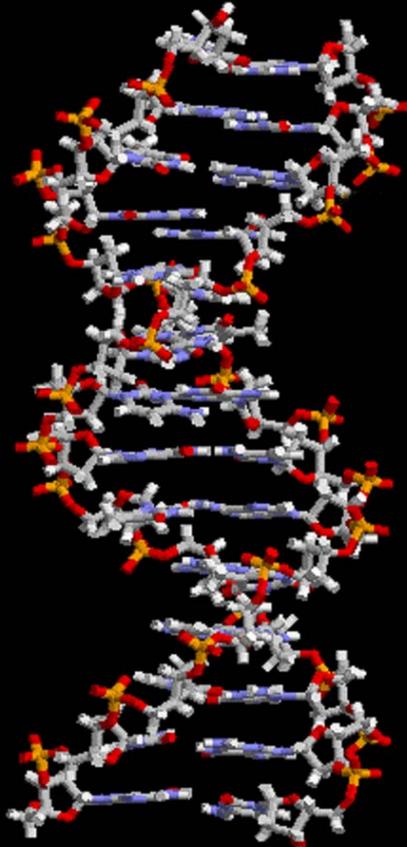


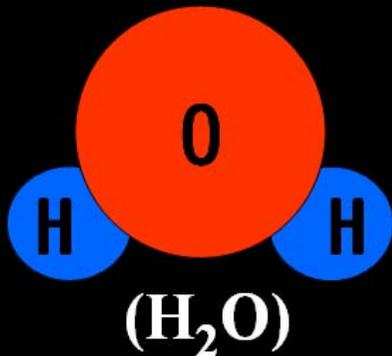
**Pour faire des molécules complexes, les chimistes nous disent qu'il faut une architecture basée sur un atome**

- (1) tétravalent,**
- (2) de petite taille.**

**Parmi les 92 éléments, seuls le Carbone, et dans une moindre mesure le Silicium satisfont ces 2 critères. Et le carbone peut faire des molécules bien plus variées et réactives que le silicium.**

**Avec les chimistes, nous postulons que seul le Carbone peut être à la base de la vie. Ne pas oublier qu'il faut aussi d'autres éléments (P, N ...) dont on ne parlera pas aujourd'hui, mais qui, sur Terre, sont aussi indispensable que le C.**





**Les chimistes nous disent que l'eau (H<sub>2</sub>O) est de loin le plus puissant et efficace solvant possible pour les molécules carbonées. Le méthane (CH<sub>4</sub> et l'ammoniac NH<sub>3</sub>) liquides sont aussi des candidats, à priori beaucoup moins prometteurs (surtout le méthane qui est non polaire), mais théoriquement possibles.**



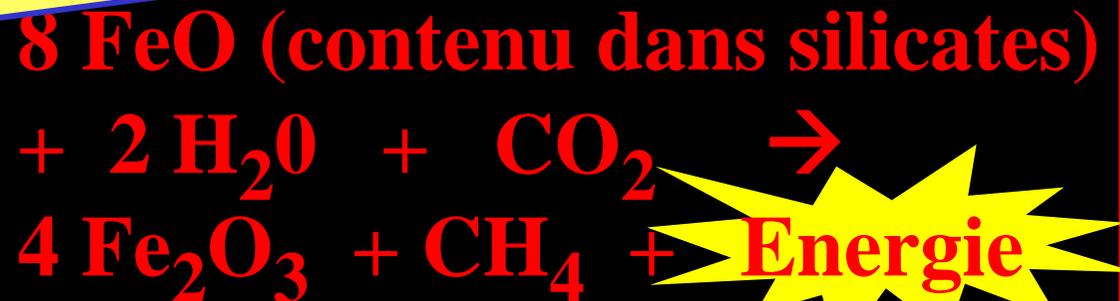
**La vie terrestre utilise deux sources d'énergie, à la base de tous les écosystèmes :**

**(1) la lumière solaire à la base de la photosynthèse,**

**(2) des réactions chimiques à la base de la chimiosynthèse.**

**Peuvent se produire en profondeur dans le sous-sol ou dans un océan, même si les conditions de surface sont « impropres » à la vie !**

**la plus**  
ions minérales et



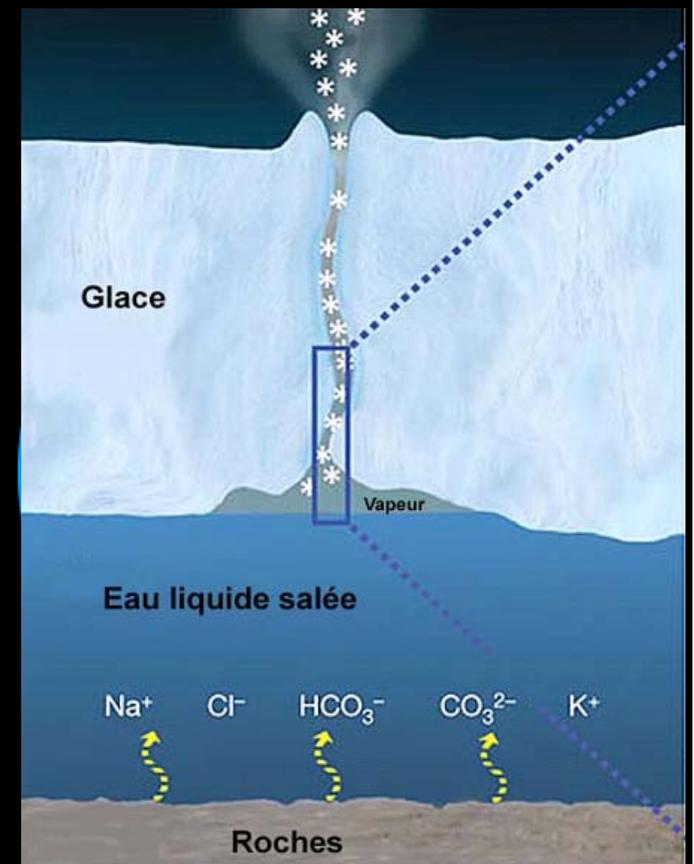
Où, dans le système de Saturne, y a-t-il à la fois les trois « ingrédients » nécessaires à la vie « à la mode terrestre » : (1) Carbone et molécules organiques, (2) eau liquide, et (3) énergie disponible ?

- Carbone et molécules organiques : partout !

- Eau liquide : en profondeur sous la glace de Titan et d'Encelade

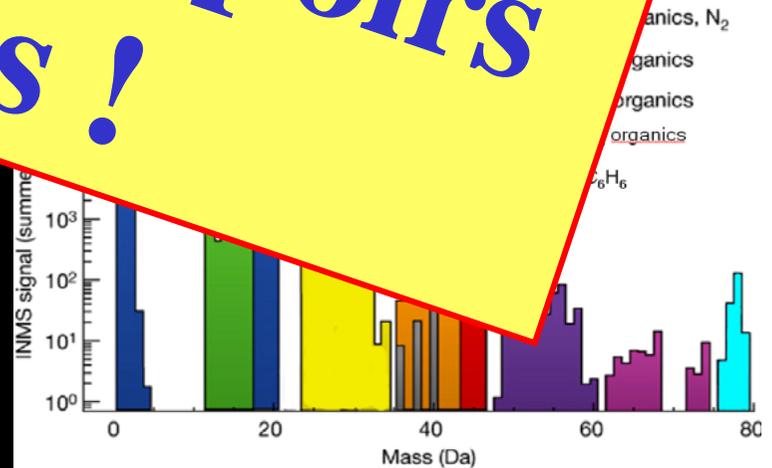
- Energie disponible dans cet océan sous-glaciaire ?

**Pas dans Titan car l'océan n'est pas en contact avec les silicates. Mais sur Encelade, si !**



**... Encelade, sans doute  
Europe, tous les espoirs  
sont permis !**

**Alors, y a-t-il de la vie dans  
l'océan d'Encelade ?  
Nul ne le sais, mais ...**

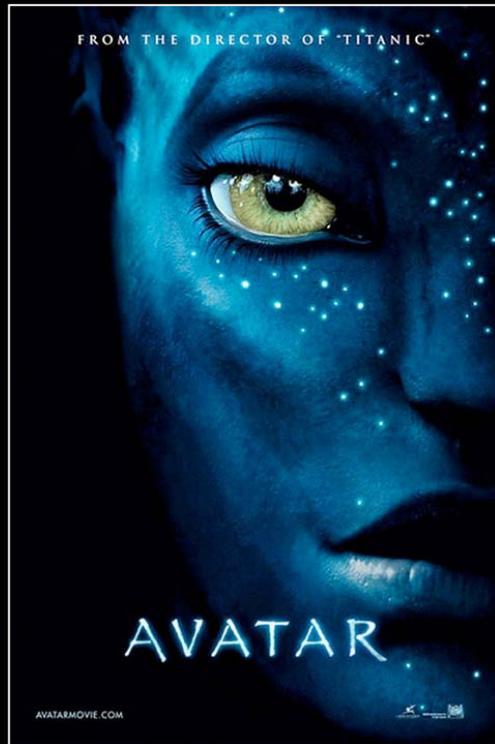


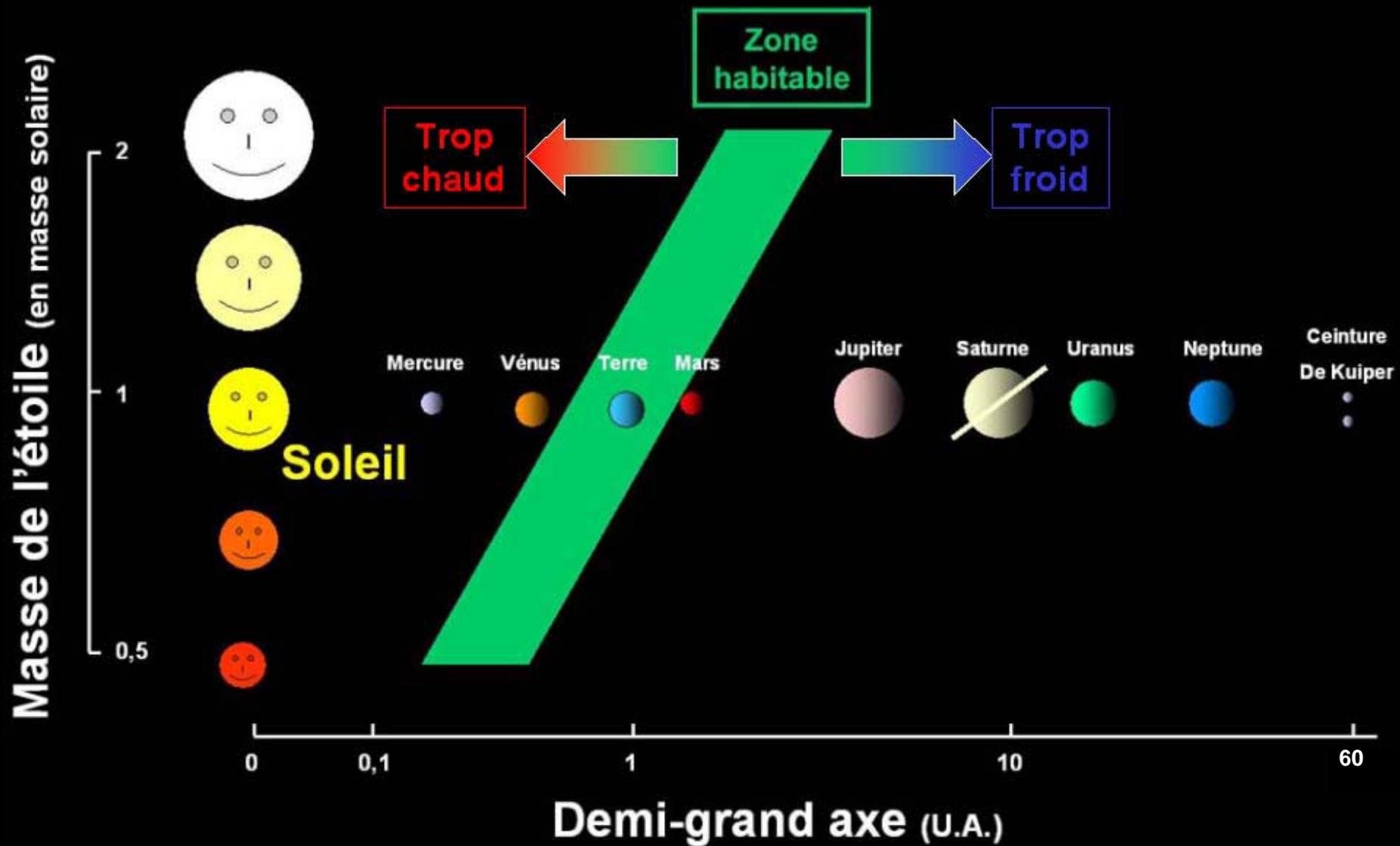


**Une parenthèse pour piquer une « grosse colère » sur la notion de zone (ou de fenêtre) d'habitabilité.**



**Tout d'abord, même une planète géante, grâce à ses satellites, peut abriter une vie « à la mode terrestre » dans son voisinage. Même les auteurs d'Avatar s'en sont rendu compte !**





**Voici la représentation classique de la zone d'habitabilité. D'abord, elle « néglige » les modulations qu'entraînent les différents effets de serre**

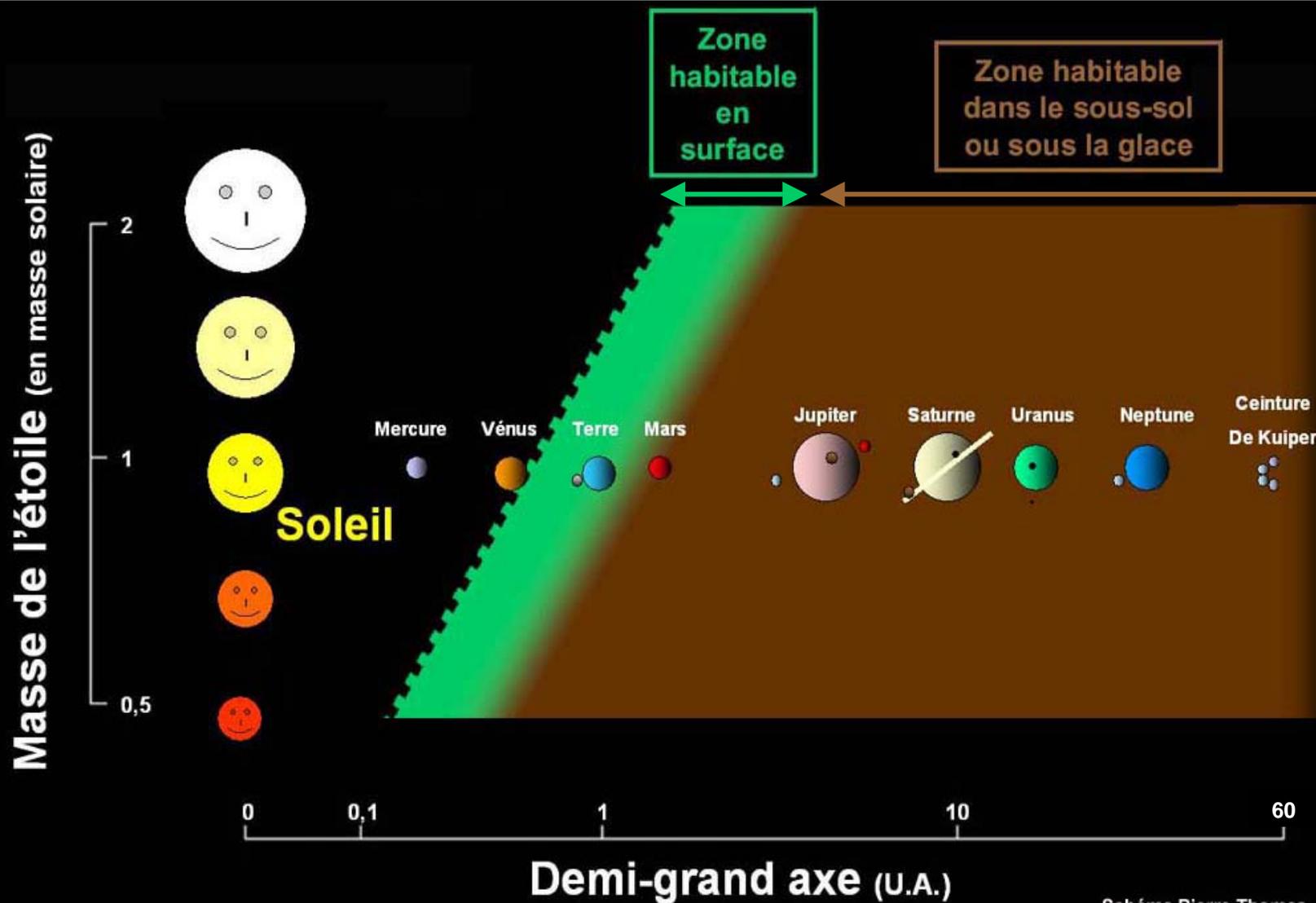
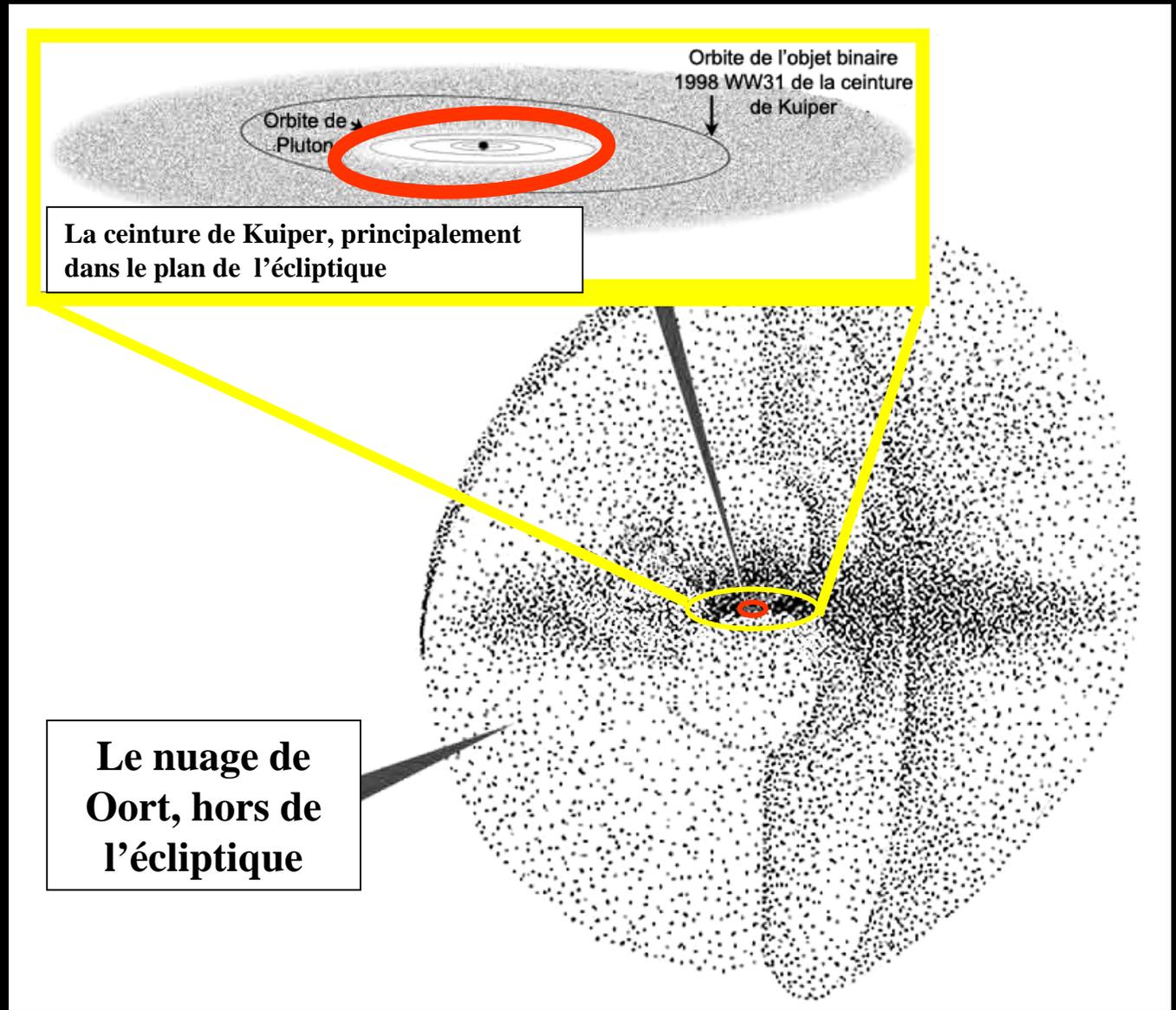


Schéma Pierre Thomas

**Ensuite, c'est oublier les vies « souterraines » ou « sous-glaciaires » qui peuvent bien sûr exister dans les zones très froides, sans eau liquide en surface.**

# Et au delà des planètes géantes ? Pluton, un des objets de la ceinture de Kuiper, et le nuage de Oort

Des perturbations orbitales font que, parfois, certains de ces objets s'approchent du soleil et deviennent des comètes

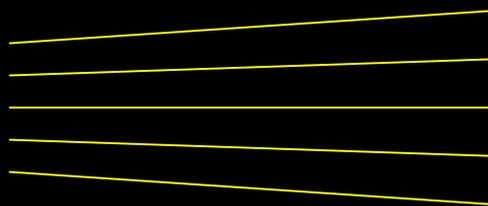


# Les molécules et ions (gaz et poussières) cométaires identifiées depuis la Terre



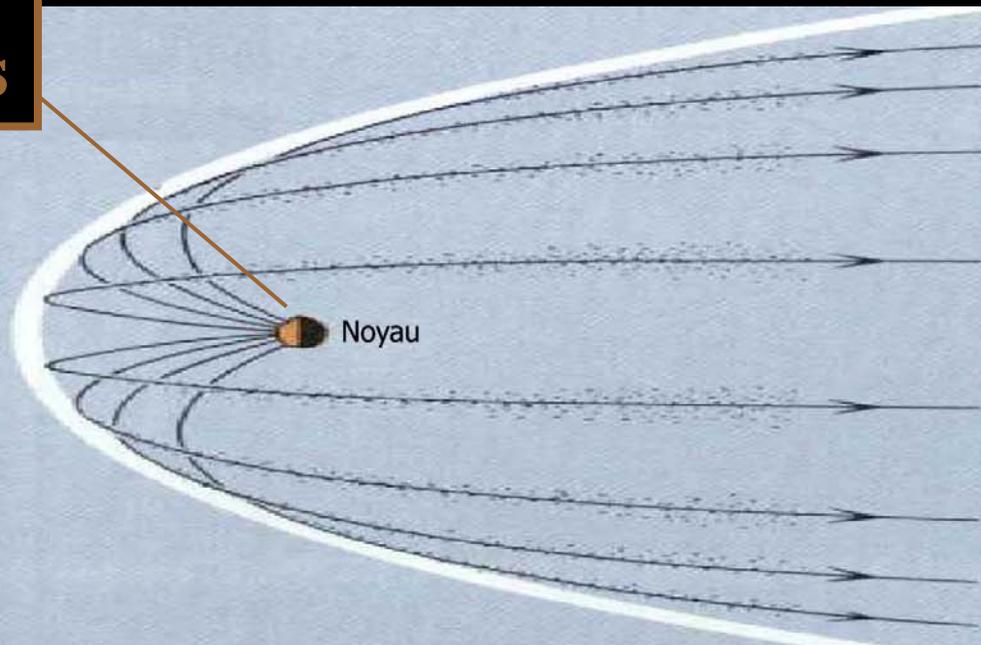
- $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,
- $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{HCO}^+$ ,
- $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{CS}$ ,
- $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{HCOOH}$ ,  $\text{CH}_3\text{OCHO}$ ,
- $\text{HCN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{HNCO}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{NH}_2\text{CHO}$ ,  $\text{NH}$ ,
- $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CH}^+$ ,  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_2$ ,
- $\text{He}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{O}^+$ ,
- $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  (olivine magnésienne)
- ainsi que les variétés isotopiques suivantes :  $\text{HDO}$ ,  $\text{DCN}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{HC}^{15}\text{N}$ ,  $\text{C}^{34}\text{S}$

# Une comète, comment ça marche ? Près du soleil, la glace du noyau devient vapeur d'eau, déviée par le vent solaire, ce qui forme la célèbre queue



**Noyau de glaces sales**

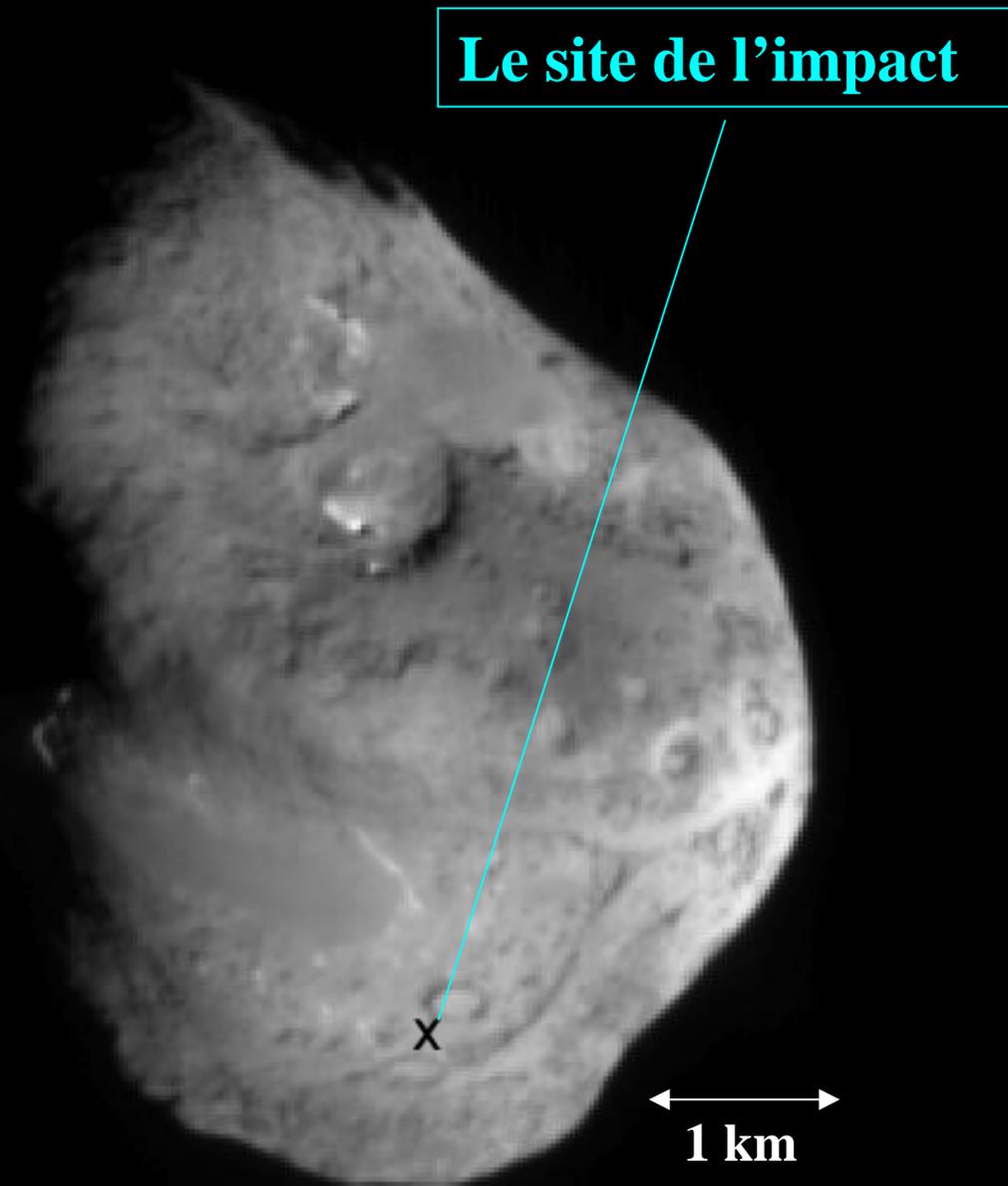
Photons et vent solaire



Noyau

Déviations des poussières par les photons et le vent solaire dans la direction opposée au soleil --> formation de la queue

**La comète  
Temple 1  
(2005, Nasa),  
héroïne malgré  
elle du vrai  
Deep Impact**



**Avant l'impact, de  
la spectroscopie. En  
bleu, les surface de  
« glace vive »  
d'H<sub>2</sub>O.**

**Le reste, un  
mélange infâme !**

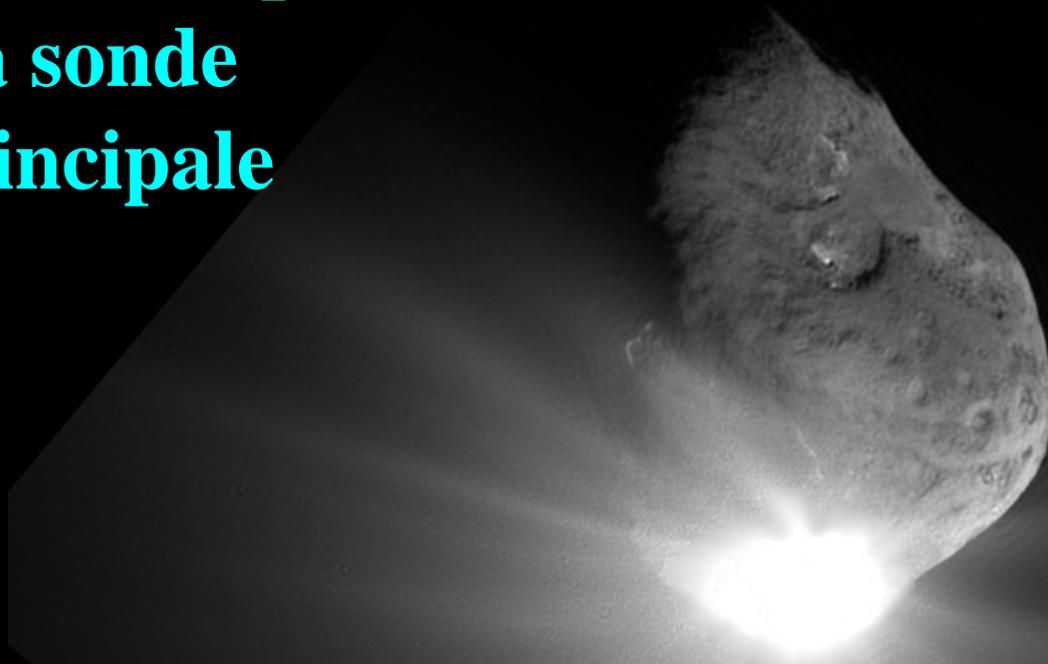


**Un  
« boulet »  
quitte la  
sonde  
principale.**

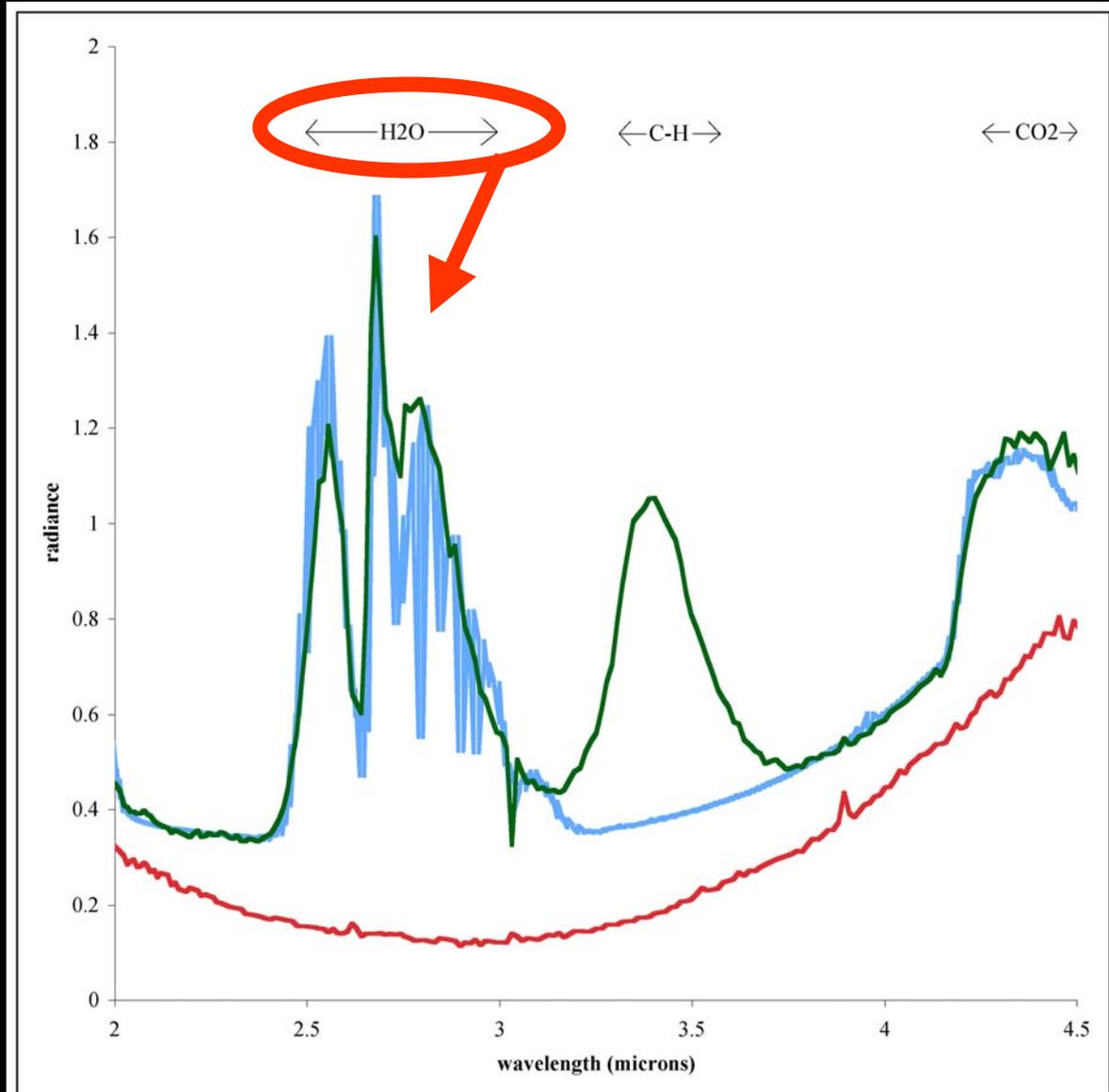
**Il s'approche**



**L'impact vu par  
la sonde  
principale**



**Le spectre IR des  
« gaz  
d'échappement » :  
H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> et  
hydrocarbures. Il y a  
bien de l'eau sur  
cette comète !  
Surprise, les études  
terrestres montrent  
que le rapport  
poussières/glaces est  
beaucoup plus  
important que  
prévu.**



**Et je ne peux pas terminer  
cette conférence sans vous  
montrer cette image prise  
le 4 novembre 2010 par la  
Sonde Nasa Epoxi :  
la comète Hartley 2.**



**165 diapositives pour vous parler d'eau liquide, de vapeur et de glace. Je crois qu'il est temps de s'arrêter (et pourquoi pas de boire un coup) !**

**Merci de votre attention.**

