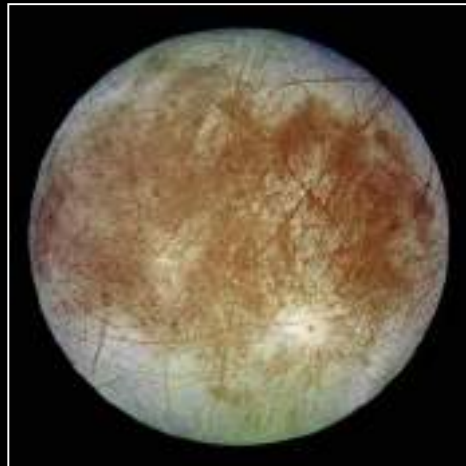
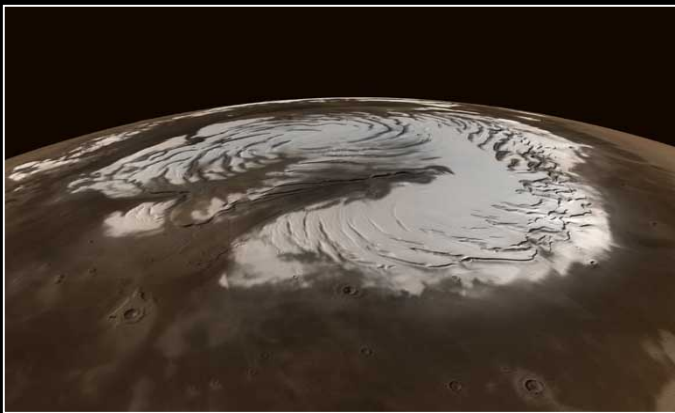
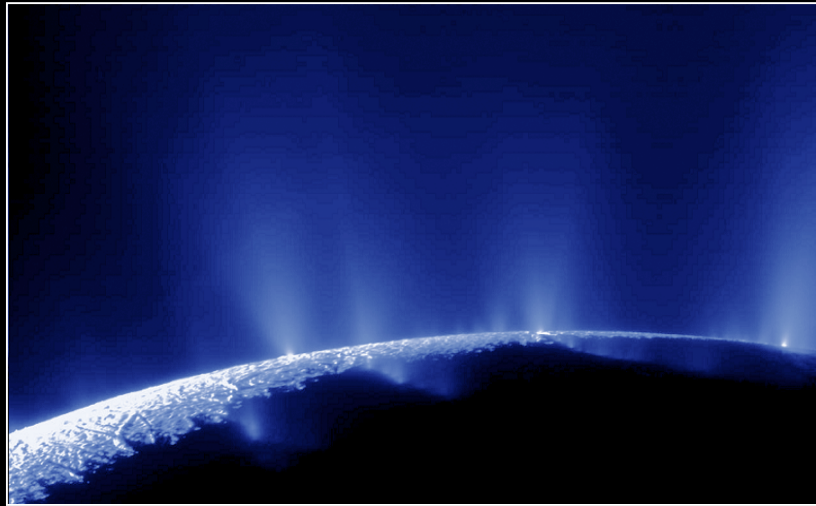


# L'eau dans le système solaire

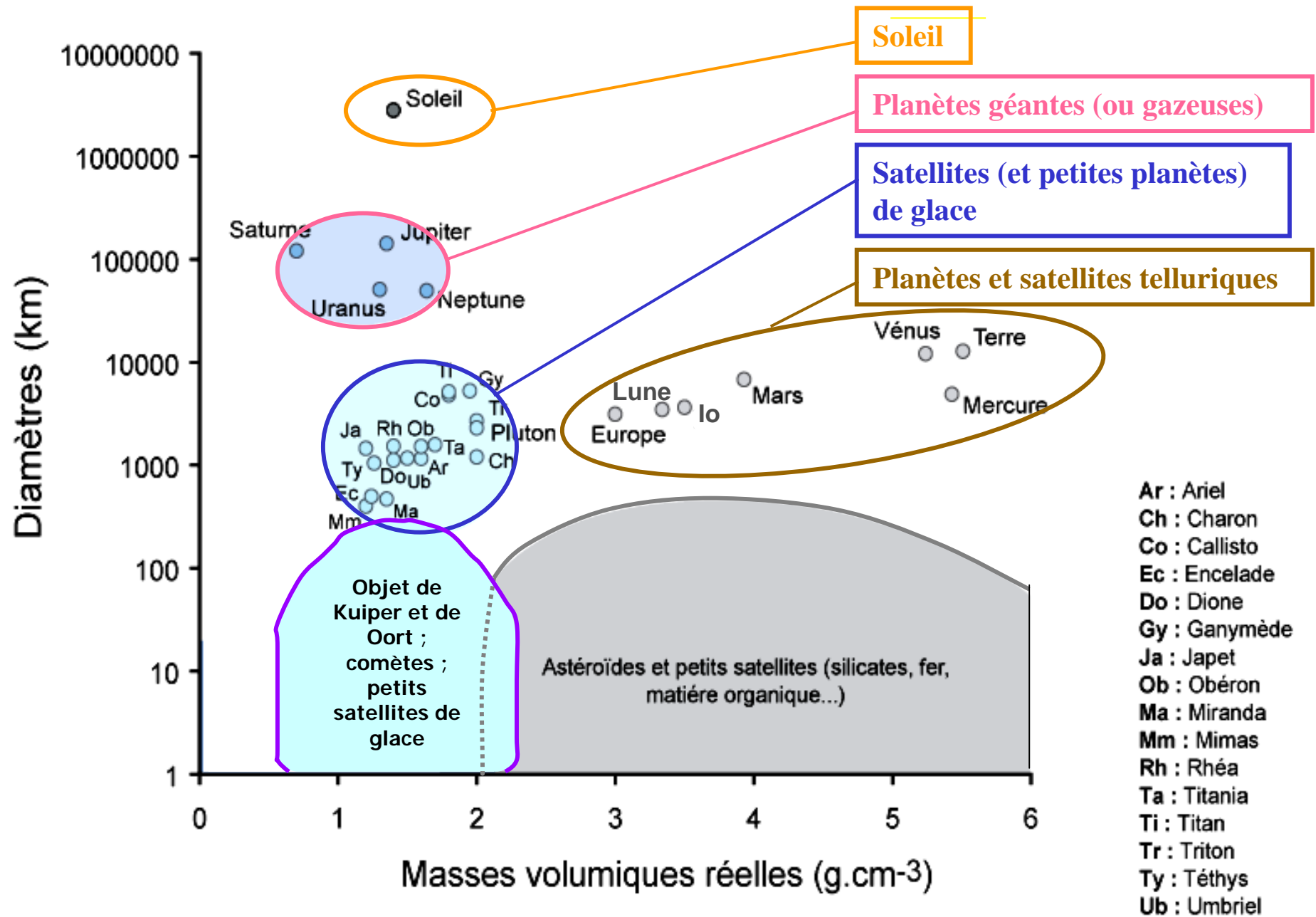


Pierre Thomas, ENS Lyon

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 !



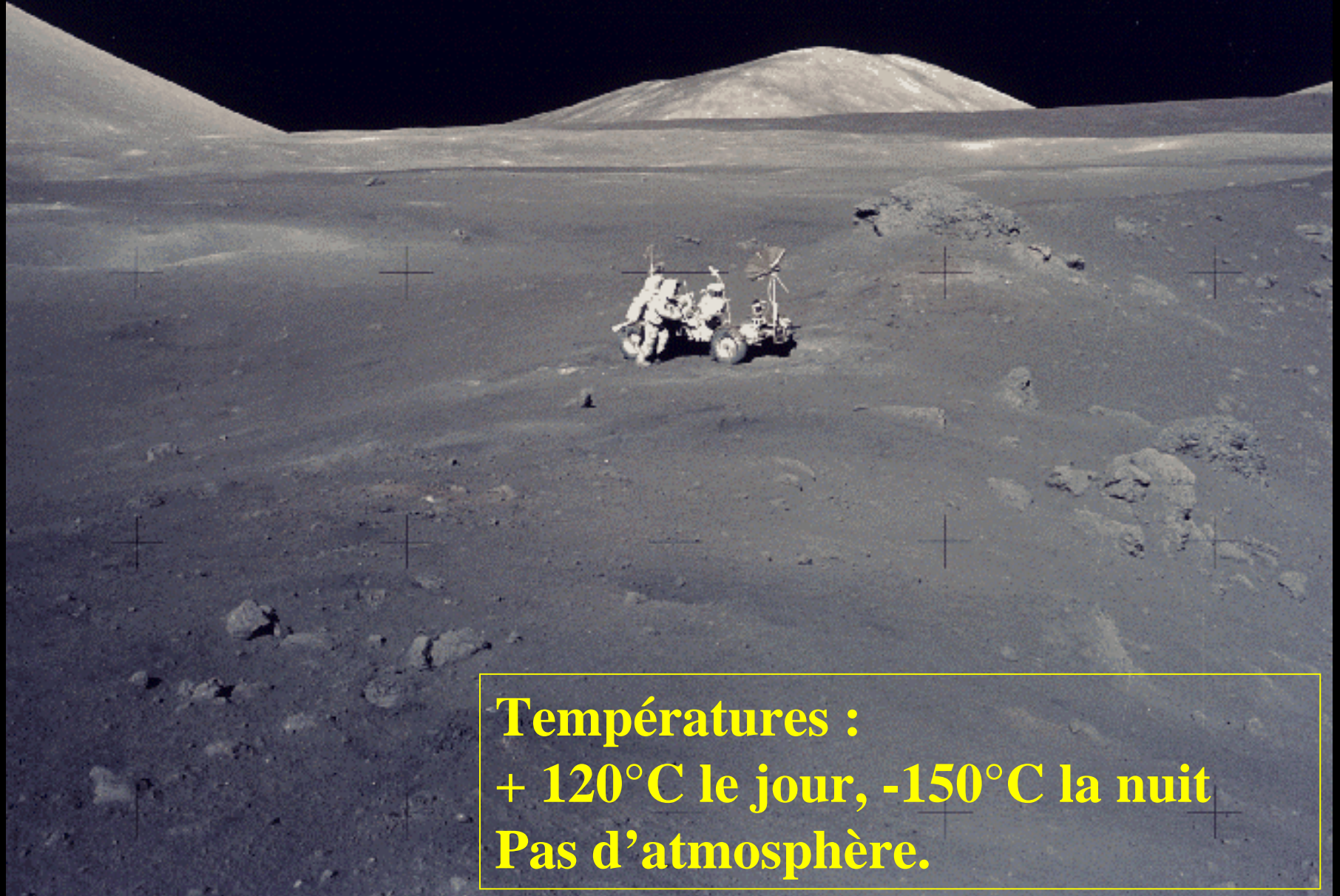
$\sim 10^{21}$  kg

$\sim 10^{19}$  kg

Rappel : Terre  
=  $6 \cdot 10^{24}$  kg

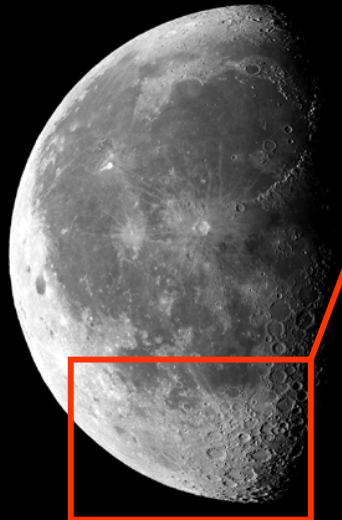


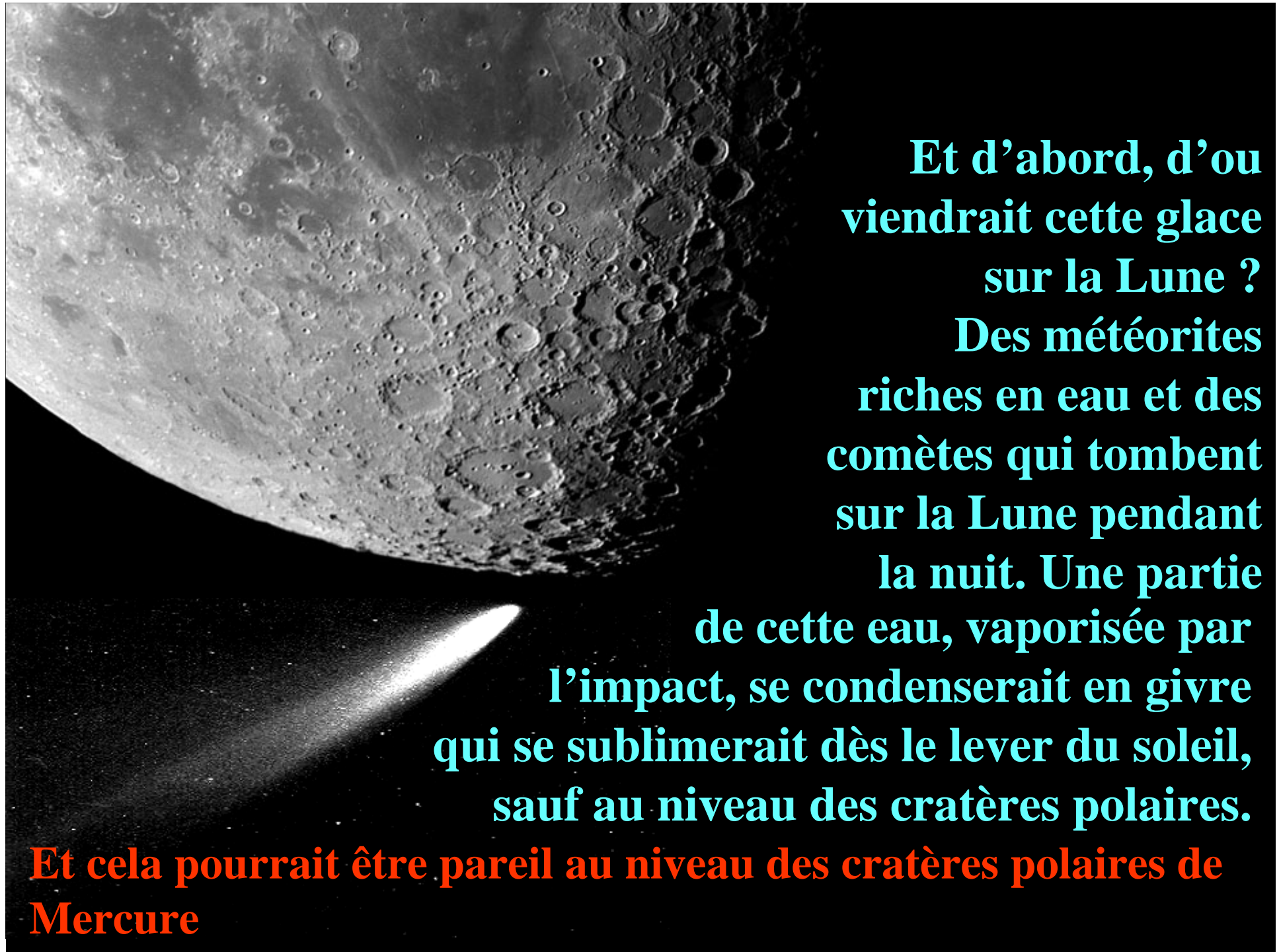
**L'eau sur la Lune : y en a pas, encore que ... !**



**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**

Super Novae

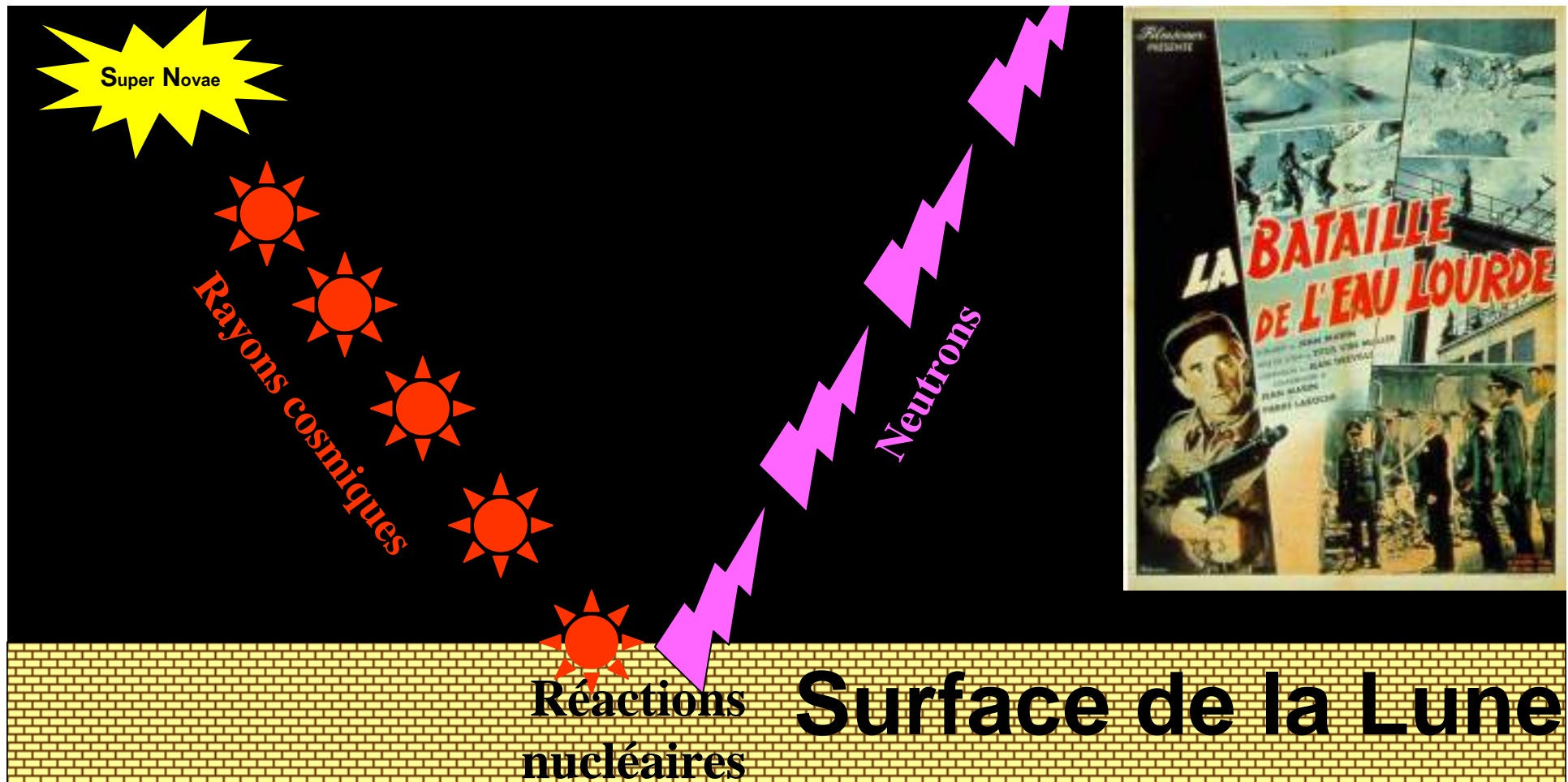
Rayons cosmiques

ATMOSPHERE

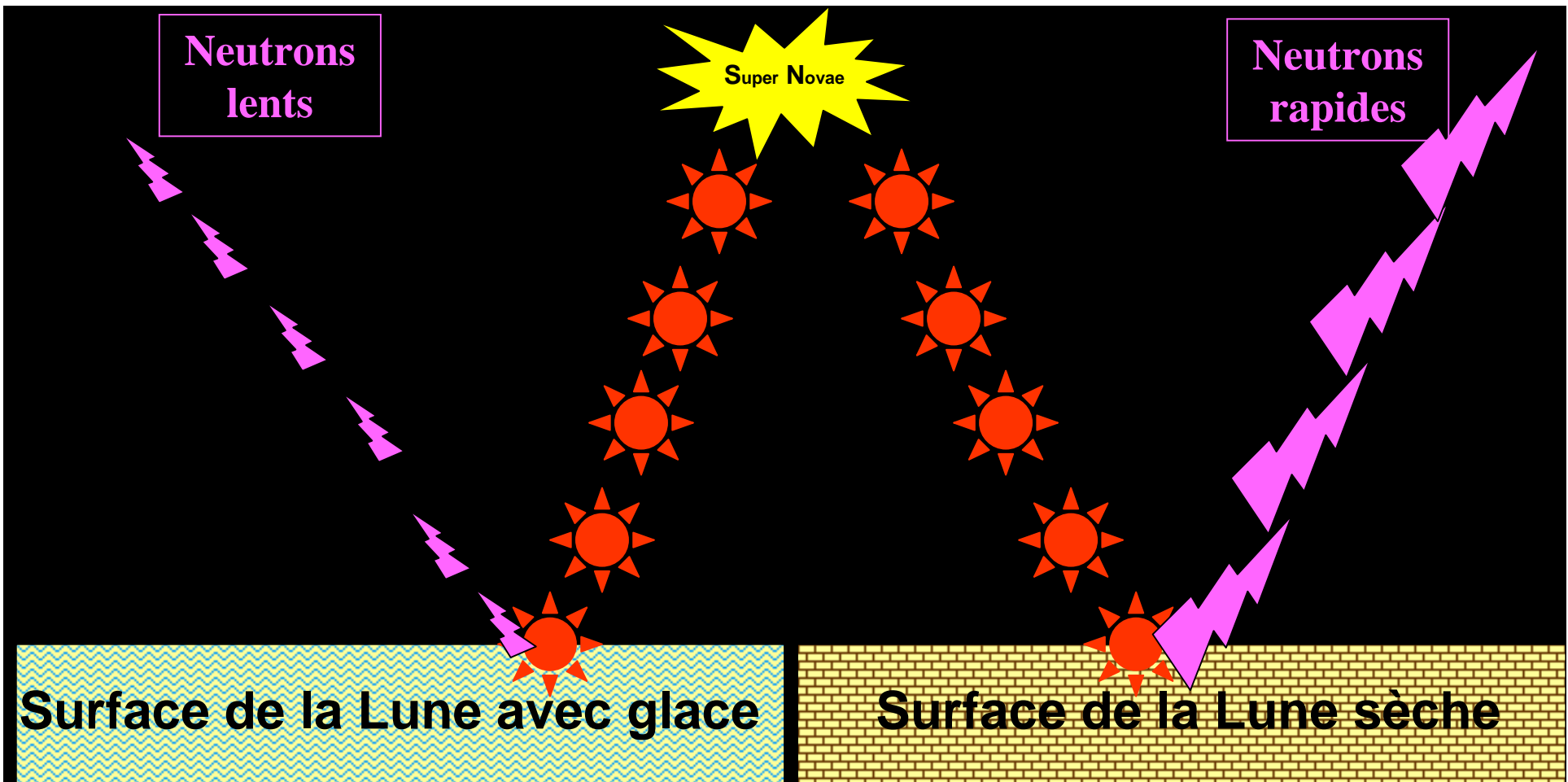
**Surface de la Terre**

**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) ralenti les neutrons d'une façon « particulière ». Et il y a de l'Hydrogène dans H<sub>2</sub>O.**

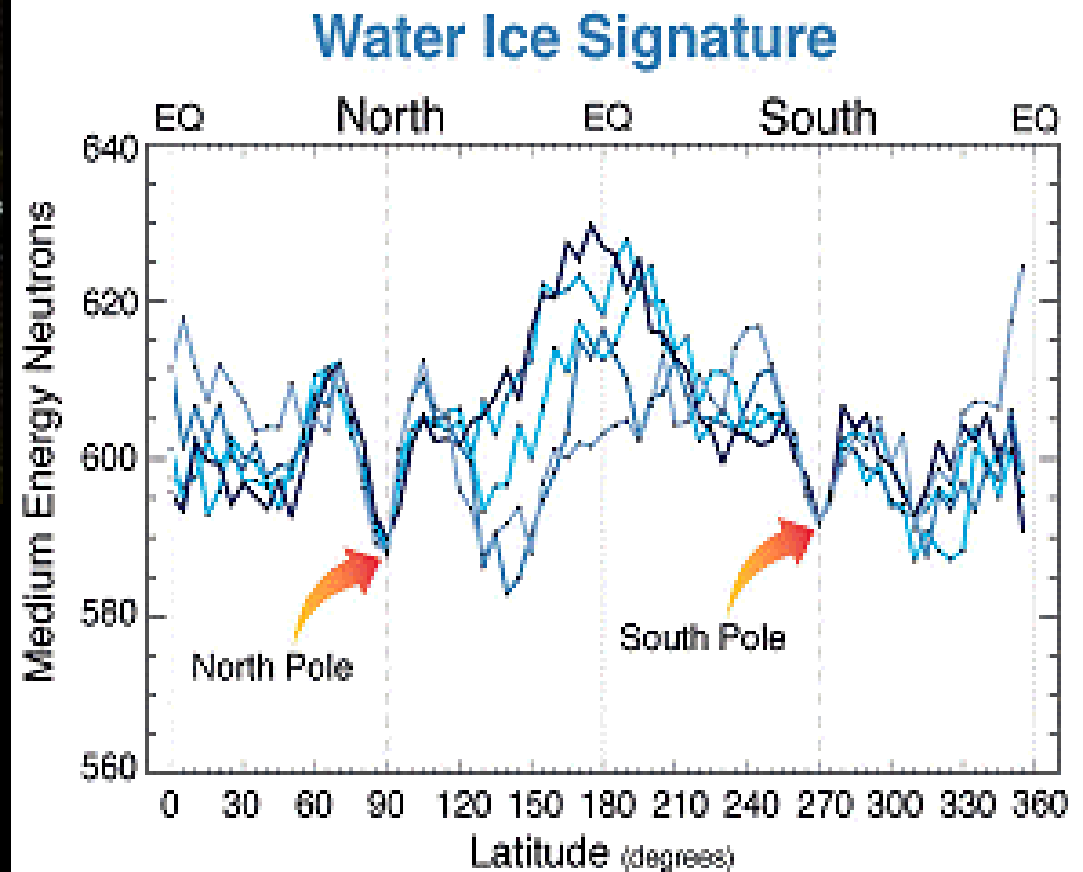


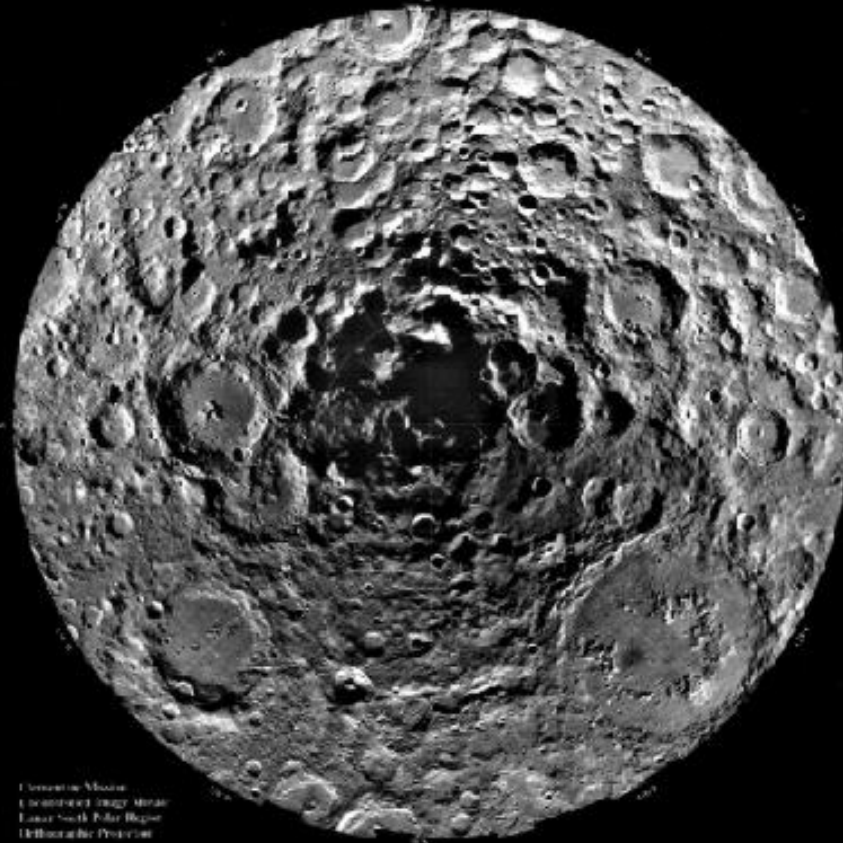
**Si il y a des quantités significatives de glace d'H<sub>2</sub>O dans certaines zones de la Lune, donc de deutérium, les neutrons seront ralentis. Le sont-ils au dessus des cratères polaires ?**



**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**



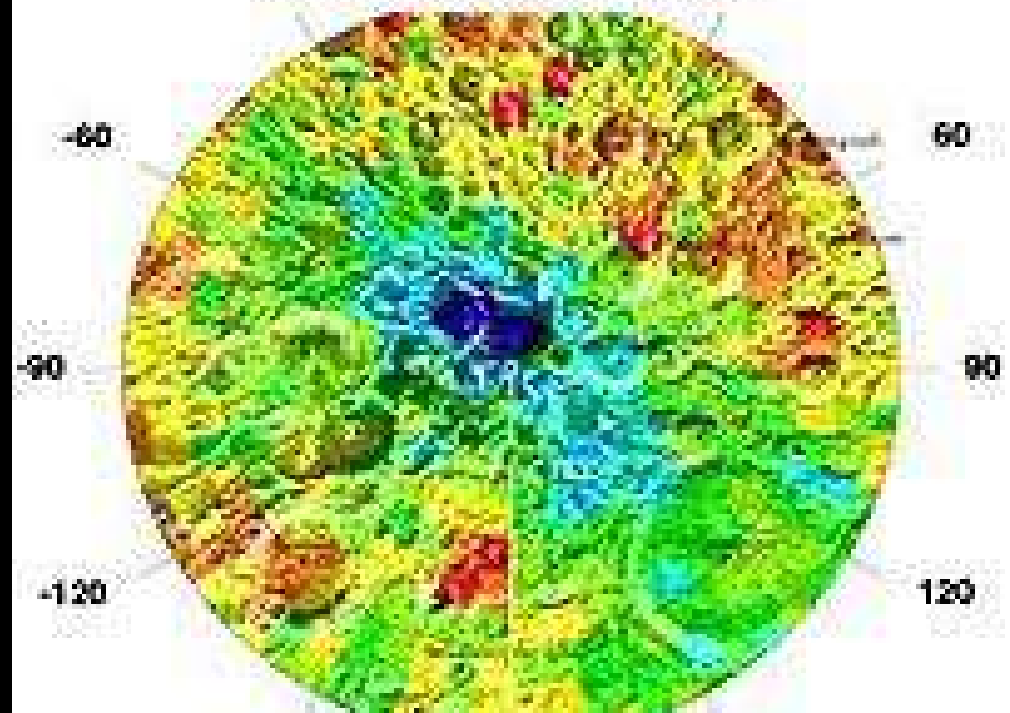


© European Space Agency  
Lunar Reconnaissance Orbiter  
Lunar South Pole Region  
Orbitographic Projection

**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 :

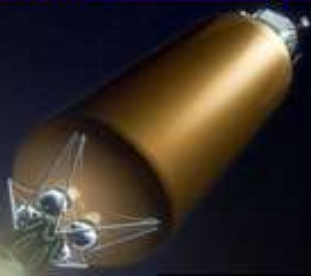
+ GO

Home

Mission

About the Moon

Impact!



**Exploration of the Moon Continues!**

**LCROSS** Lunar CRater Observation and Sensing Satellite

Tech Info

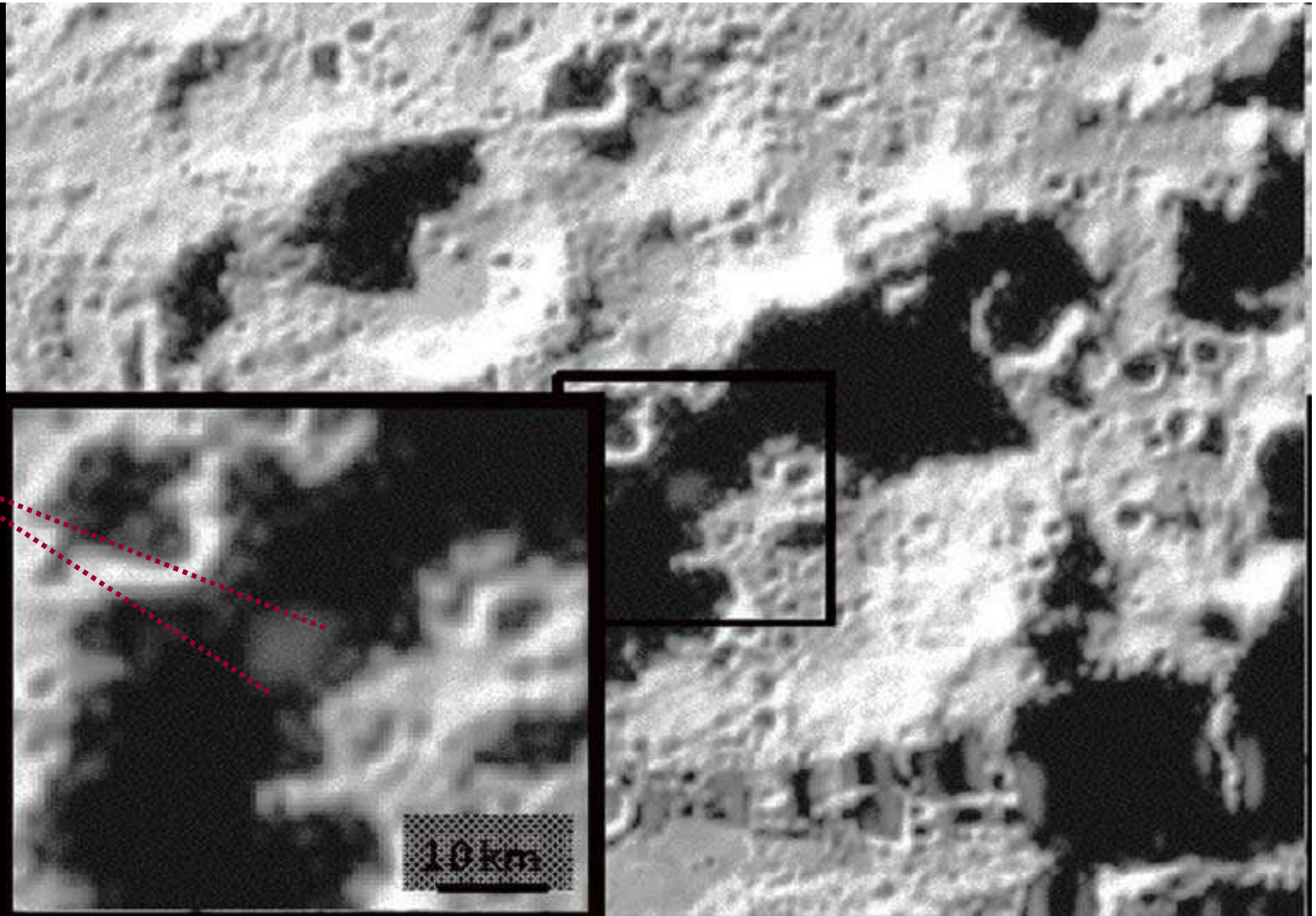
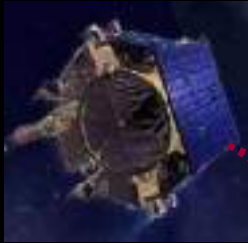
Observations

Education

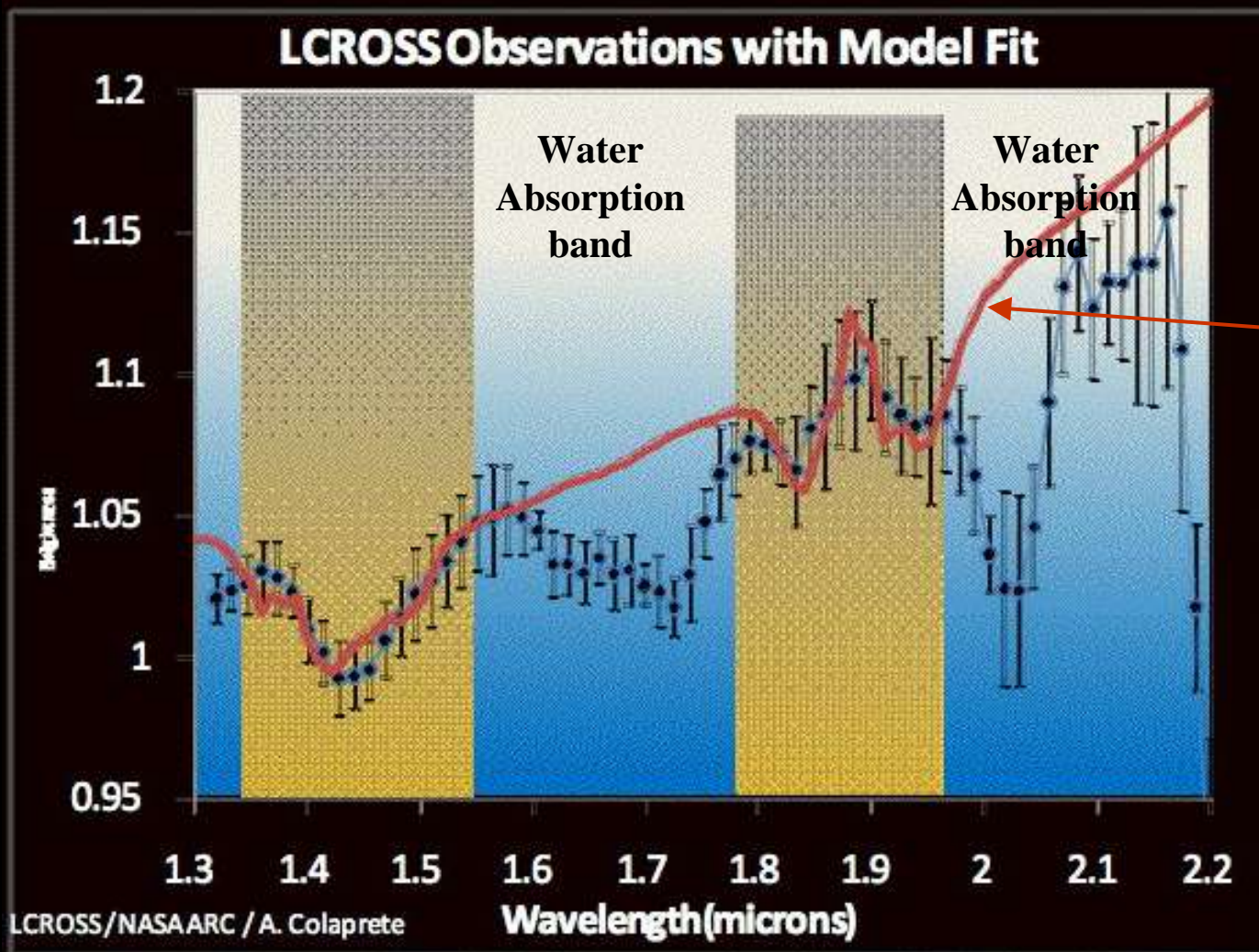
News / Events



**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.**



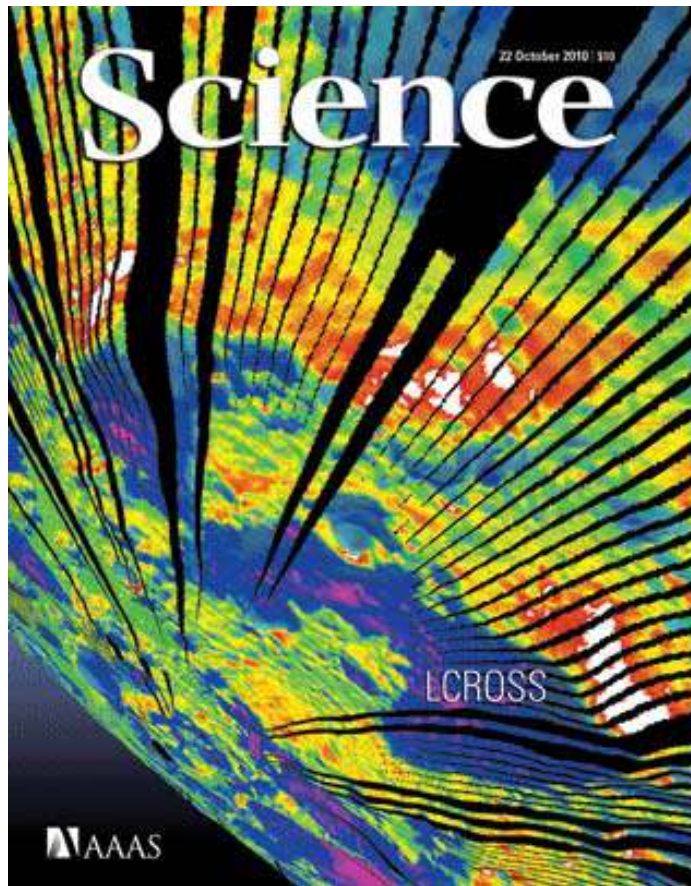
**Le panache créé par le 1er impact et vu par LCROSS, 20 secondes après ce 1er impact. Vu la masse et la vitesse de l'impact, il a dû se faire un cratère de 20 m de diamètre pour 3 m de profondeur. Le panache visible ici correspond au plus fins débris issus du cratère**



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)**



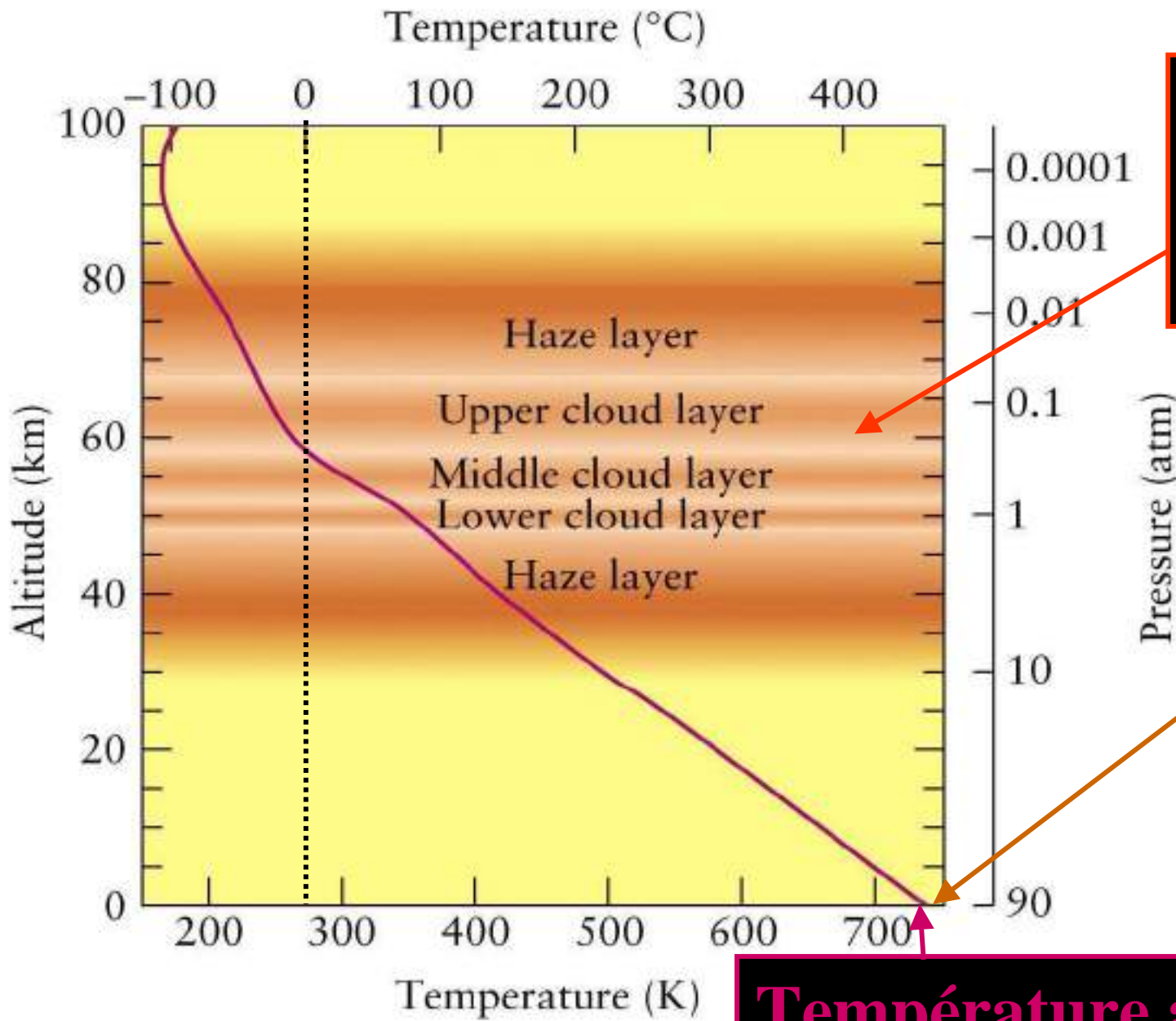
**Colaprete *et al.*, *Science*  
22 October 2010:  
Vol. 330, no. 6003,  
pp. 463 – 468, Anthony**

**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%**

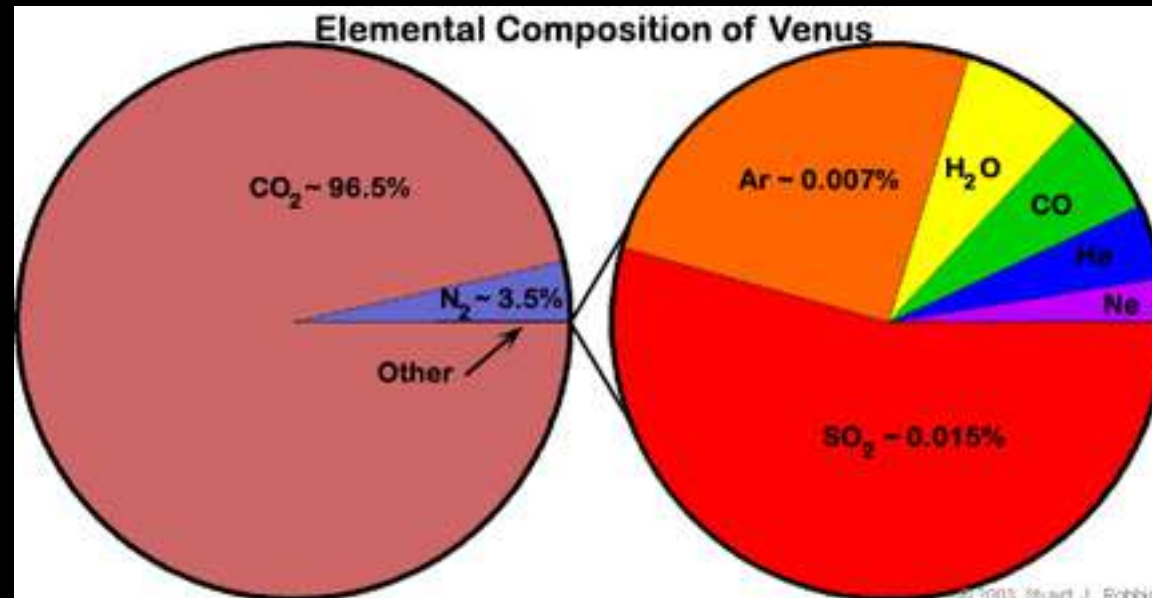
**Ar : 0.007%**

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

**CO : 0.0017%**

**He : 0.0012%**

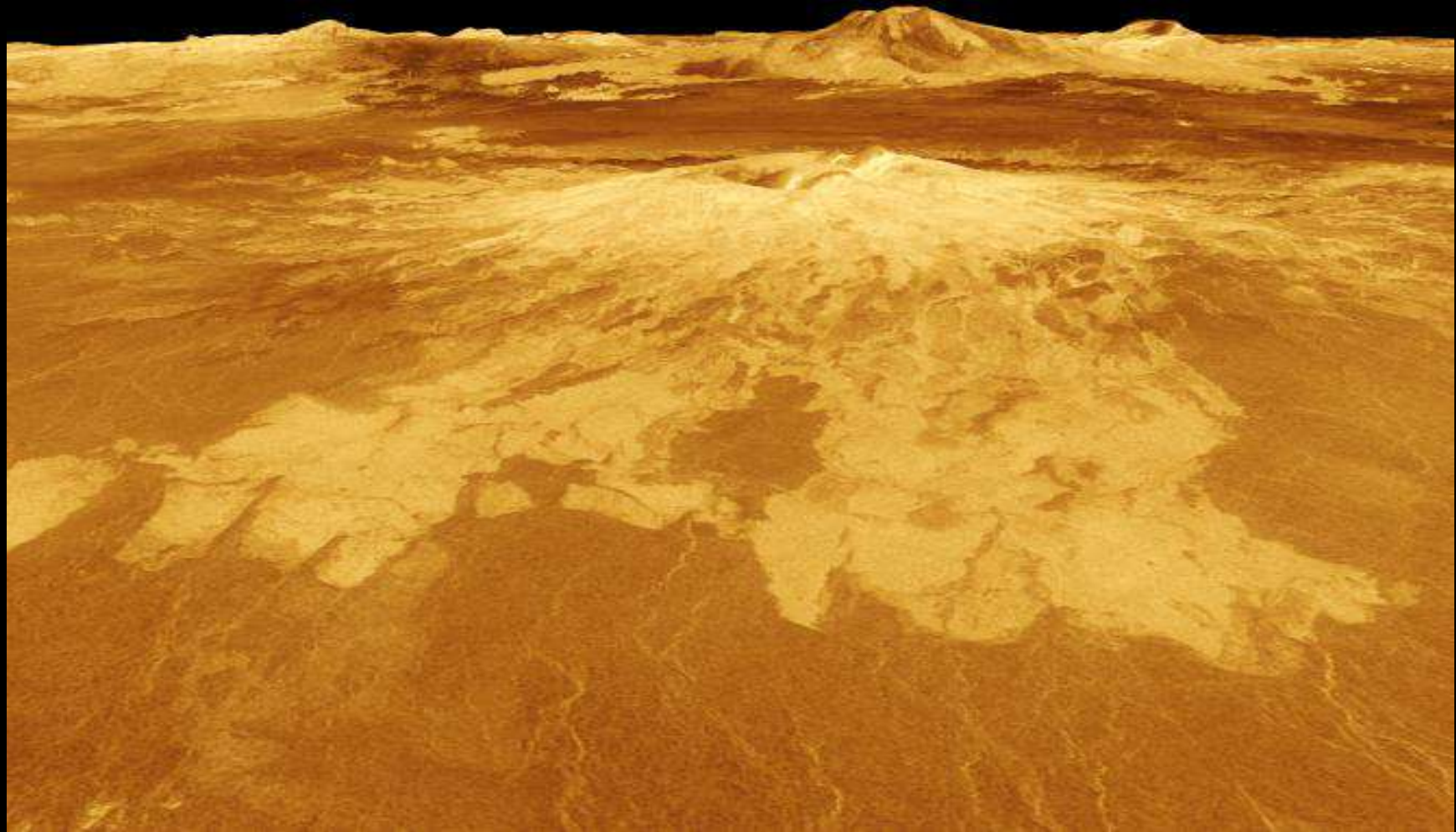
**Ne : 0.0007%**

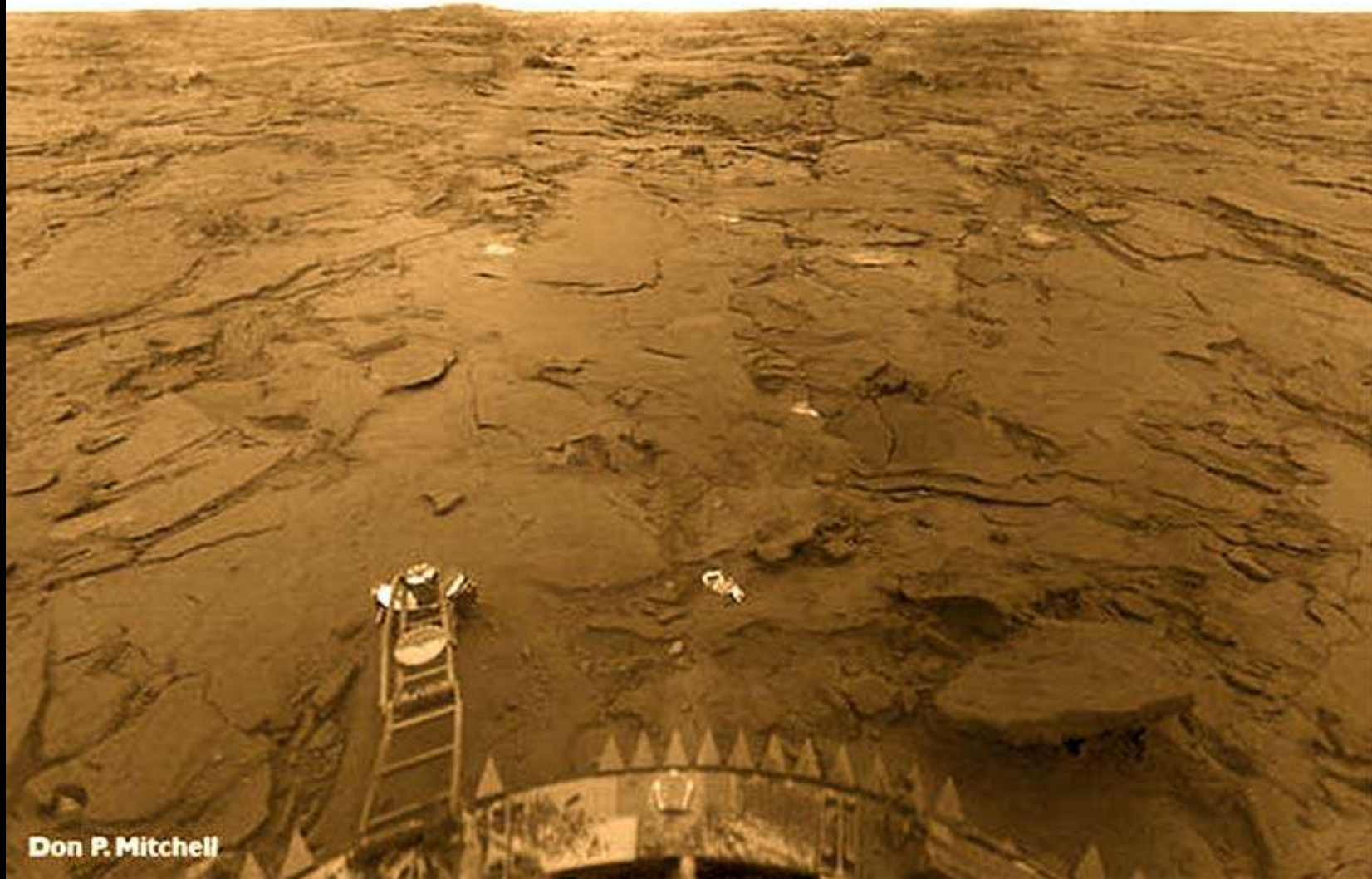


**La composition de l'atmosphère vénérienne :  
0,002% de vapeur d'eau ( $2 \cdot 10^{-5}$ ).**

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

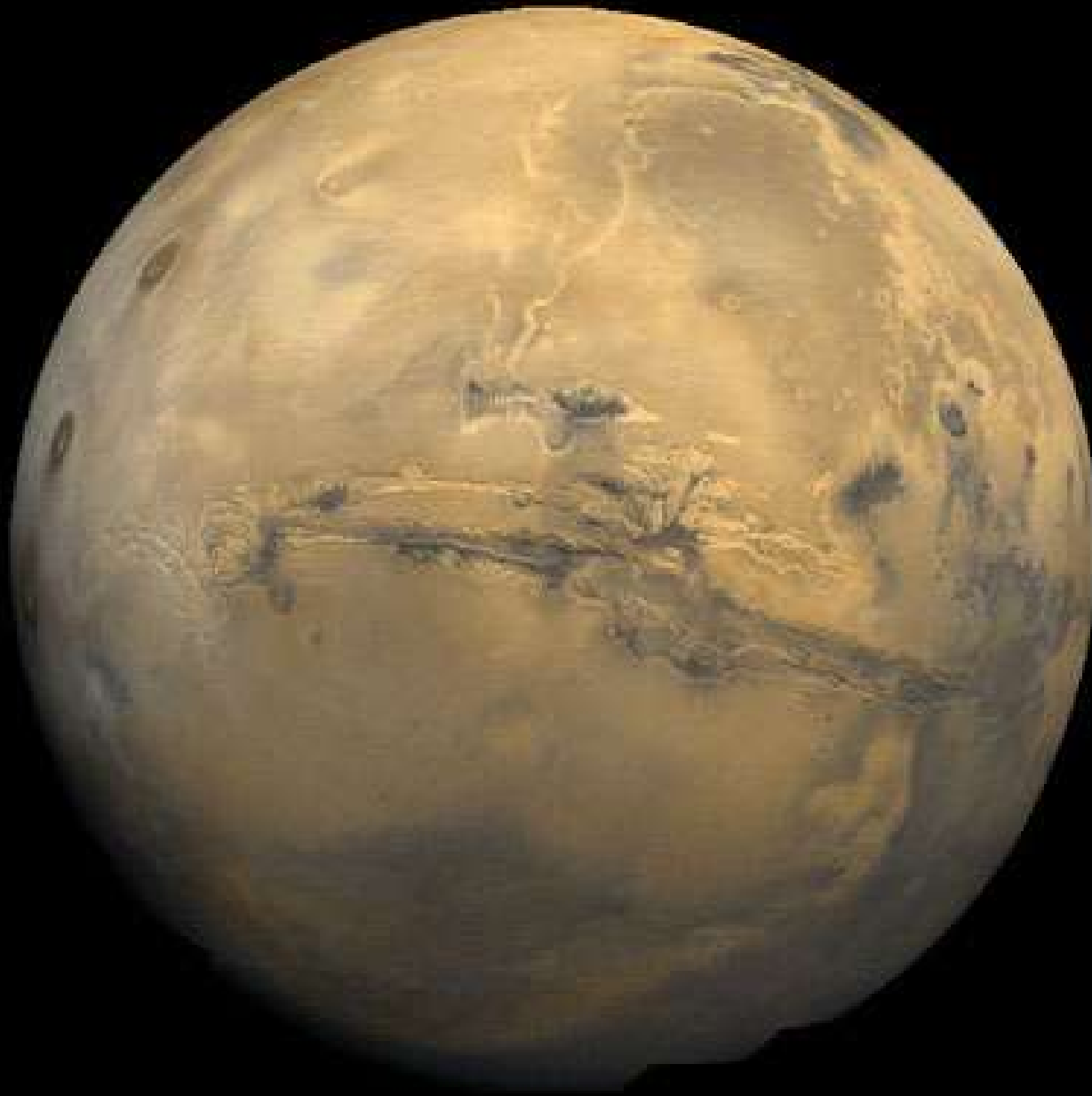
**Où est partie cette eau vénérienne ? Sans doute photolysée par les abondants UV solaires, avec échappement de l'H<sub>2</sub>**





Don P. Mitchell

**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**

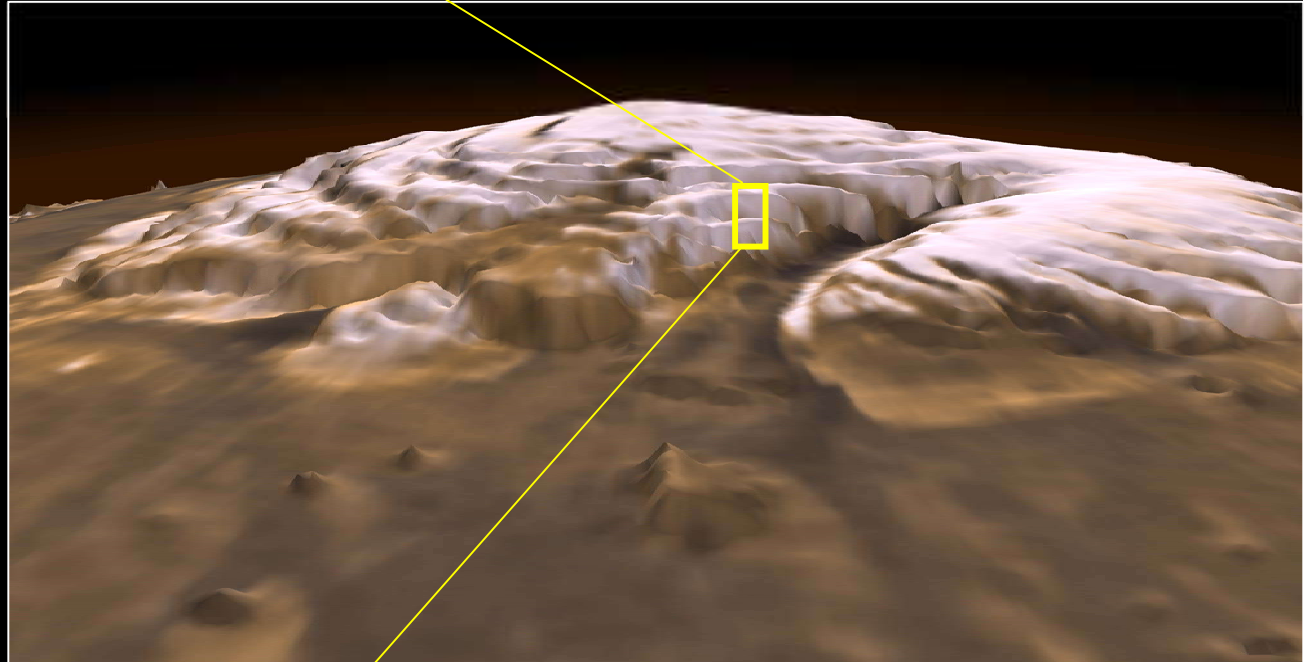
**Etudions ces calottes polaires !**

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

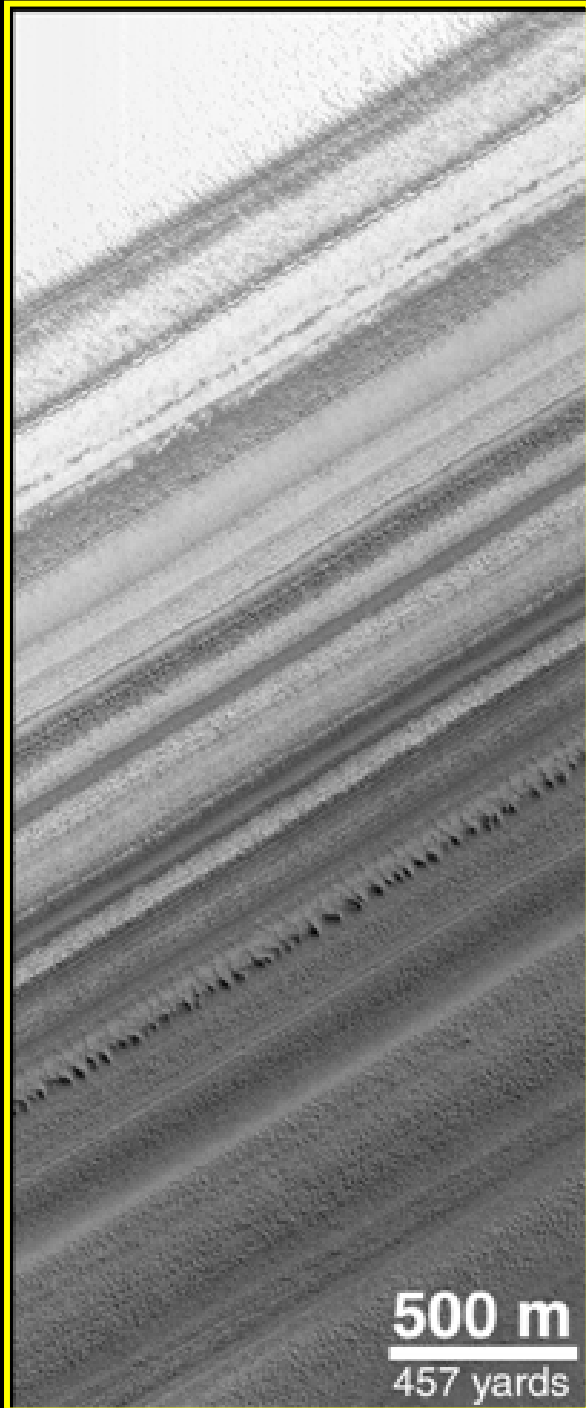




**Les résultats des sondes « récentes » en orbite : on peut étudier les calottes polaires avec un luxe de détail.**

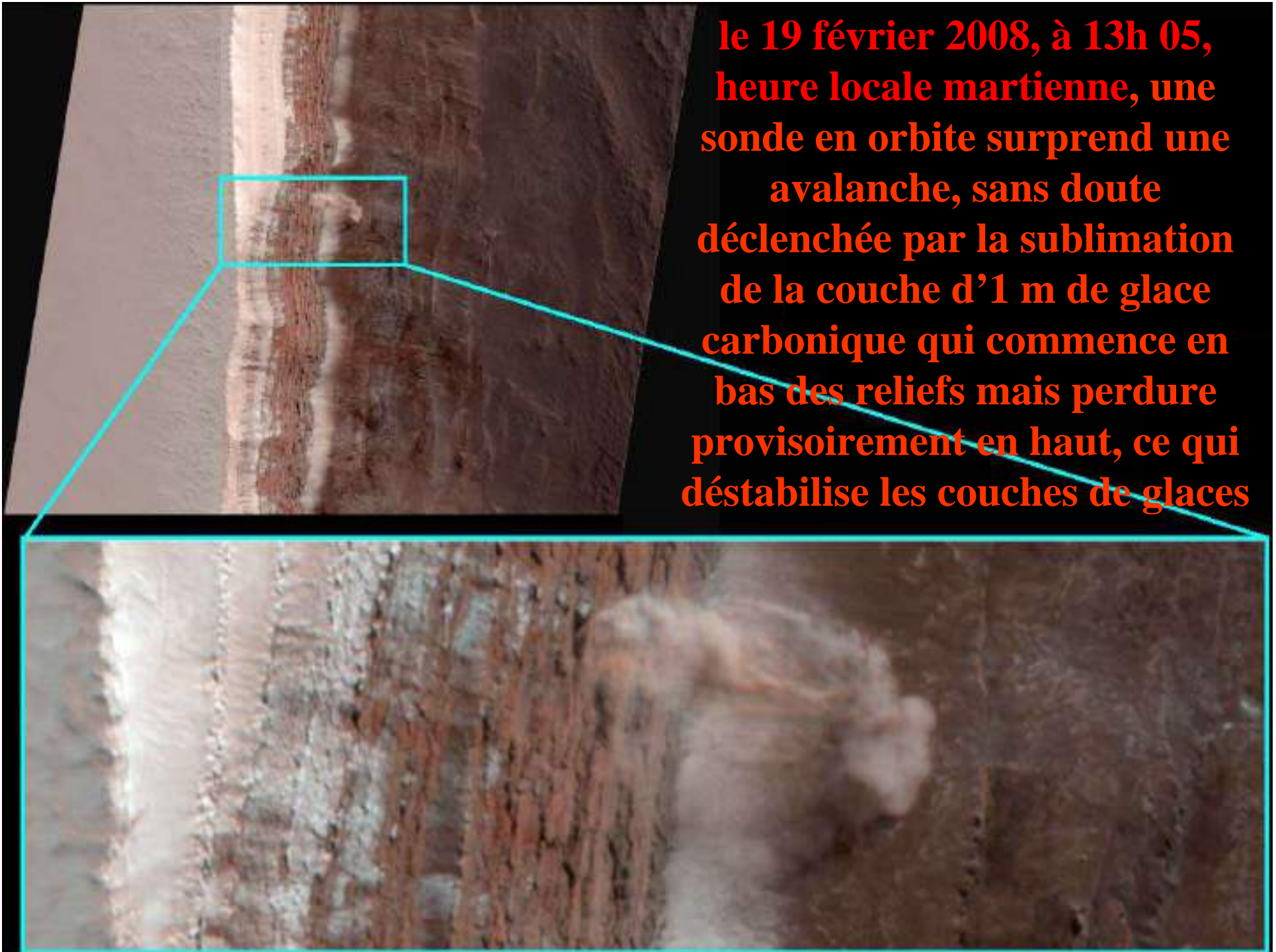


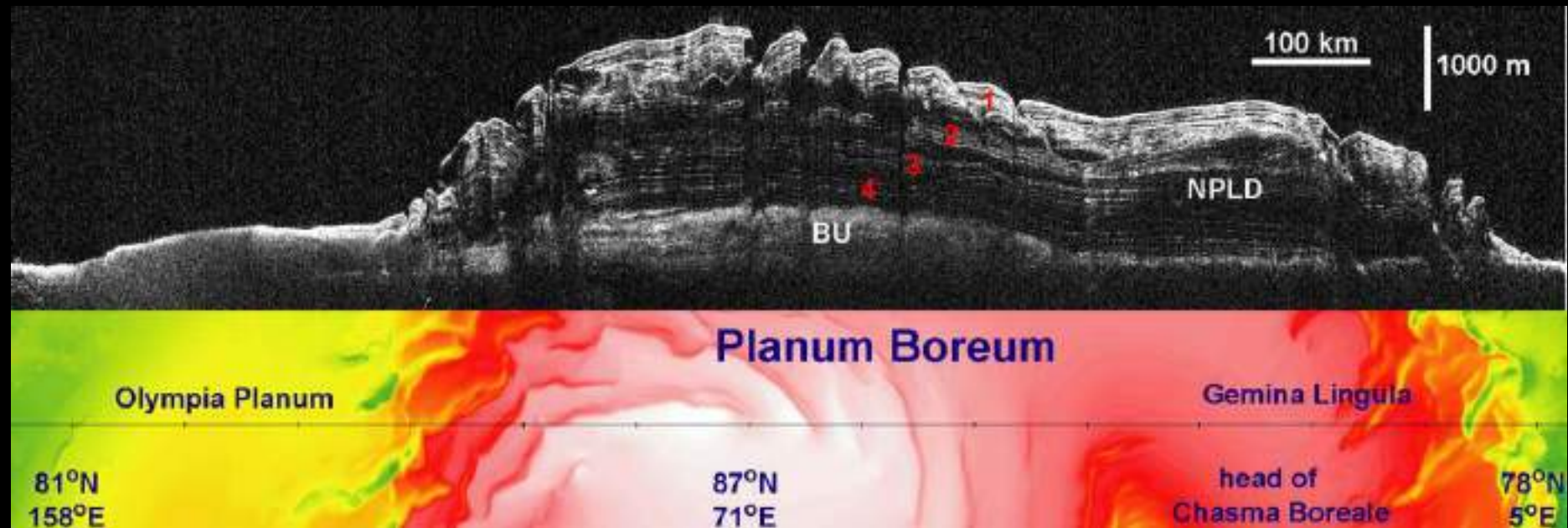
**Les falaises bordières montrent des falaises (ici 1000m) qui permettent de voir que la calotte est constituée d'une succession de couches de glace d'H<sub>2</sub>O plus ou moins riche en poussières**



500 m  
457 yards

**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**

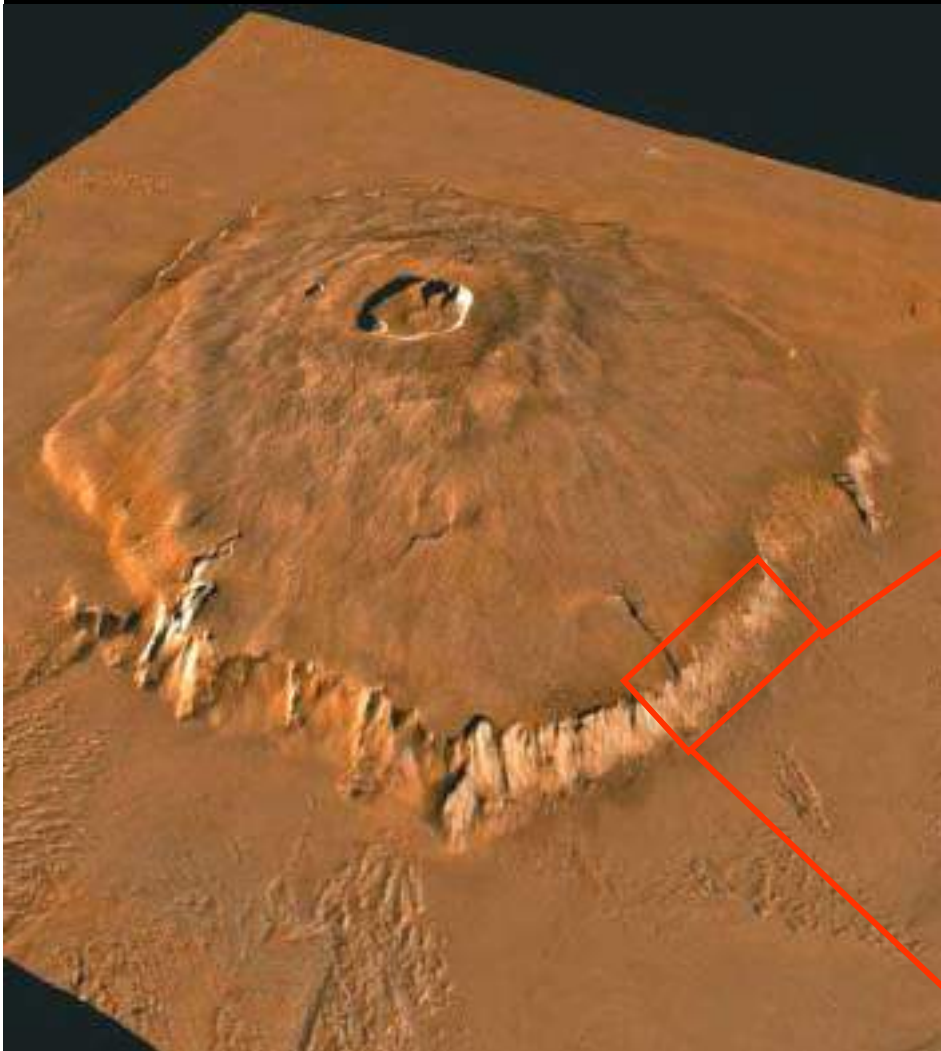




**Deux sondes martiennes en orbite disposent d'un radar. Voici une coupe radar globale de la calotte permanente nord. On y verrait 4 « cycles ».**

# 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.**

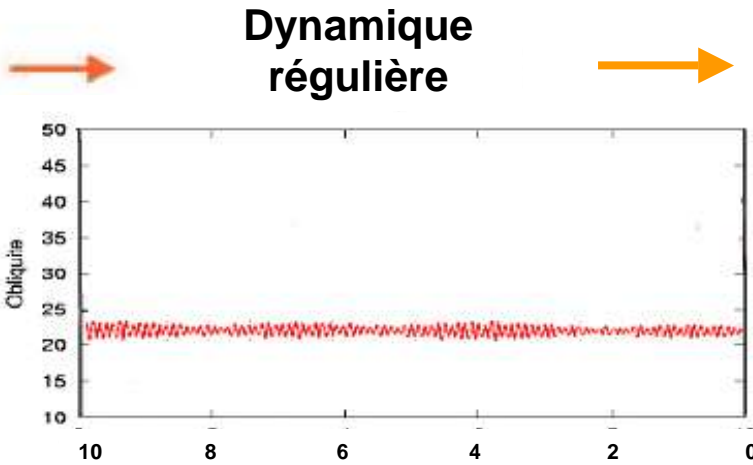


**Autre glacier de la région de Reuil Vallis,  
autres montagnes équatoriales.**

## Obliquité (II)



Terre

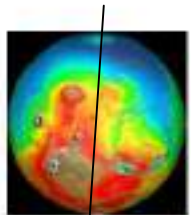


Périodes dominantes:

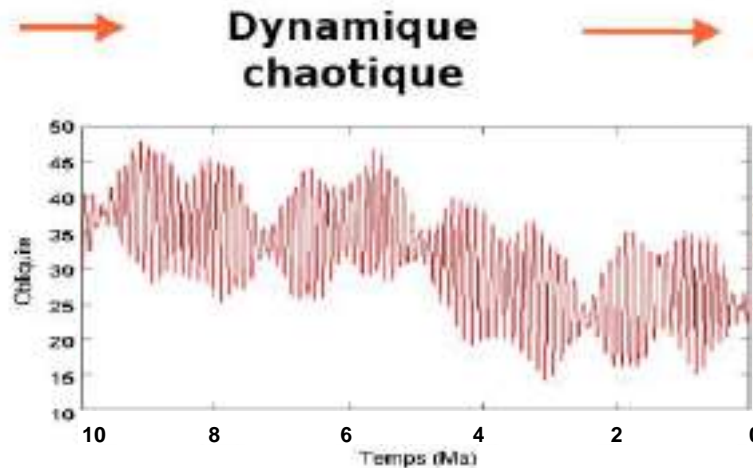
~41 000 ans

~39 600 ans

Modulation: ~ 1.2 Ma



Mars



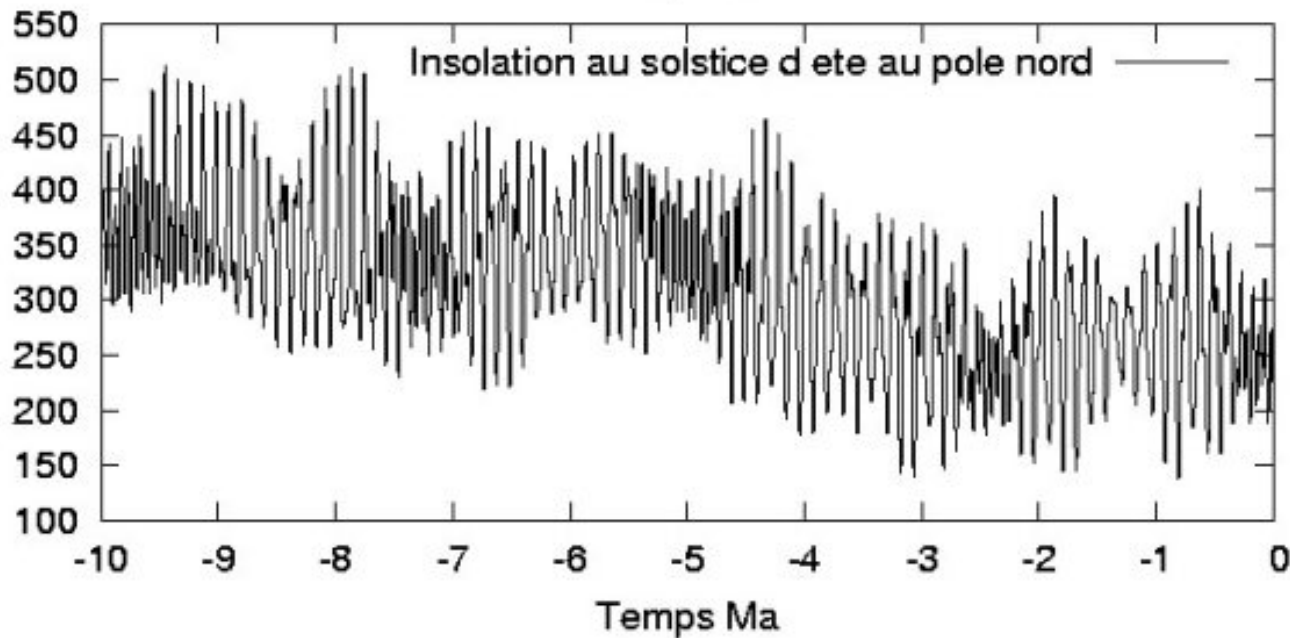
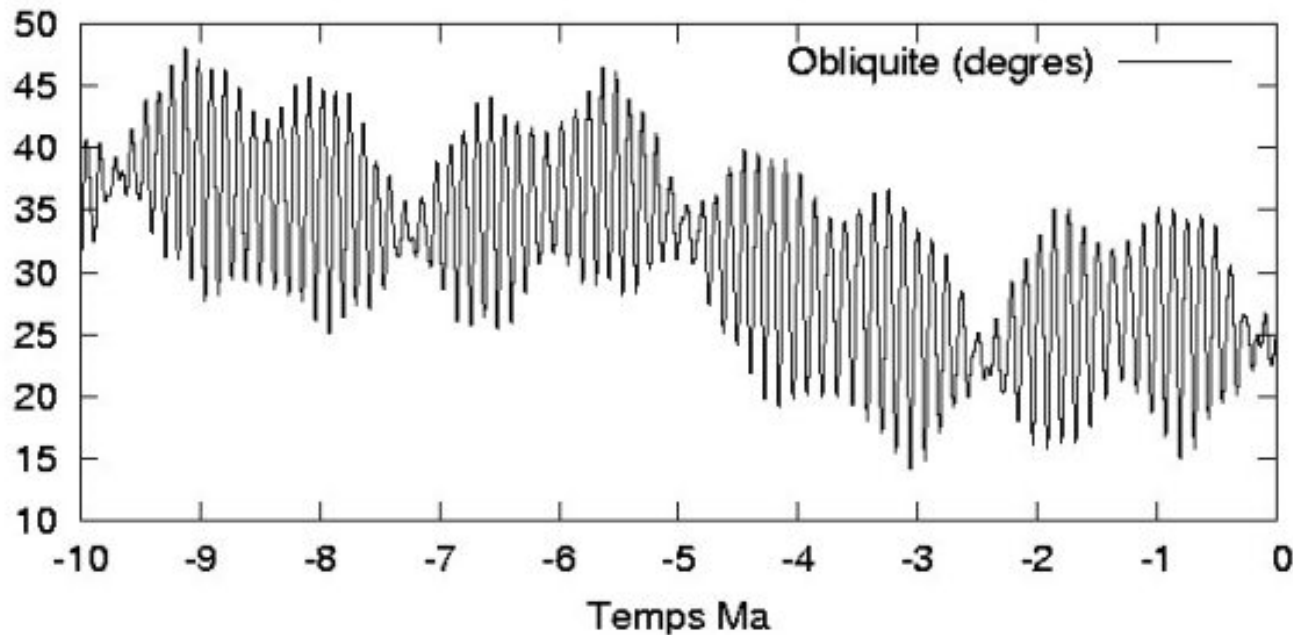
Mouvement  
chaotique entre 0 et  
80°  
(Laskar et Robutel,  
1993)

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

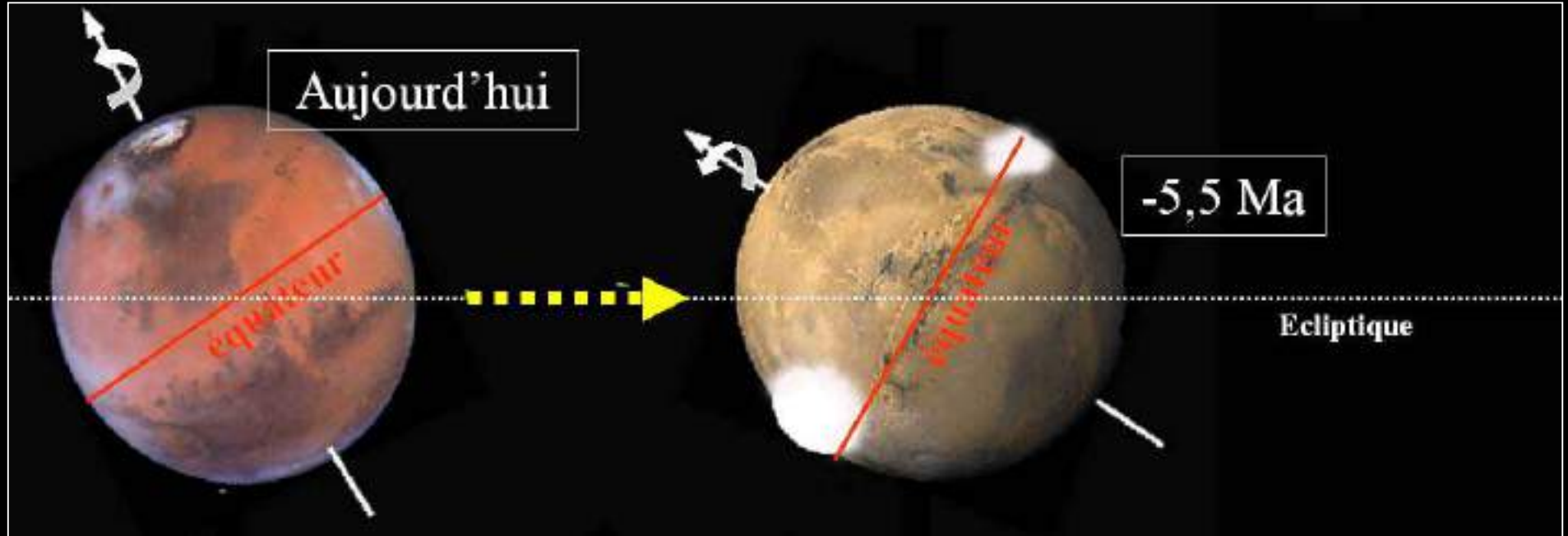
L'action du soleil et des astres voisins (entre autre sur le bourrelet équatorial) fait varier l'inclinaison de l'axe de rotation des planètes



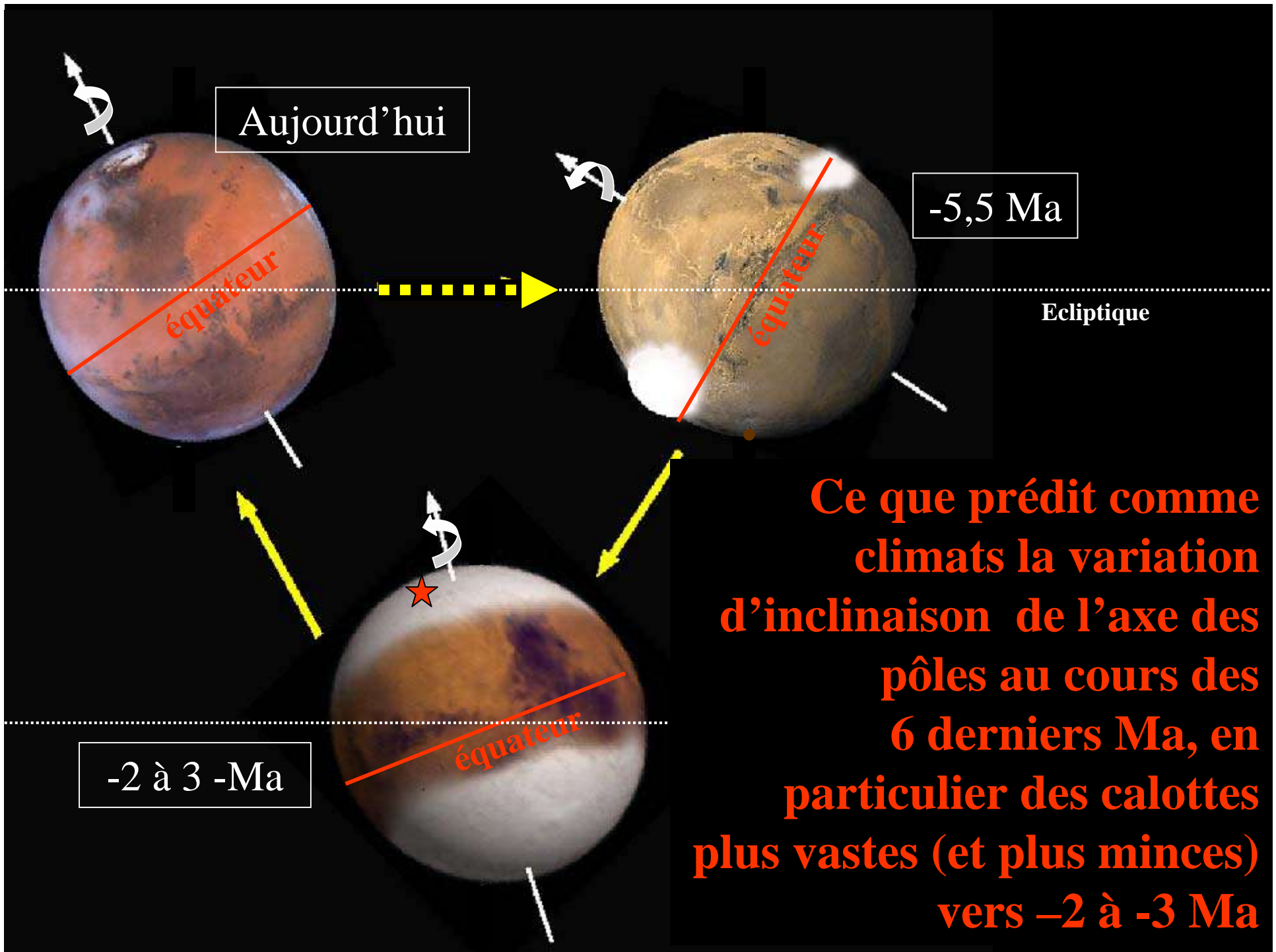
**Sur les 10 derniers millions d'années, les calculs montrent l'inclinaison de Mars a varié entre 15° et 45°. Avant, c'est « incalculable » (basculement chaotique)**

**Cela a entrainé une variation d'insolation polaire l'été de 150 à 500  $W/m^2$**





**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.**

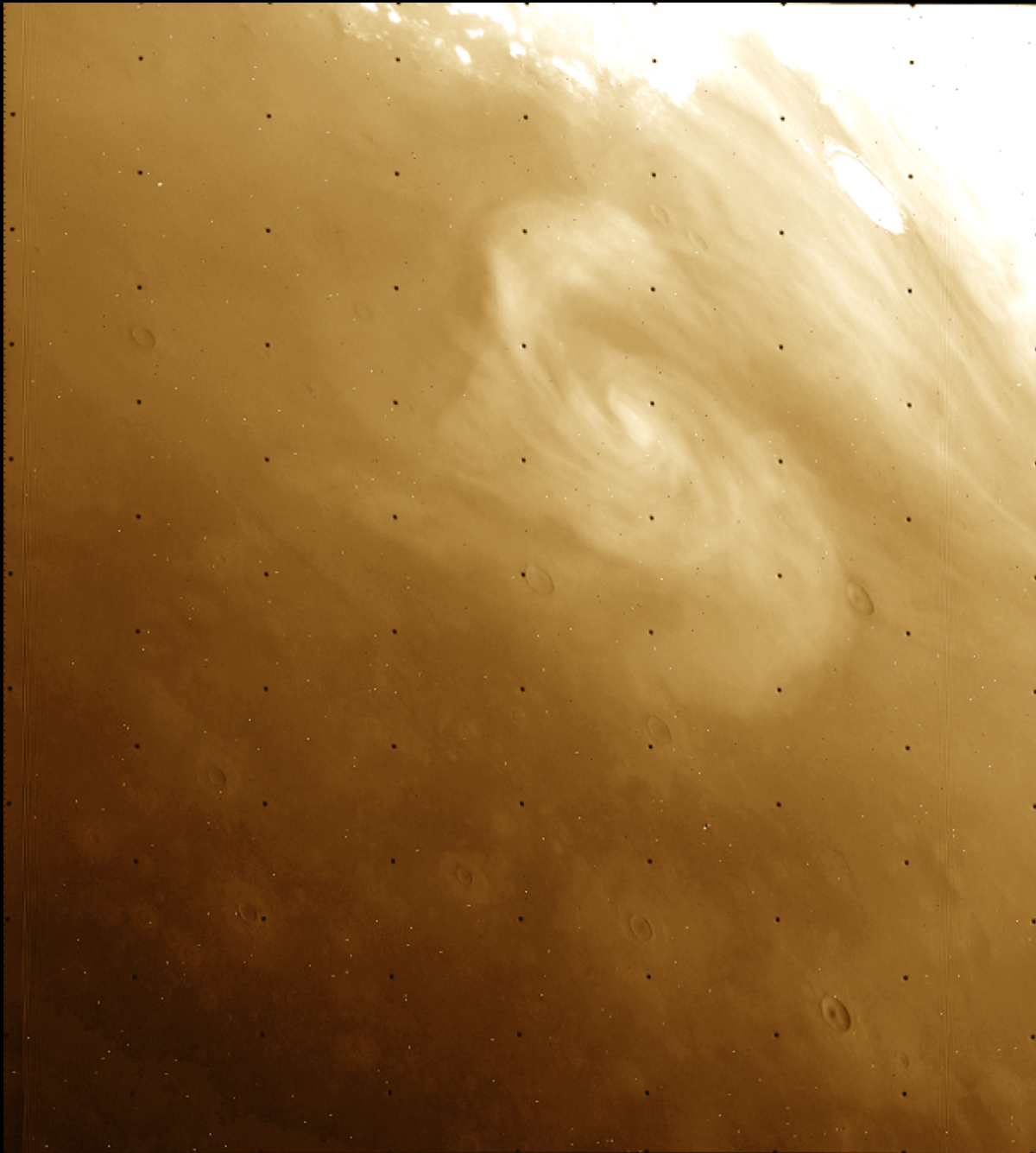




**Et voici, au fond d'un cratère ( $70^{\circ}$  N) ce qu'on pourrait un reste « permanent » de cette « calotte transitoire ». Noter que comme tous les versants « à l'ombre » au petit matin, ses flancs nord sont recouverts de givre ou de neige.**

# Dans l'atmosphère

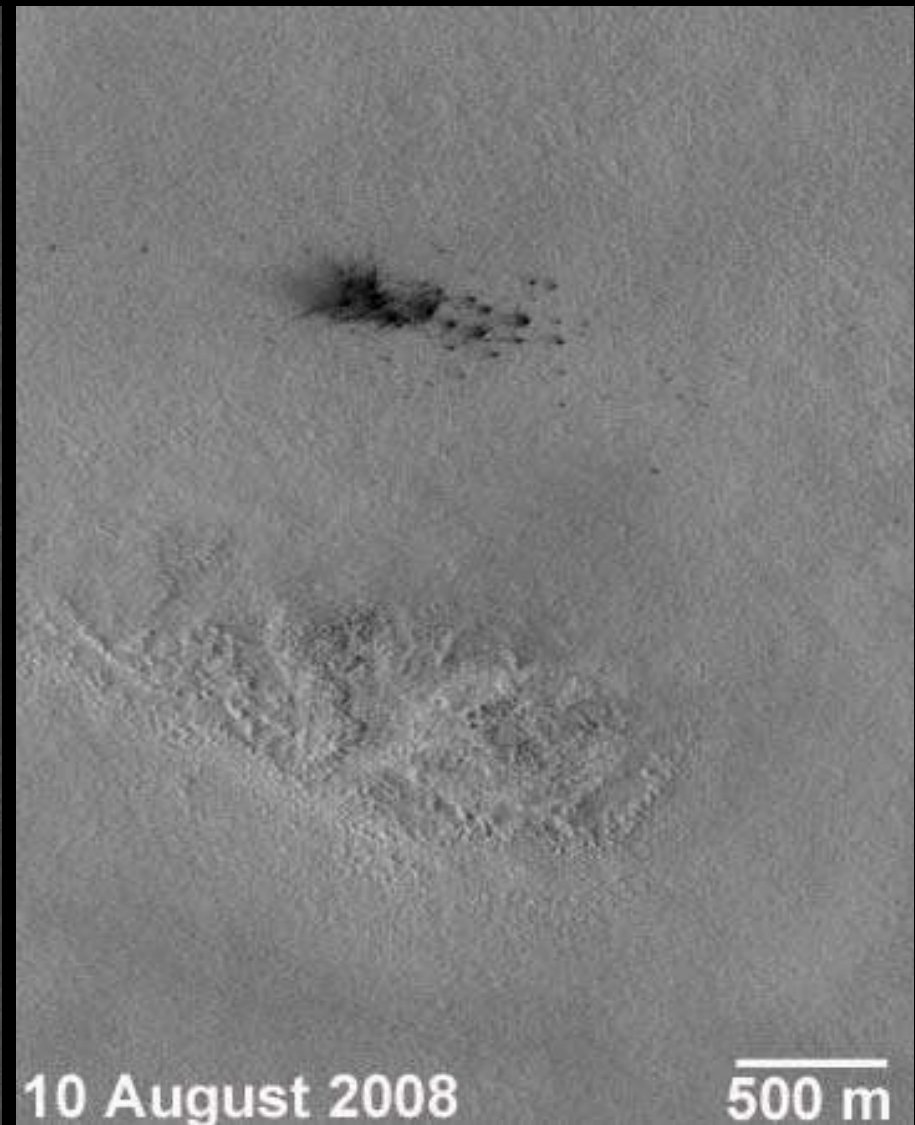
La vapeur  
d'eau  
représente  
0,021% de  
l'atmosphère,  
soit une couche  
de  $12 \mu$  d'eau  
précipitable





**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' $H_2O$**

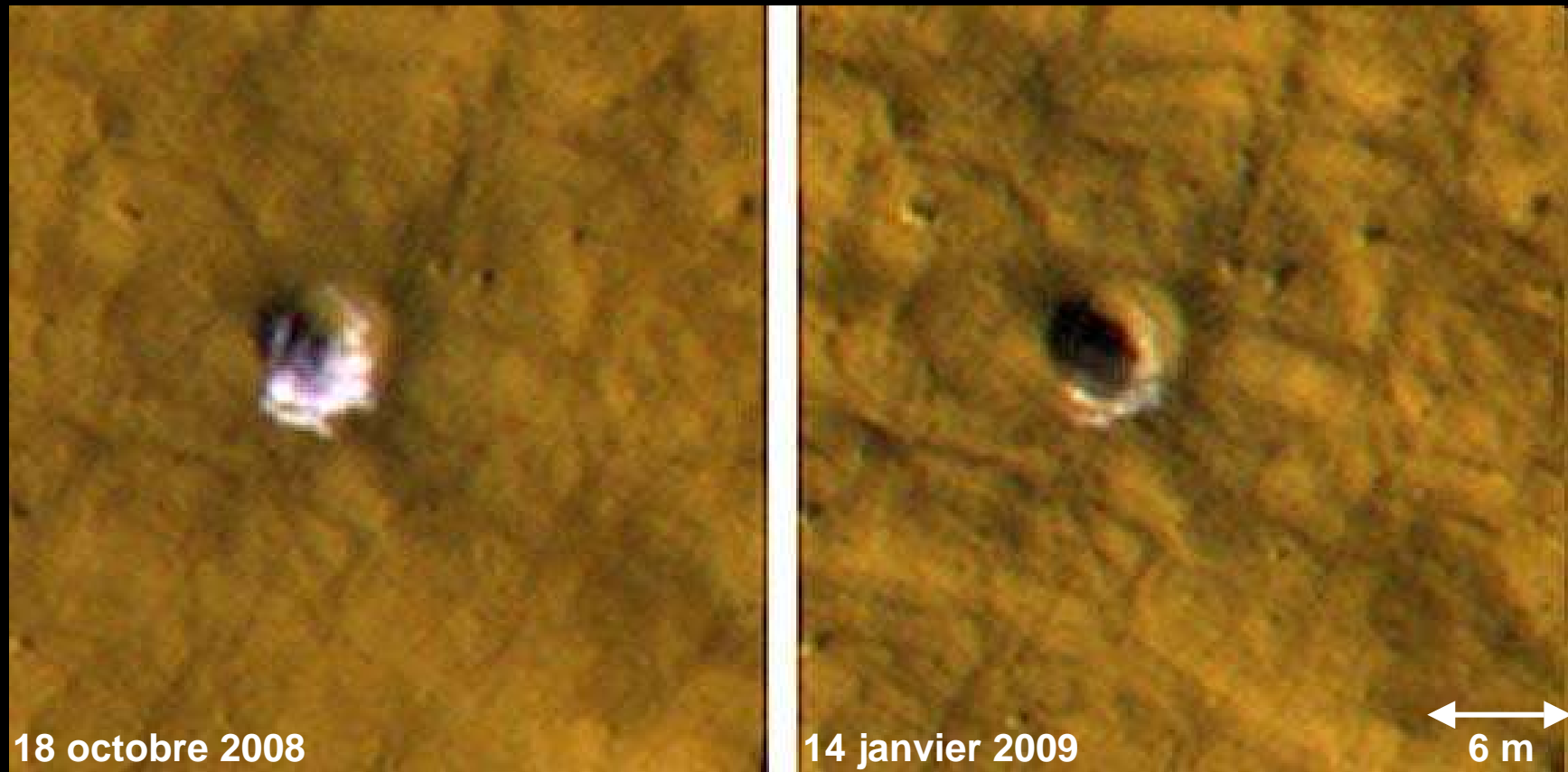
Photos Viking, 1976-1977



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



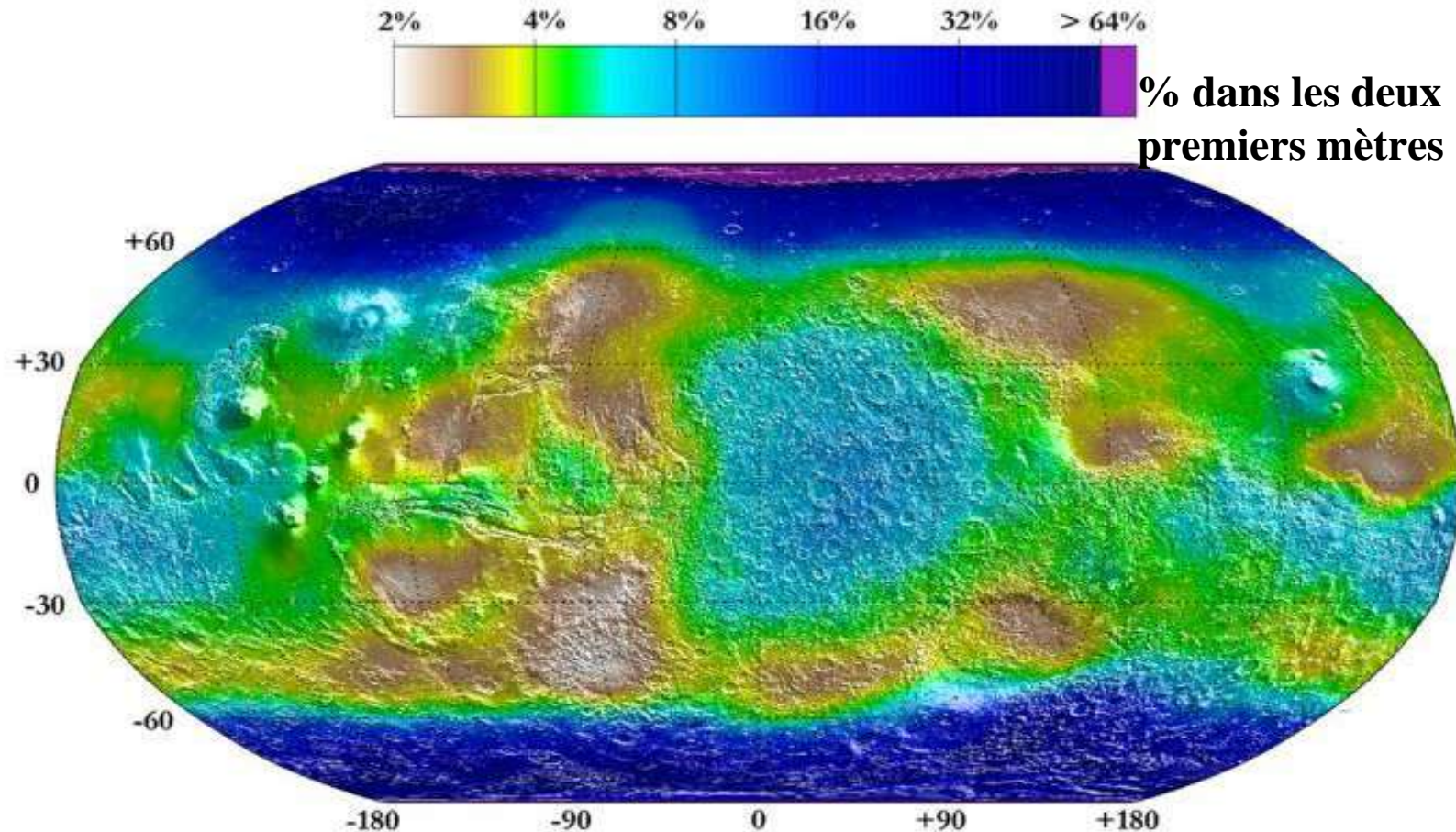
**Les plus « grands » de ces cratères « actuels » sont souvent entourés d'éjectas blancs, que les spectres IR révèlent être fait de glace d'eau. Ce cratère a été creusé en 2008. Il mesure 8 m de diamètre, pour 1,5 m de profondeur. De la glace d'eau existe donc à faible profondeur dans cette région (56°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



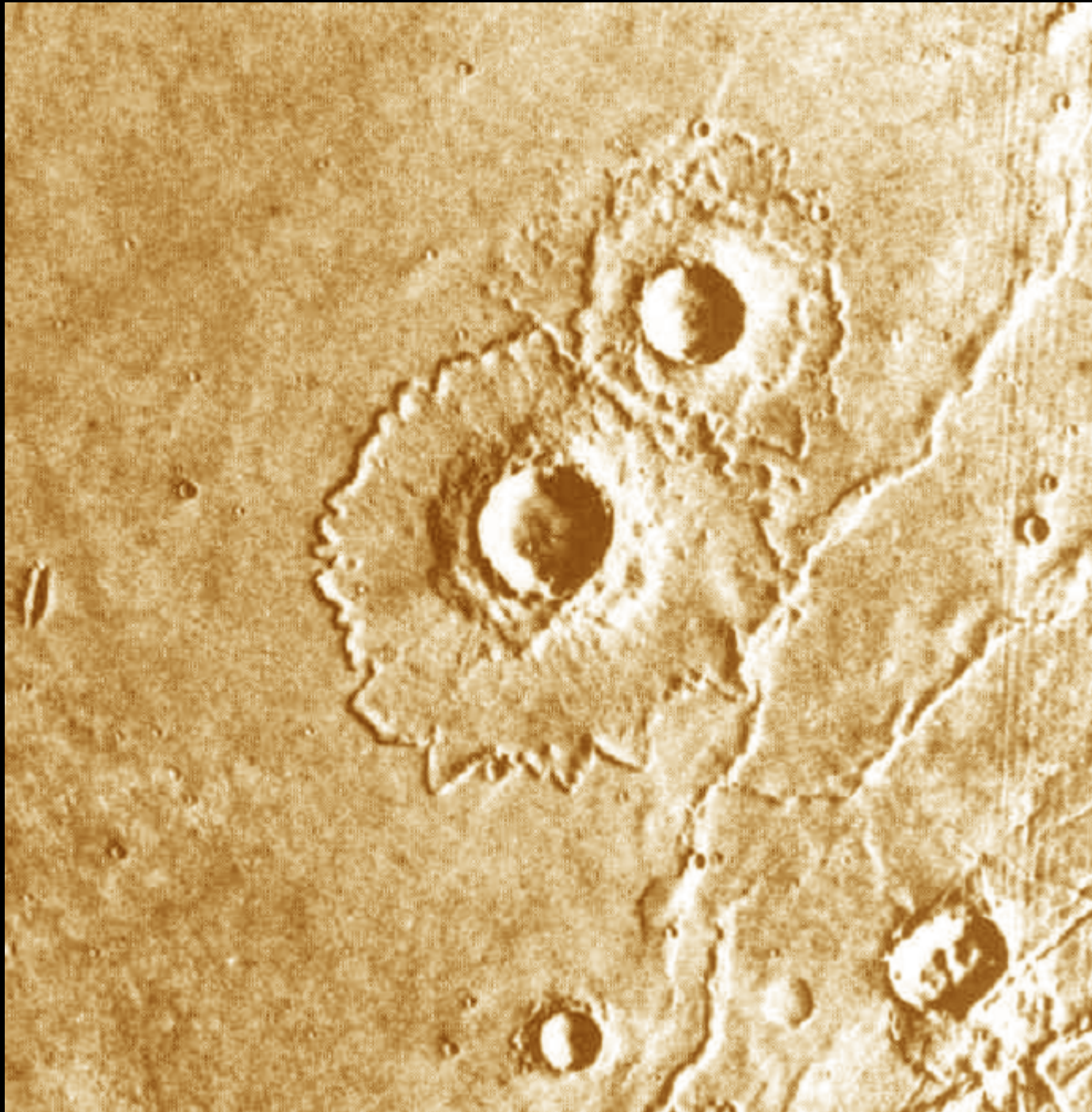
**Voici un autre petit cratère récent ( $D = 6\text{ m}$ ,  $P = 1,3\text{ m}$ ) creusé entre le 22 décembre 2007 et le 5 juillet 2008. Le 18 octobre, une image Haute Résolution montre de la glace vive, quasiment sublimée le 14 janvier 2009. De la glace stable en profondeur (mais instable en surface)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



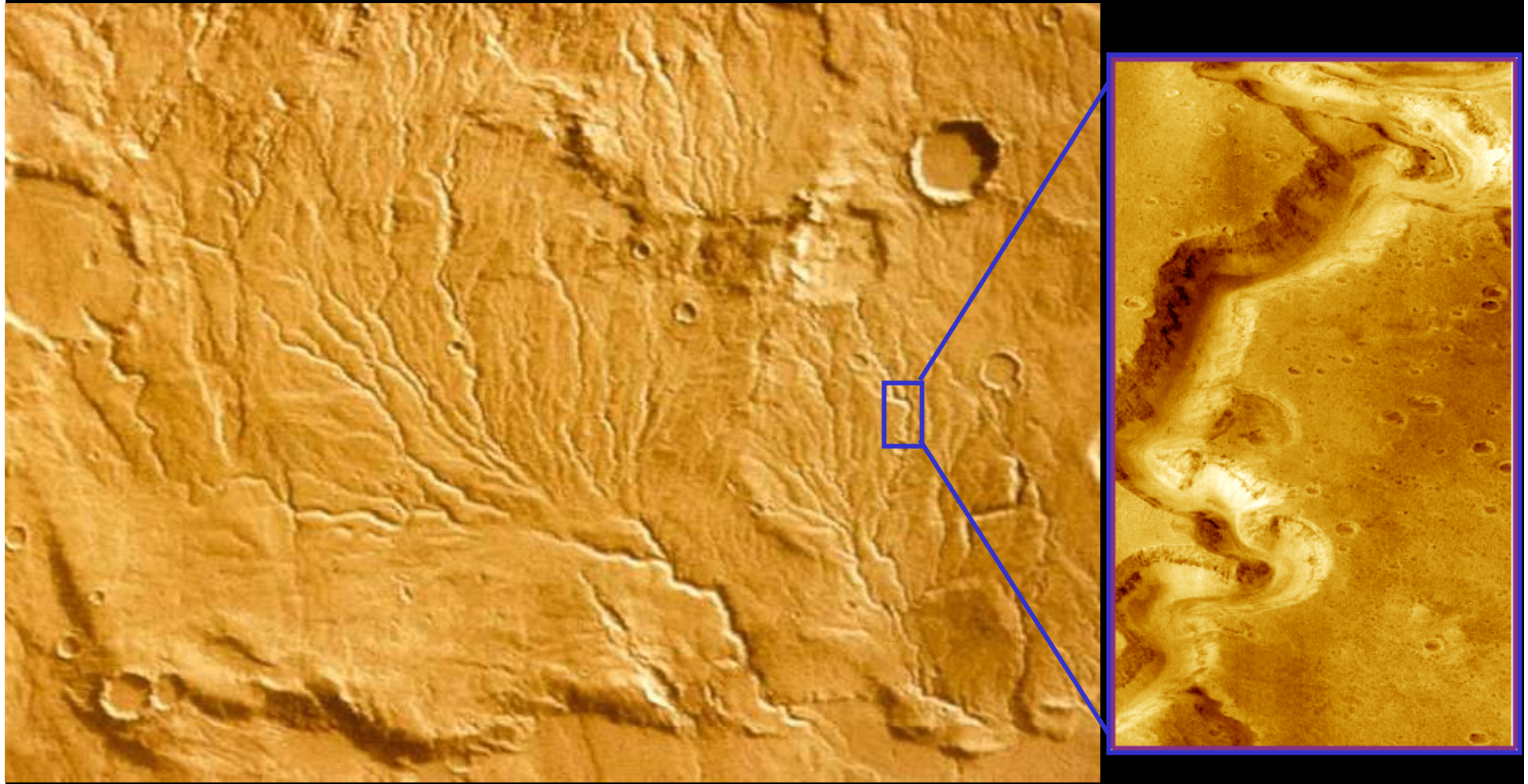
## Lower-Limit of Water Mass Fraction on Mars



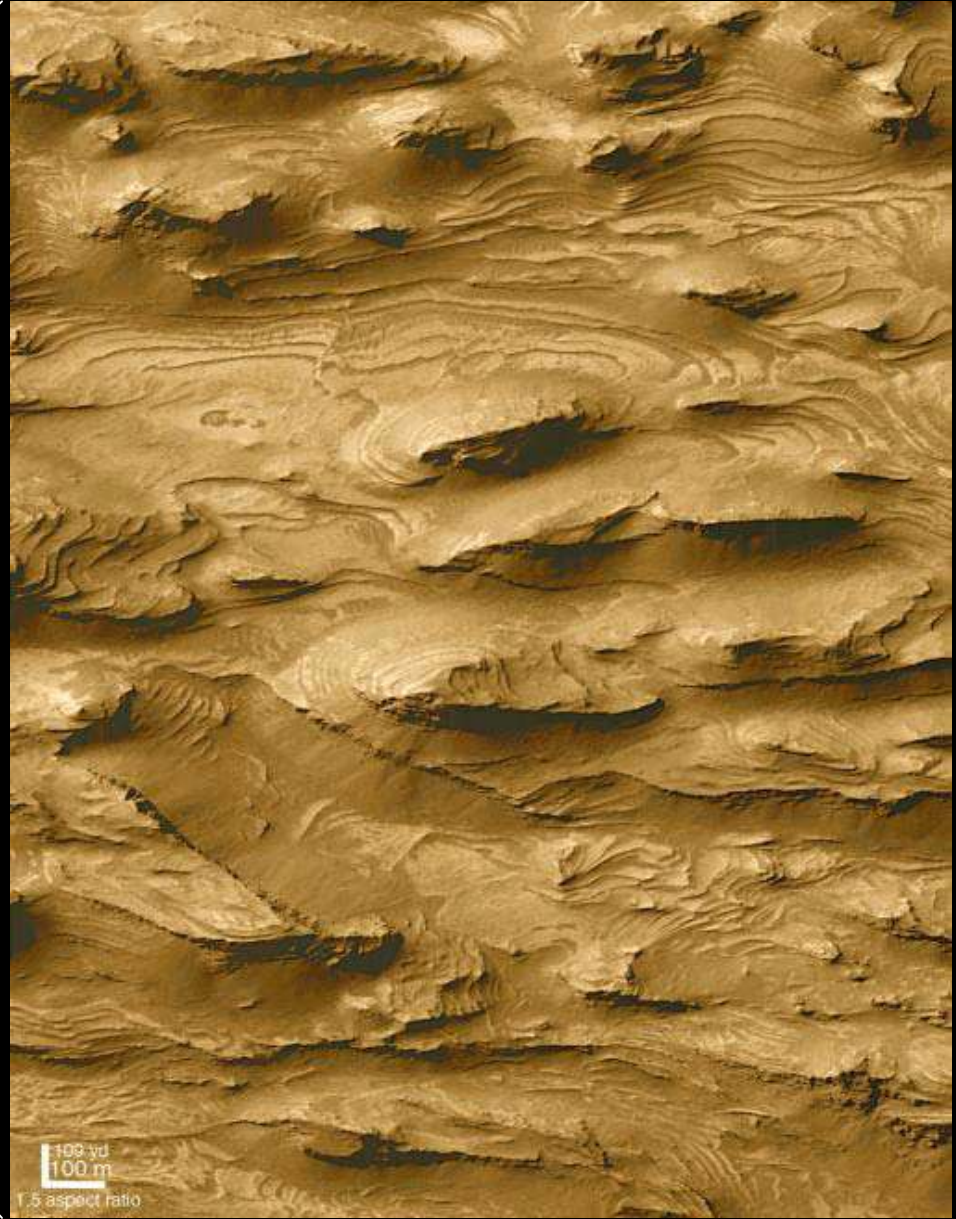
**Avec les neutrons émis par le sol sous l'action du rayonnement cosmique, on voit qu'il y a beaucoup d'H<sub>2</sub>O (de glace vu la température) dans le sous-sol superficiel, ou du moins beaucoup de Deutérium, et en particulier au-delà de 60° lat. N et S**



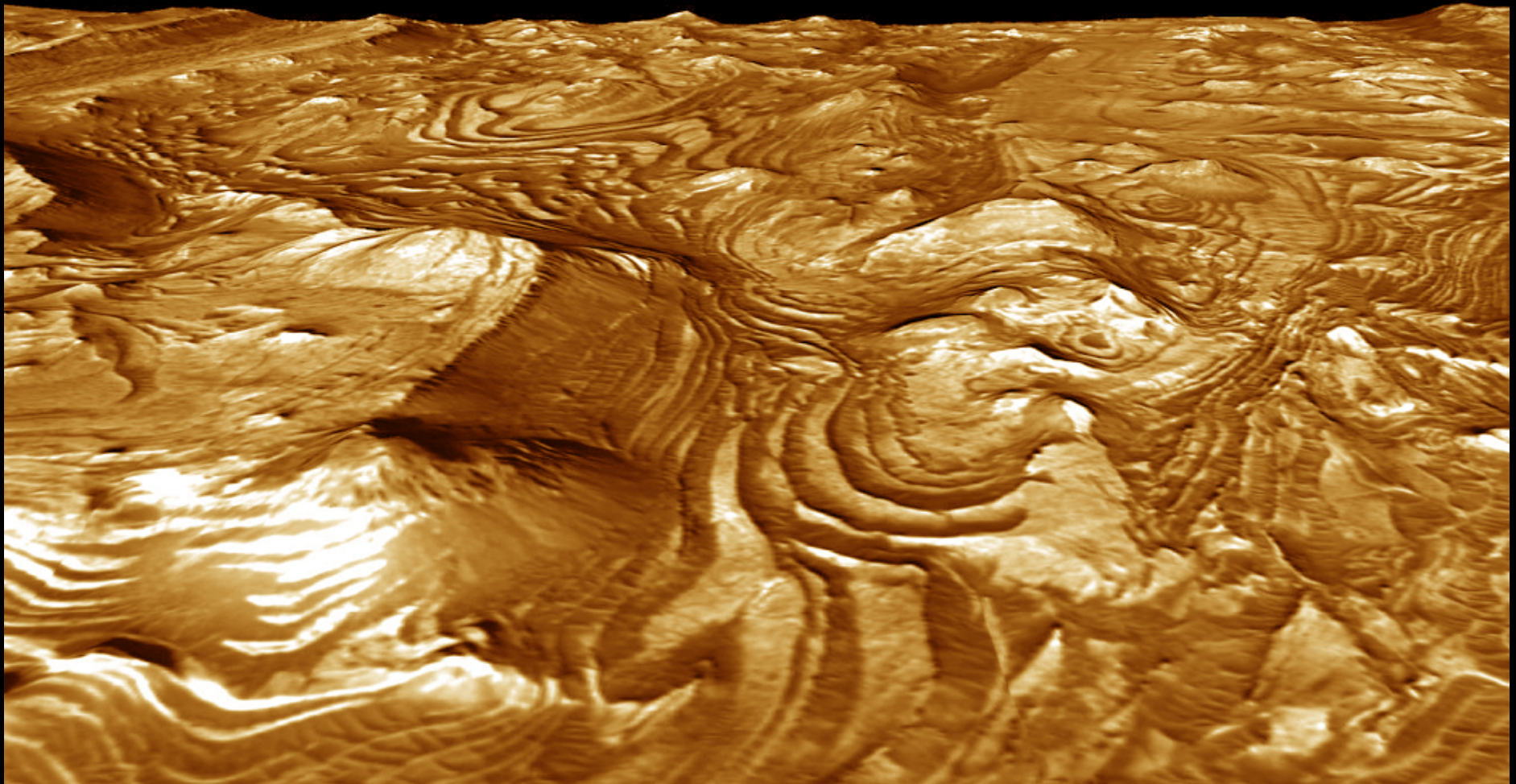
**Il y en a  
dans le  
sous-sol  
profond.  
Les  
cratères y  
font  
« sploch »**



**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**

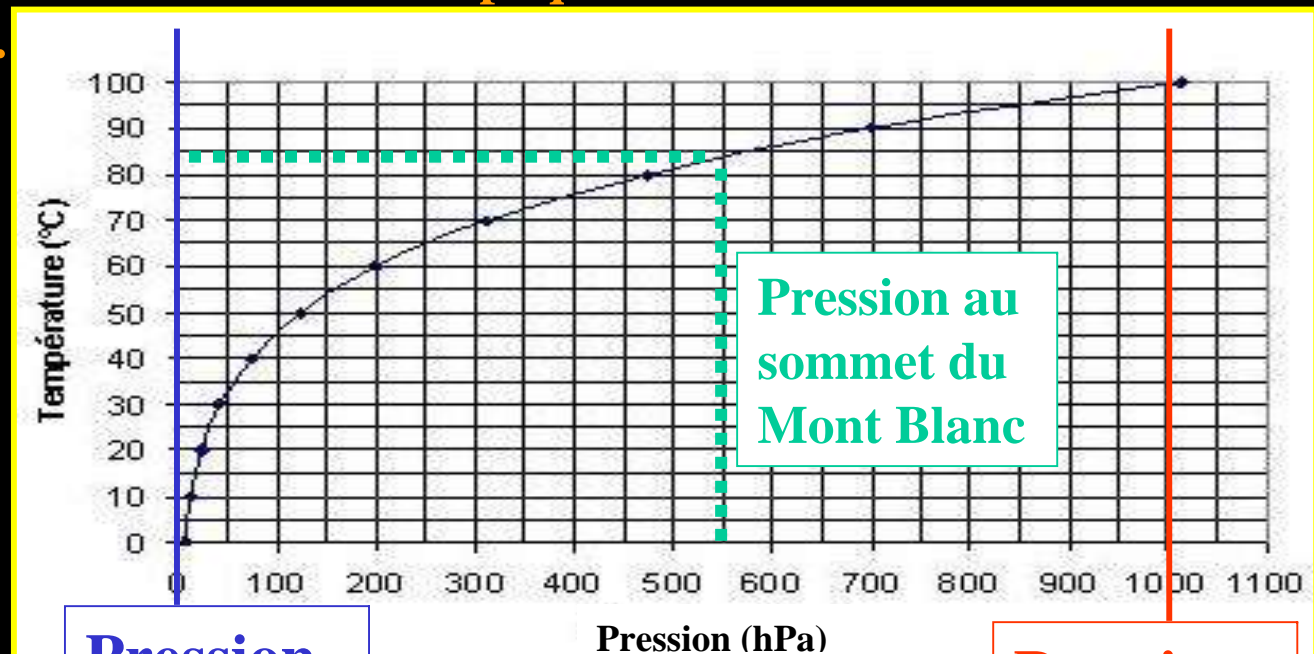
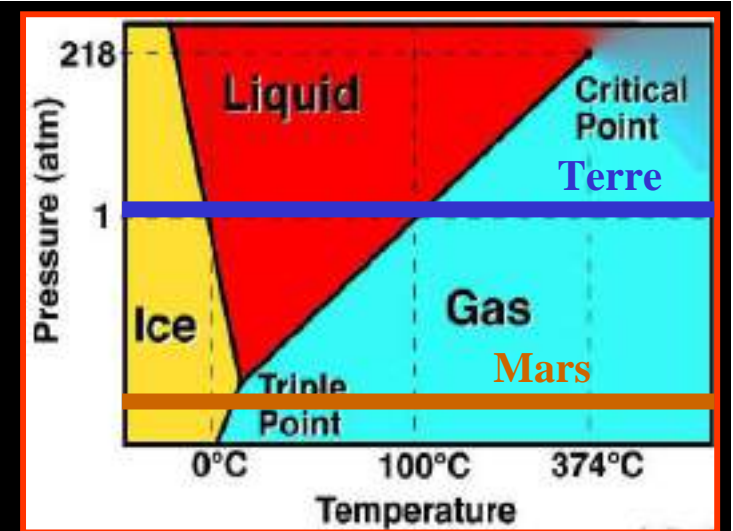


**Les mêmes en vue rasante, avec raies spectrales (IR) d'évaporites (sulfates) . Et on a trouvé dans les vieux terrains les raies spectrales (IR) des argiles, preuve d'une altération aqueuse.**

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 !

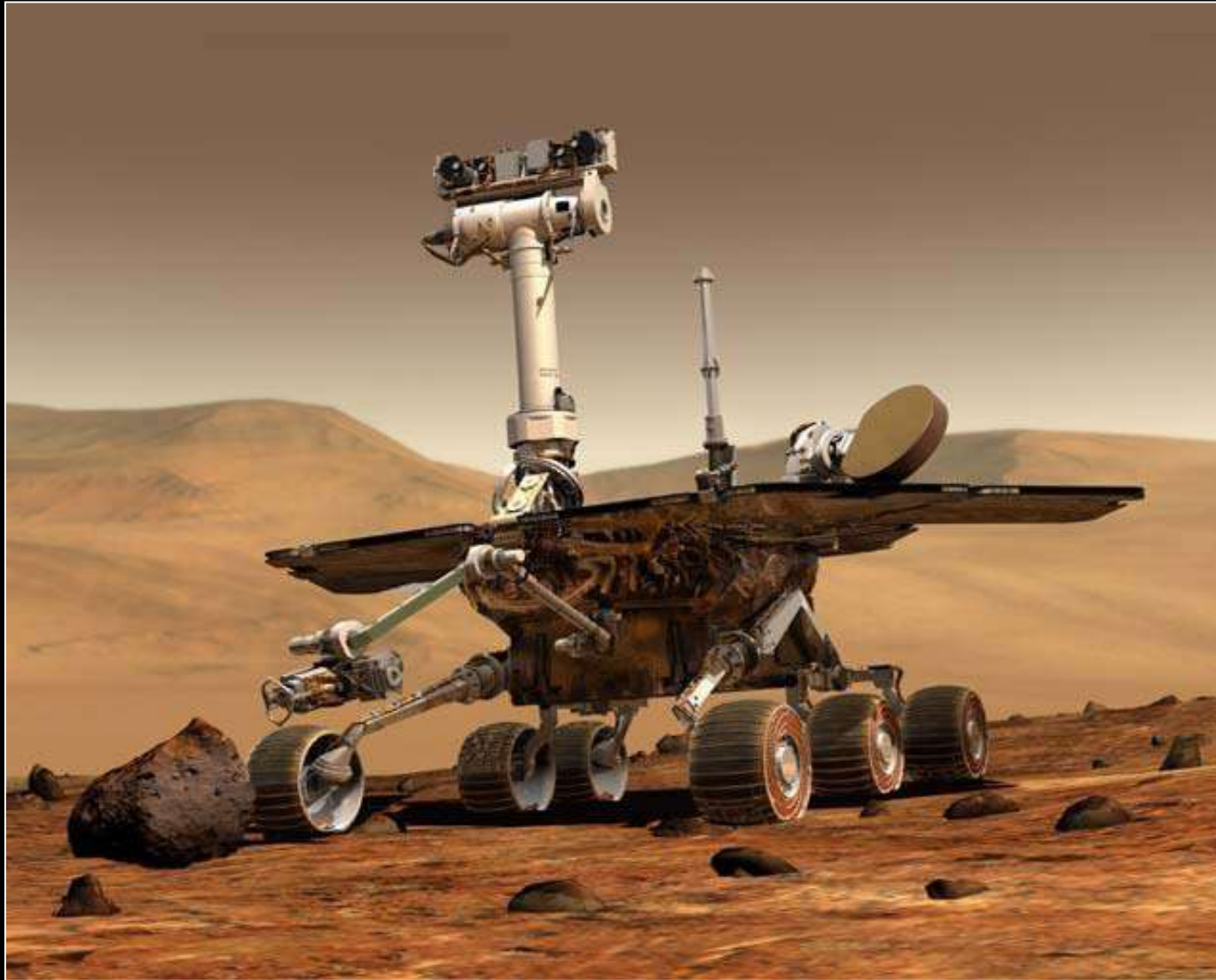
Les traces d'H<sub>2</sub>O liquide doivent dater d'une époque où  
P et T étaient plus élevées.



Pression  
sur Mars

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

Pression  
sur Terre

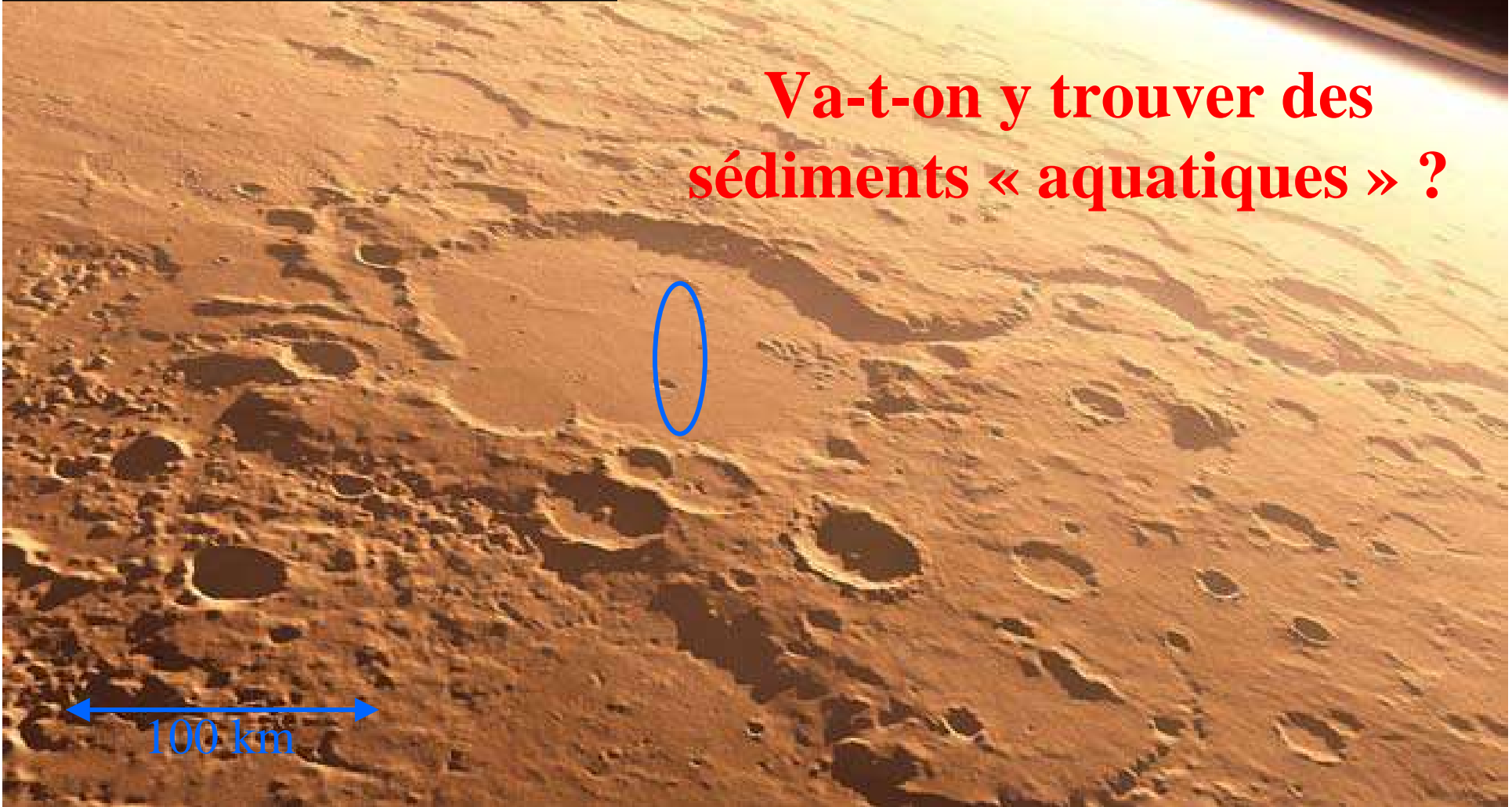


**Les résultats des 3 robots Nasa  
(ceux concernant l'eau)**



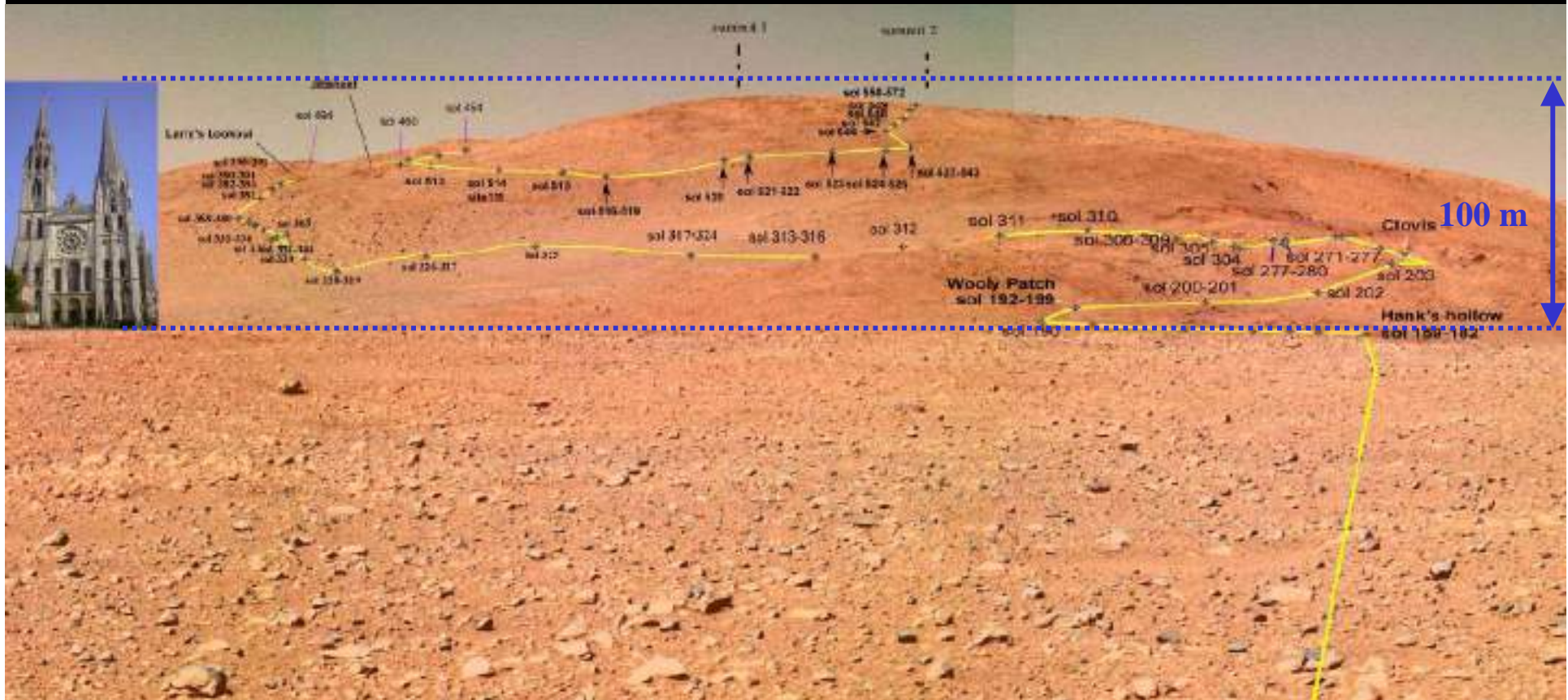
**Voilà où s'est posé le 1er robot mobile, Spirit, au fond du cratère Gusev, probable ancien lac.**

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

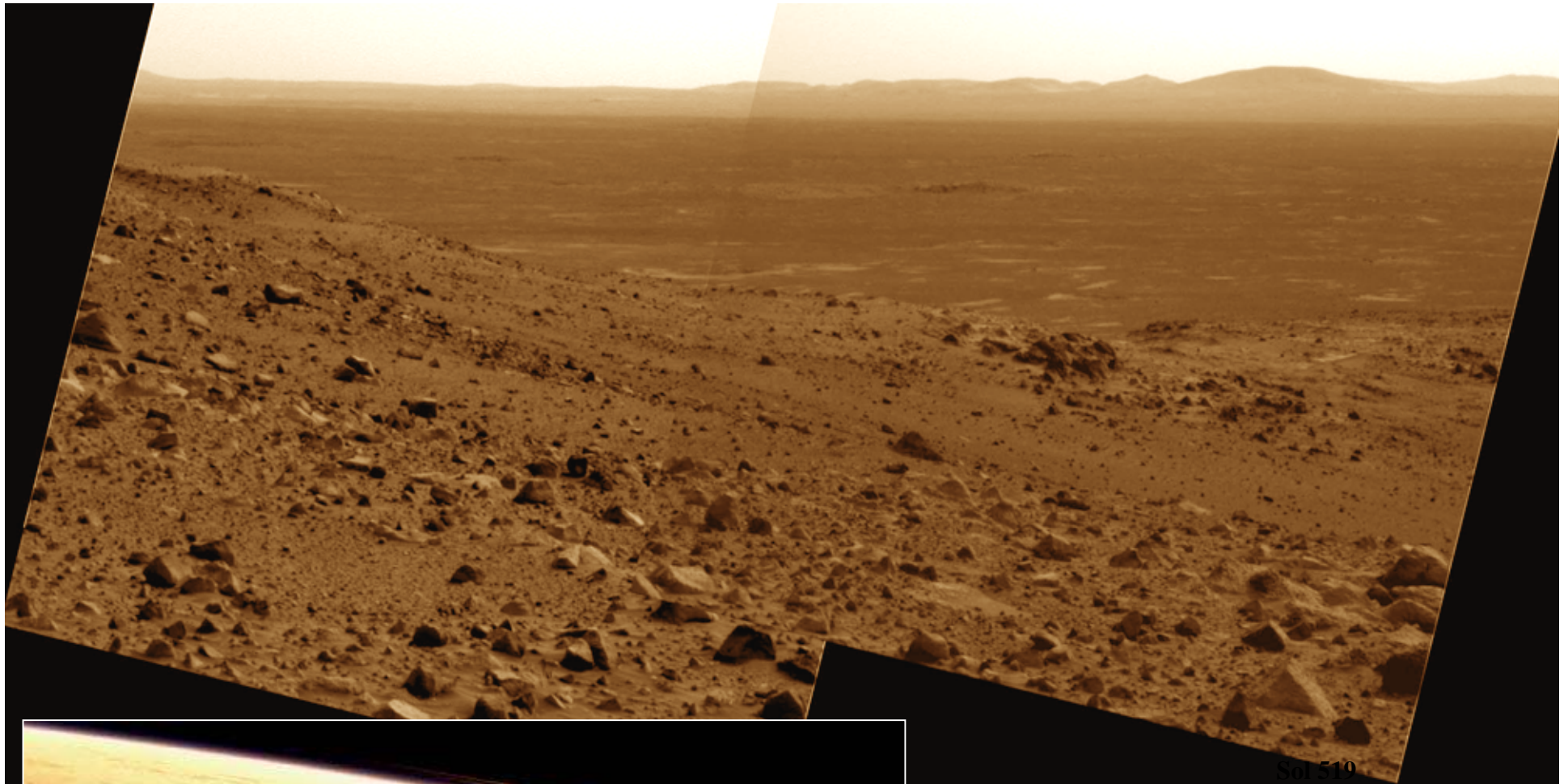




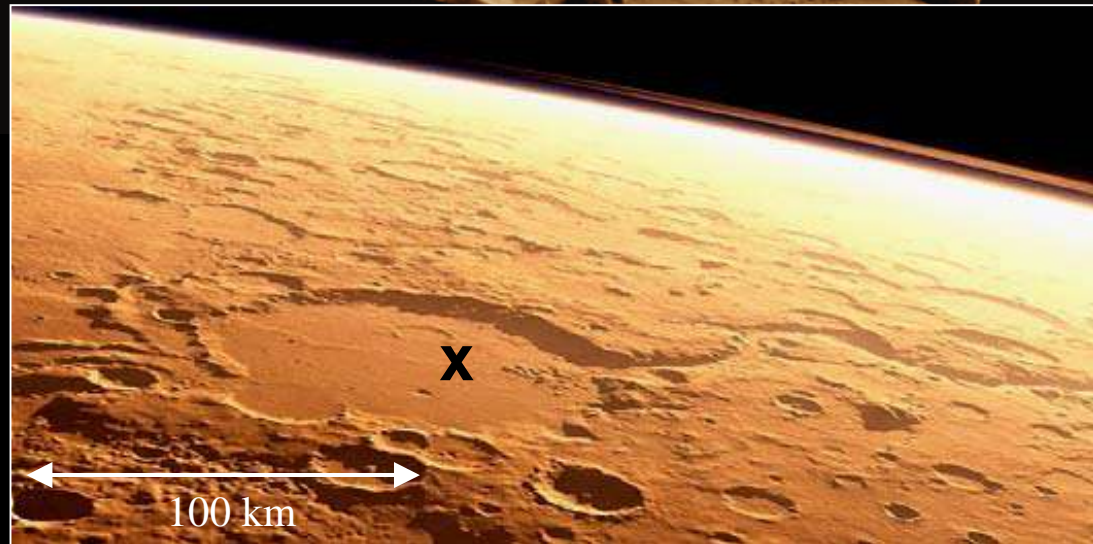
# En janvier 2004, Spirit s'est posé à 3 km de collines



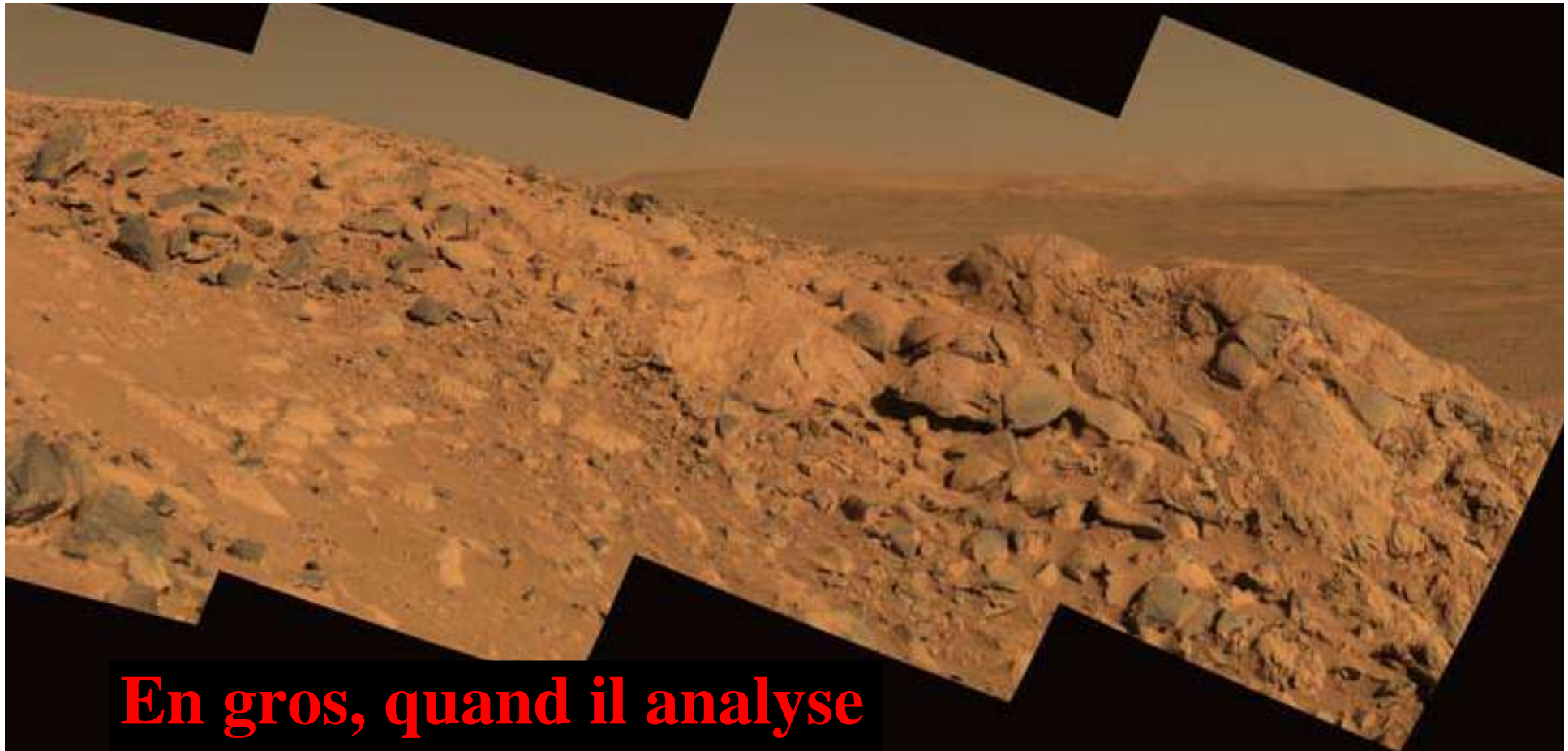
**Il analyse au voisinage du point d'atterrissage, va au pied des collines, y monte, redescend derrière et est maintenant de l'autre côté de ces collines, enlisé, après avoir parcouru au total plus de 10 km**



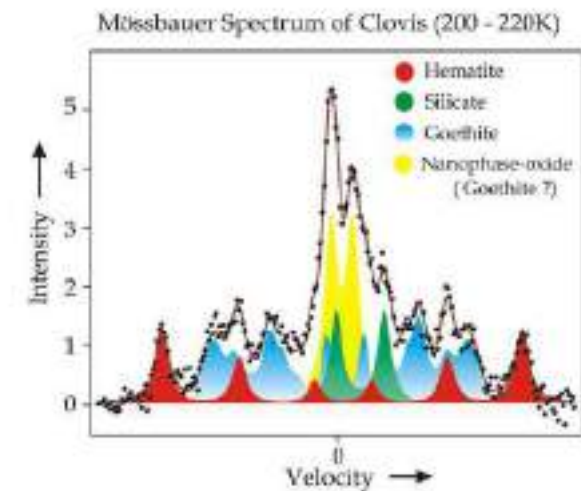
Sol 519

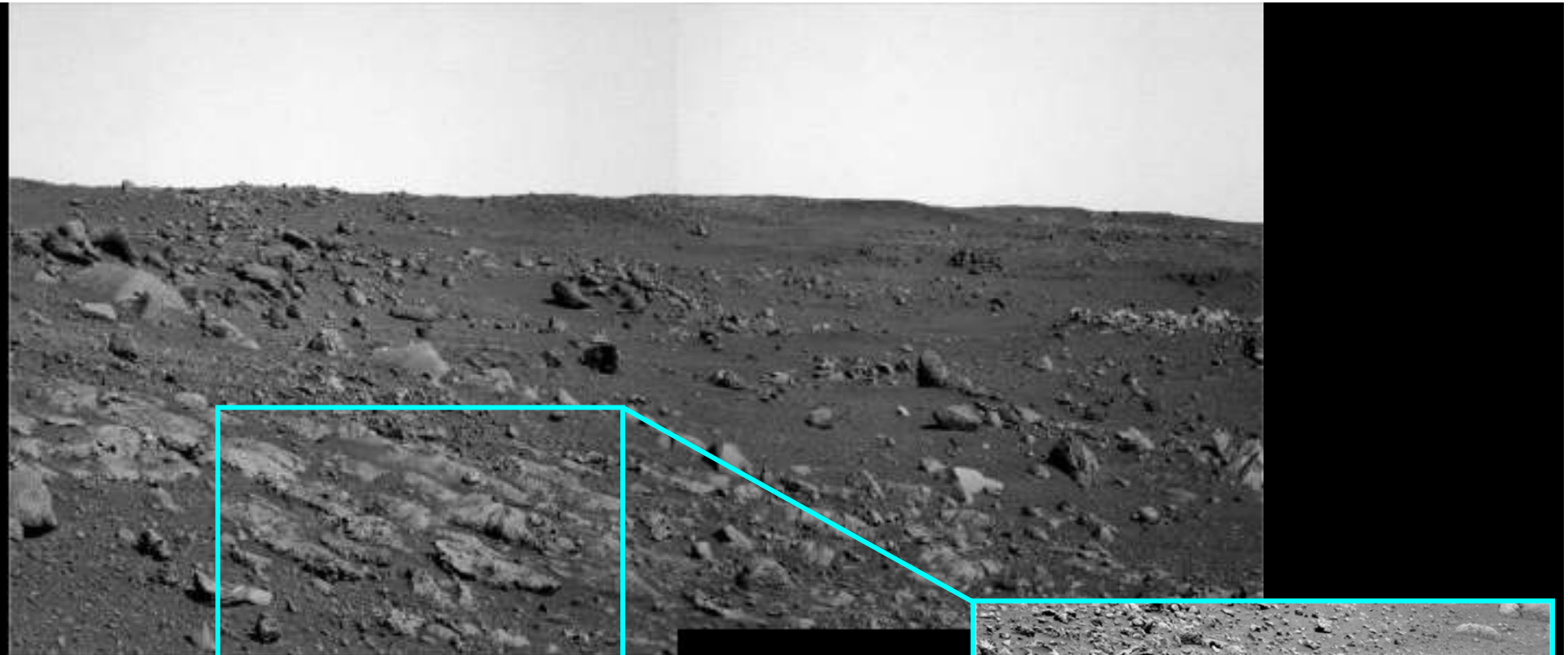


**Avant de parler d'eau,  
un paysage : quand il  
fait clair, on découvre  
les bords du cratère  
Gusev, à 50 km de là.**



**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.**



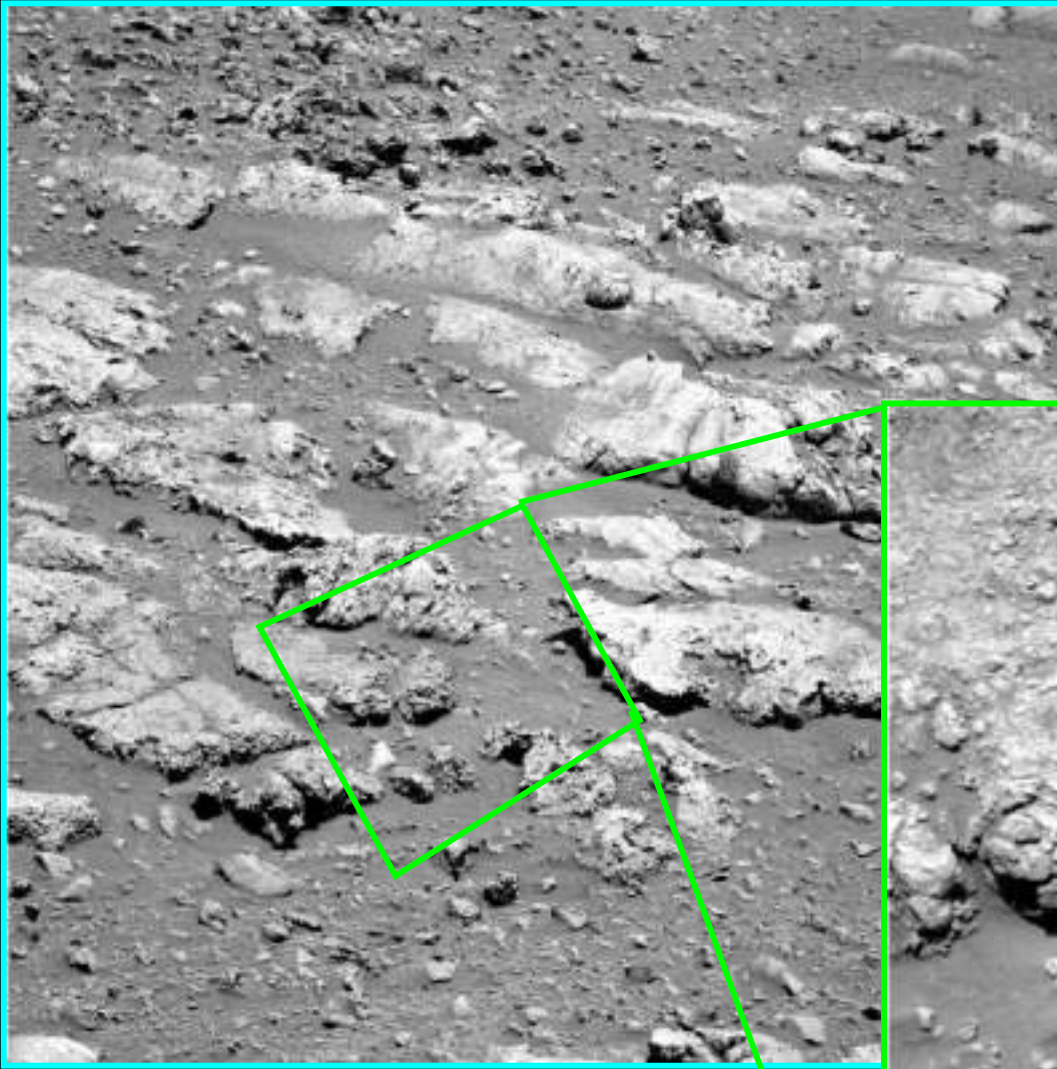


**Près du sommet, de  
nouveaux affleurements**

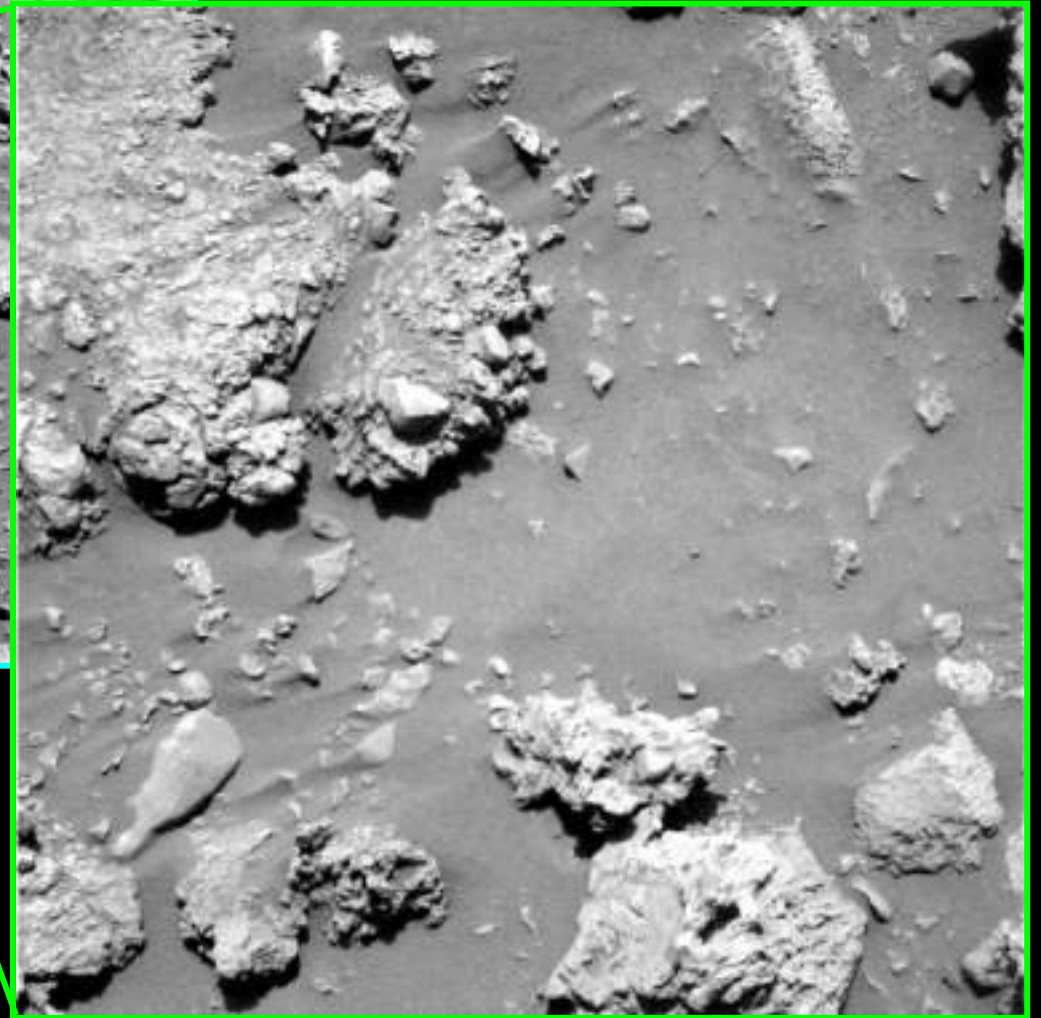
**Détaillons cet  
affleurement vaguement  
stratifié**

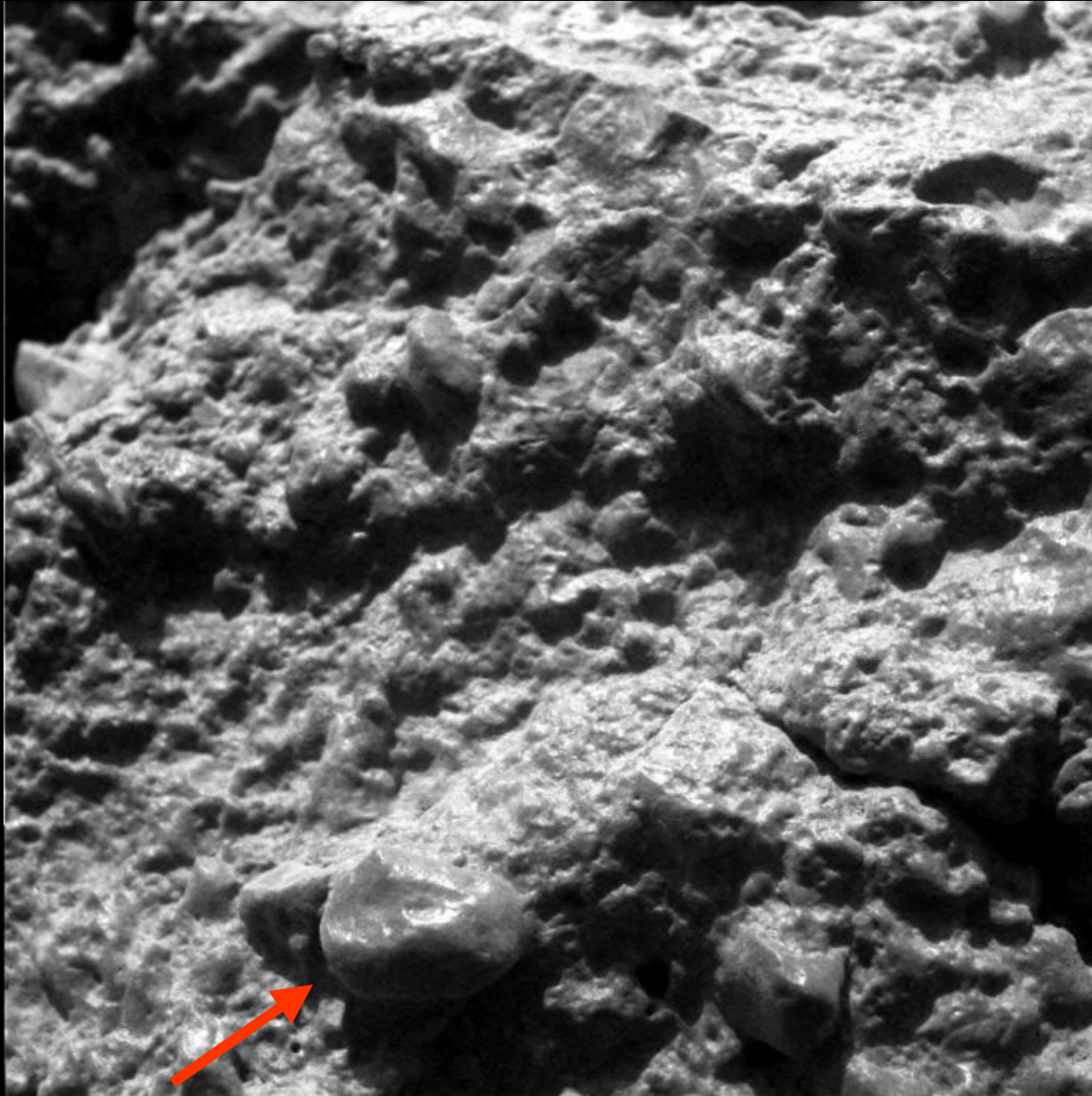


**Approchons nous !  
Les strates sont  
faites de brèches !**



**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 »**



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

