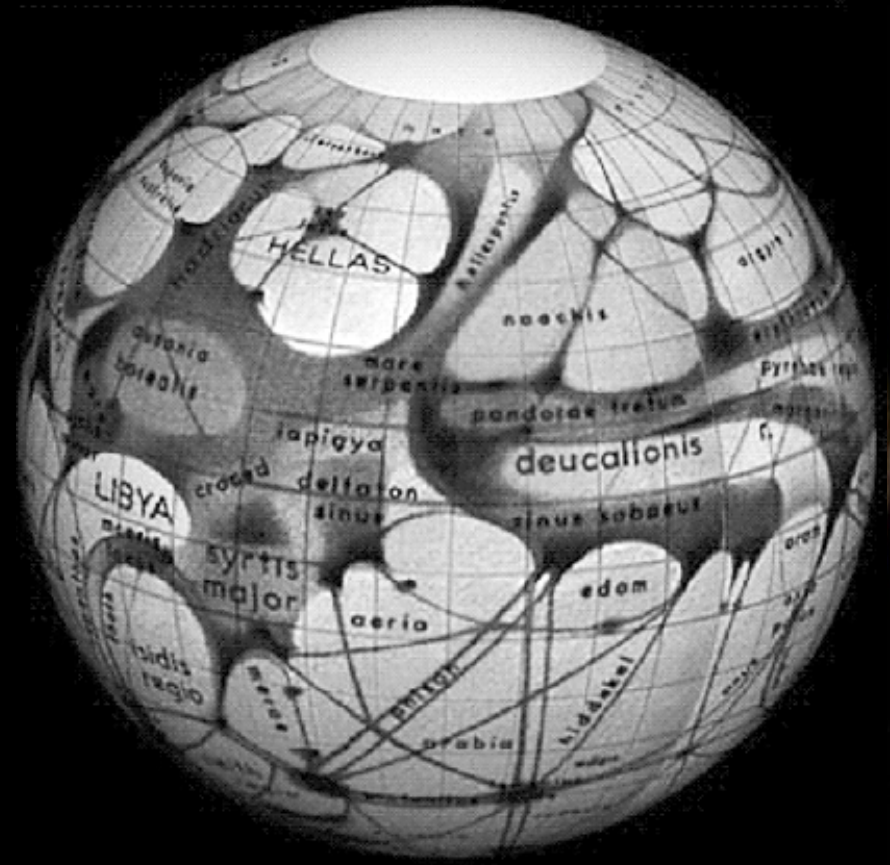
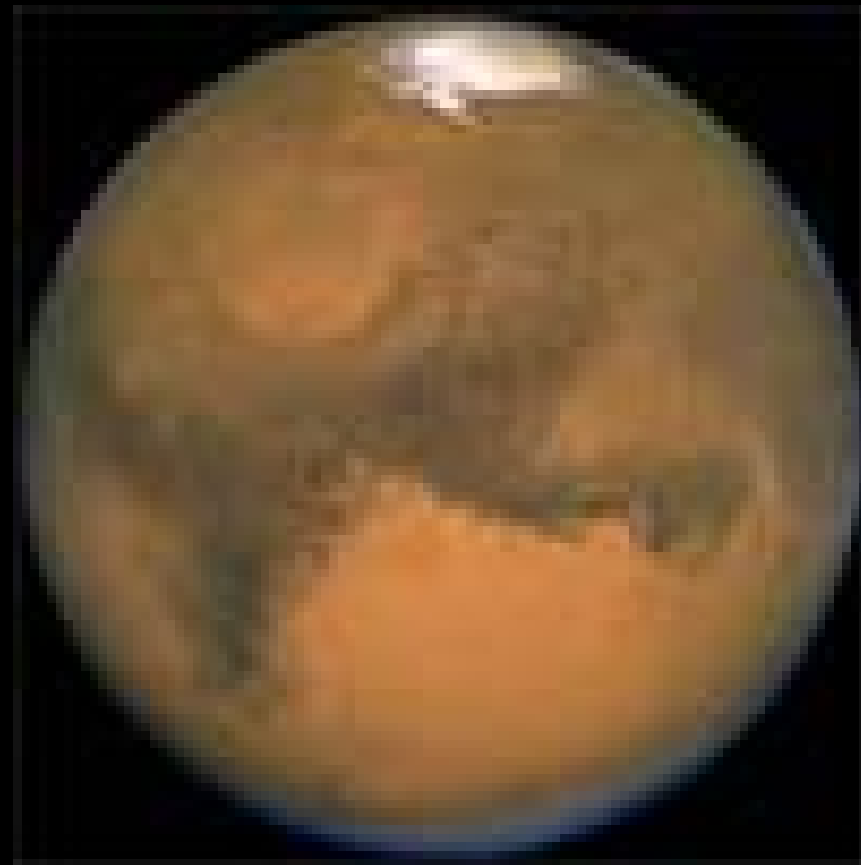


# 1996-2010, quinze ans d'exploration qui ont changé la face de Mars



Mars vu au télescope



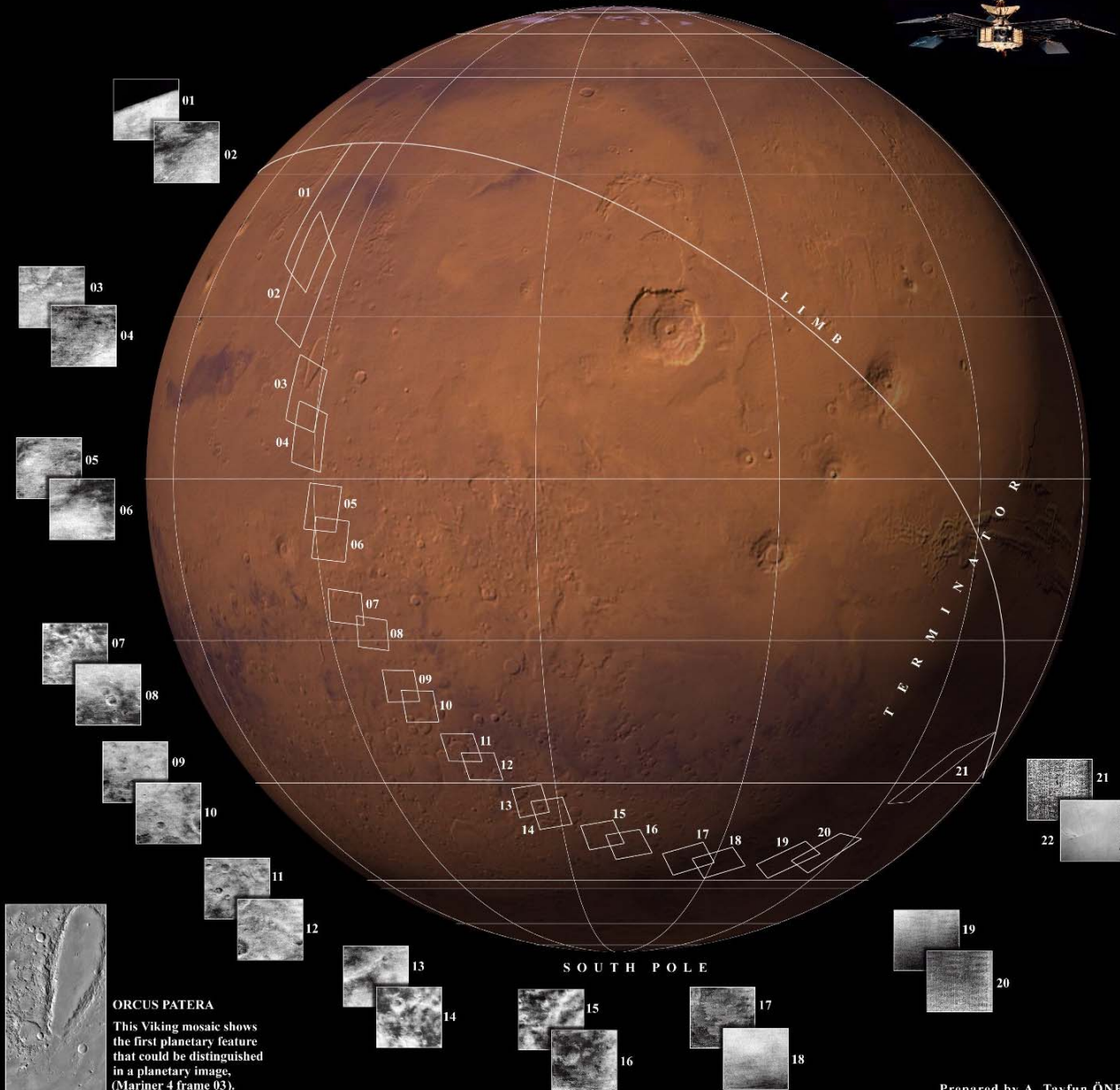
**Avant 1965, avec les télescopes, on mesurait diamètre et masse, on détectait la présence d'une atmosphère, de saisons, de calottes polaires variables...**

**Certains « croyaient voir » plus que ne le permettaient les télescopes. Et les romanciers se sont emparés de ce plus. Ainsi est né le mythe des martiens.**



Mariner IV Mars Encounter Imaging Geometry  
July 15, 1965

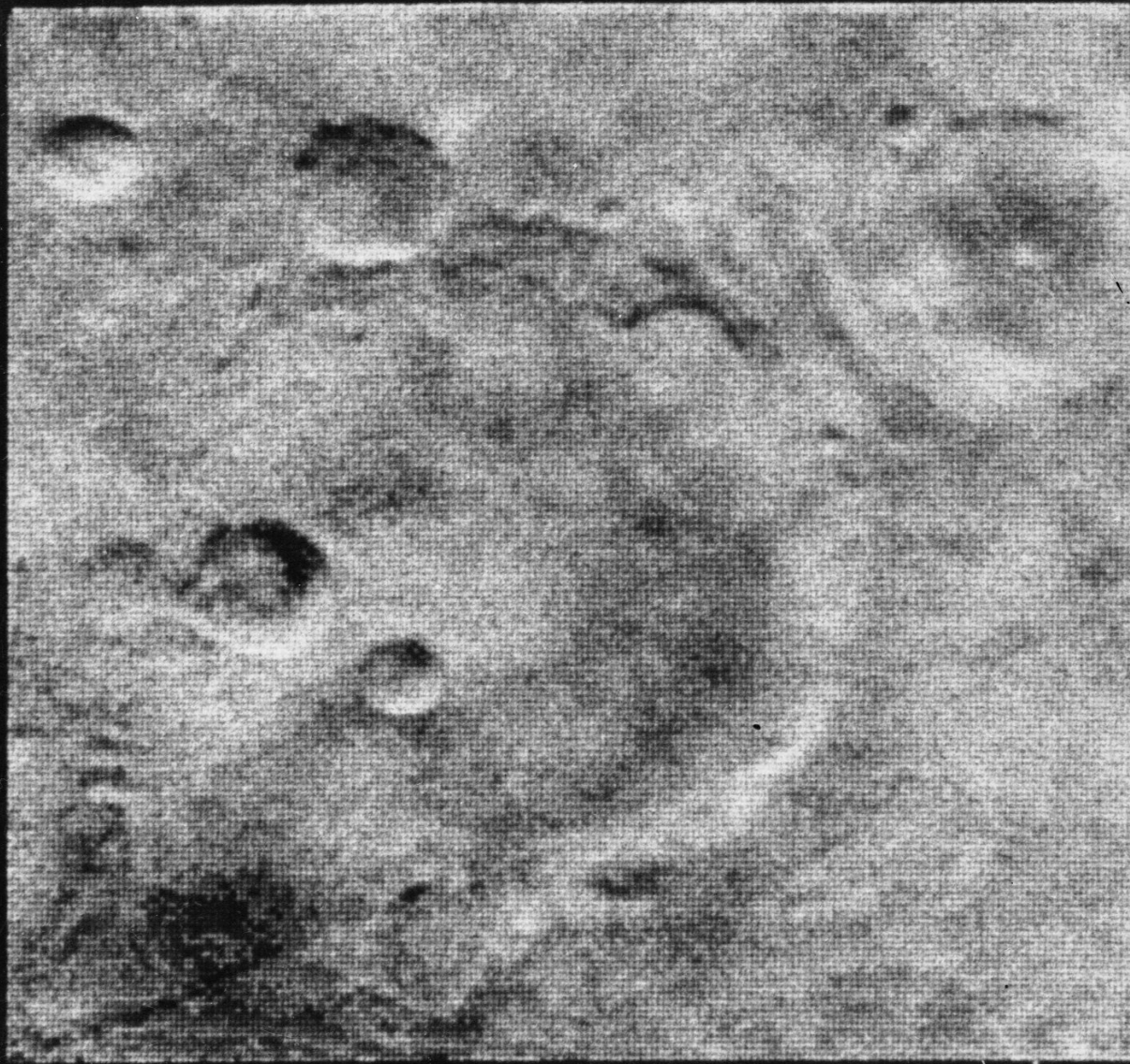
NORTH POLE



ORCUS PATERA

This Viking mosaic shows the first planetary feature that could be distinguished in a planetary image. (Mariner 4 frame 03).

**Juillet 1965,  
premier  
survol par  
une sonde  
américaine,  
Mariner 4,  
qui prend 21  
images, sur  
un grand  
cercle. Et là,  
cruelle  
déception !**



**Par un malheureux hasard, les quelques zones photographiées ressemblent à la Lune, avec des cratères, et rien d'autre.**

**Adieu canaux et martiens !**



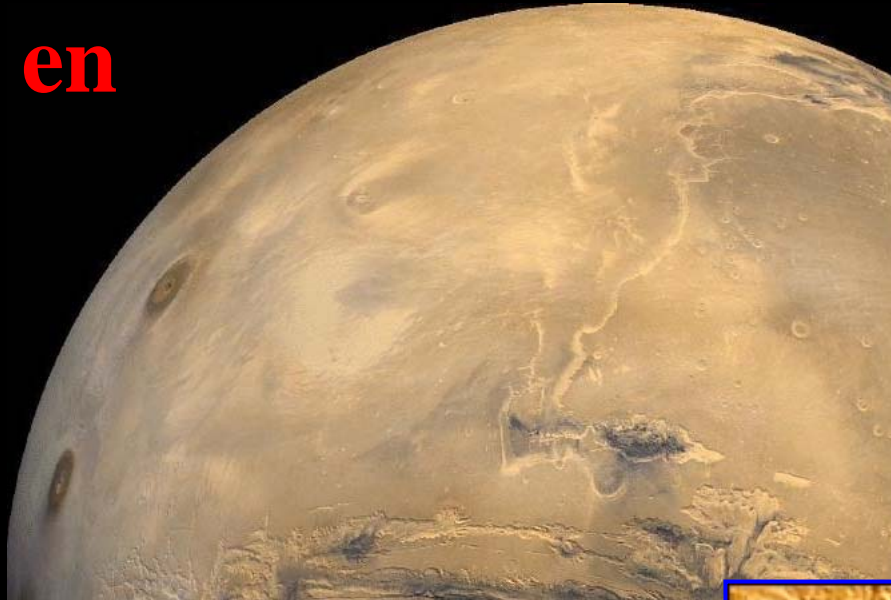
**1972, puis 1976, trois sondes se mettent en orbite autour de Mars. L'intérêt renaît.**

**On voit en effet :**



**1972, puis 1976, trois sondes se mettent en orbite autour de Mars. L'intérêt renaît.**

**On voit en effet :**



**Un grand canyon**

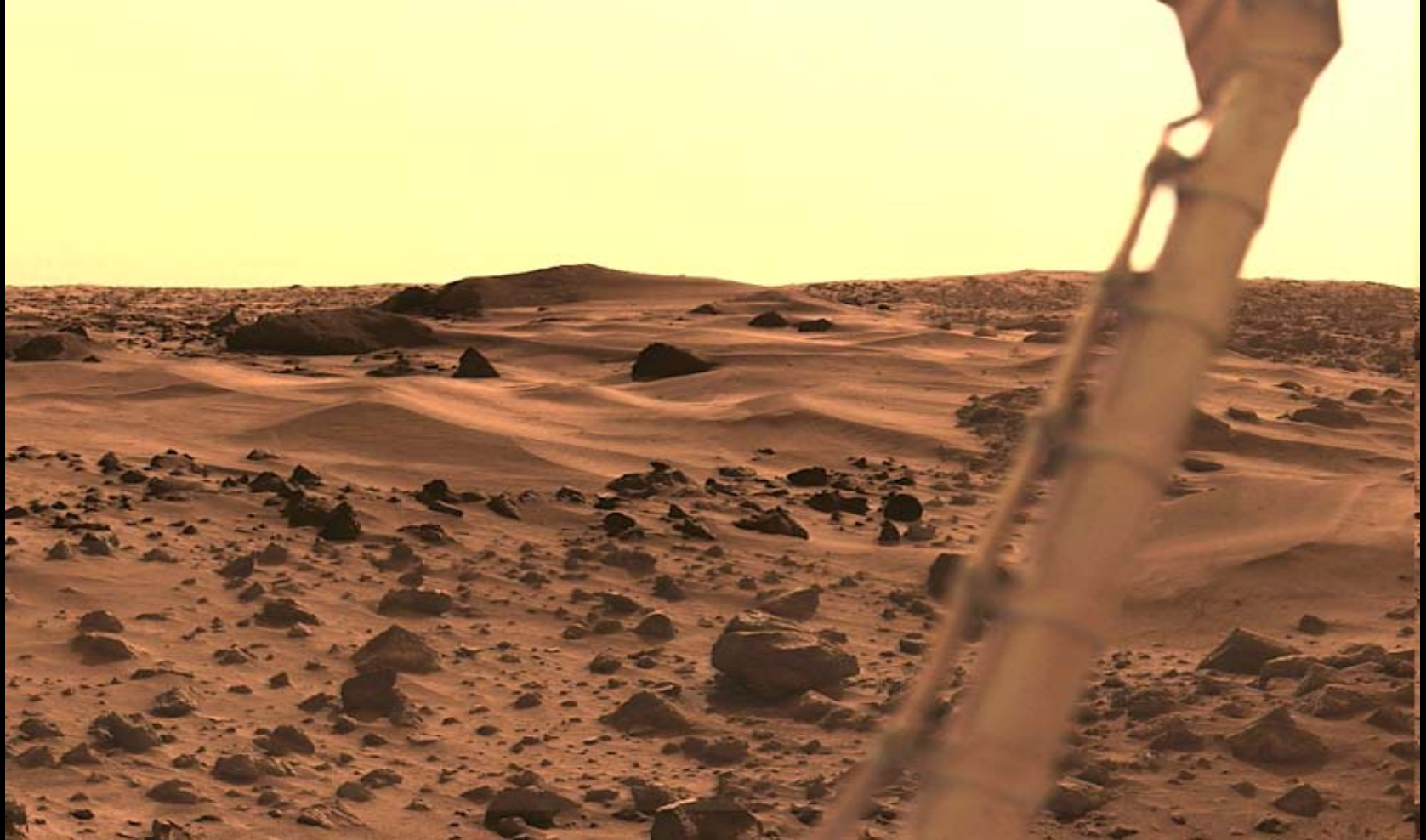


**Des volcans géants**

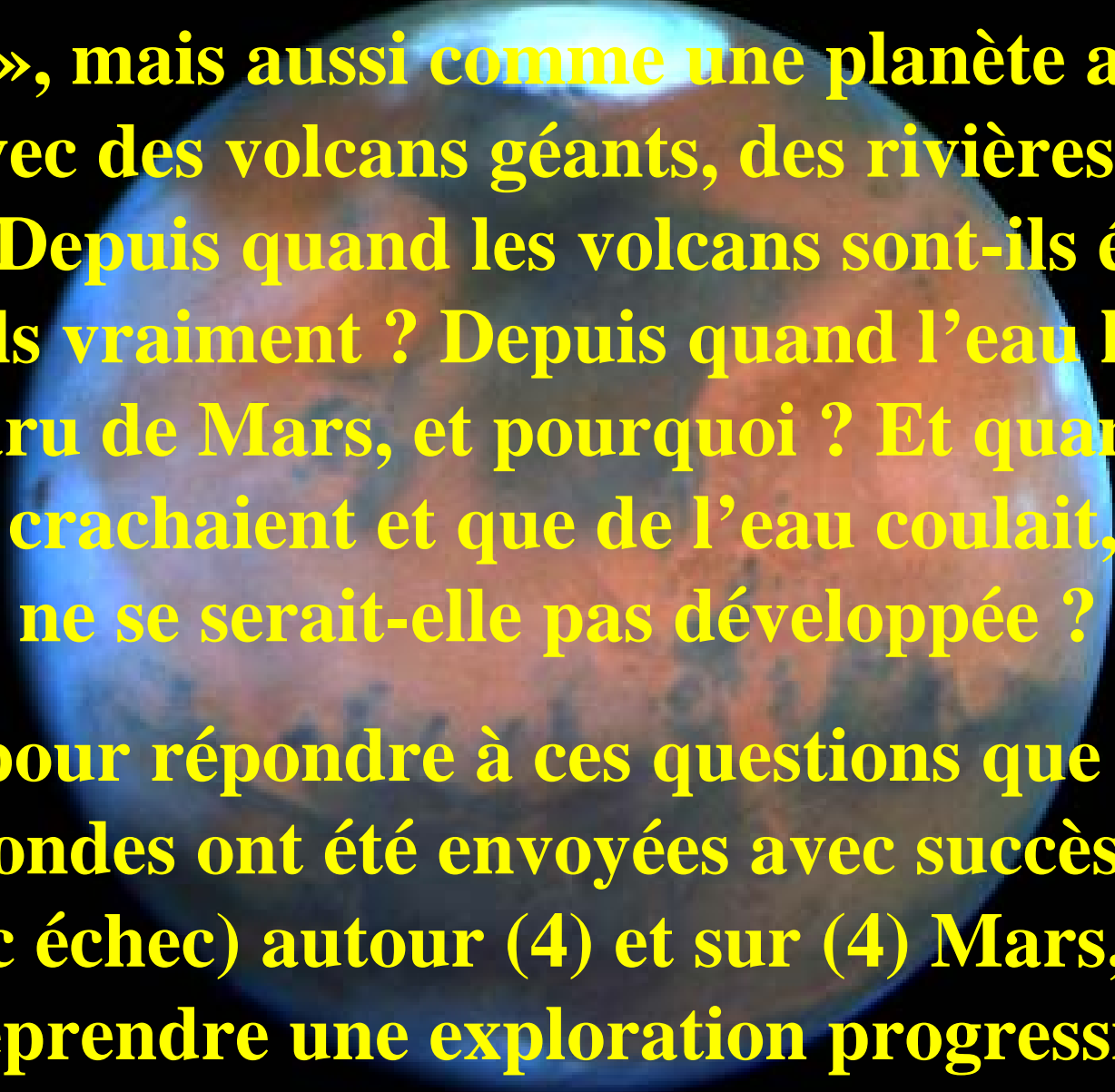


**Des traces d'anciens écoulements d'eau**





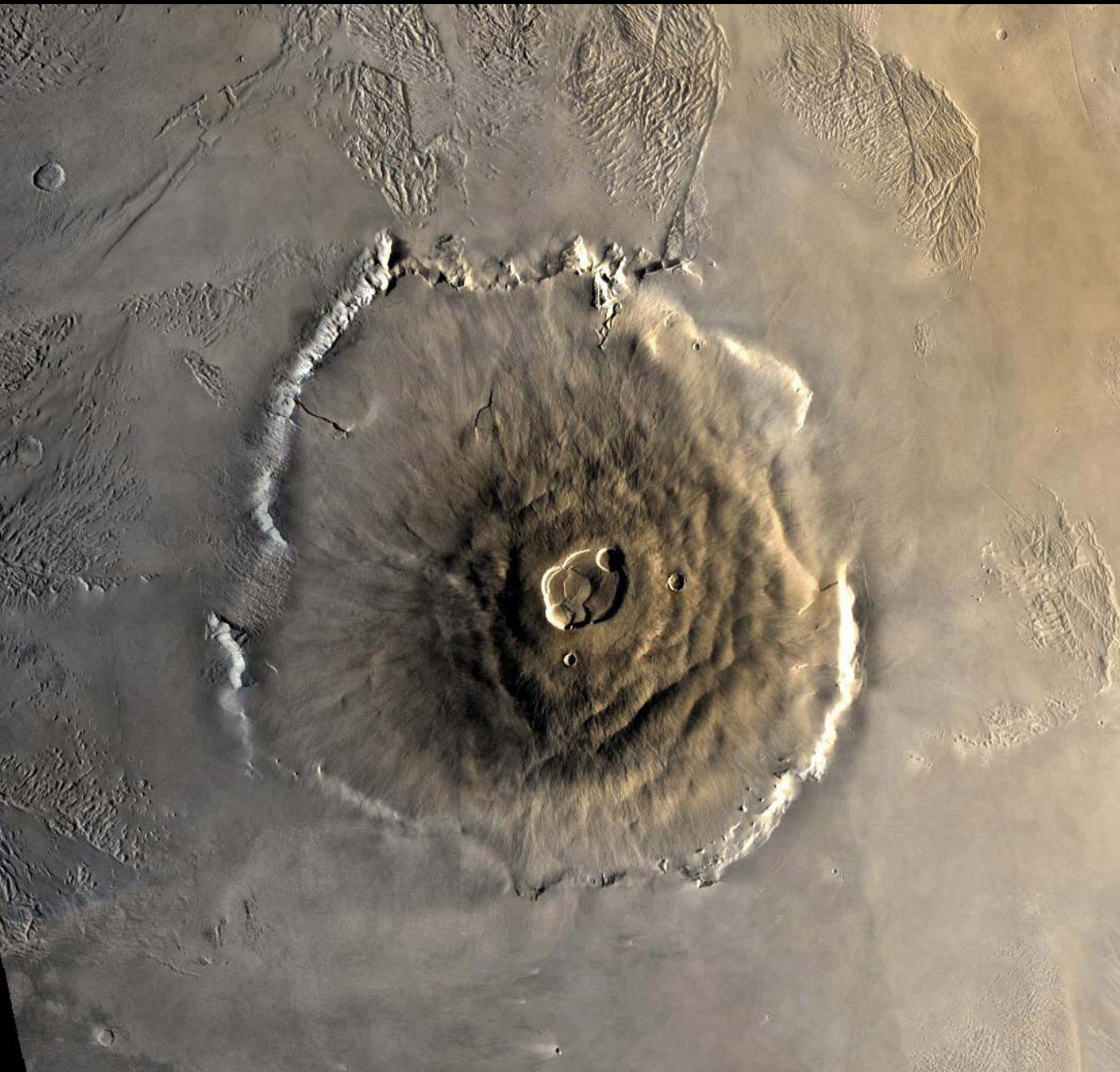
**Deux sondes se posent « en douceur » en 1976.  
Mars est un désert glacé (- 50°C en moyenne),  
stérile, où les vents de la faible atmosphère  
résiduelle (6 hPa) déplacent des dunes de sables.**



**Mars se révèle donc comme un désert froid et « mort », mais aussi comme une planète au passé actif, avec des volcans géants, des rivières qui ont coulé ... Depuis quand les volcans sont-ils éteints, et le sont-ils vraiment ? Depuis quand l'eau liquide a disparu de Mars, et pourquoi ? Et quand les volcans crachaient et que de l'eau coulait, une vie ne se serait-elle pas développée ?**

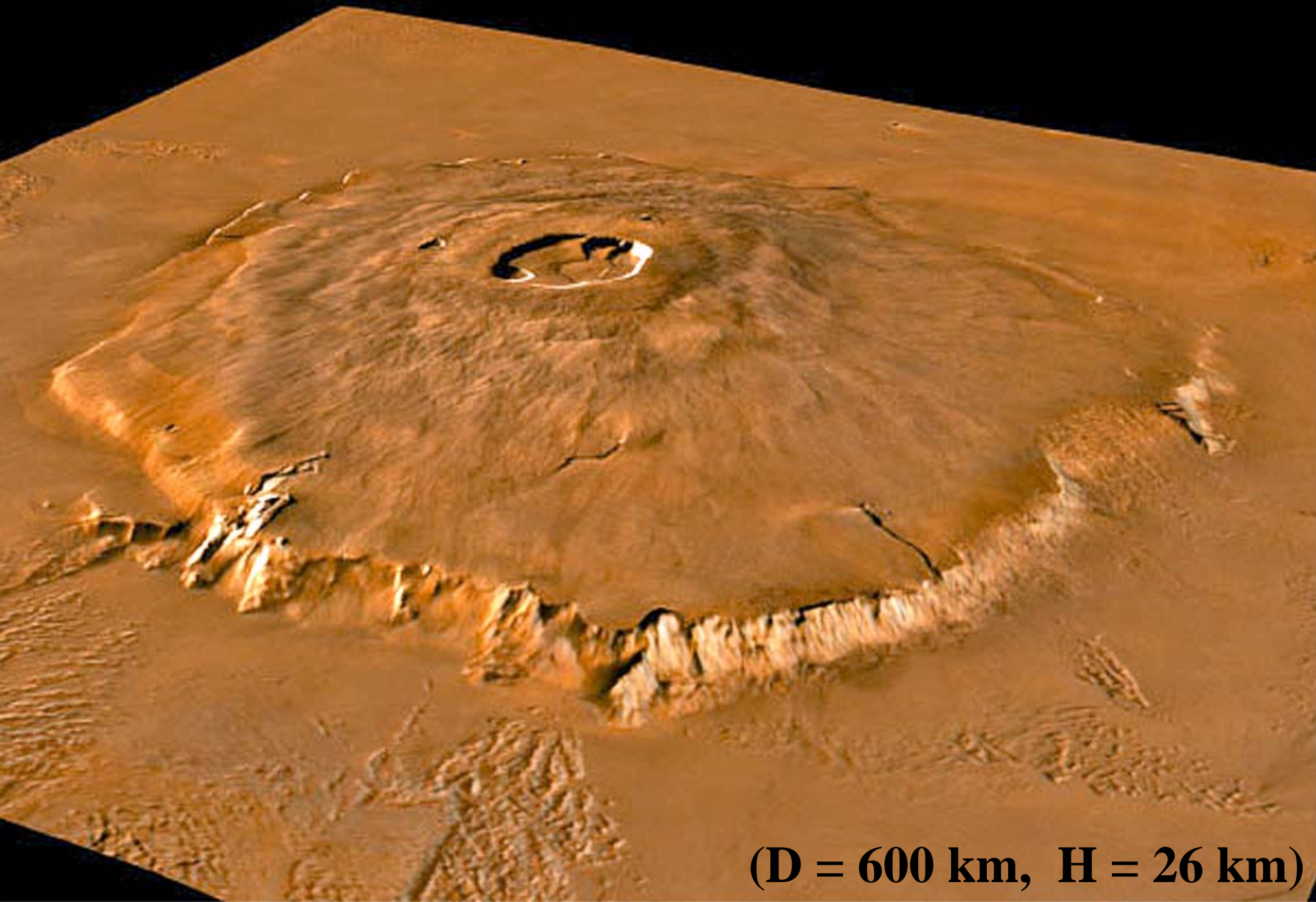
**C'est pour répondre à ces questions que depuis 1996, 8 sondes ont été envoyées avec succès (et aussi 4 avec échec) autour (4) et sur (4) Mars, pour entreprendre une exploration progressive et surtout méthodique de Mars**





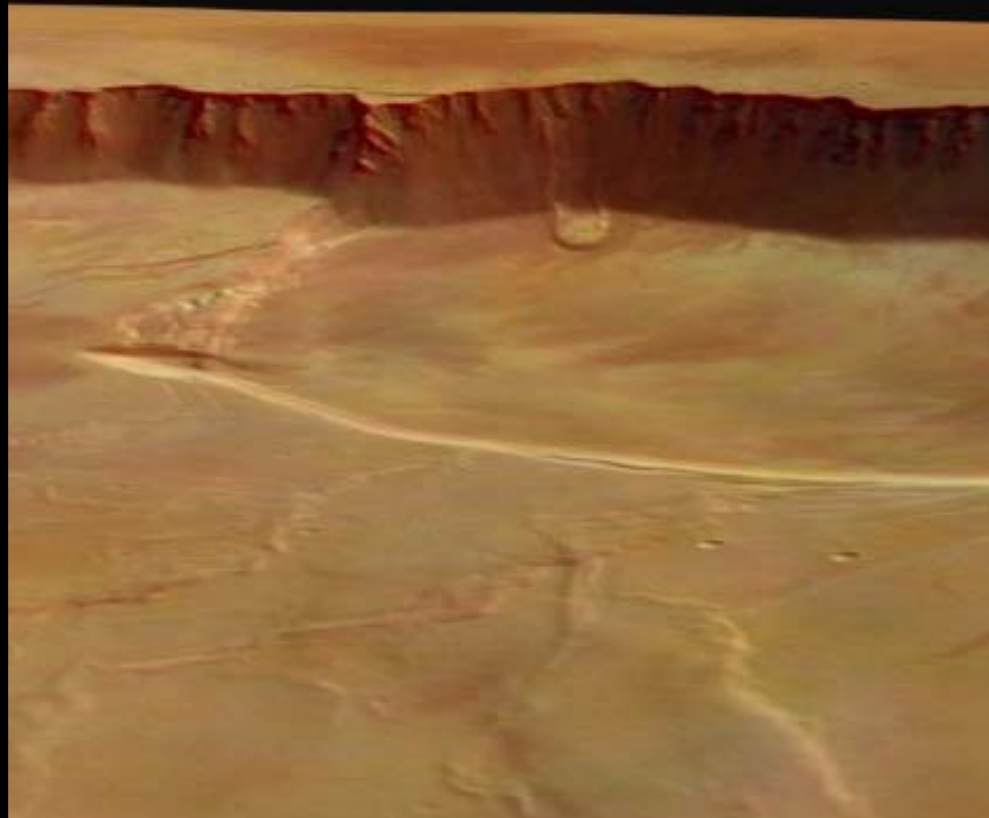
**On va  
commencer  
de regarder  
les derniers  
résultats avec  
les volcans et  
les canyons.  
Voici  
Olympus  
Mons, le plus  
grand volcan  
du système  
solaire**





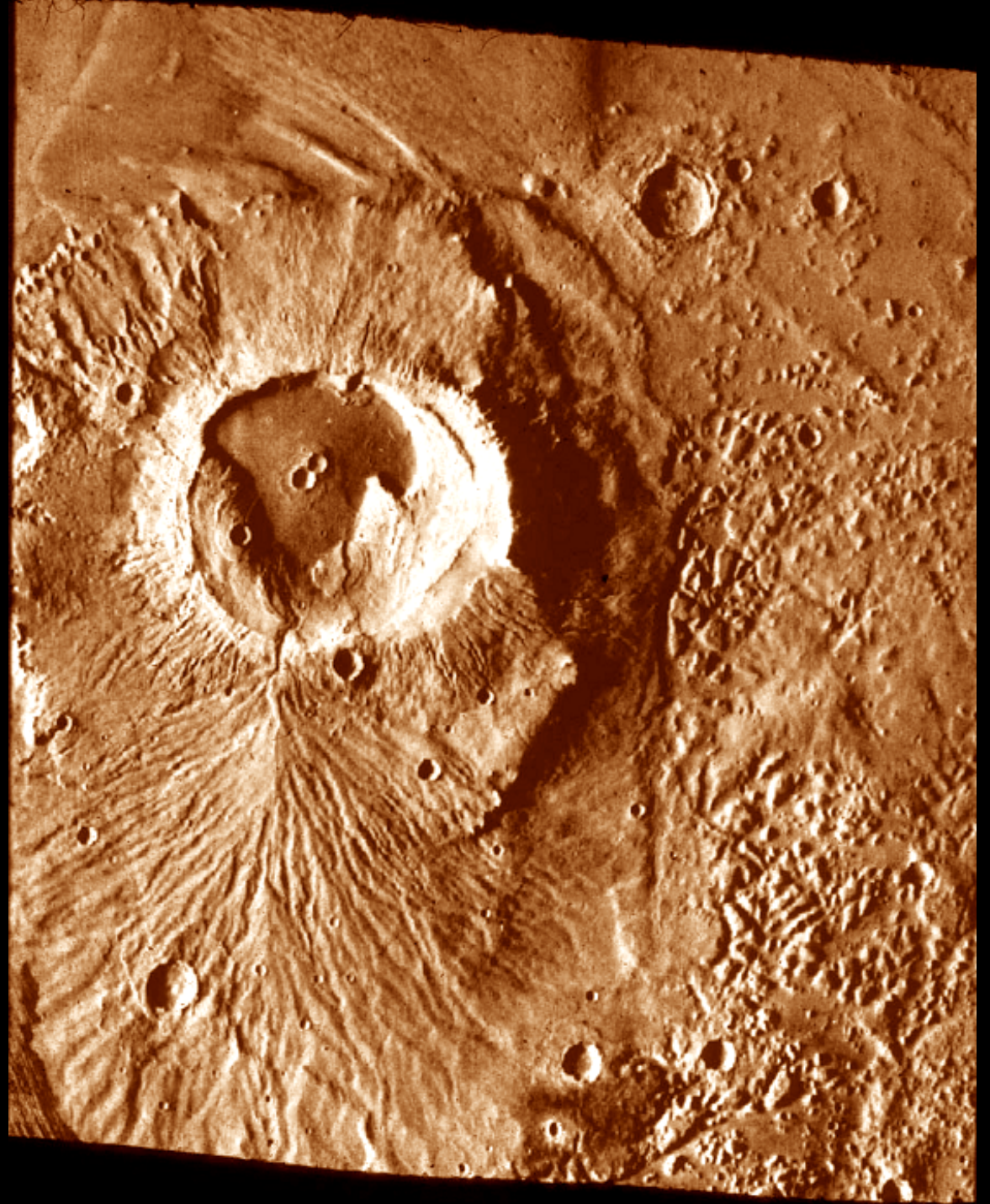
**(D = 600 km, H = 26 km)**

**Les caméras des nouvelles sondes transmettent des images à haute résolution, en 3D ... Ici, gros plan sur les caldéras (cratères) sommitales**

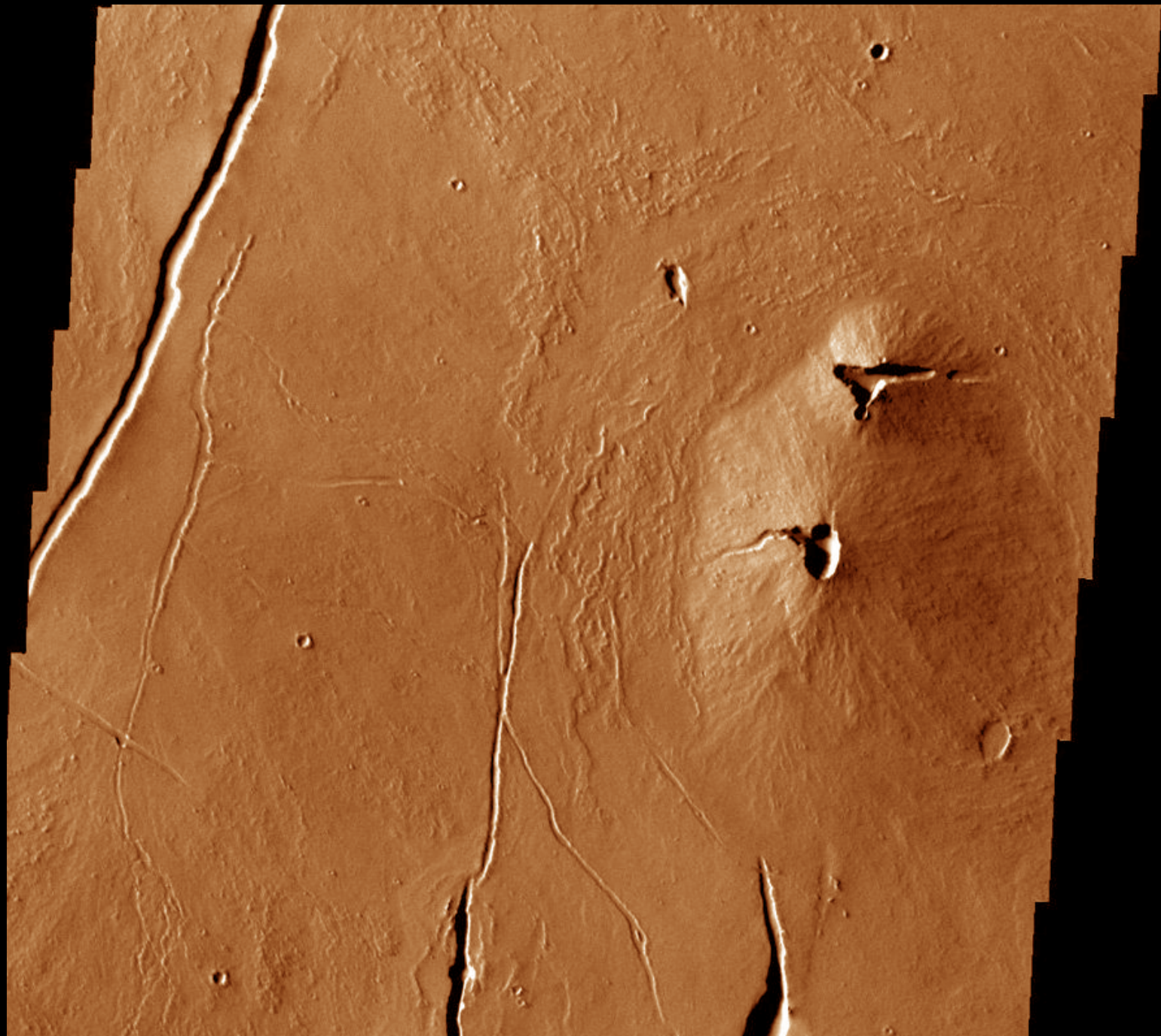




**D'autres  
volcans**







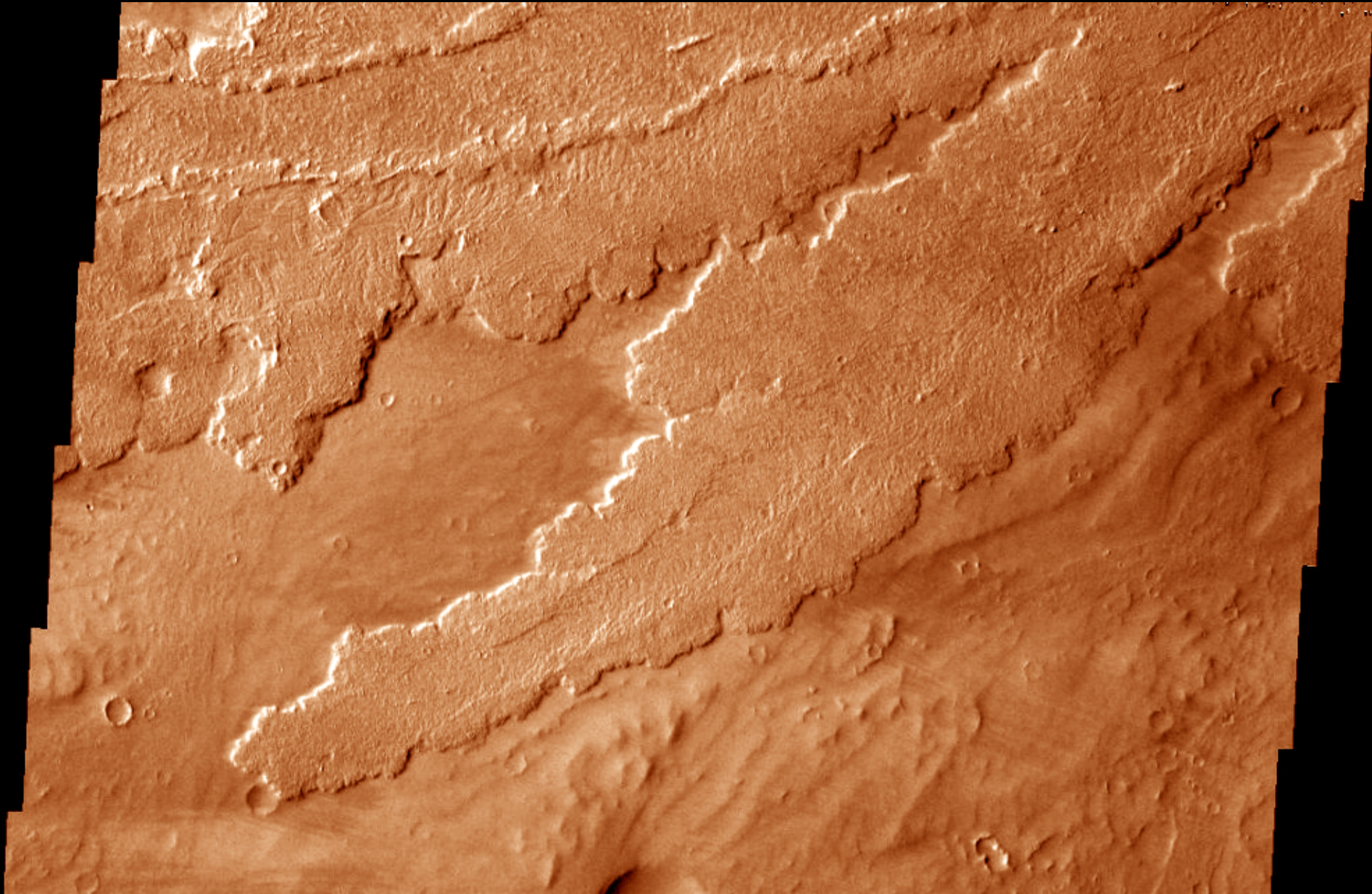




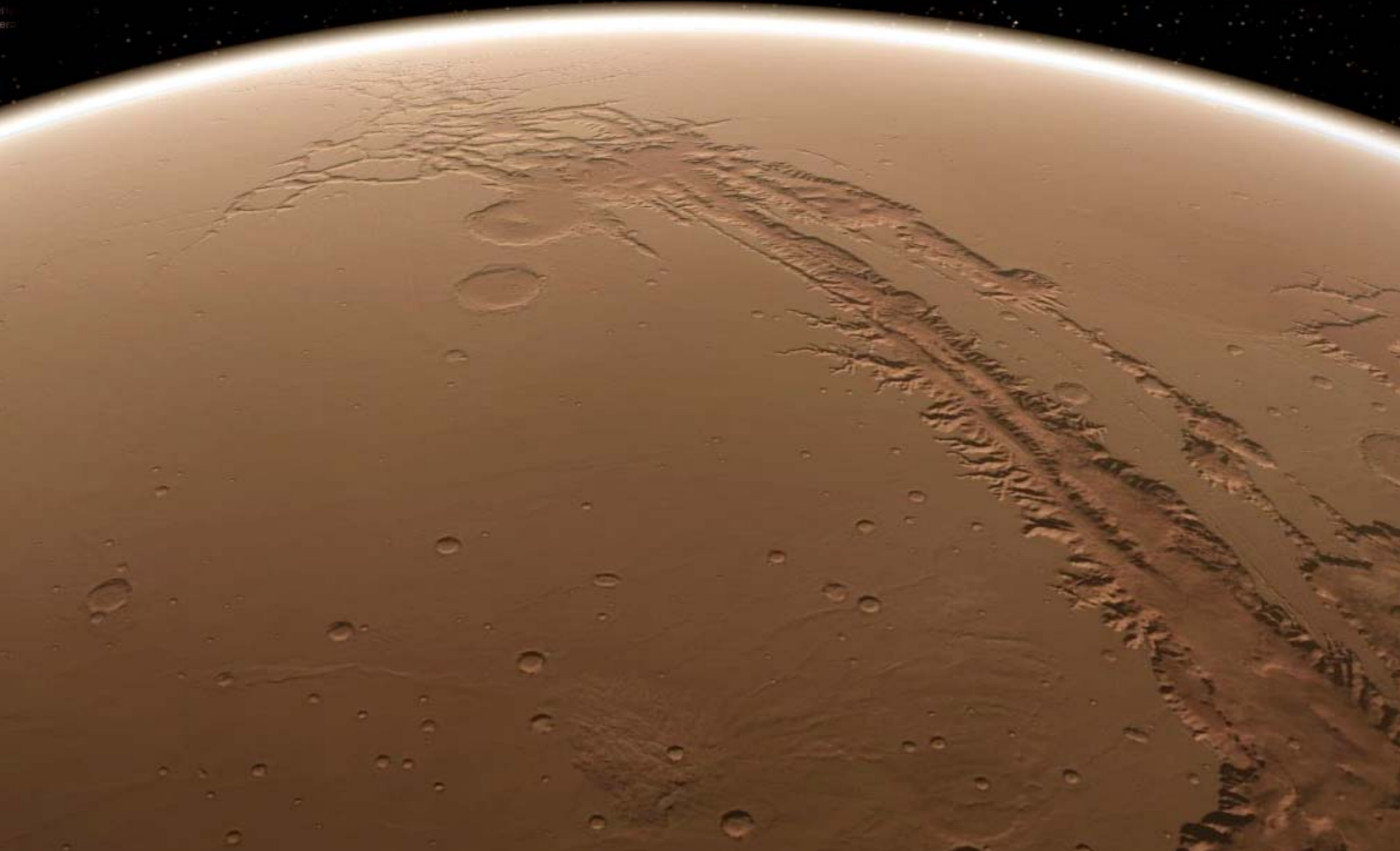
**Des coulées de laves et des failles**



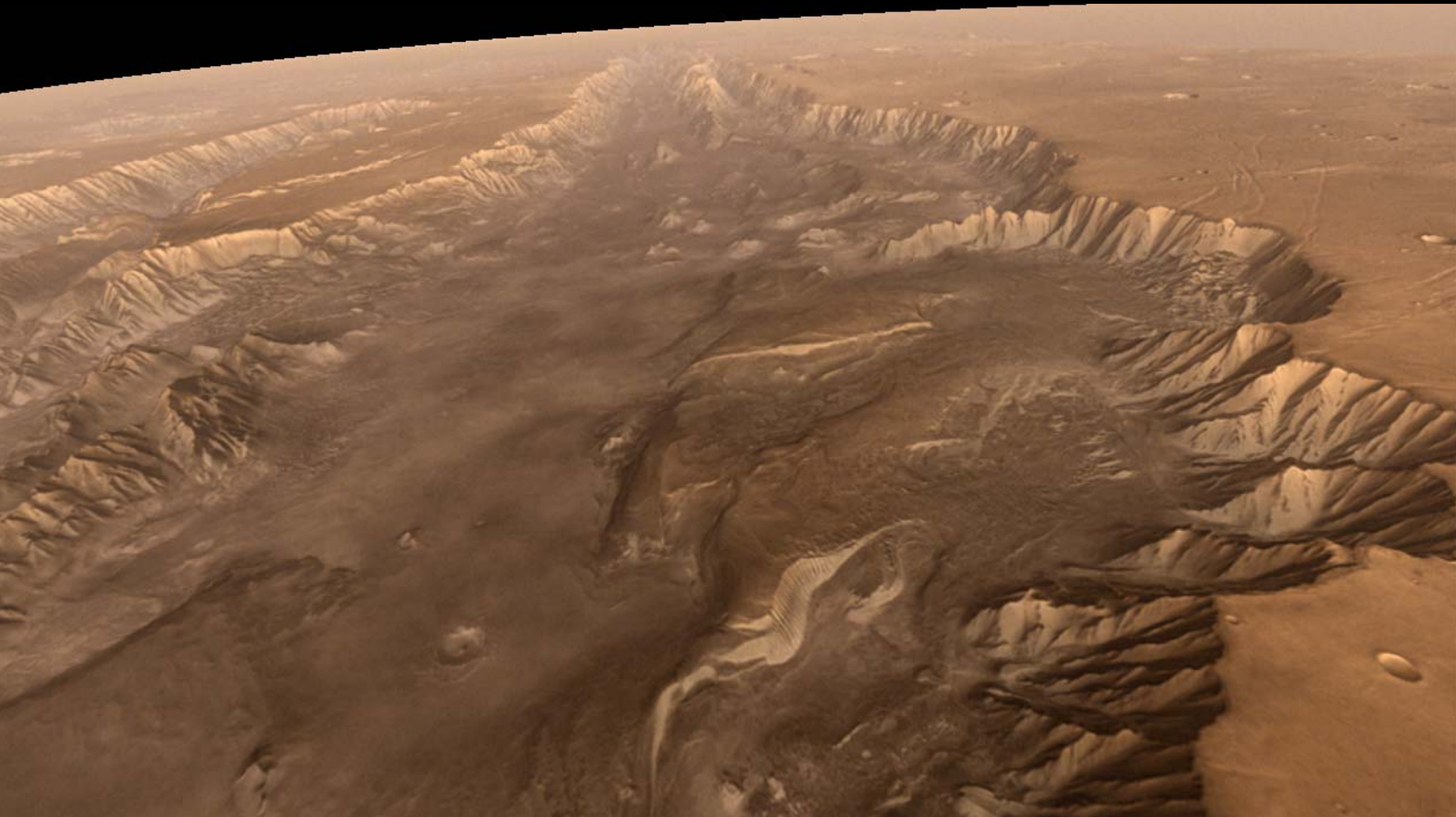
**De belles coulées de laves ...**



# Valles Marineris, le « grand rift » de Mars

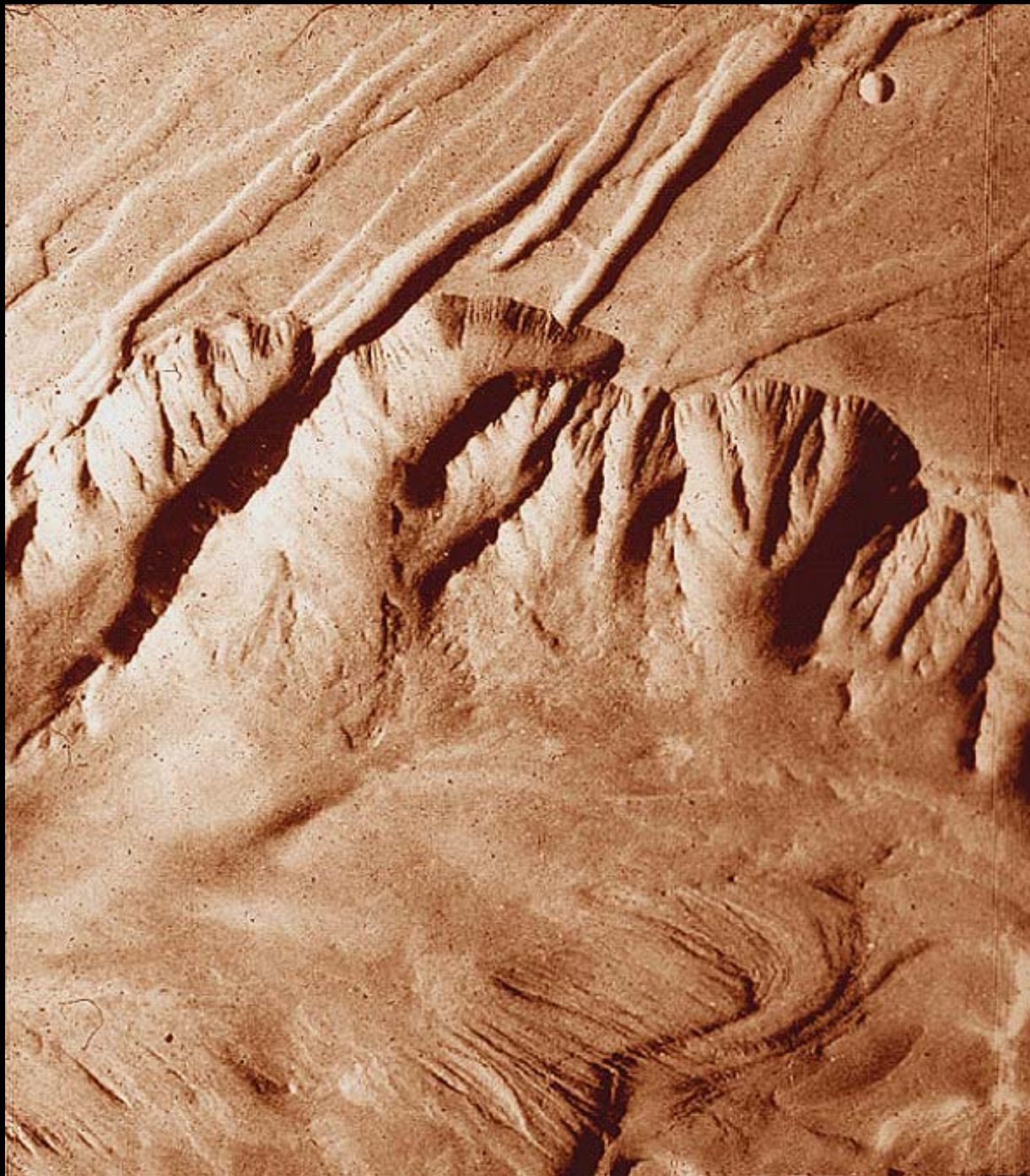






**Grand comme 2 fois le Grand Rift Africain  
(plusieurs milliers de km de long, 100 km de large,  
plus de 5000 m de hauteur)**

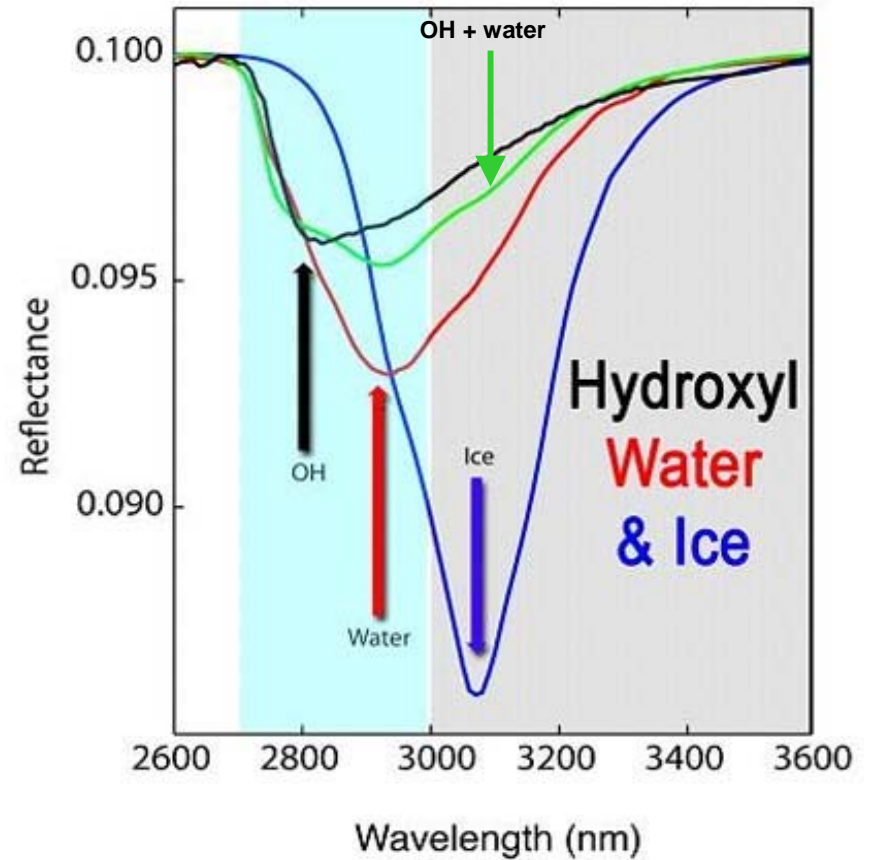
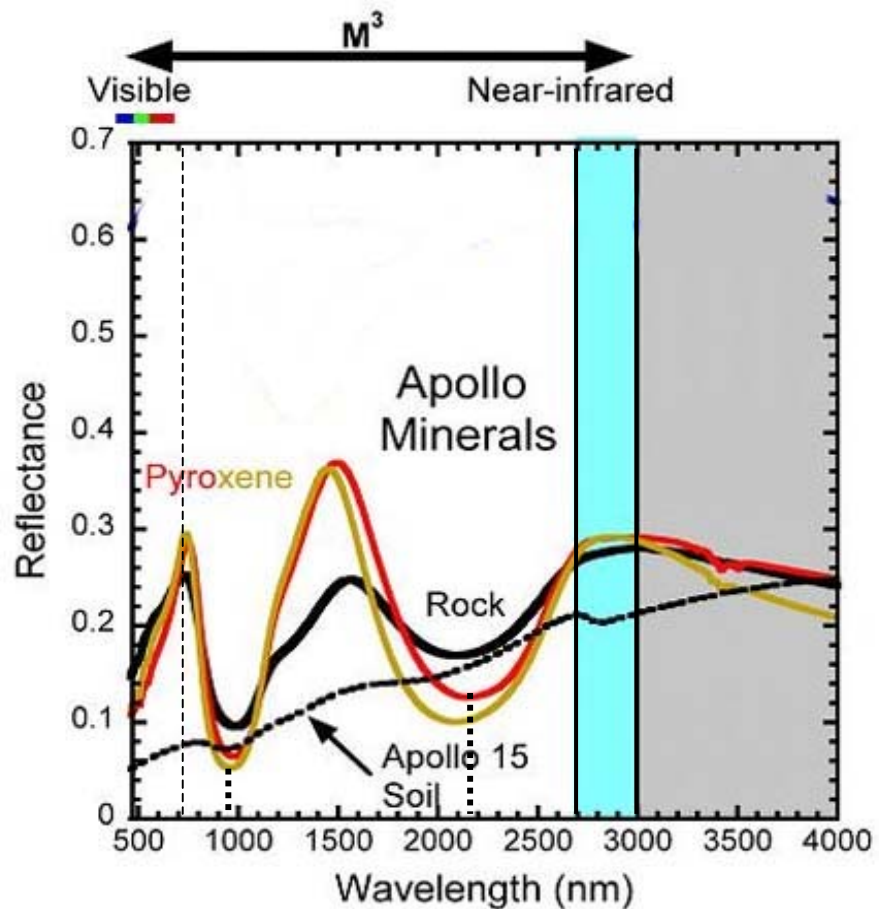




**Des failles  
recoupent le  
plateau.**

**Mais en quoi  
sont faites ces  
murailles  
hautes de  
plus de  
5000 m ?**

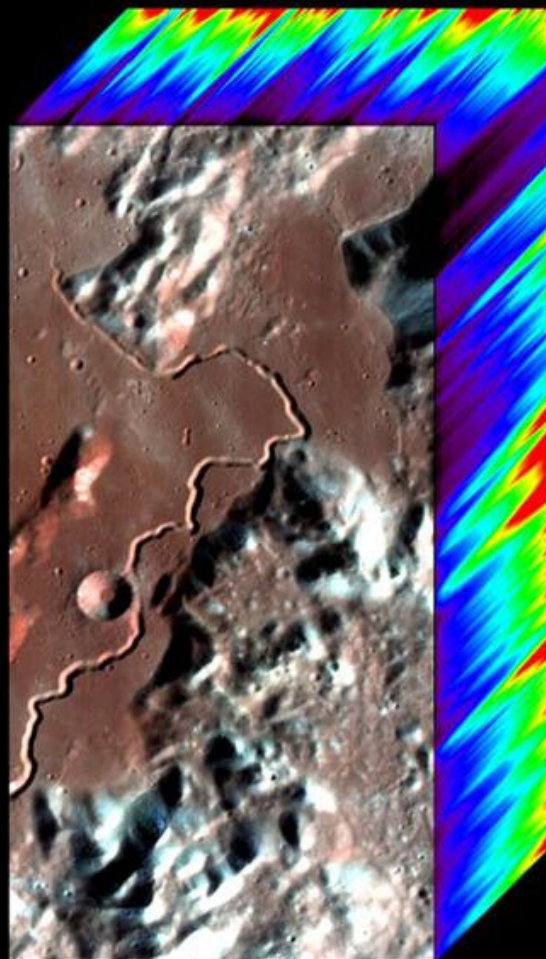
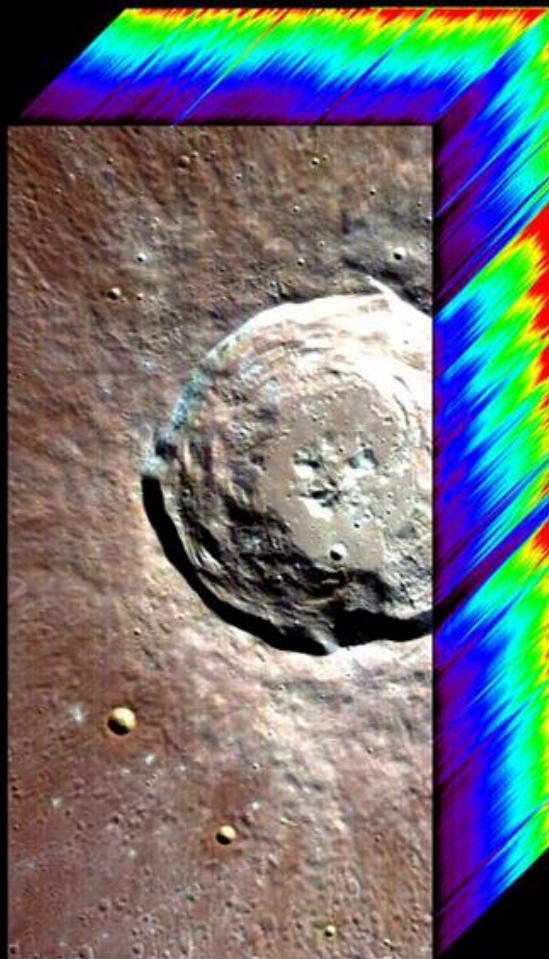
# Pour répondre, on utilise les réflectances spectrales



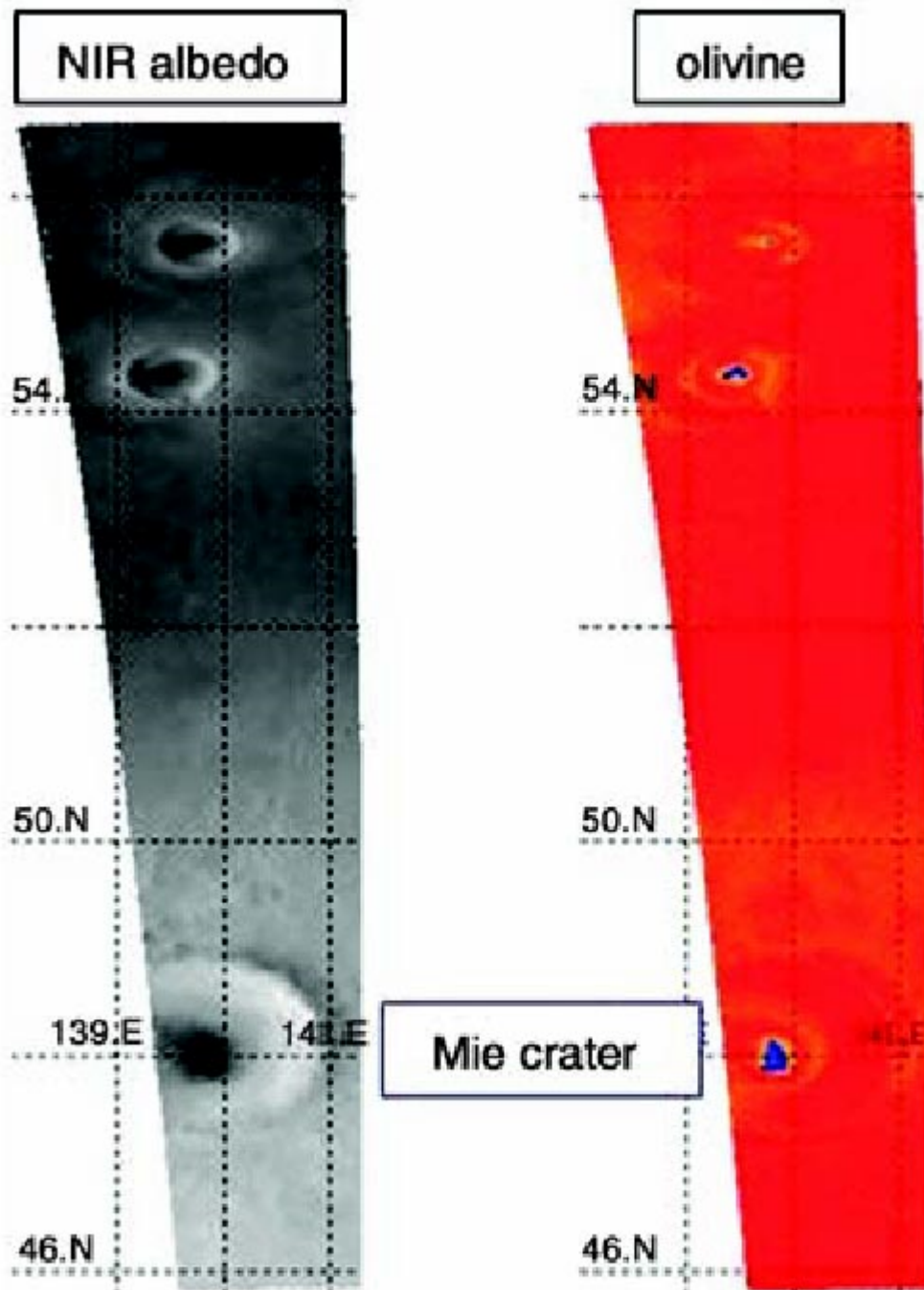
Dans le Proche Infra-Rouge, de nombreux minéraux et autres « substances » présentent une réflectance (inverse de l'absorption) différentielle



**Si pour chaque pixel on a un spectre, l'intensité de l'absorption (inverse de la réflectance) pour des longueurs d'onde caractéristiques d'un minéral donné donnera une « idée » de la répartition de ce minéral**

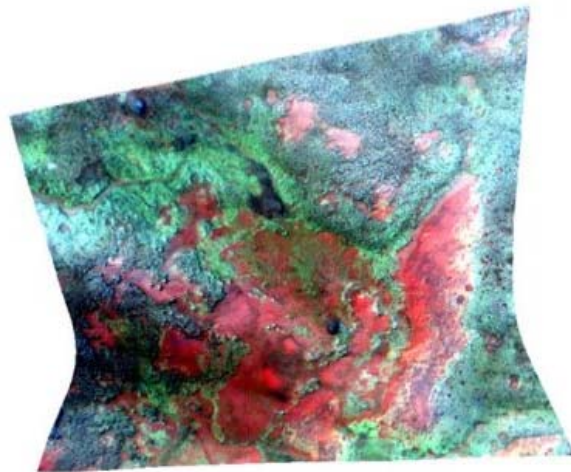
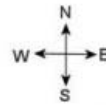
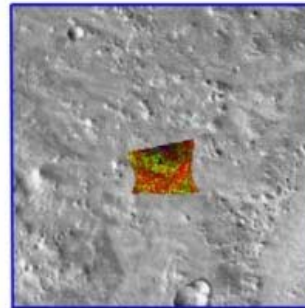
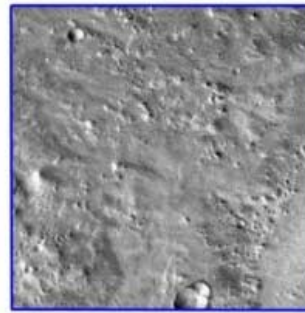
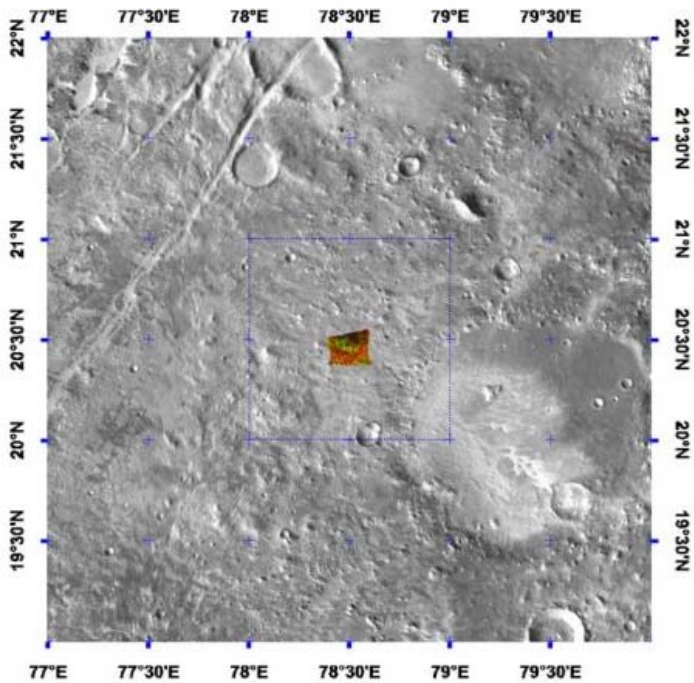




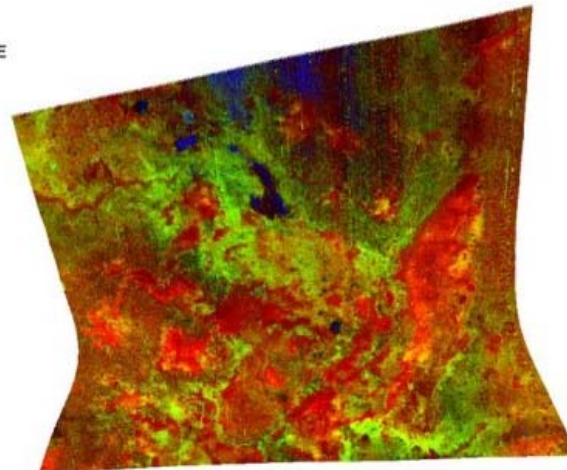


**Que peut-on identifier ?**  
 Principalement les minéraux contenant du Fer et les minéraux hydratés. Parfois, c'est simple : il y a de l'olivine au fond de 2 cratères. Mais même là, il y a 2 solutions : un niveau profond riche en olivine, ou de la poussière éolienne riche en olivine et piégée dans les cratères, parce que dense ???

**Parfois la géologie n'est pas très claire, et les géologues ont encore du travail à faire !**

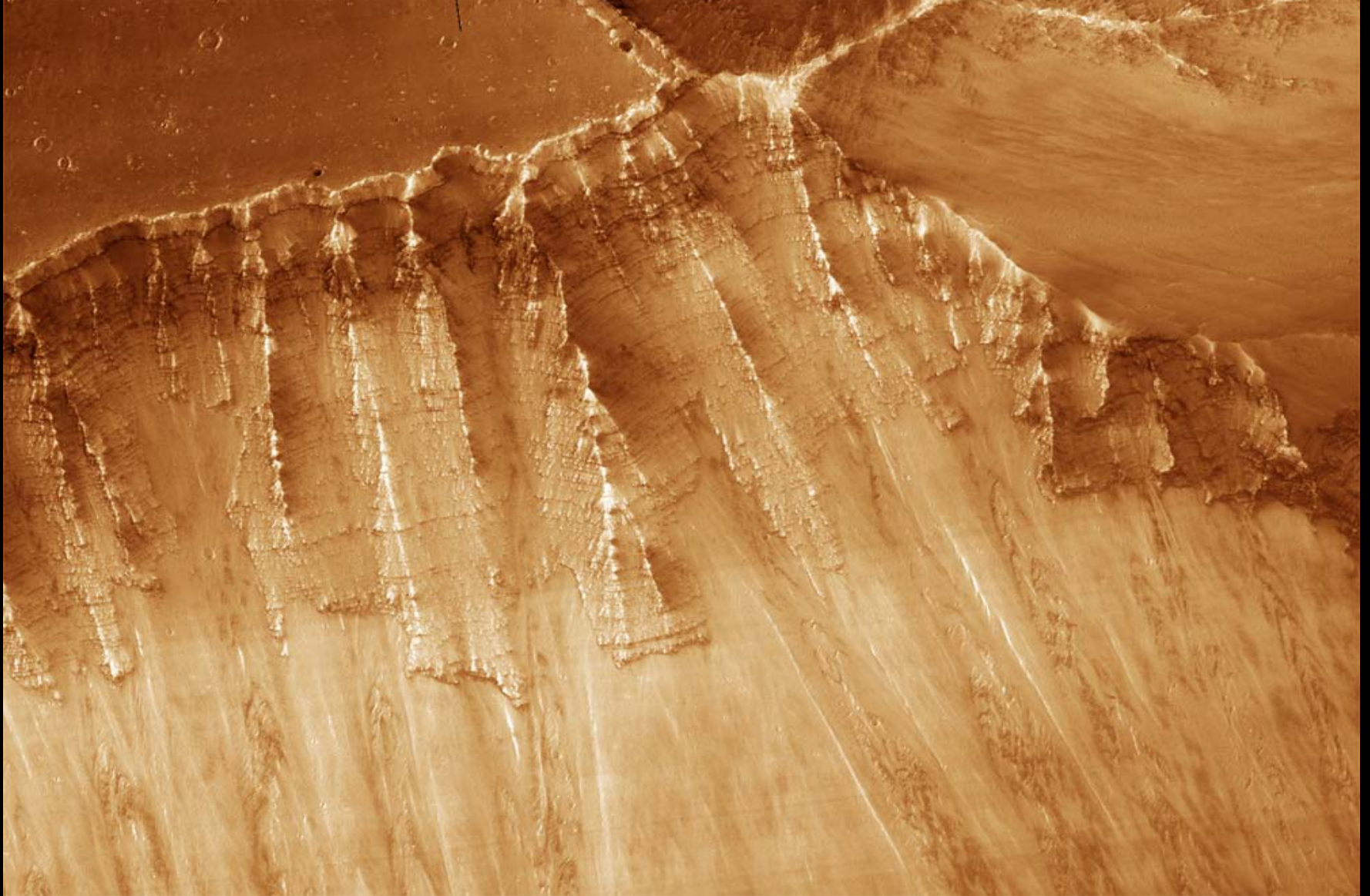


**infrared false color**



**orange = olivine  
green = Fe-Mg phyllosilicate  
blue = high calcium pyroxene**





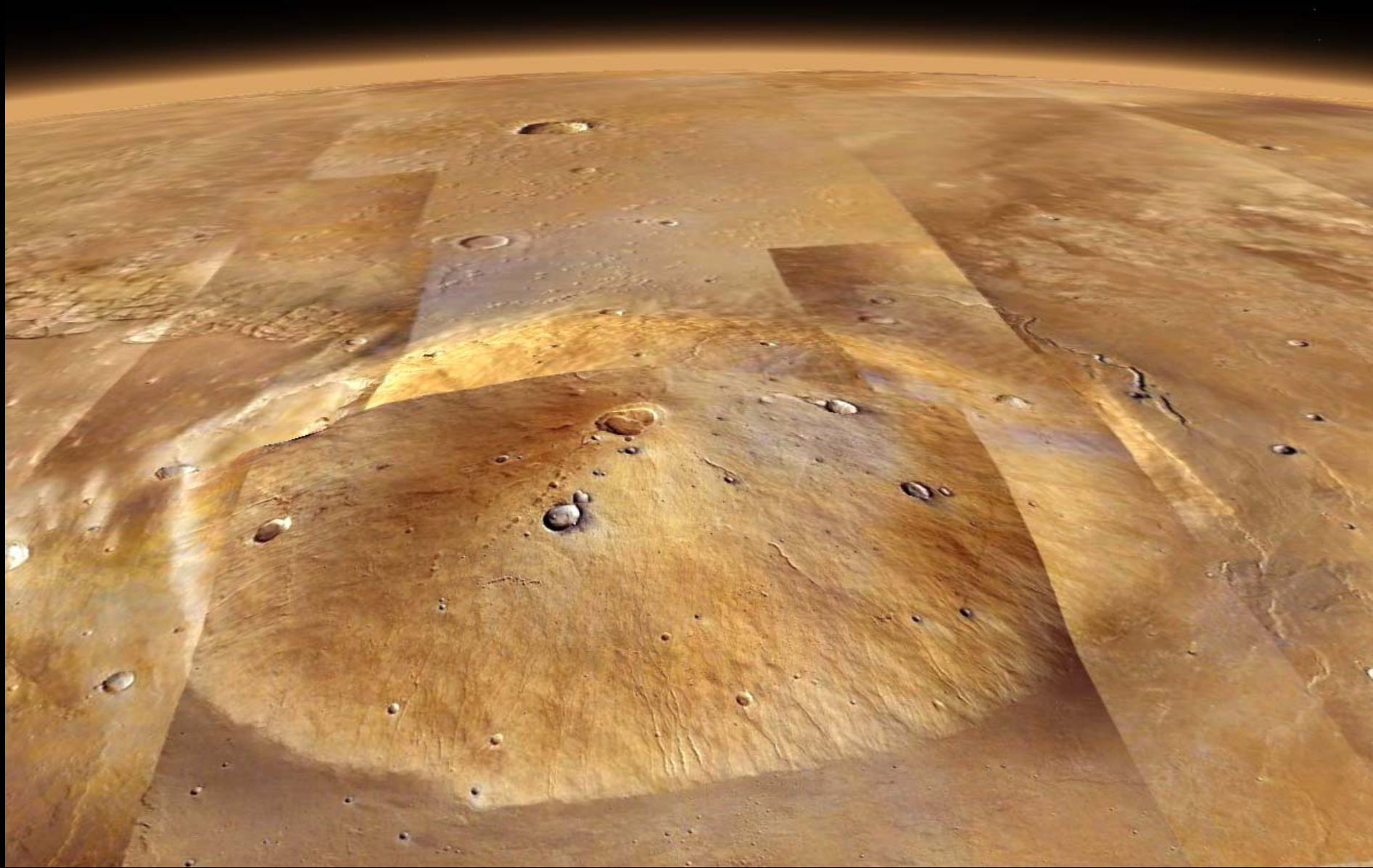
**A haute résolution, les parois du canyon se révèlent constituées d'un empilement de couches, avec les spectres (IR) de l'olivine et du pyroxène : des coulées de lave.**



Photographie : Pierre Thomas

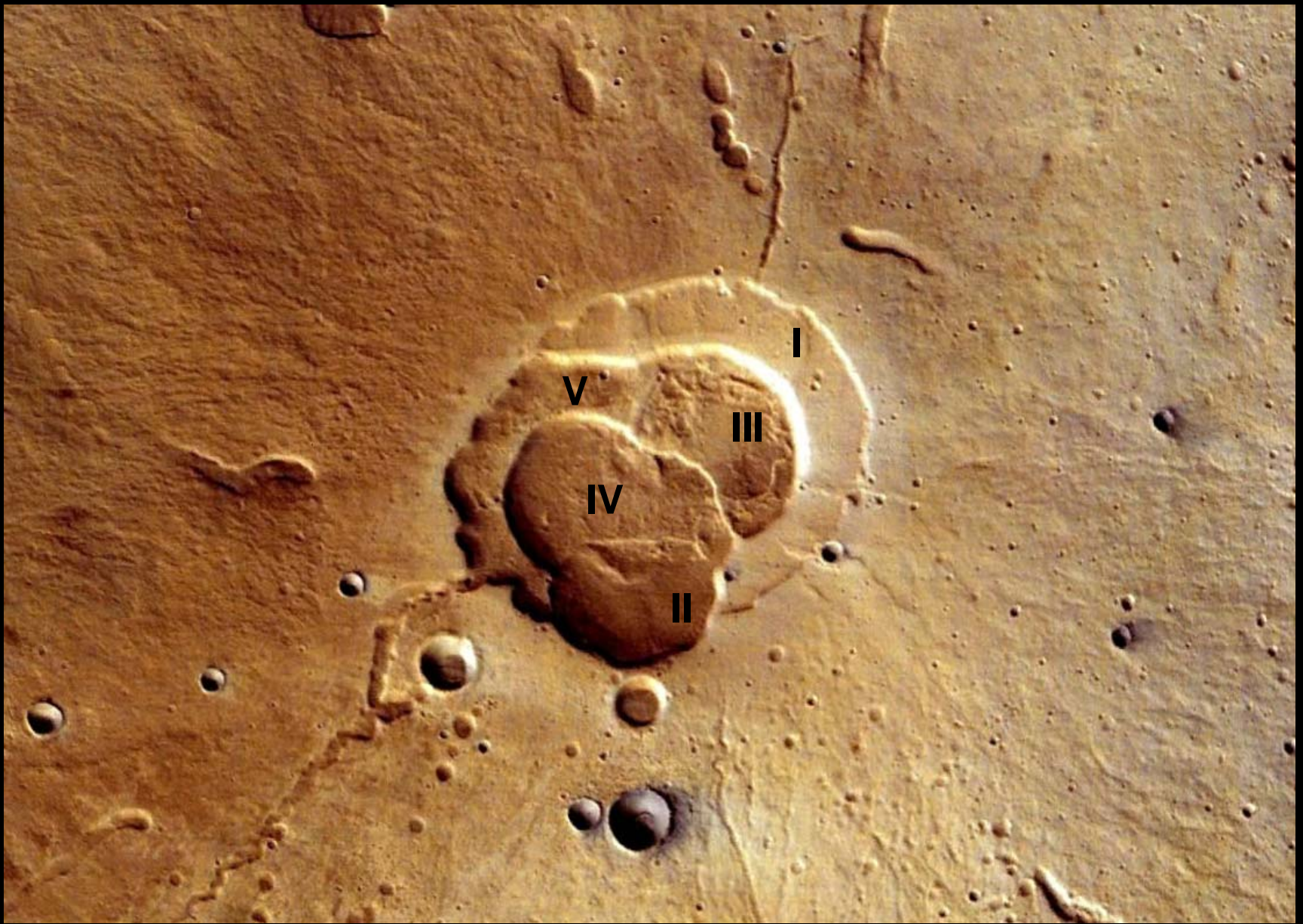
**Analogie terrestre : les trapps, ici ceux d'Islande, au climat plus « martien » que ceux du Dekkan.**





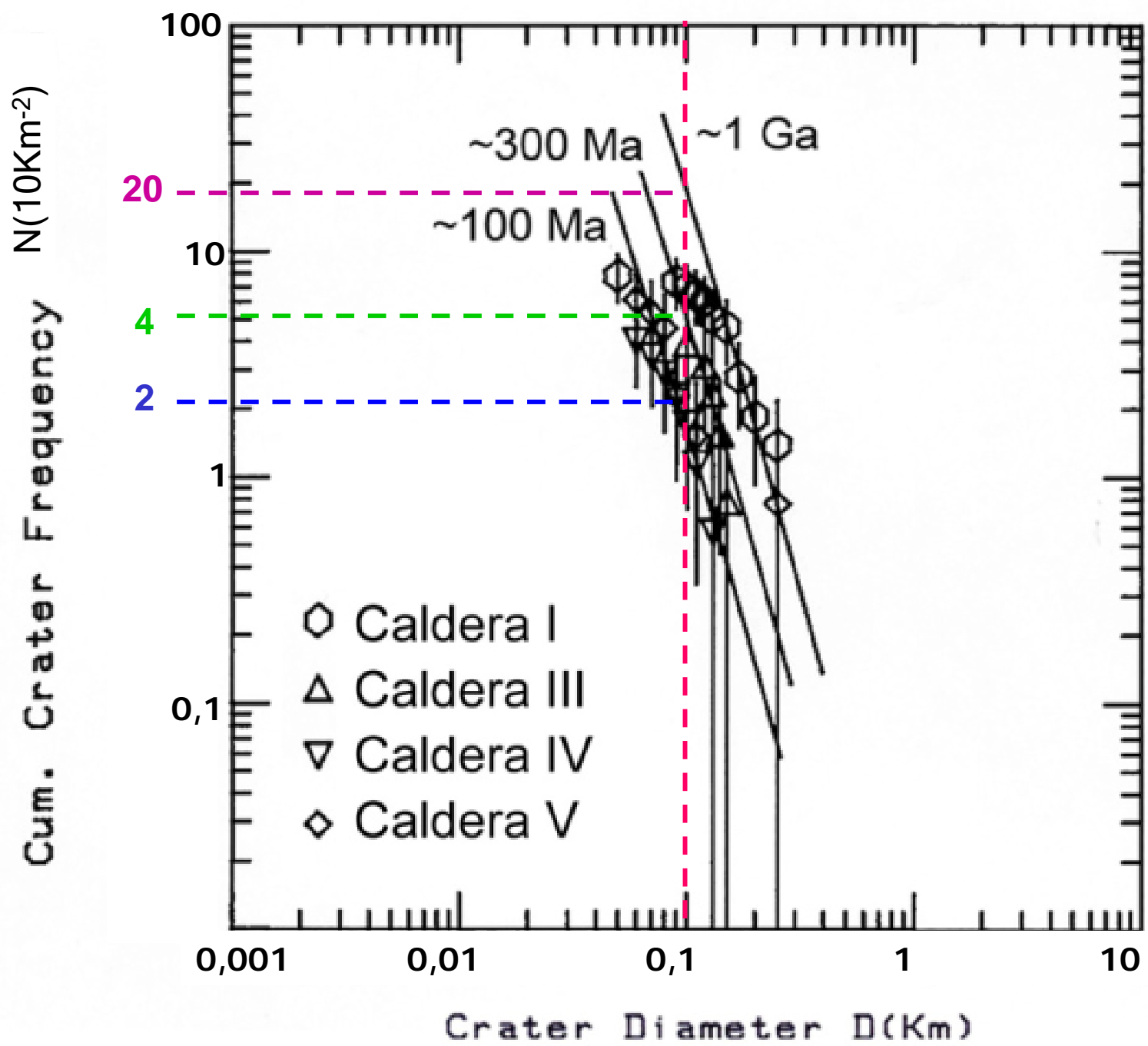
**Voici Hecates Tholus, un volcan avec calderas (cratères) sommitaux emboîtées**



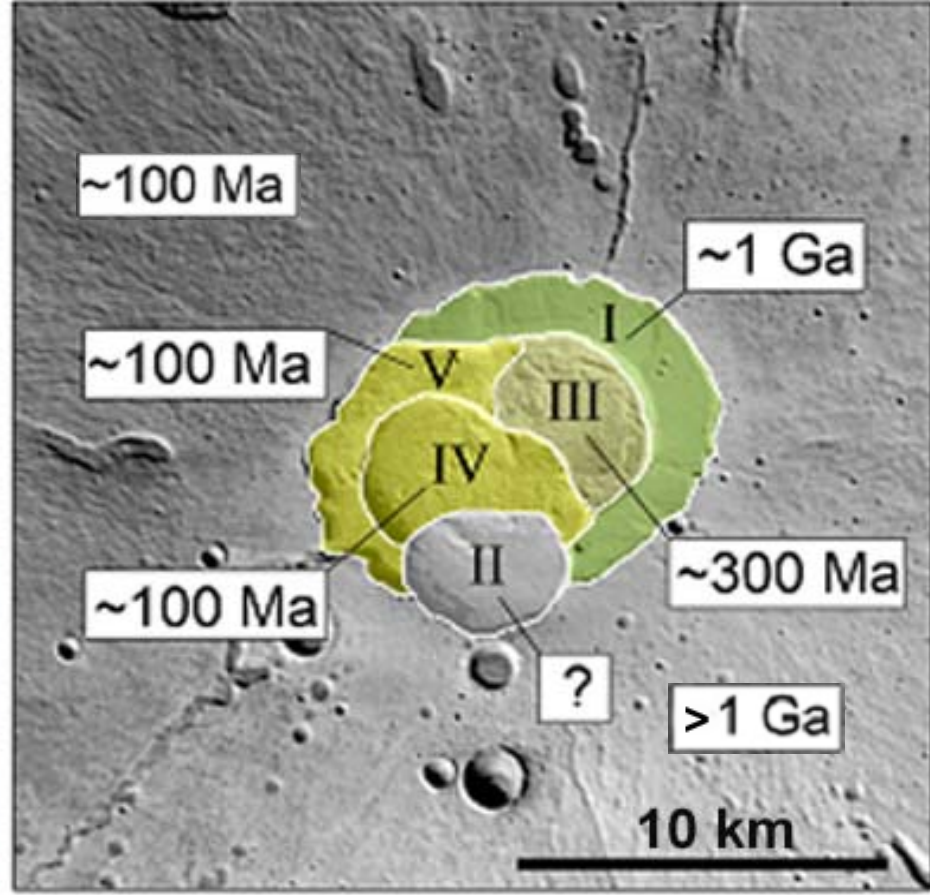


**Sur ces surfaces volcaniques, on peut compter les cratères de météorites. Et avec les données lunaires,**





On peut proposer des âges

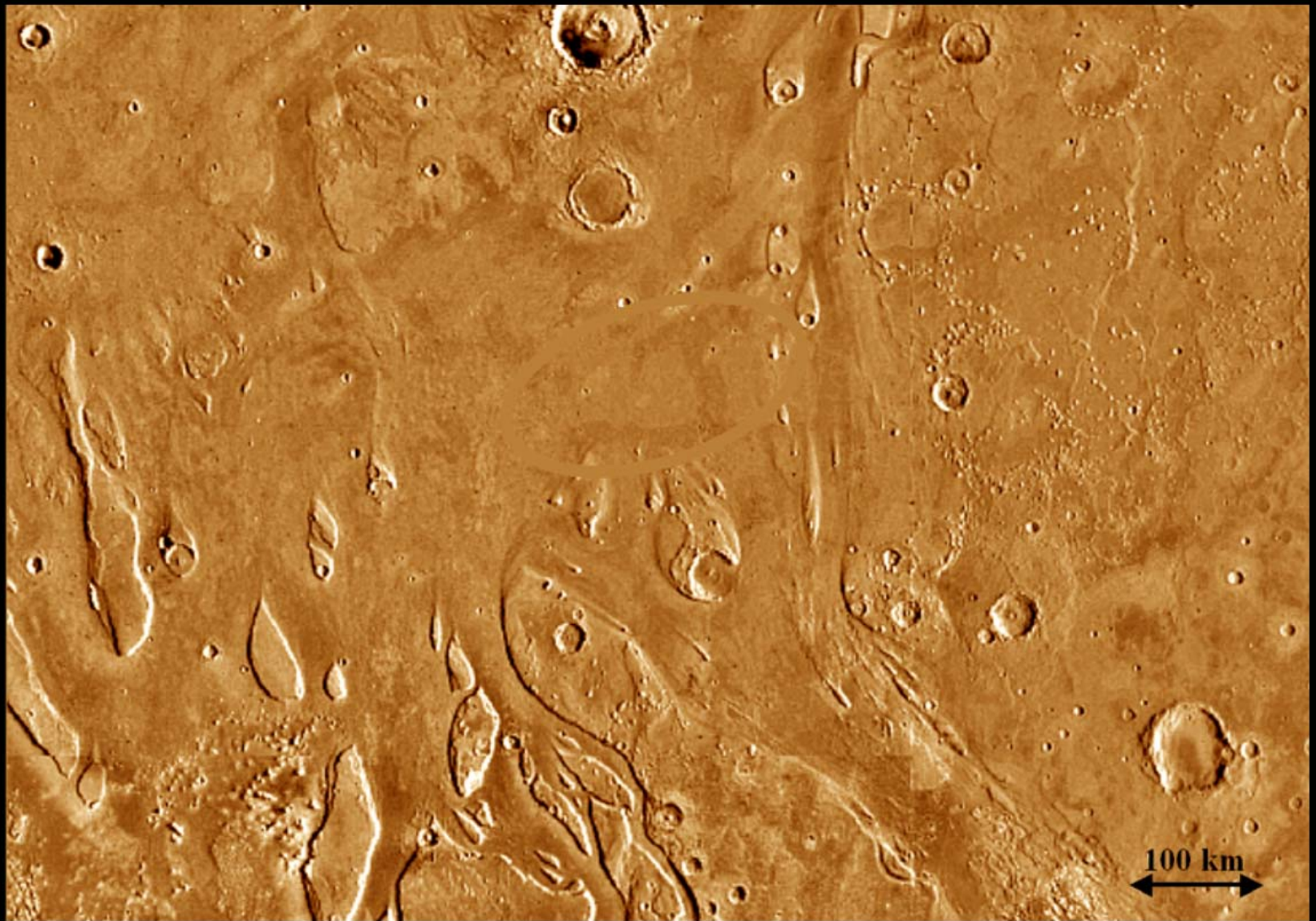


**La toute fin de ce volcanisme (les dernières coulées qui remplissent les caldéras et recouvrent le flanc NO) est « jeune ». 100 millions d'années, c'est rien pour un géologue ou un astronome (les 2,2 derniers % de l'histoire de Mars)**



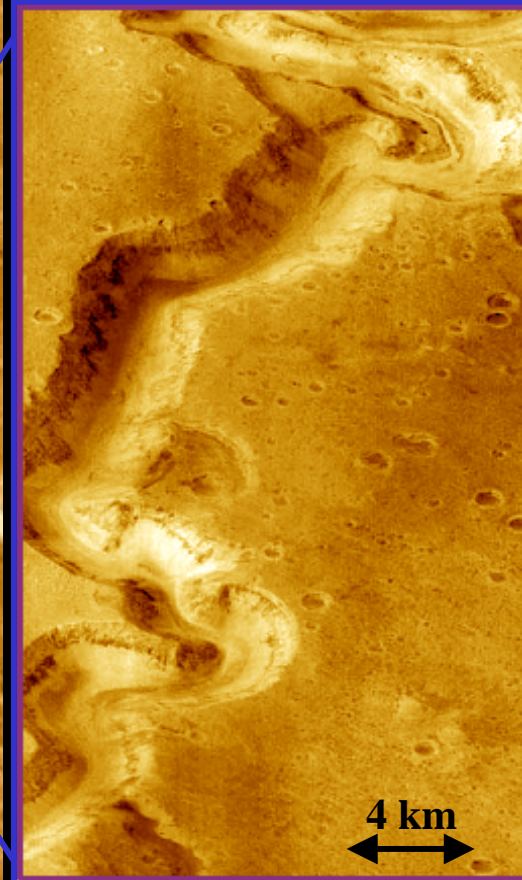
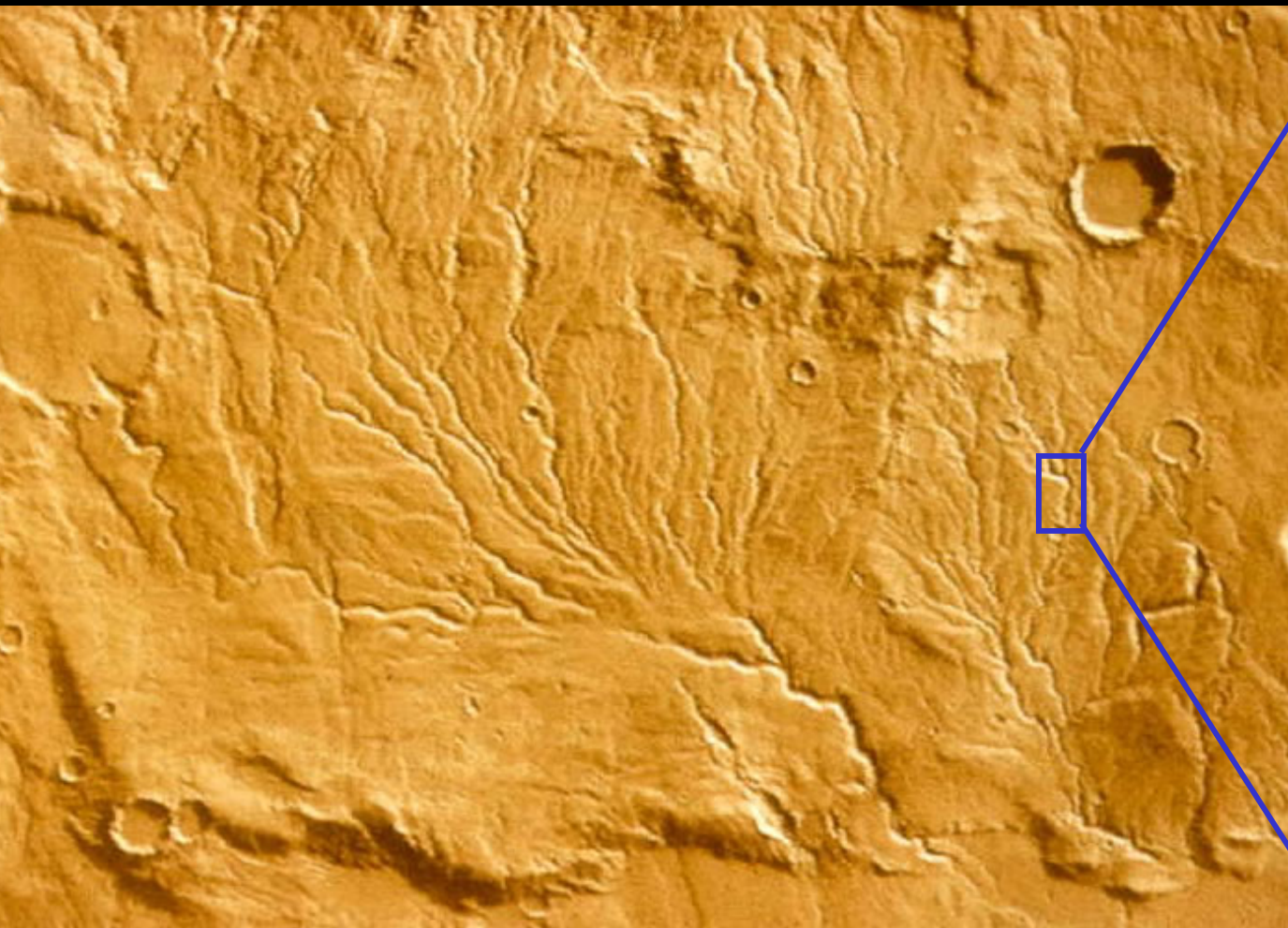
**Mais la grande question, c'est l'eau, puis la vie sur Mars. Alors parlons de l'eau sur Mars !**





**On sait depuis 1972 que de l'eau a jadis coulé sur Mars,  
creusant ici d'énormes vallées de débâcles,**

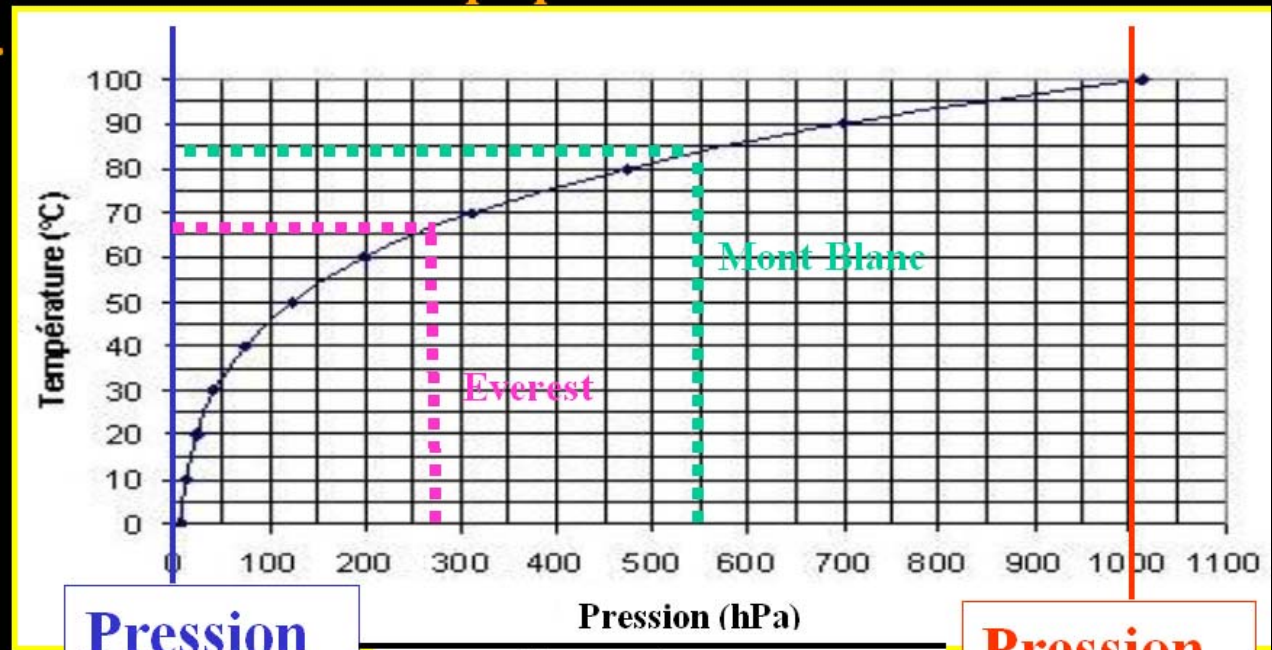
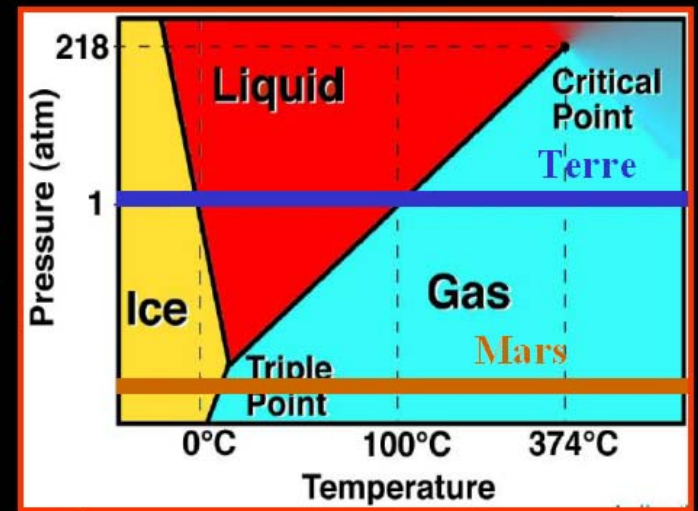




**Ailleurs tout un réseau hydrographique avec petits ruisseaux formant de grandes rivières, avec affluents, méandres...**



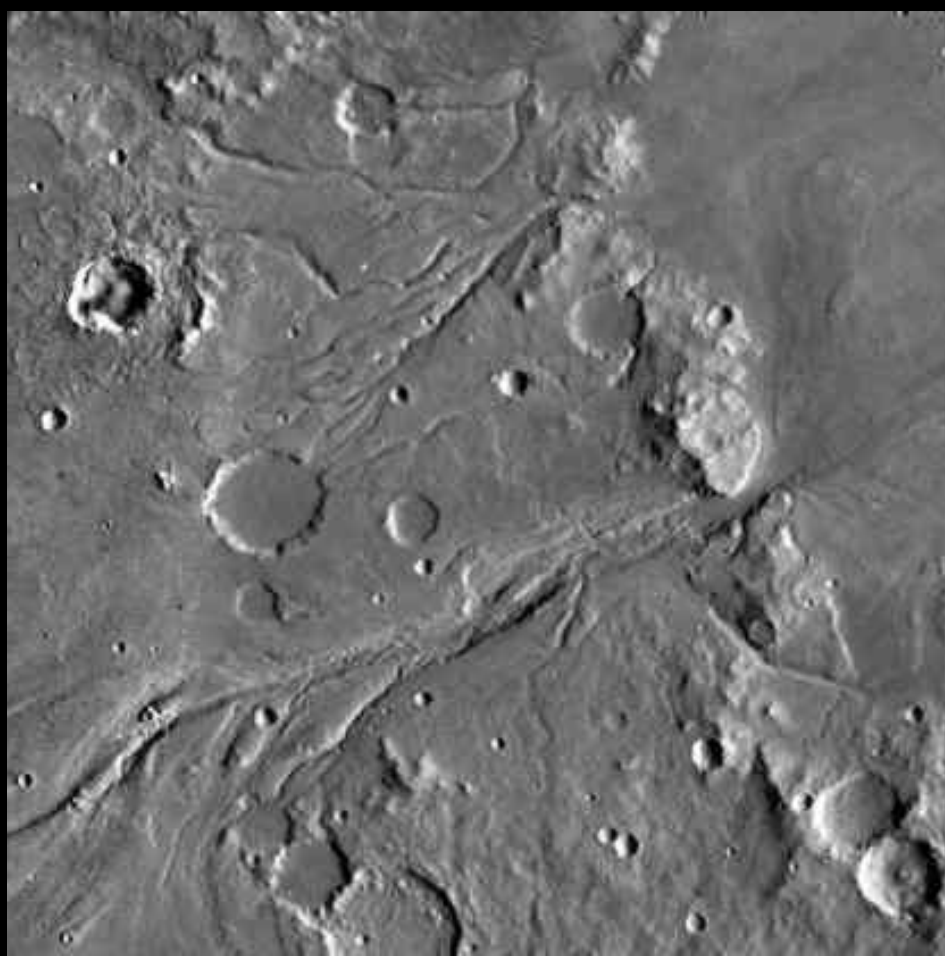
Sur Mars, la pression actuelle de de 6 hPa.  
 A cette pression, l'eau ne peut pas être liquide.  
 Elle est en glace et/ou en vapeur. Et comme il fait  
 en moyenne  $-50^{\circ}$ , elle est surtout en glace, avec une  
 très faible proportion de vapeur dans l'atmosphère.  
 Que se passe t'il si on 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**

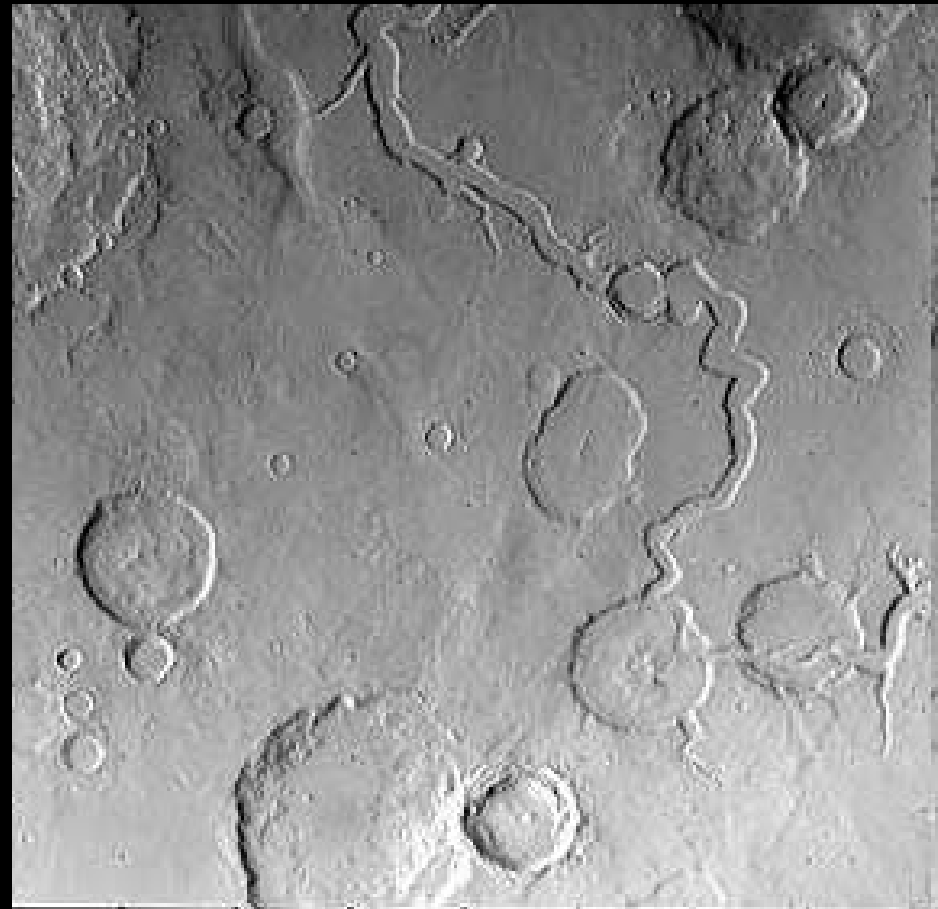
**Température  
d'ébullition de l'eau en  
fonction de la pression**

**Pression  
sur Terre**

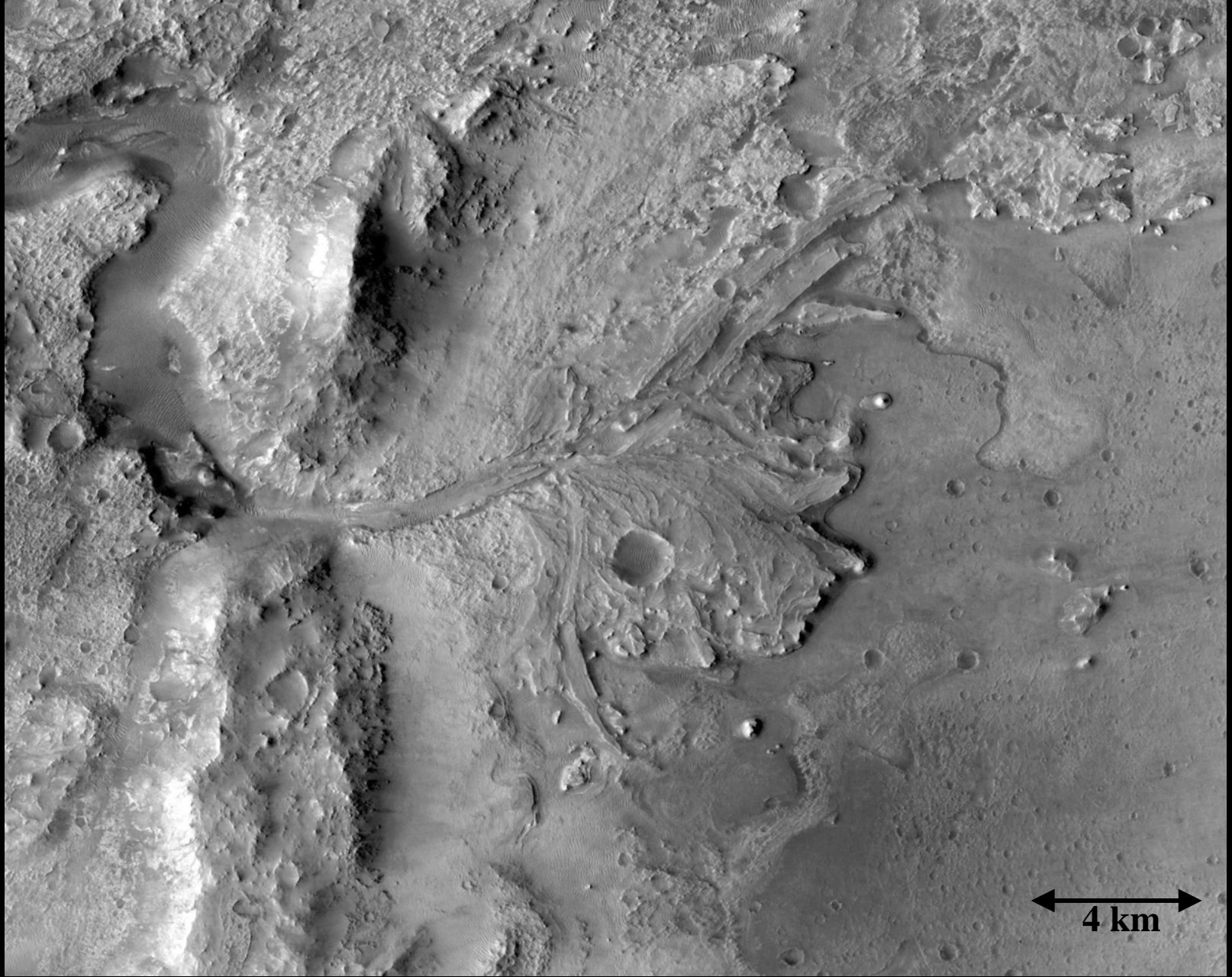


**On connaît ces vallées depuis 1972. Les données récentes les ont rajeunies: Il y en a jusque vers  $-3,5 \text{ Ga} \pm 0,5$**

**Ces anciennes rivières se jettent dans d'anciens lacs (voire anciennes mers) et forment des ...**

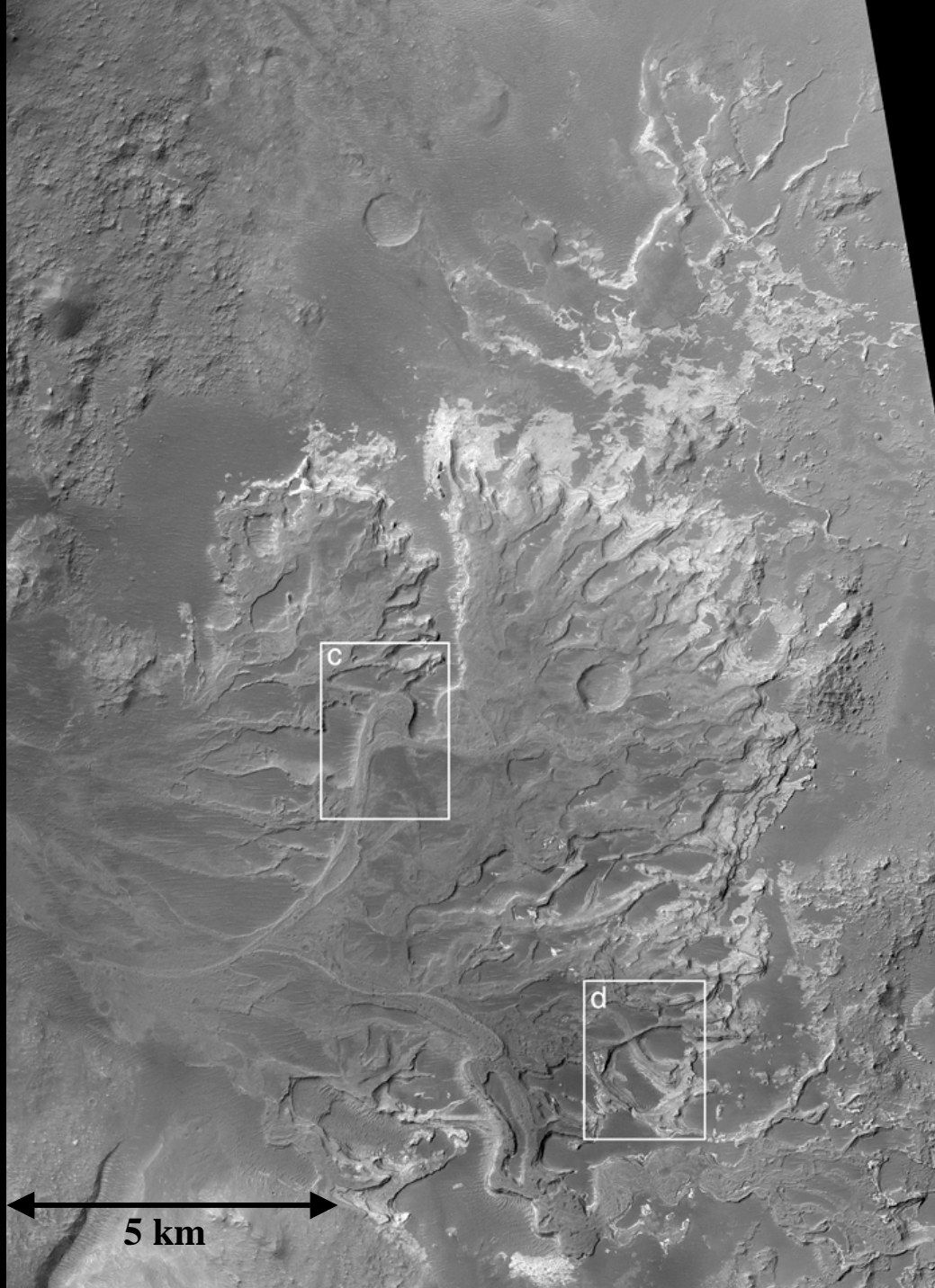






... des deltas.

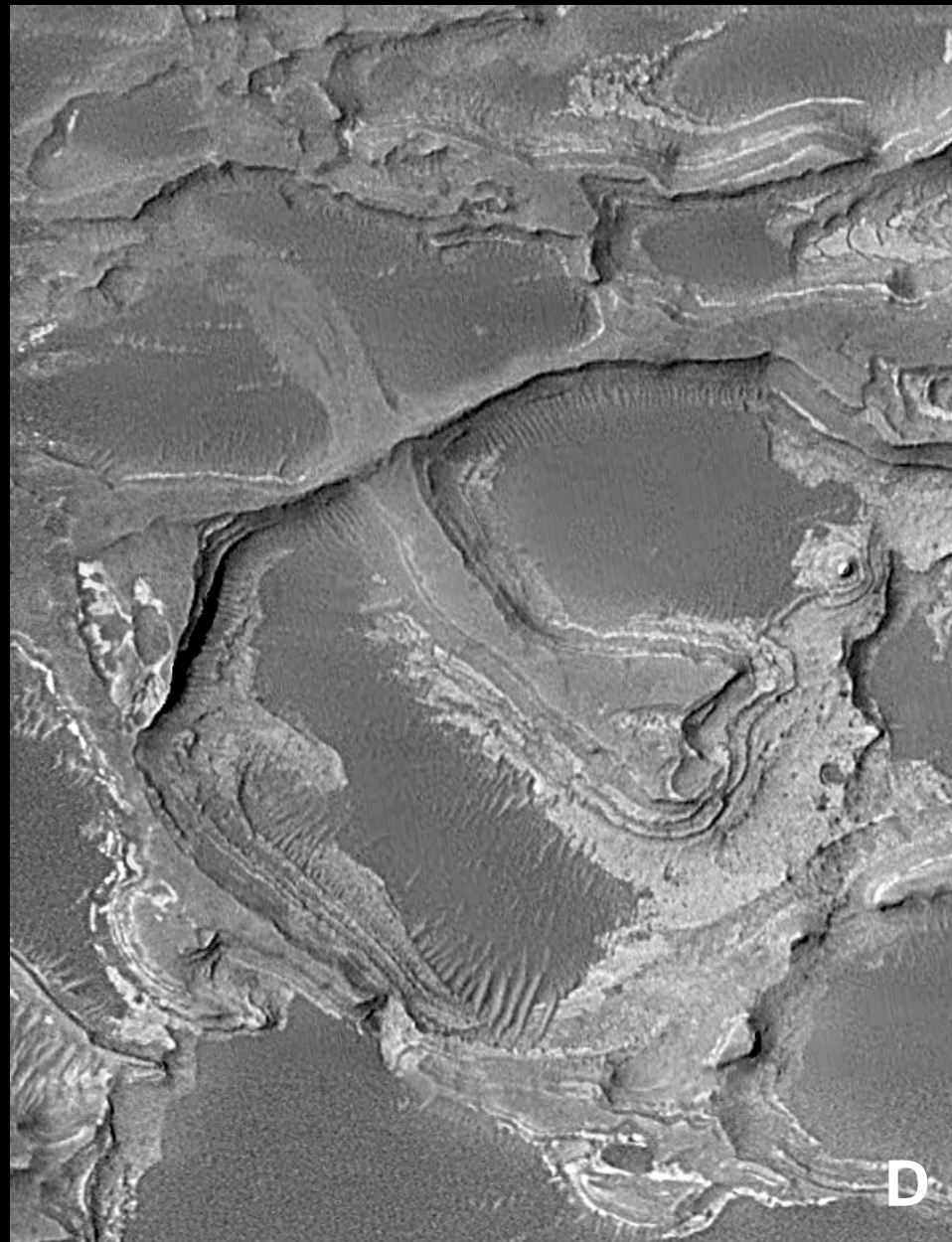
**Ces deltas sont parfois « inversés » : les paléo-lits de rivières sont perchés. Sans doute le résultat de l'érosion (éolienne) différentielle des anciens lits indurés par des sels**







**Des détails, exemples de ce que permettent les images HR actuelles**

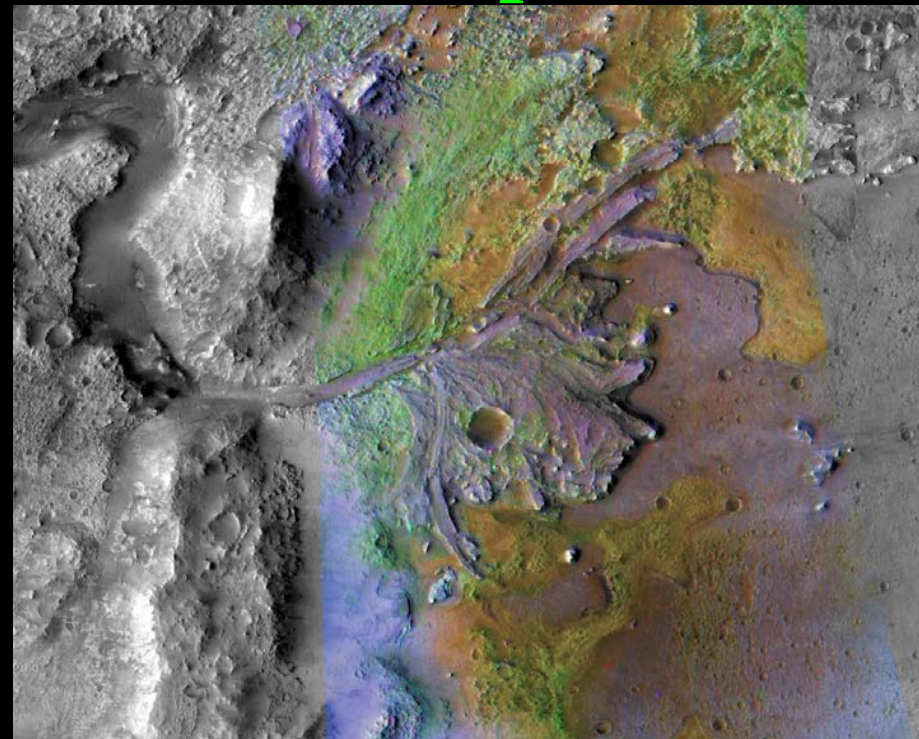




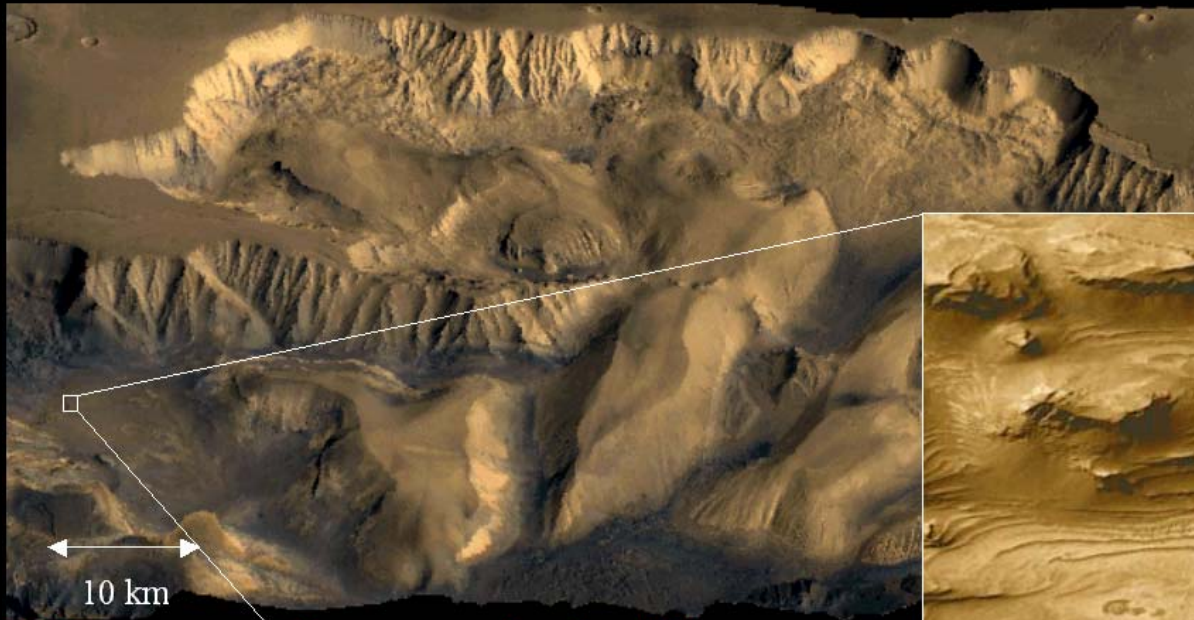


**Ici, on trouve des argiles (en vert sur la composition colorée issue d'études spectrales) dans la plaine, mais sous les terrains les plus récents de ce delta martien qui n'en contient pas.**

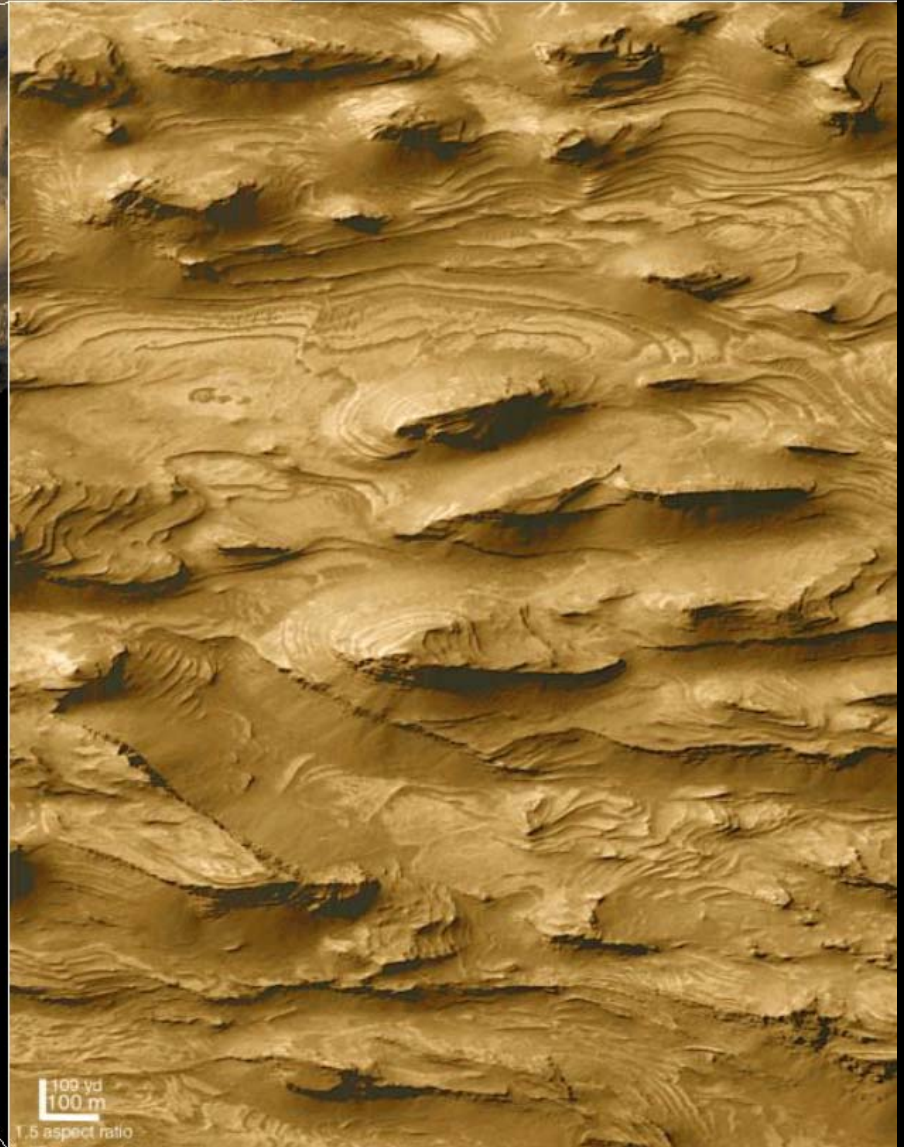
**On peut ainsi faire une chronologie entre les époques « argilogènes » (eau liquide pérenne avec Ph pas trop acide) et les autres époques (eau transitoire, Ph acide ...)**



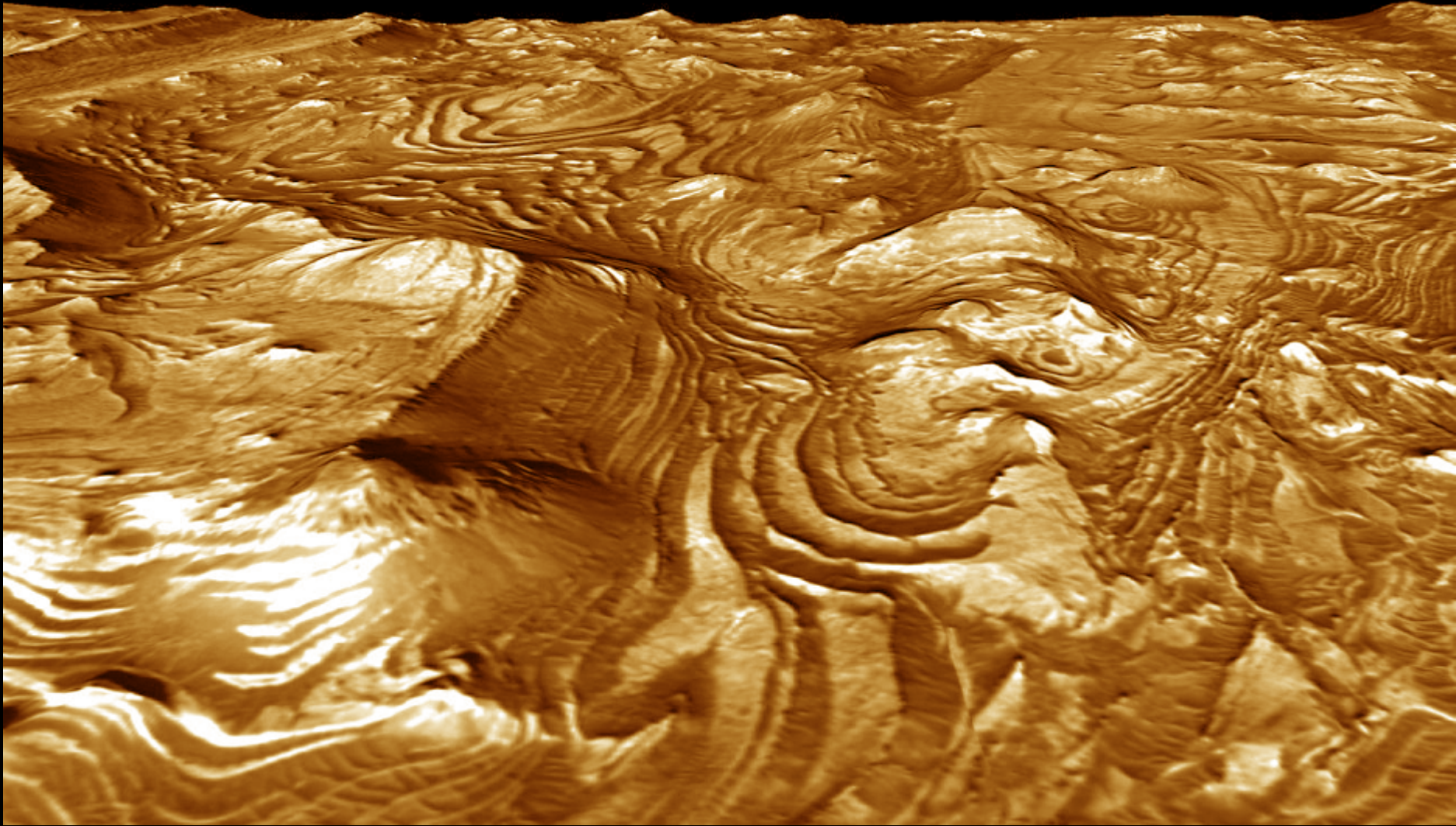




**Non seulement de l'eau liquide a été présente un « certain temps », à coulé, mais elle a déposé des strates sédimentaires dans les creux**

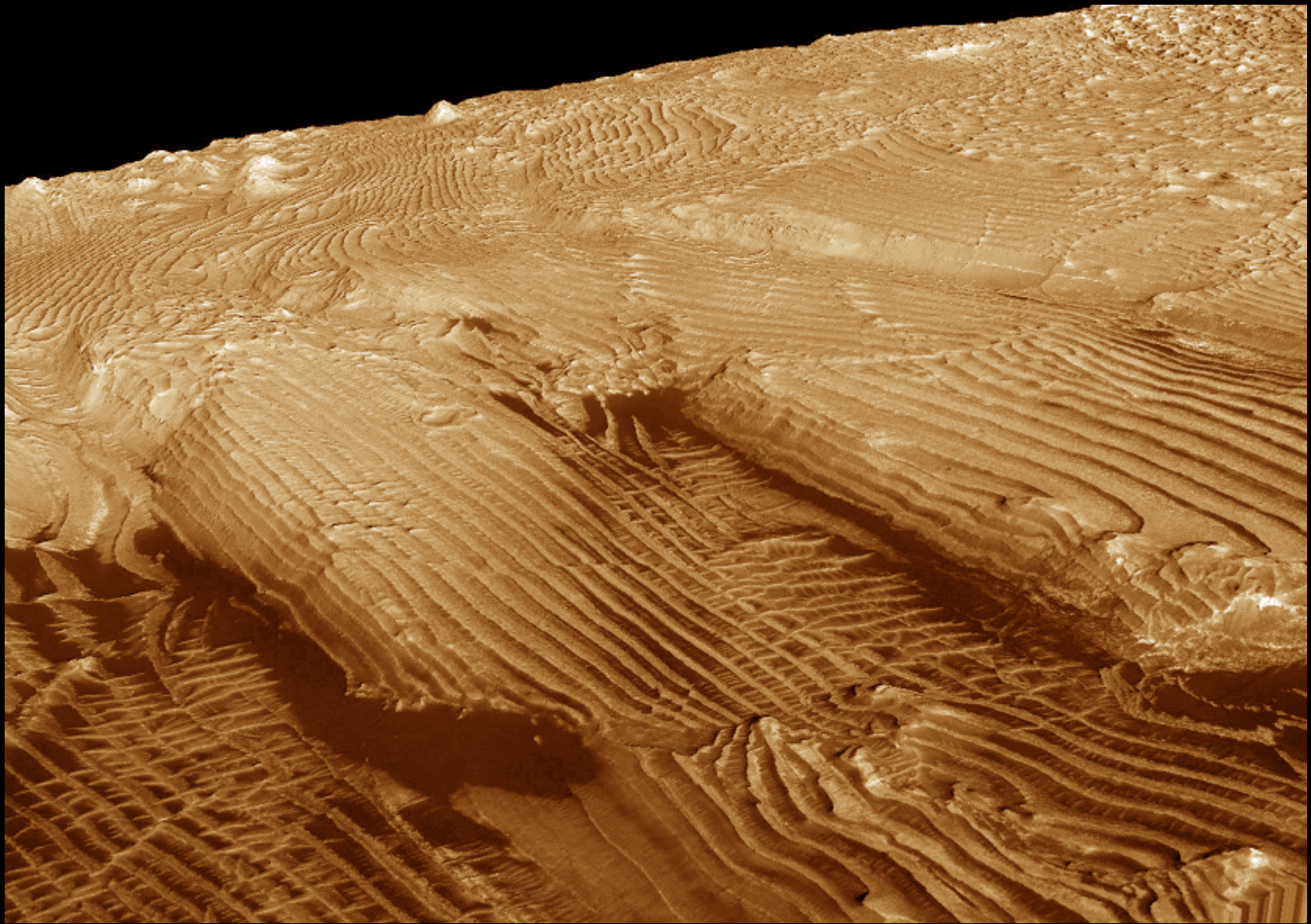






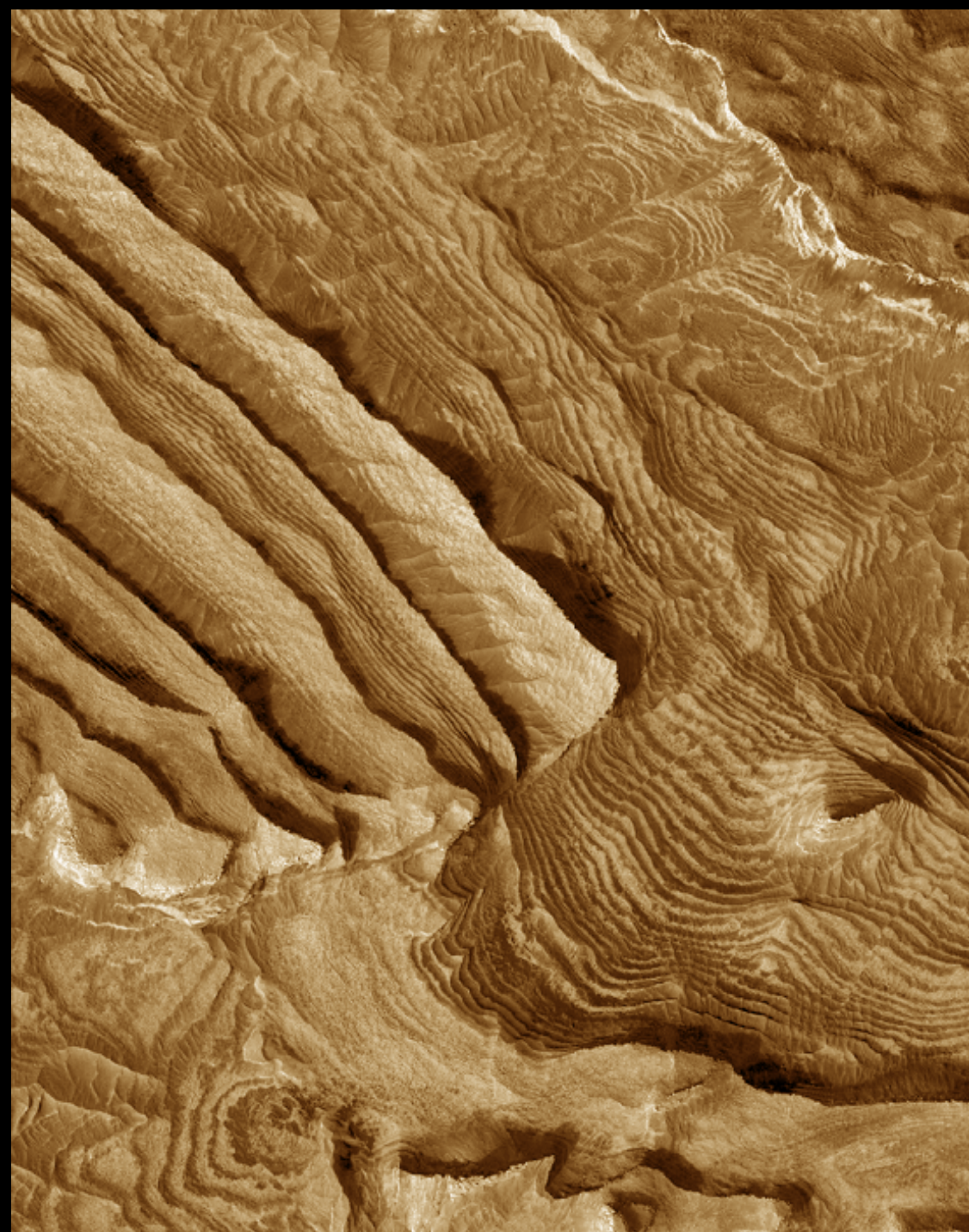
**Les mêmes en vue rasante**





**... que de couches de sédiments ; et quelle  
régularité !**

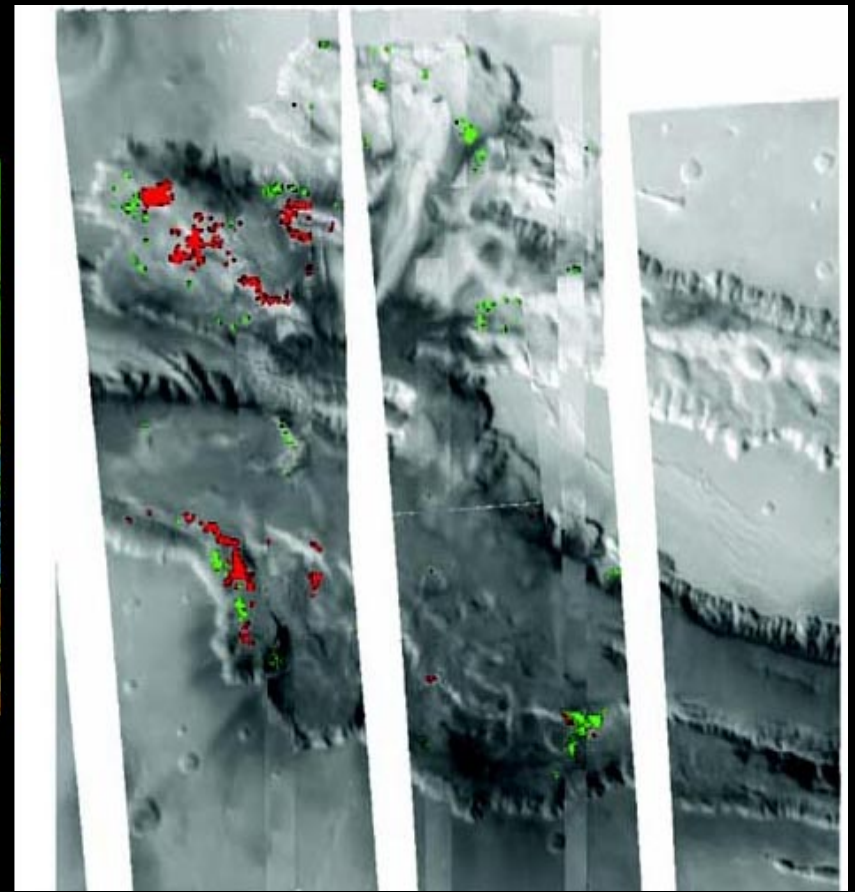
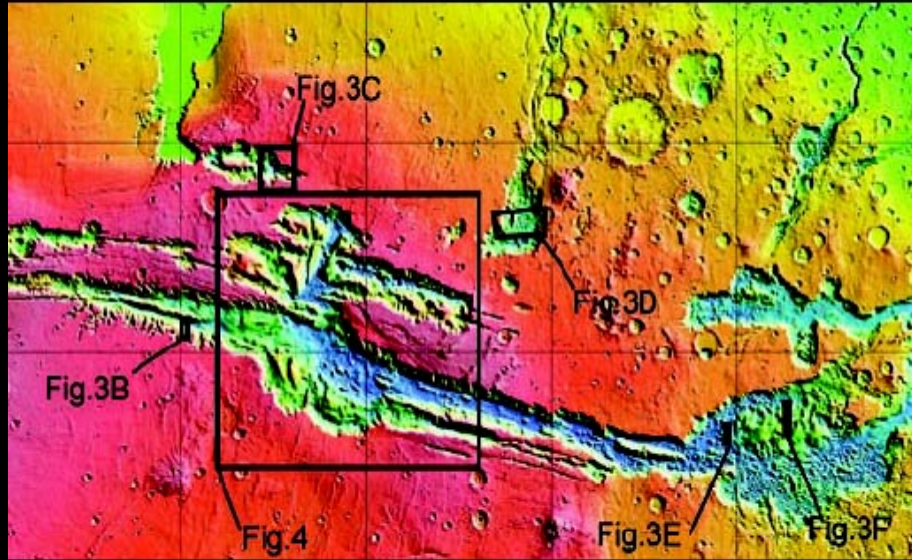




**Quelle double  
régularité ! Cela  
sent les variations  
rythmiques de  
paramètres  
orbitaux.**



## Carte topographique de Valles Marineris, et localisation de la photo



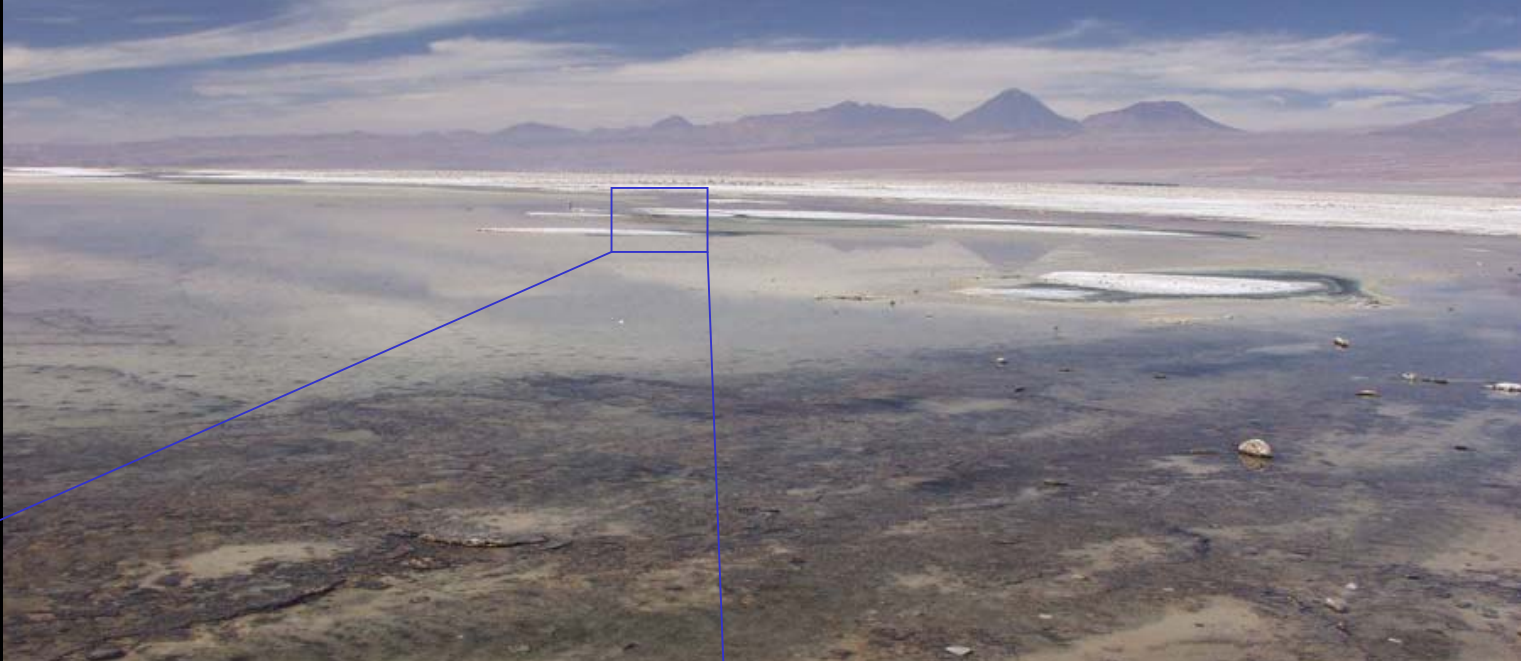
**Que sont ces sédiments ?**

**Le spectro-imageur repond (partiellement )**

**Sur la photo ont été reportés :**

**en rouge les affleurements de kiésérite ( $MgSO_4 \cdot H_2O$ )**

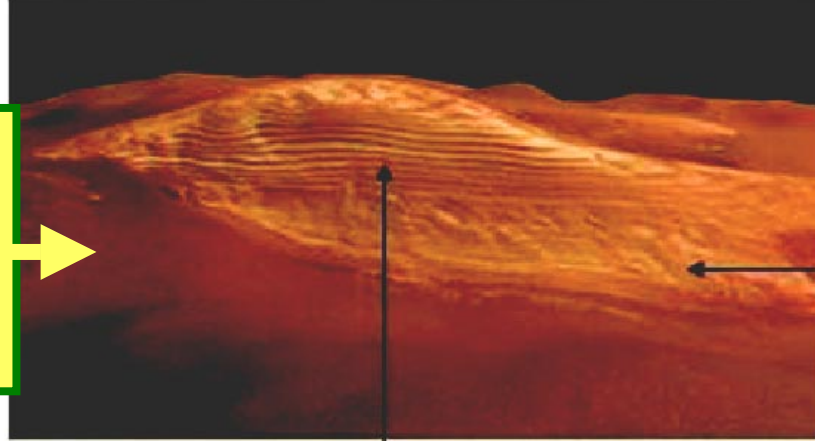
**en vert les affleurements de sulfates hydratés non parfaitement identifiés ( $XSO_4 \cdot nH_2O$ , et si  $X = Ca$  et  $n = 2 \rightarrow$  gypse)**



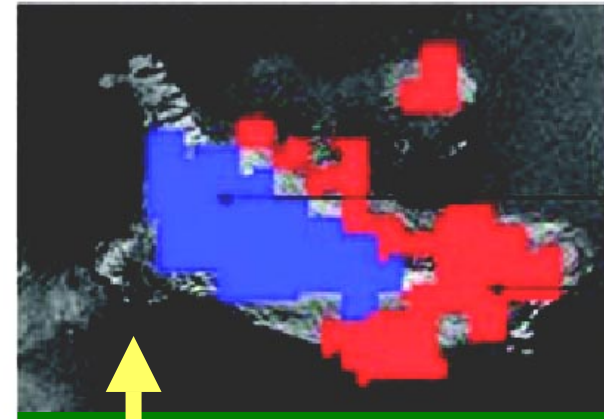
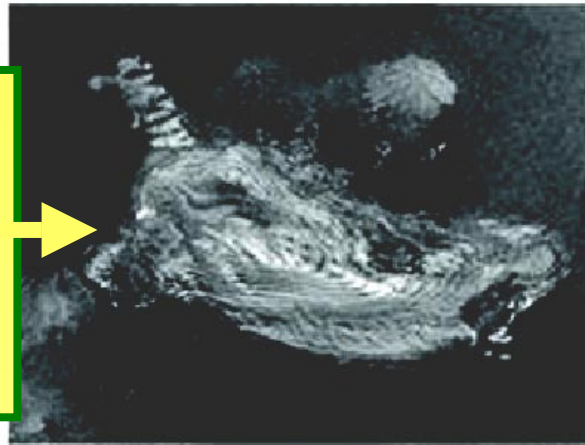
**Kiésérite, gypse,  
sulfates ..., ça se  
dépose dans des lacs  
salés, des lagunes en  
bord de mer ...**



**Image oblique Mars Express : terrains stratifiés en haut, beaucoup moins en bas**



**Image verticale Mars Global Surveyor (MGS), de la NASA**



gypsum

kieserite

**Les données du spectro-imageur de Mars Express, reportées sur l'image MGS.**

**Les niveaux stratifiés supérieurs seraient en gypse.**

**Les niveaux inférieurs mal stratifiés seraient en kiésérite.**

**La composition des eaux de l'ancien lac auraient changé au cours du temps !**

**Terminons nos observations orbitales concernant l'eau liquide par les « gullies »**



**Les « gullies » (ravine, rigole, en anglais), découverts en 1997, sont de petites ravines de quelques centaines de mètres qui dévalent des pentes « exposées au soleil » d'anciens cratères ou de vallées.**



**Ces gullies sont très jeunes ; aucun cratères ne les recoupe. A gauche, une ravine recoupe même un champ de dunes**



Plus de 10 m de terrains étanches. Leur poids confère une pression suffisante pour que l'eau puisse être liquide en dessous de 10 mètres de profondeur, si la température est suffisante



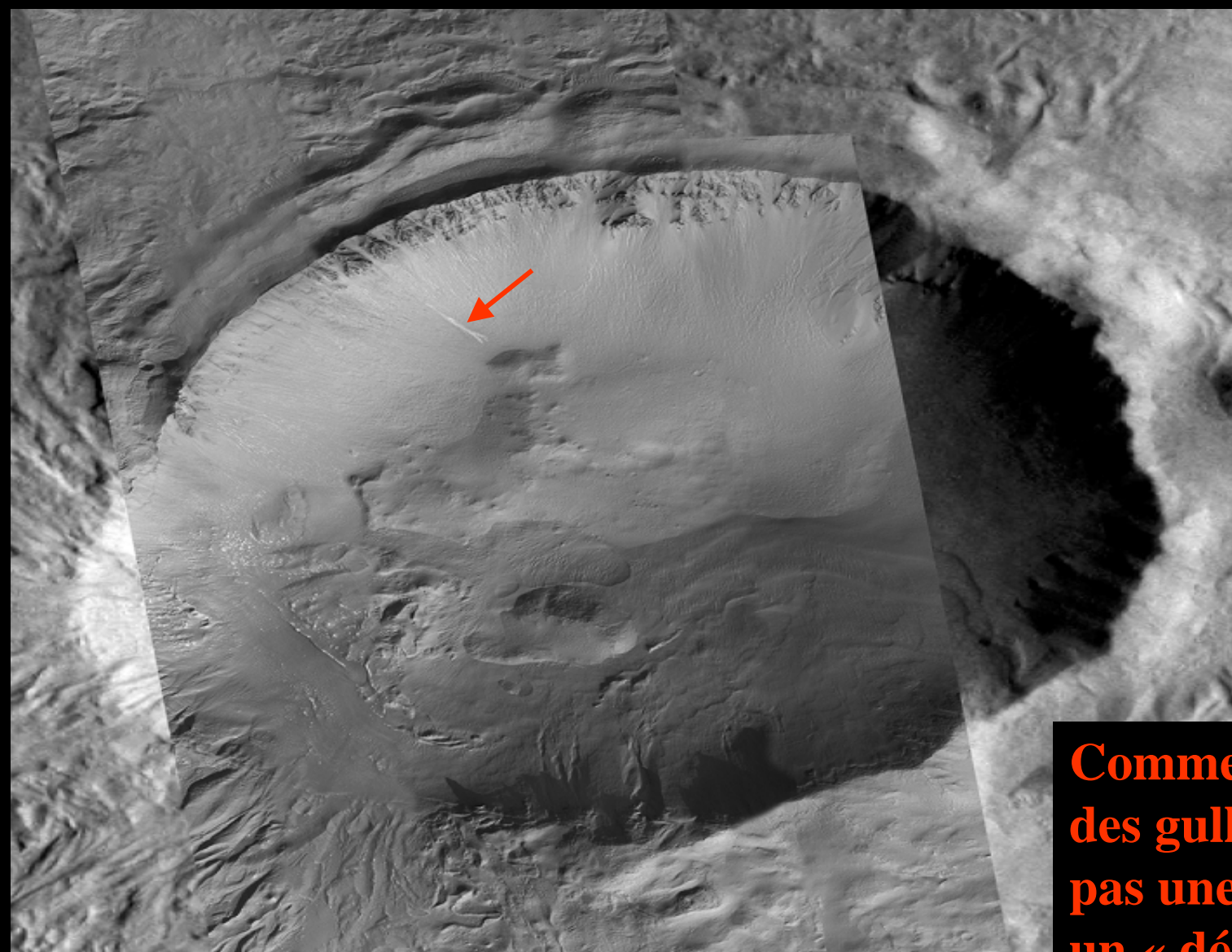
Sur les versants exposés au soleil, la température peut approcher les 0°C

Terrains imbibés de glace, peut-être salés. Si la salinité est forte, la température de fusion peut baisser bien en dessous de 0°C

La glace peut fondre sous ces versants réchauffés, l'eau liquide peut crever les terrains étanches et s'écouler, brièvement.

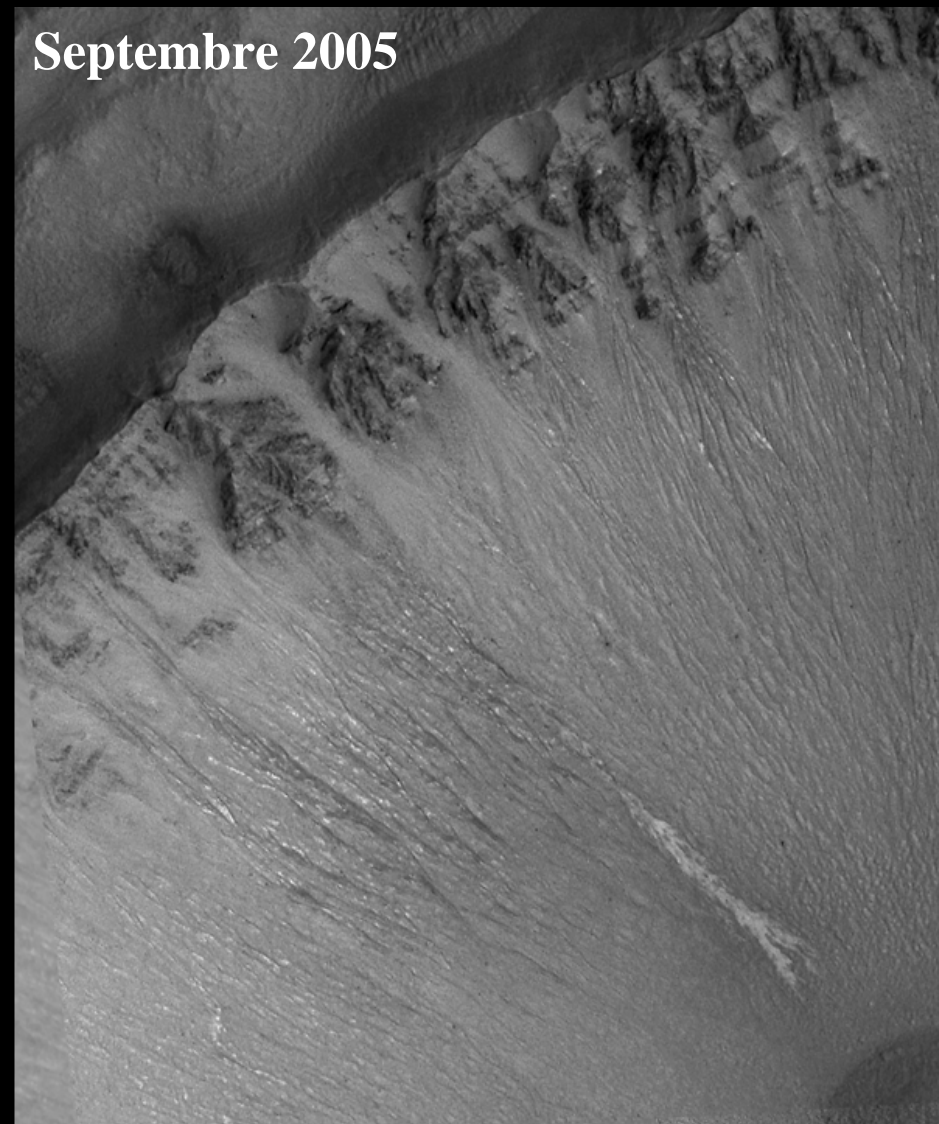
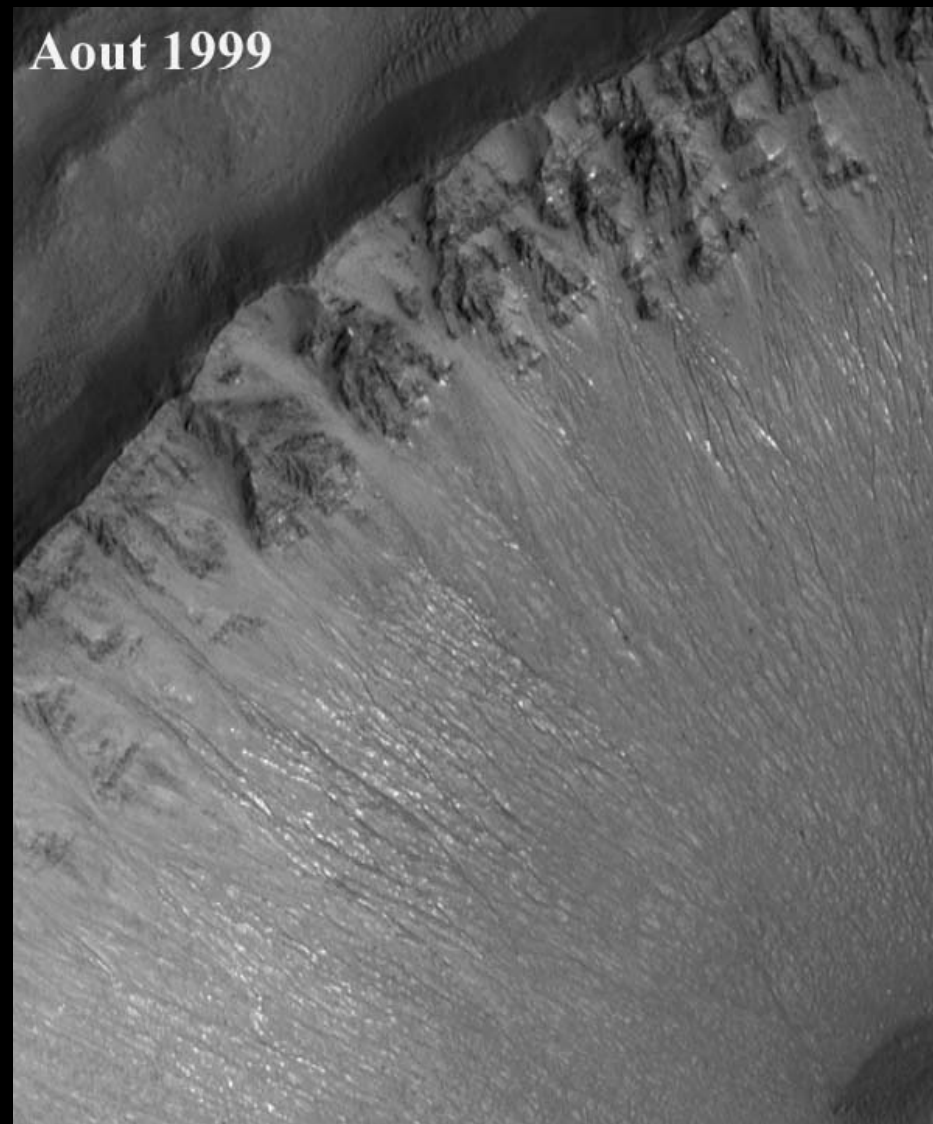


**Voici un cratère avec gullies, photographié en septembre 2005. Qu'a t'il de spécial ?**

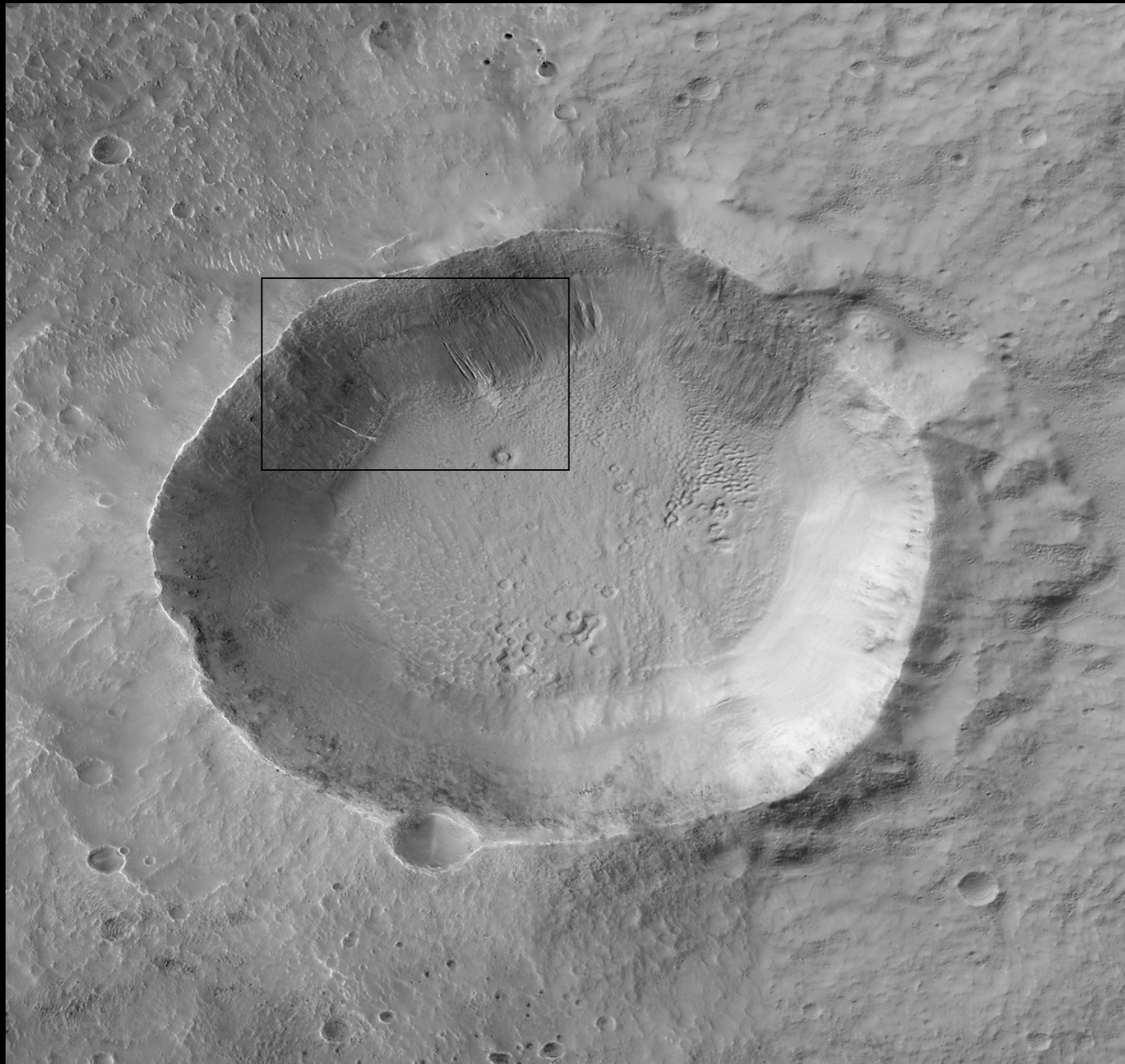


**Comme quelques %  
des gullies, ce n'est  
pas une ravine, mais  
un « dépôt clair »**

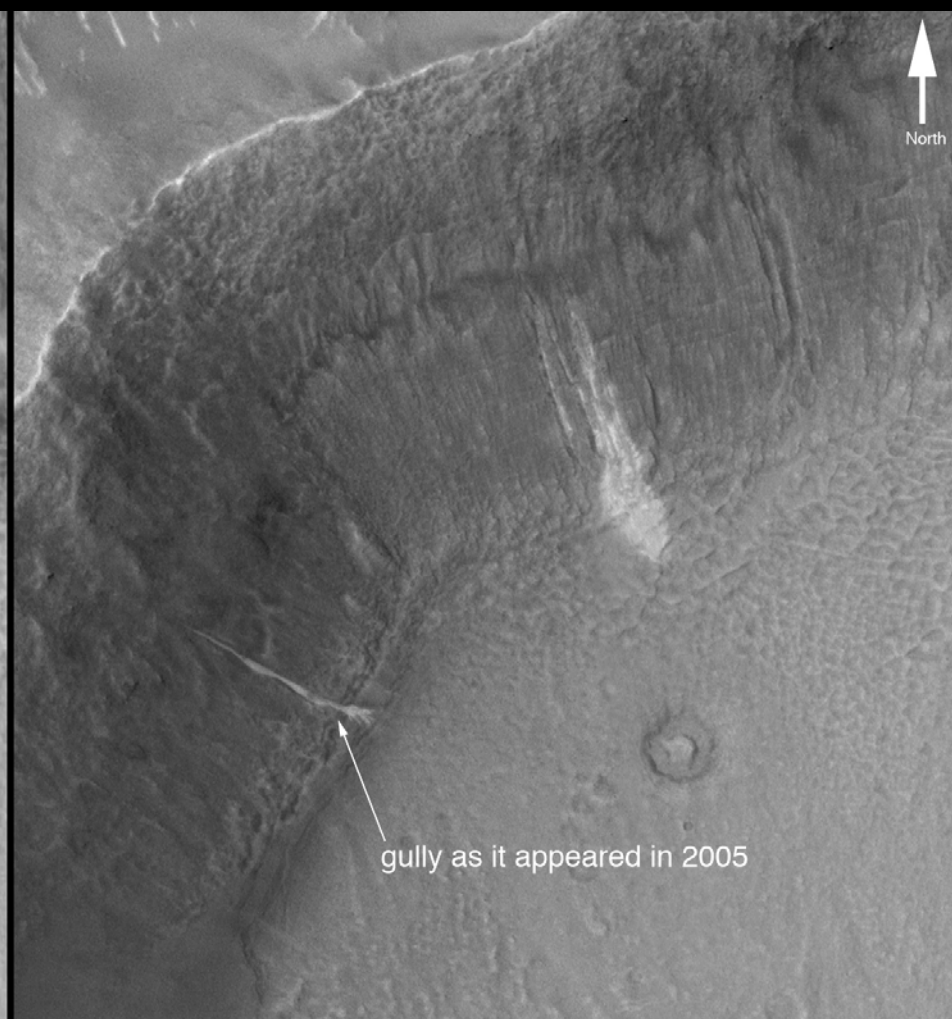
**Il a aussi de spécial qu'il existait en 2005, mais qu'il n'existait pas en ...**







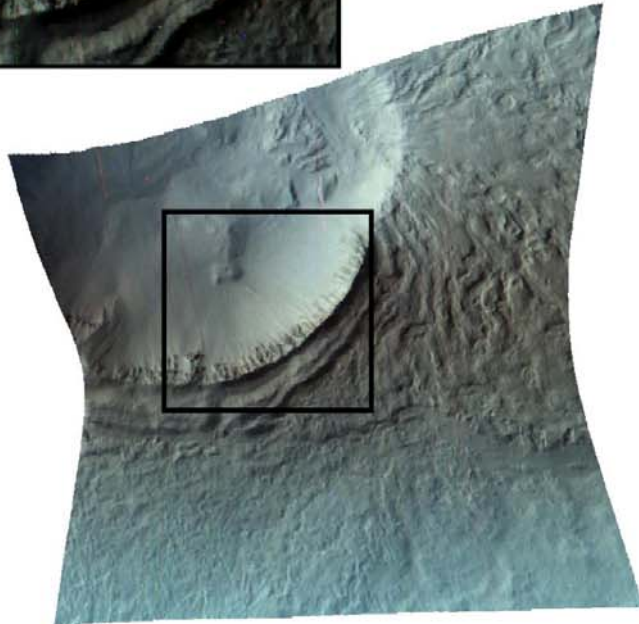
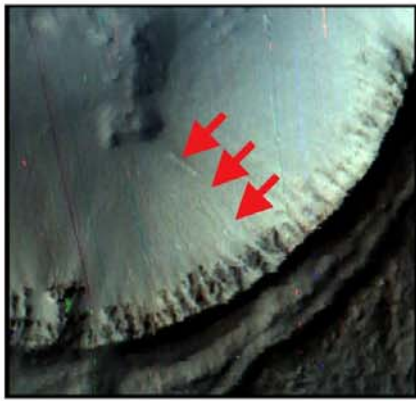
**Un  
deuxième  
cratère  
avec ...**



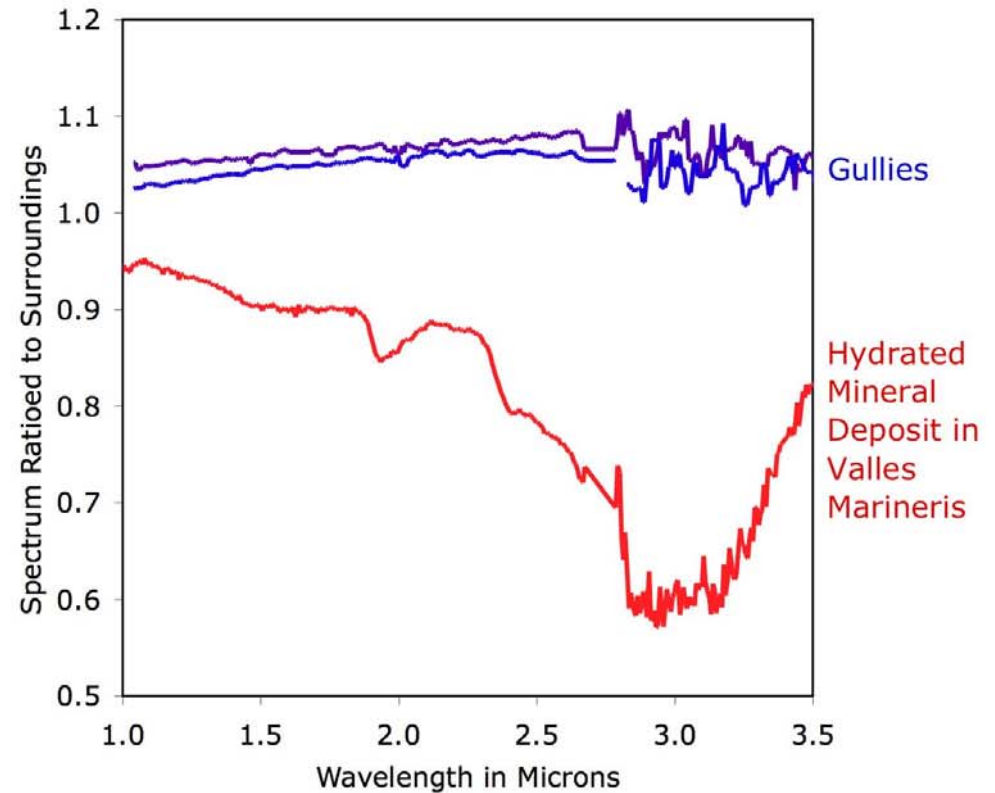
**Là aussi une ravine s'est fait remplir d'un dépôt blanchâtre entre 2001 et 2005.**

**Il semblerait bien que de l'eau liquide (en déséquilibre) ait coulé sur Mars au 21eme siècle**



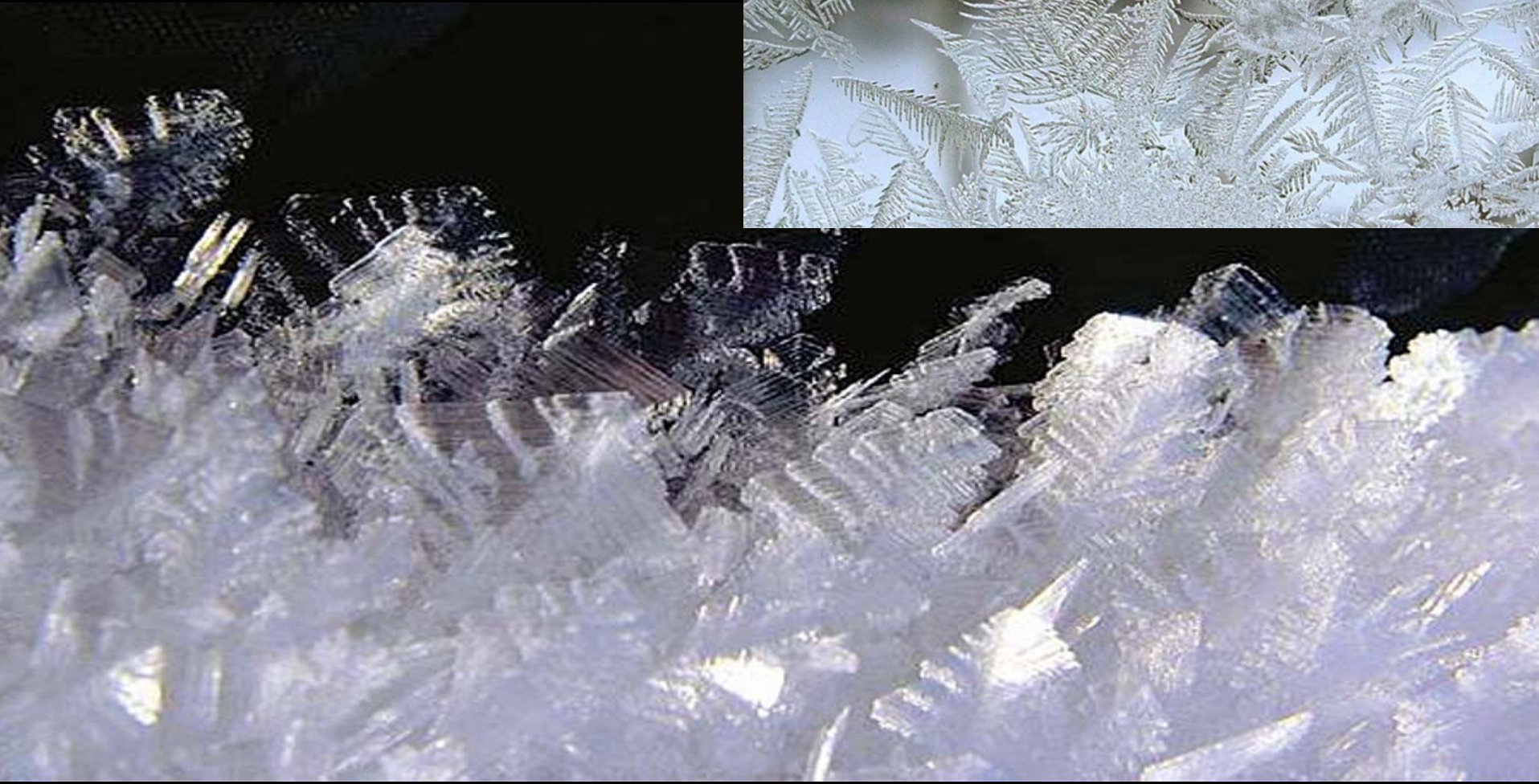


10 km

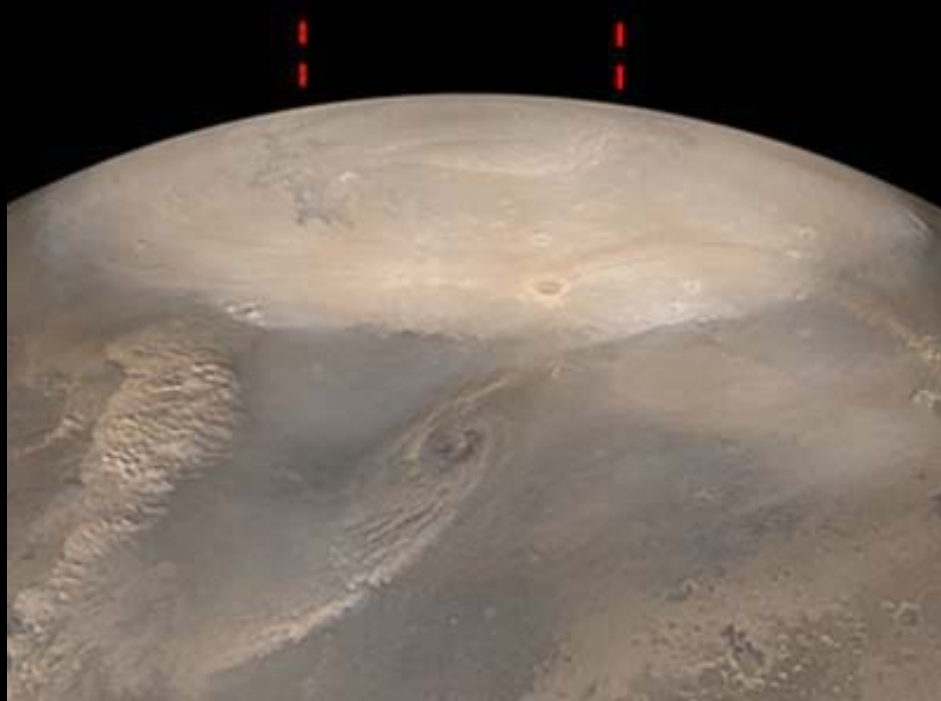


**Nouvelles du 24 septembre 2007 : ces gullies clairs et actuels ne contiendraient ni glace, ni sels divers. Alors ?? Réponses plus tard !**

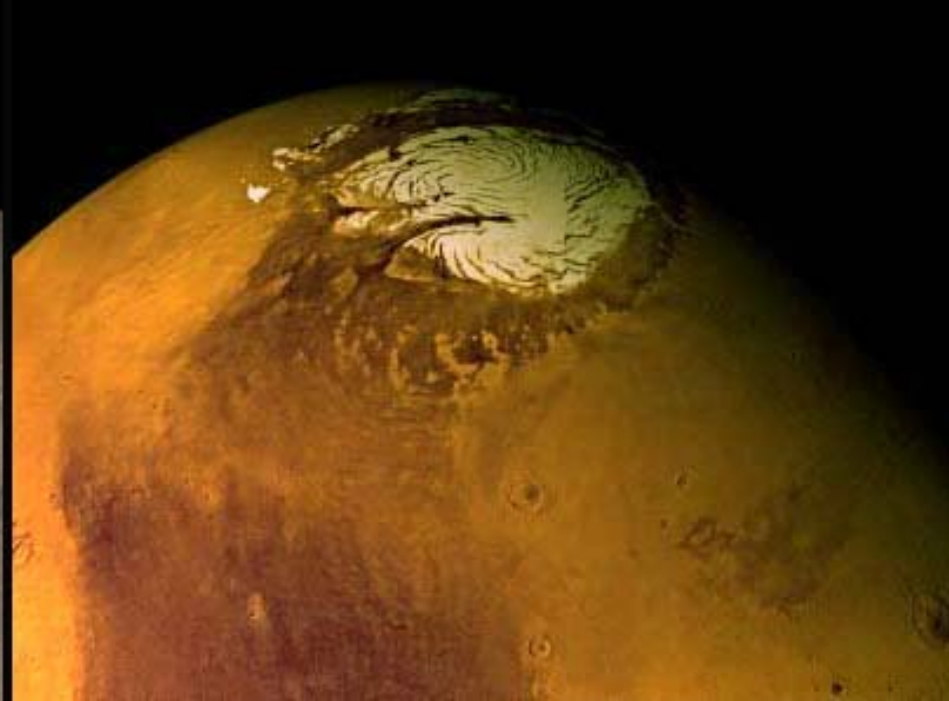
**Après l'eau liquide, la  
(les) glace(s) de surface  
ou des profondeurs**







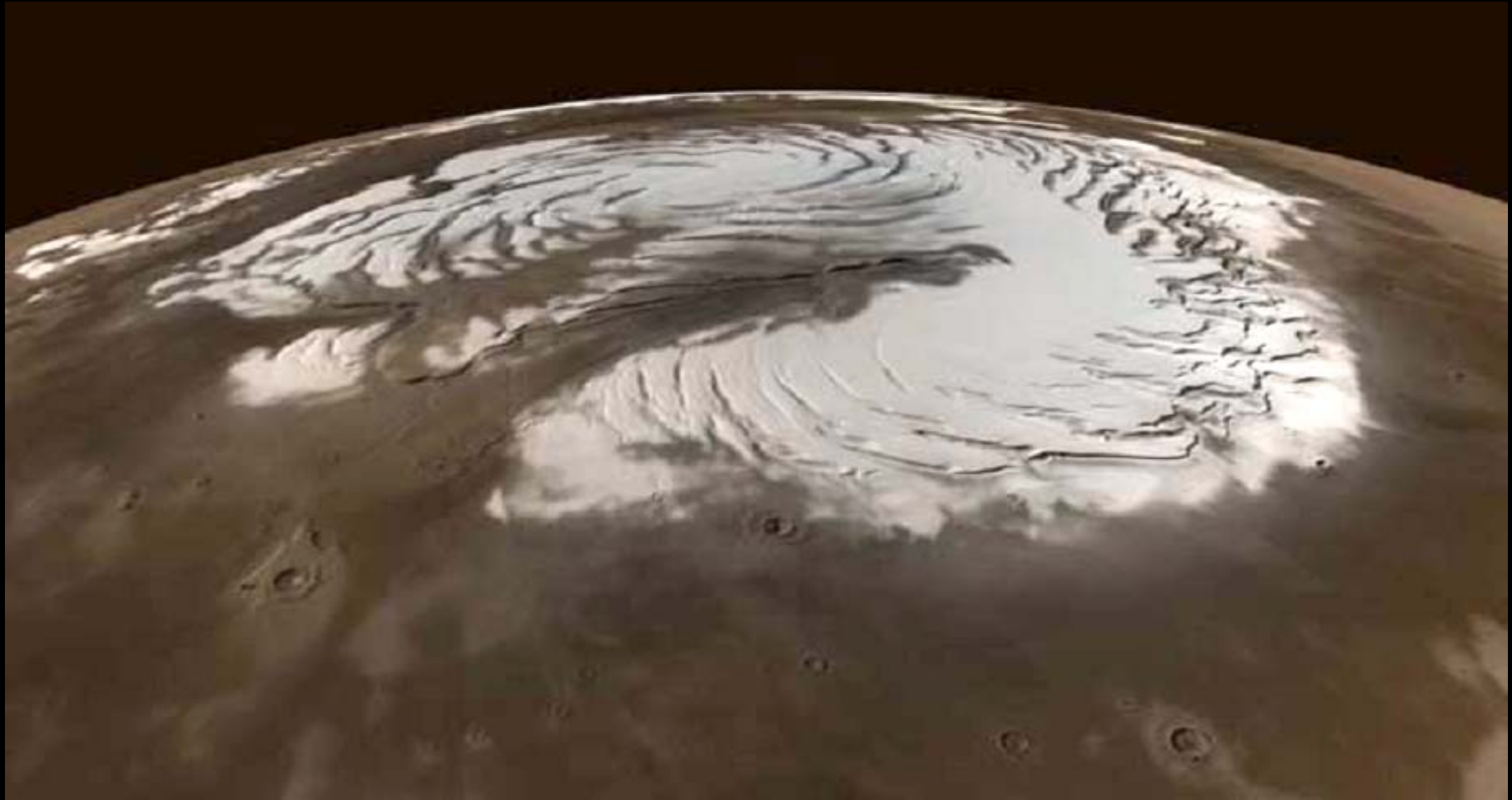
La calotte nord l'hiver  
D = 3000 km



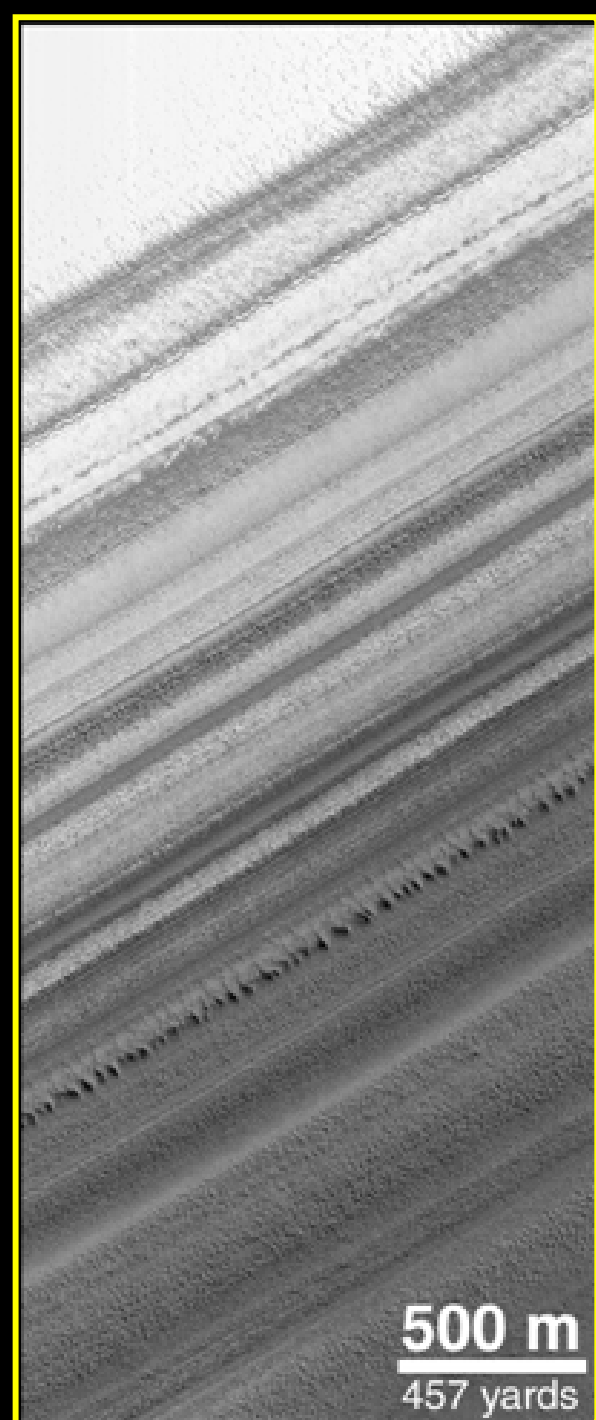
La calotte nord l'été  
D = 1000 km

**On sait depuis le 17eme siècle qu'il y a des calottes polaires sur Mars. Ces calottes changent de taille avec les saisons. Elles sont petites l'été (= calotte résiduelle = calotte permanente = calotte estivale). Elles sont grande l'hiver (= calotte transitoire = calotte hivernale)**

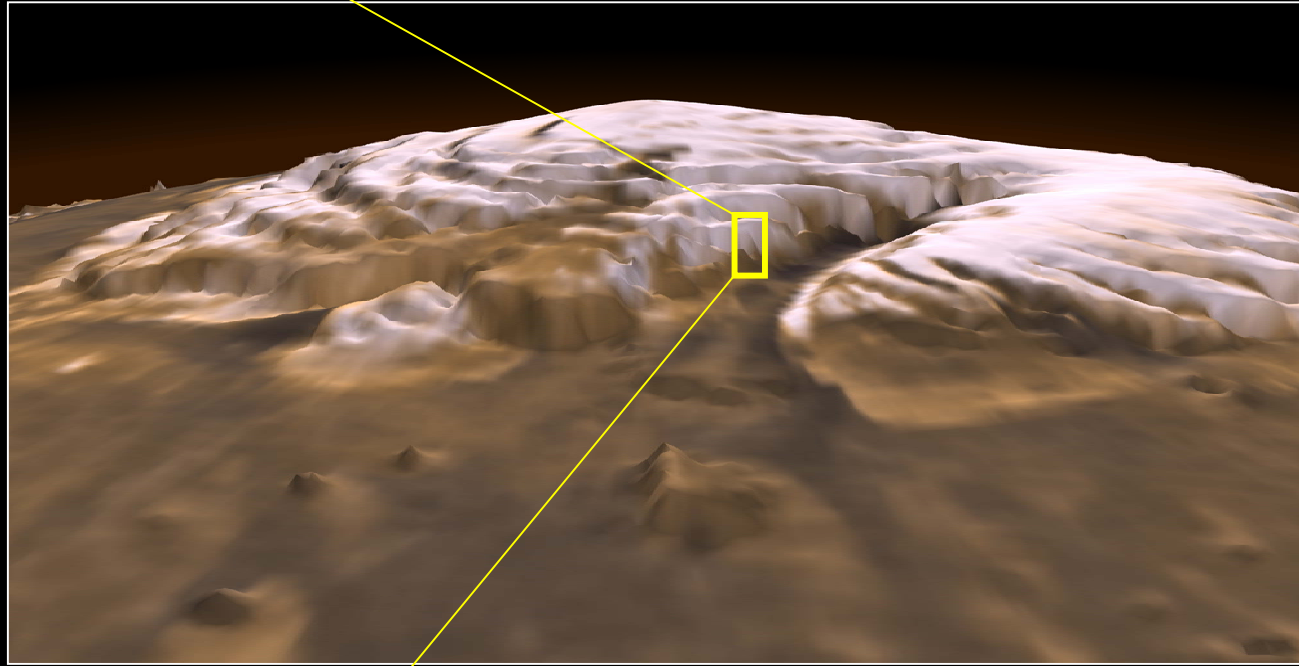
**Voici la calotte polaire nord, ici vue en fin d'été, avec ses « chasmas » énigmatiques. Les études spectrales nous indiquent qu'il s'agit principalement de glace d'eau.**



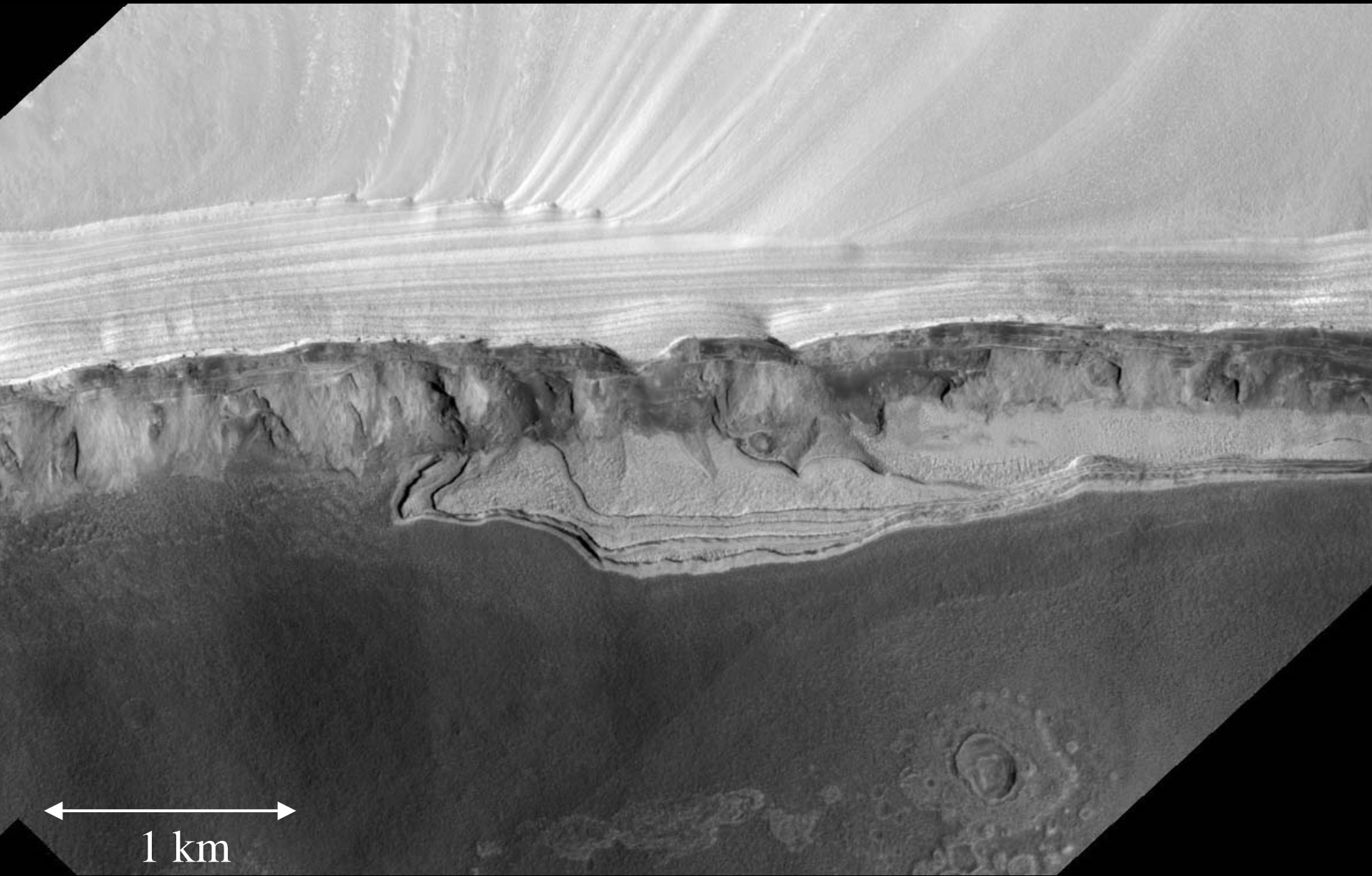




500 m  
457 yards



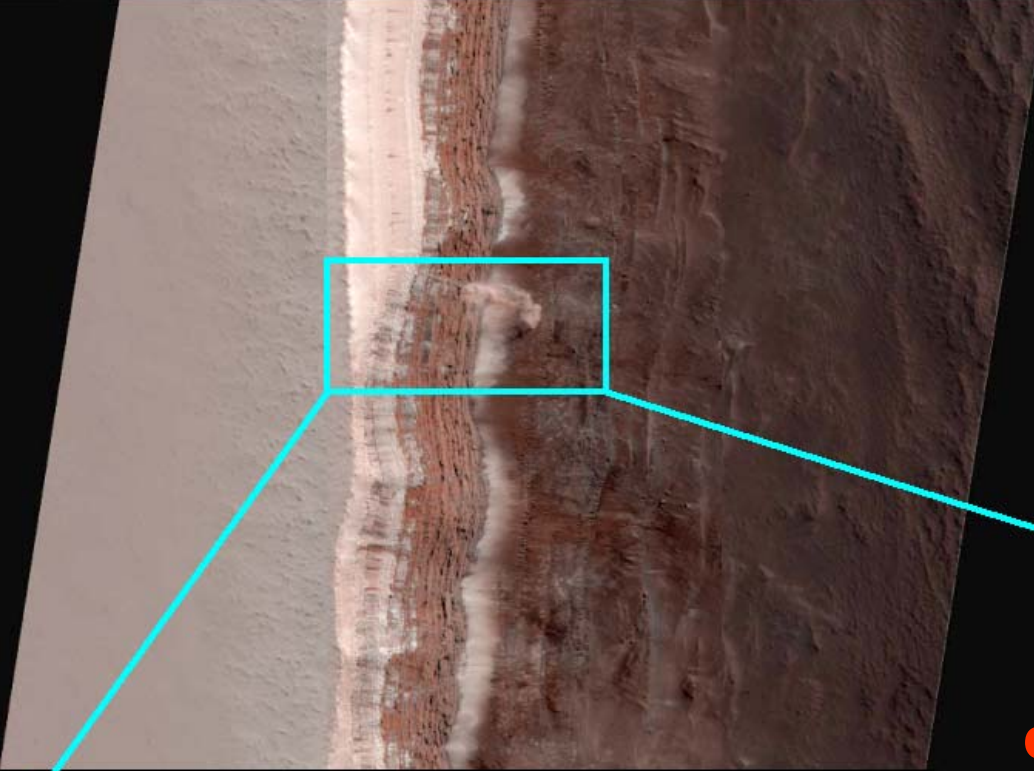
**Les chasmas montrent des falaises (ici 1000 m) qui permettent de voir que la calotte est constituée d'une succession de couches de glace d'H<sub>2</sub>O plus ou moins riche en poussières : les Terrains Polaires Lités.**

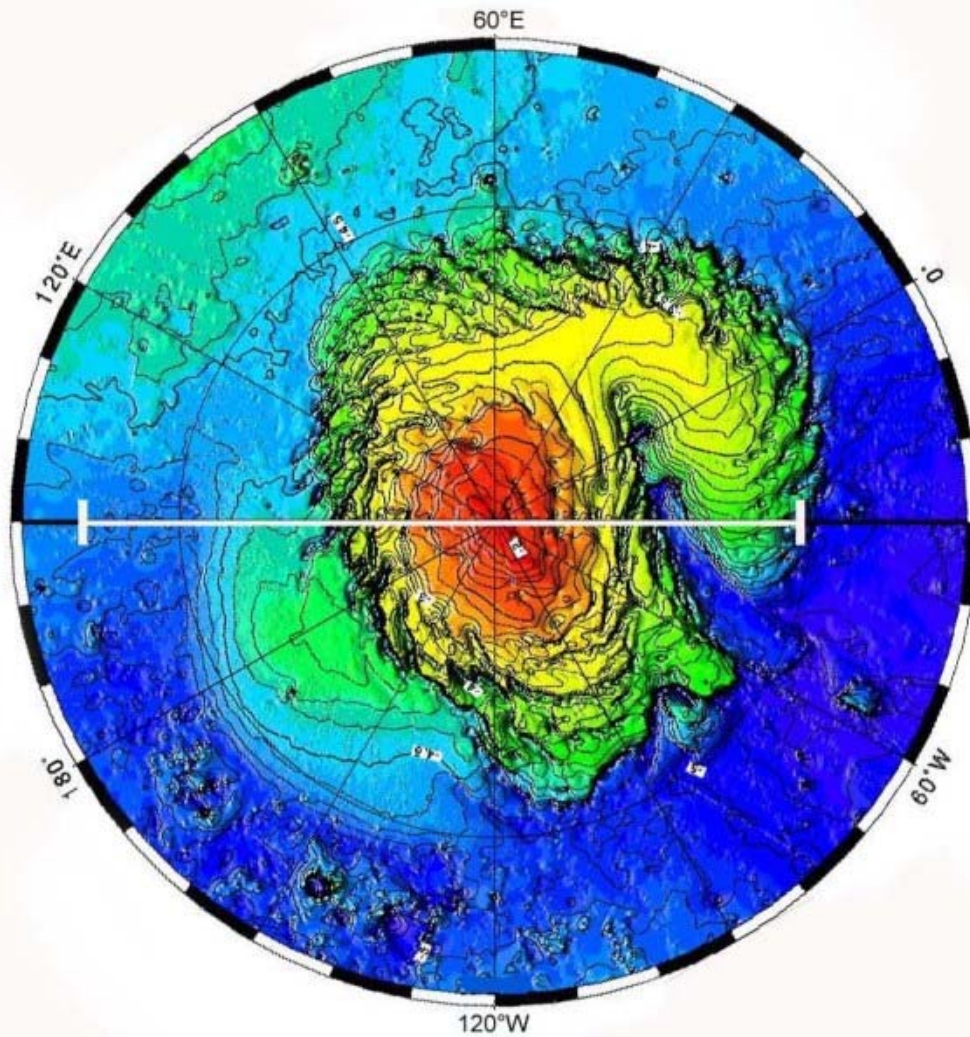


**Une belle vue oblique, montrant que la structure interne est complexe**

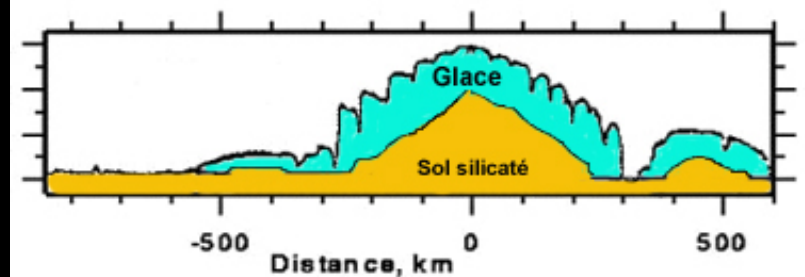
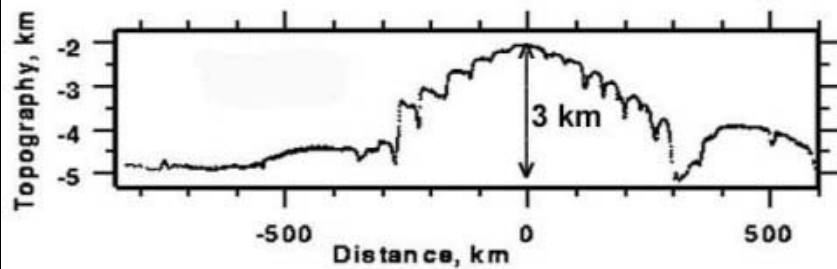
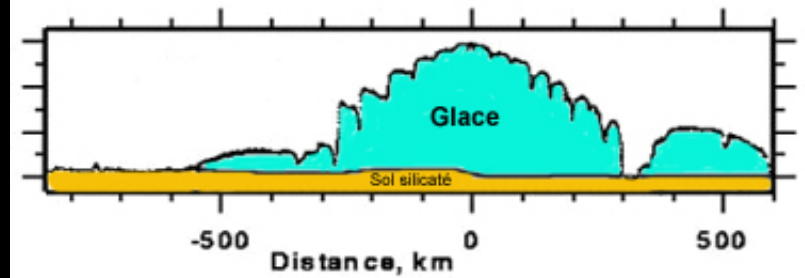


**le 19 février 2008, à 13h 05, heure locale martienne, une sonde en orbite surprend une avalanche, sans doute déclenchée par la sublimation de la couche d'1 m de glace carbonique qui commence en bas des reliefs mais perdure provisoirement en haut, ce qui déstabilise les couches de glaces**





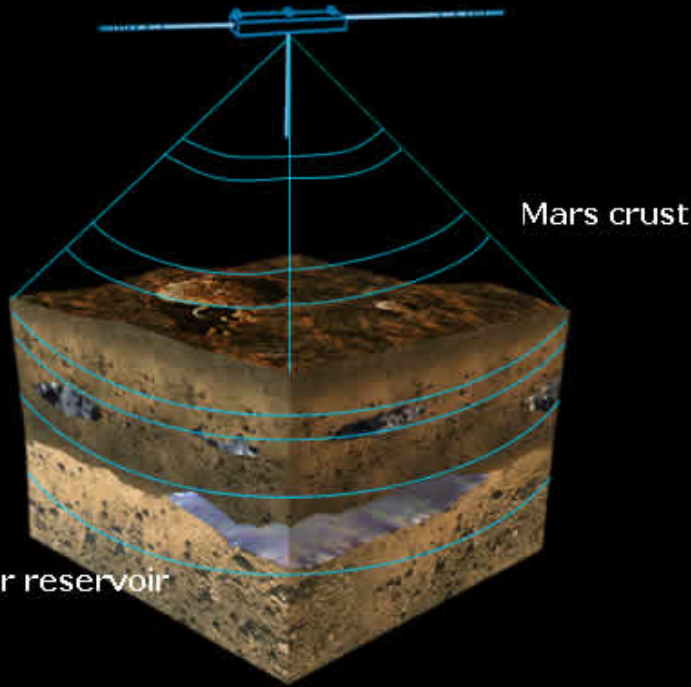
**Mais quel est la géométrie du socle, donc quel est le volume de la glace ?**





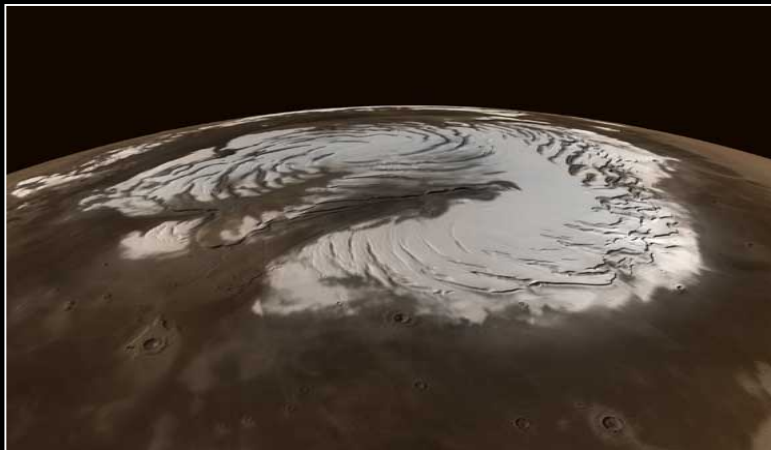
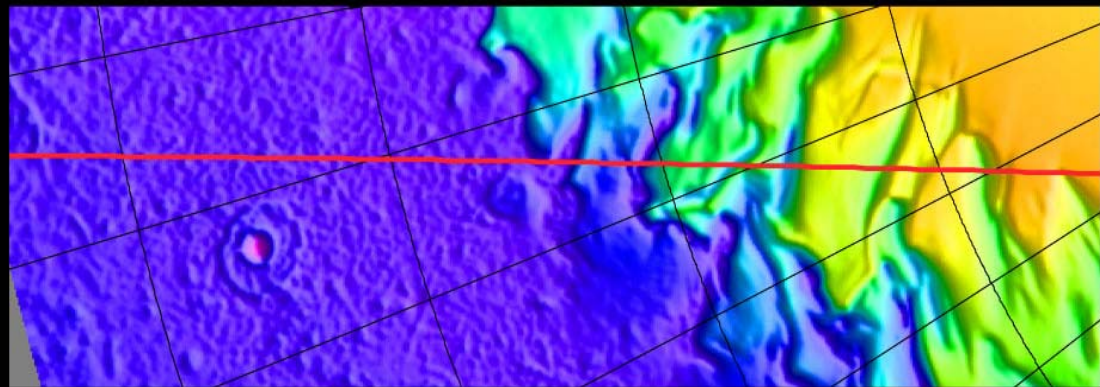
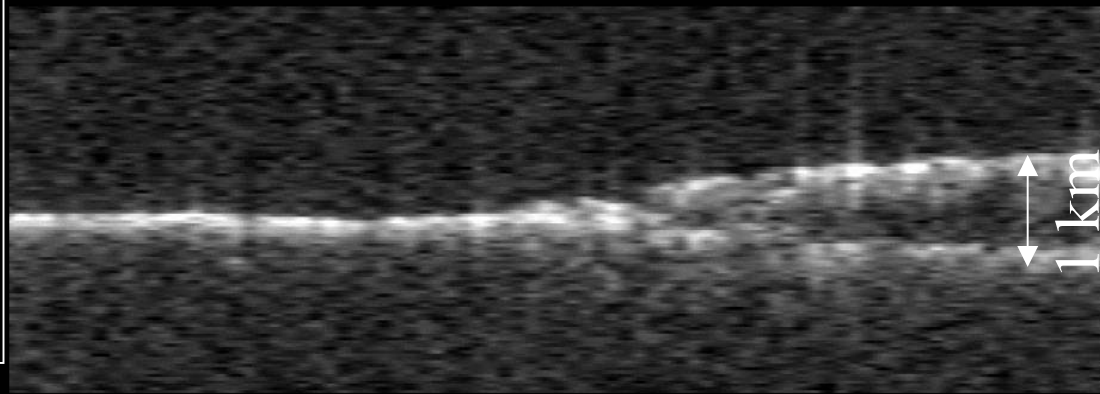
## Sonde européenne Mars Express

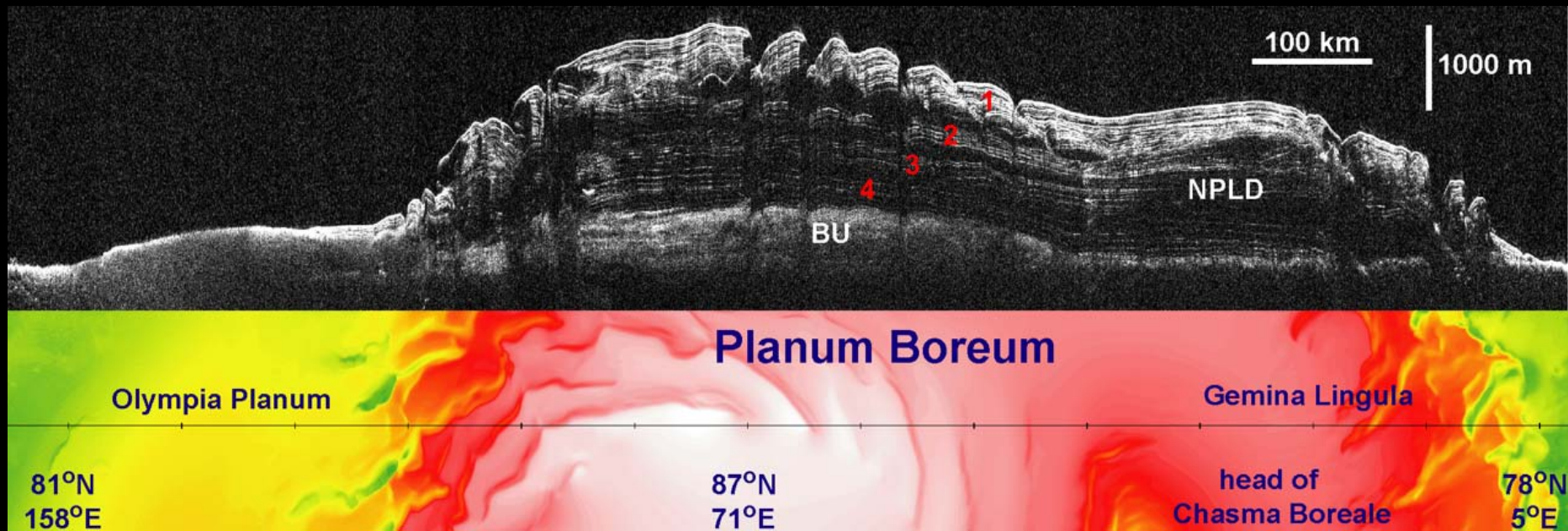
MARSIS antenna beam



## Deux sondes possèdent un radar

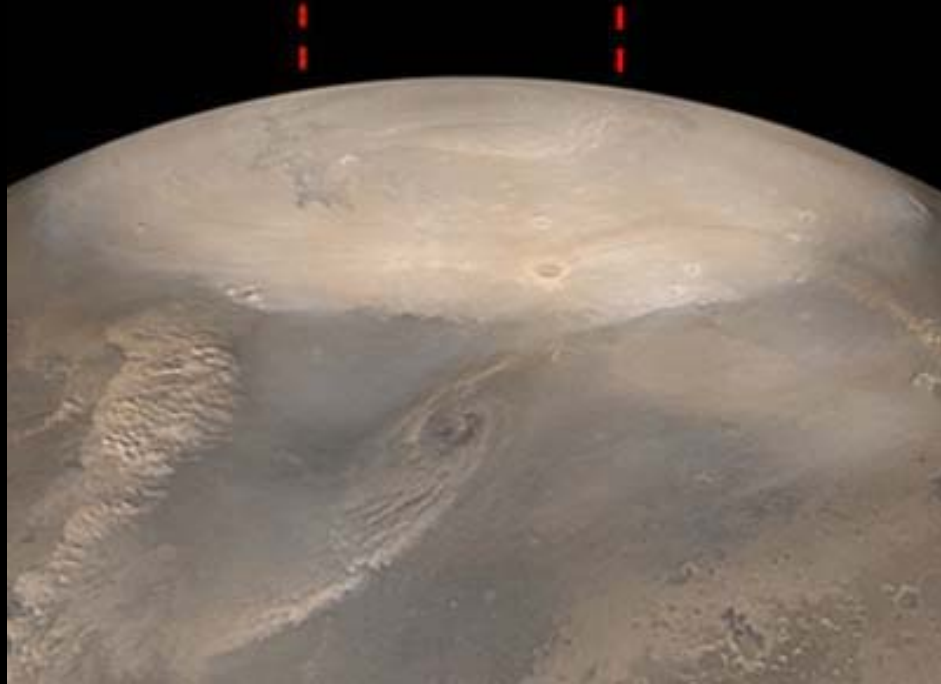
Premiers résultats du radar :  
la calotte polaire nord d'été fait plus d'1 km d'épaisseur





**Une coupe radar globale de la calotte permanente nord. On y verrait 4 « cycles », et on peut essayer de retrouver des « rythmes astronomiques » dans ces périodicités.**





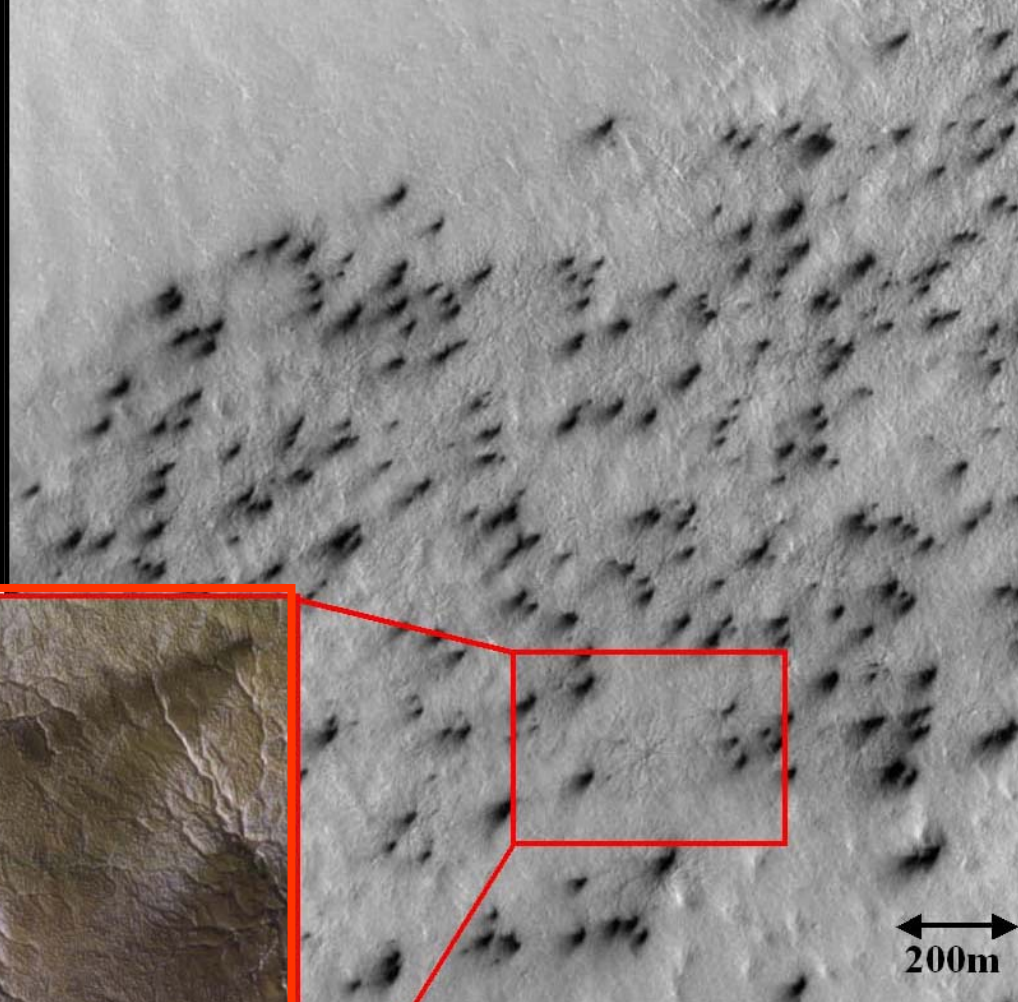
La calotte nord l'hiver  
D = 3000 km



La calotte nord l'été  
D = 1000 km

**Ces calottes changent de taille avec les saisons. Elles sont petites l'été (= calotte résiduelle = calotte permanente = calotte estivale). Elles sont grande l'hiver (= calotte transitoire = calotte hivernale). Cette calotte transitoire est faite d'une couche d'environ 1 m de glace carbonique.**

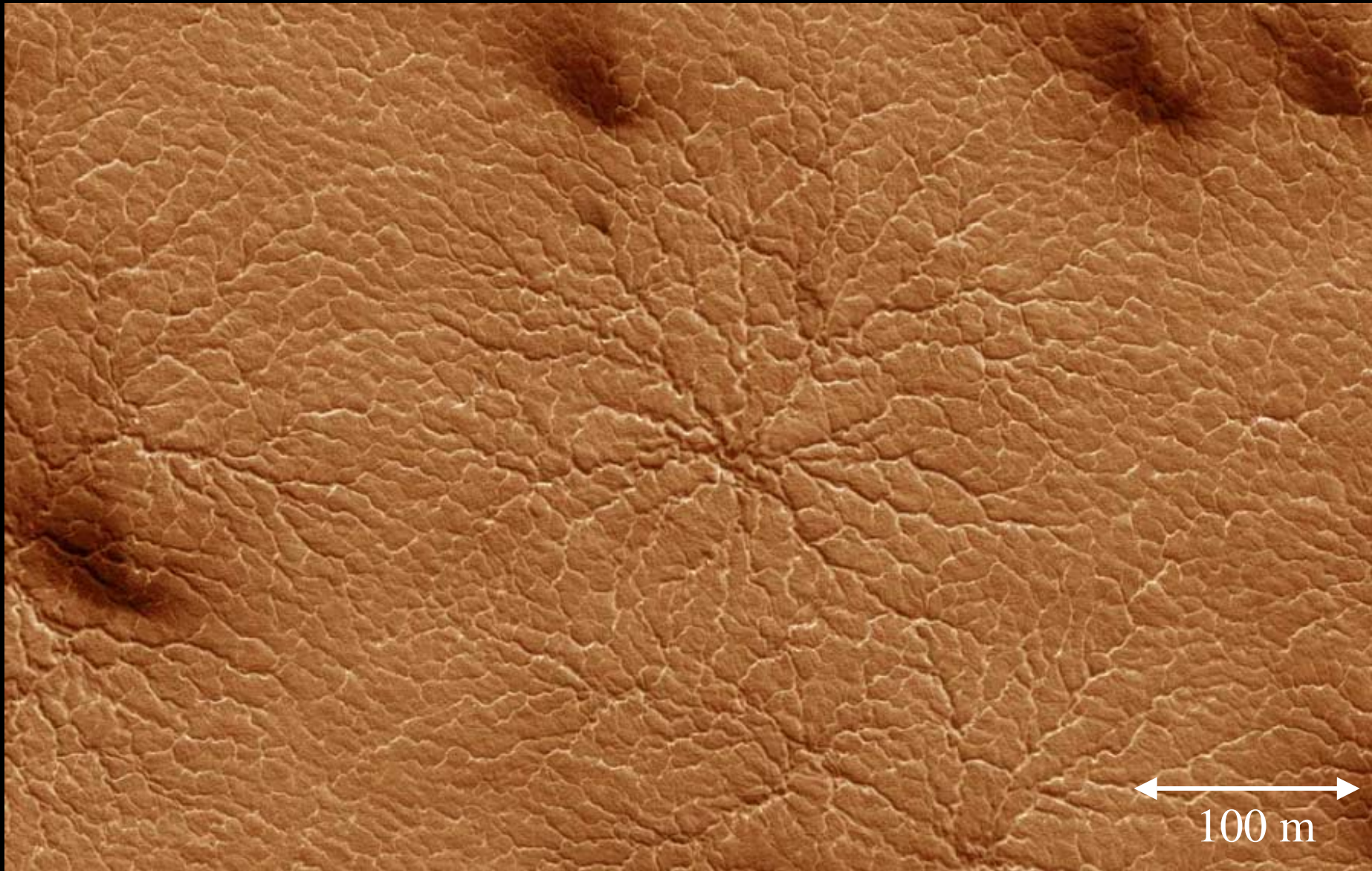
# Gros plan sur la calotte transitoire



**Elle est :**

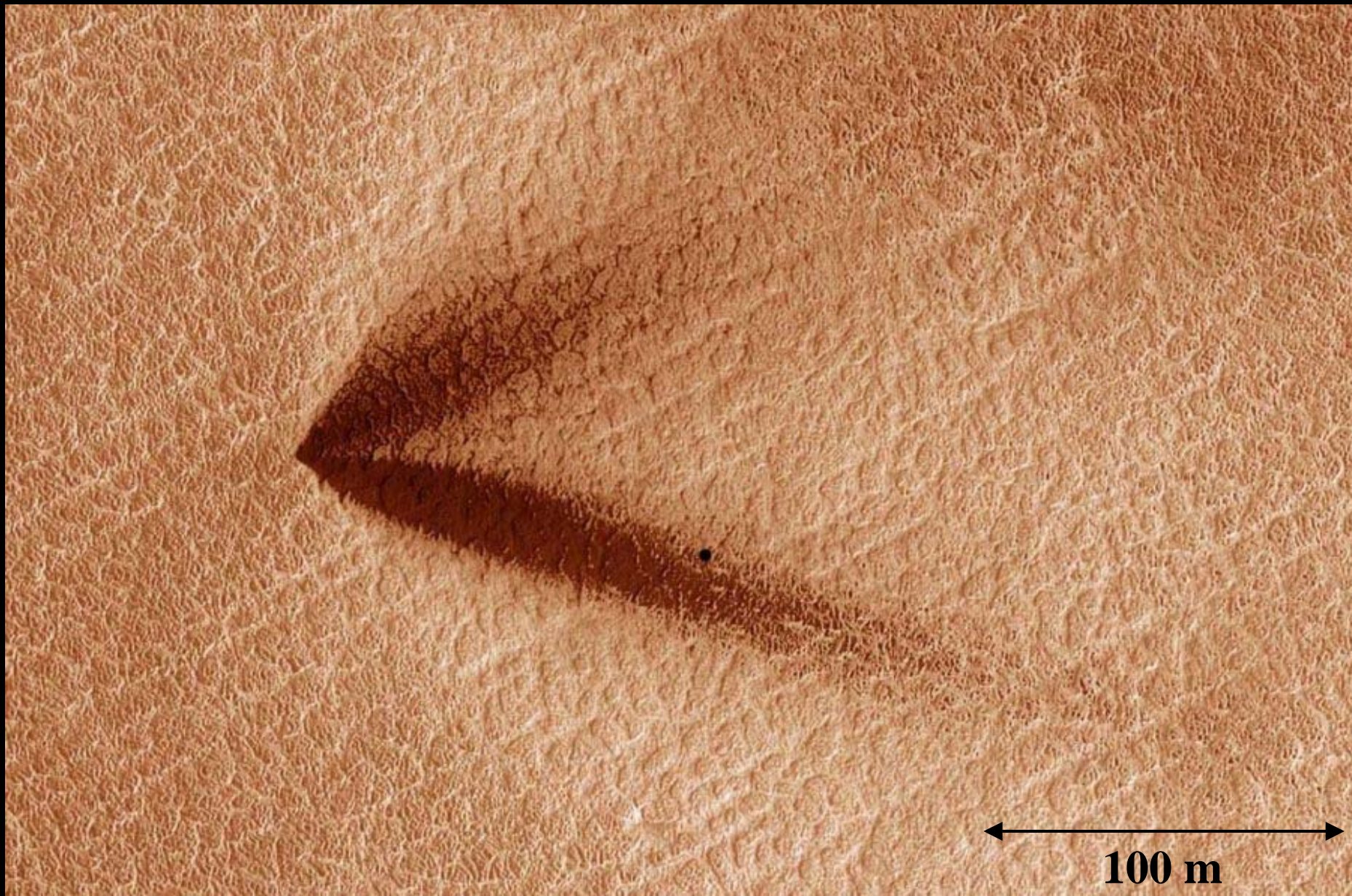
- relativement transparente
- parcourues de traînées sombres
- affectée de « fractures » bizarres





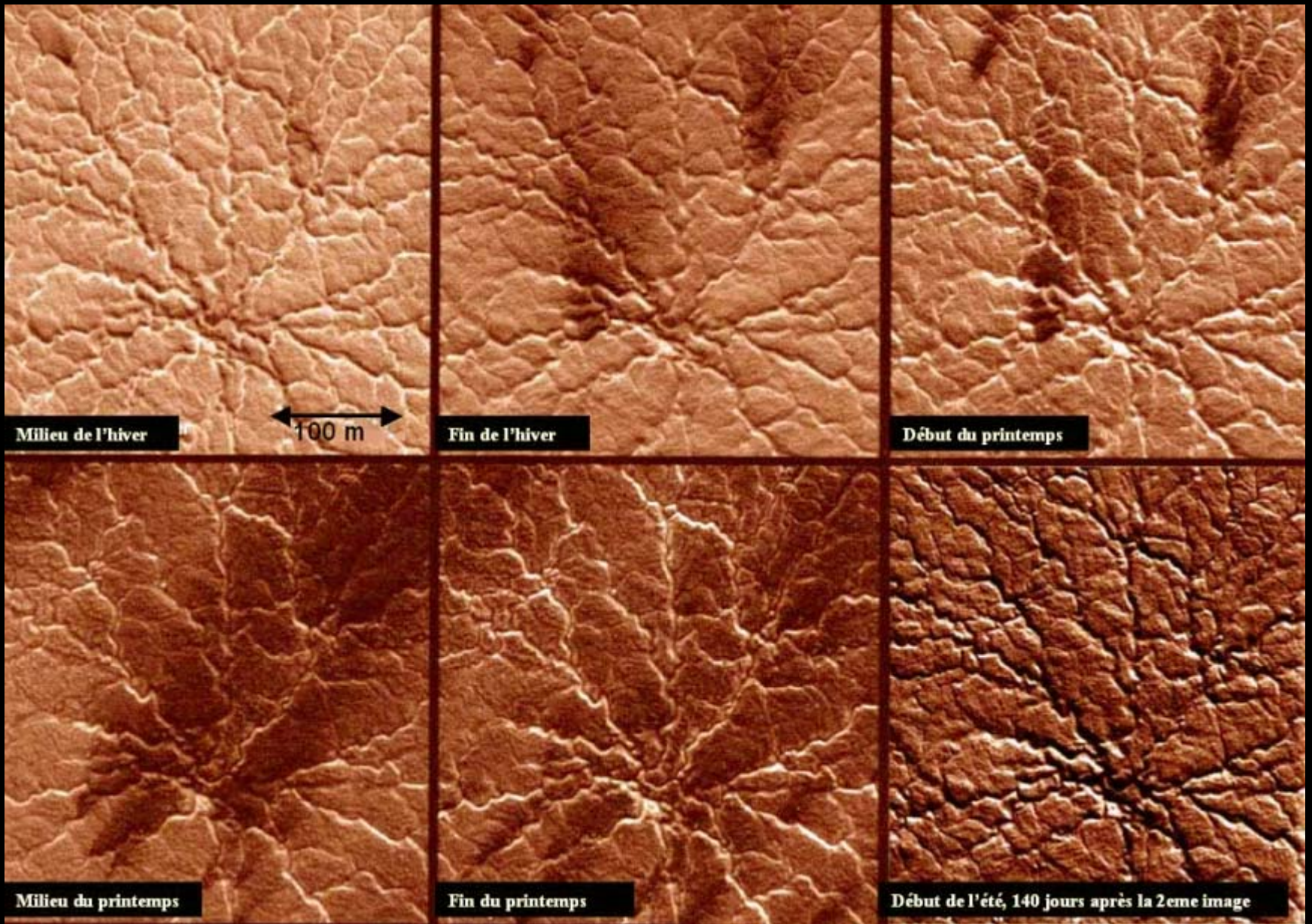
**Gros plan sur les fractures, « en araignée »**





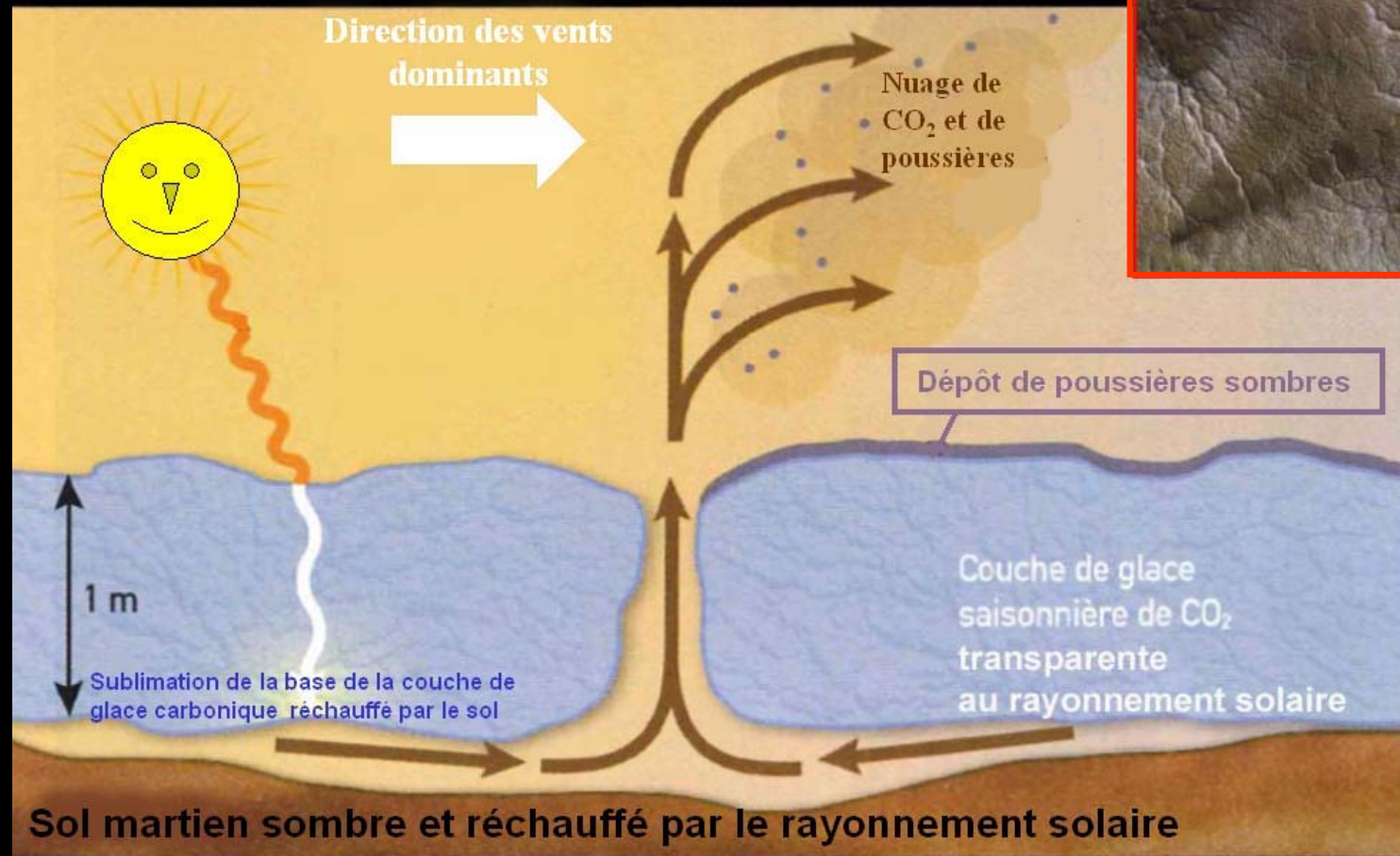
**Gros plan sur les traînées sombres, en « éventail »**





**Le paysage évolue au cours de l'année :  
les éventails n'existent qu'au printemps**





## Le modèle explicatif







**Voilà à quoi doit  
ressembler une  
promenade sur la  
calotte transitoire  
pendant une  
« chaude » après-  
midi de printemps.**





## La calotte polaire nord en été

Pôle Nord  
 $T = -50^{\circ}\text{C}$

- 1 à 3 km  Calotte polaire résiduelle de glace d'eau = terrains polaires lités, alternances de couches de glace d'eau « propre » et « poussiéreuse »
-  Socle rocheux

## La calotte polaire nord en hiver

Pôle Nord  
 $T = -120^{\circ}\text{C}$

- 1 m  Calotte saisonnière de glace carbonique (avec un peu de glace d'eau à sa base et/ou mélangée dans la masse)
- <1 mm  Givre hivernal de glace d'eau
- 1 à 3 km  Calotte polaire résiduelle de glace d'eau = terrains polaires lités, alternances de couches de glace d'eau « propre » et « poussiéreuse »
-  Socle rocheux

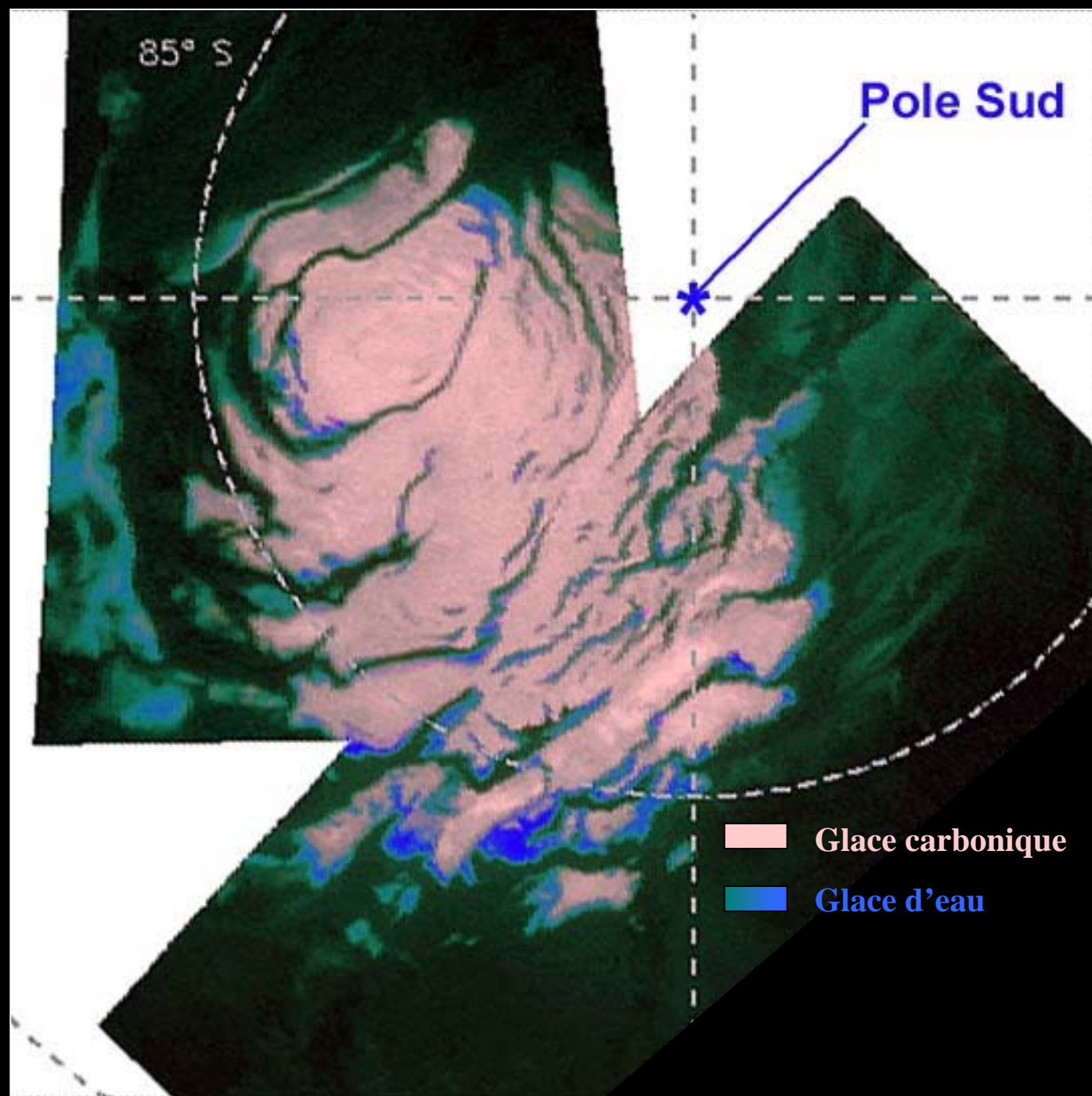
**Le modèle de la (des) calotte(s) polaire(s) nord dans la situation actuelle.**



**Etudions maintenant la,  
ou plutôt les calottes sud.  
La calotte transitoire est  
faite, comme au nord, de  
glace carbonique.**



**Mais pas  
de raies spectrales de la  
glace d'eau dans la calotte  
permanente, seulement  
celles du CO<sub>2</sub>**



**Sous la glace carbonique résiduelle d'été, les images multi-spectrales hautes résolutions prises par Mars Express révèlent la glace d'eau, mais bien « masquée »**



A close-up photograph of a layered ice deposit on Mars. The top layer is a thin, clear, yellowish-tan layer of carbonic ice, approximately ten meters thick. Below it is a much thicker, darker, and more textured layer of permanent ice (TPL) made of water ice, which is very dusty. The layers are clearly visible and separated.

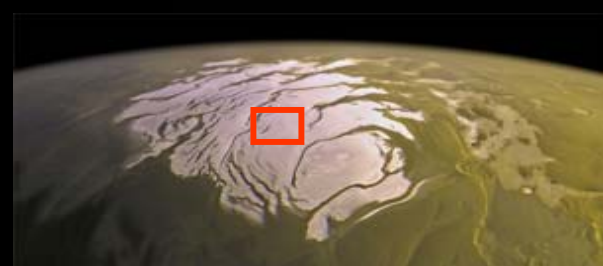
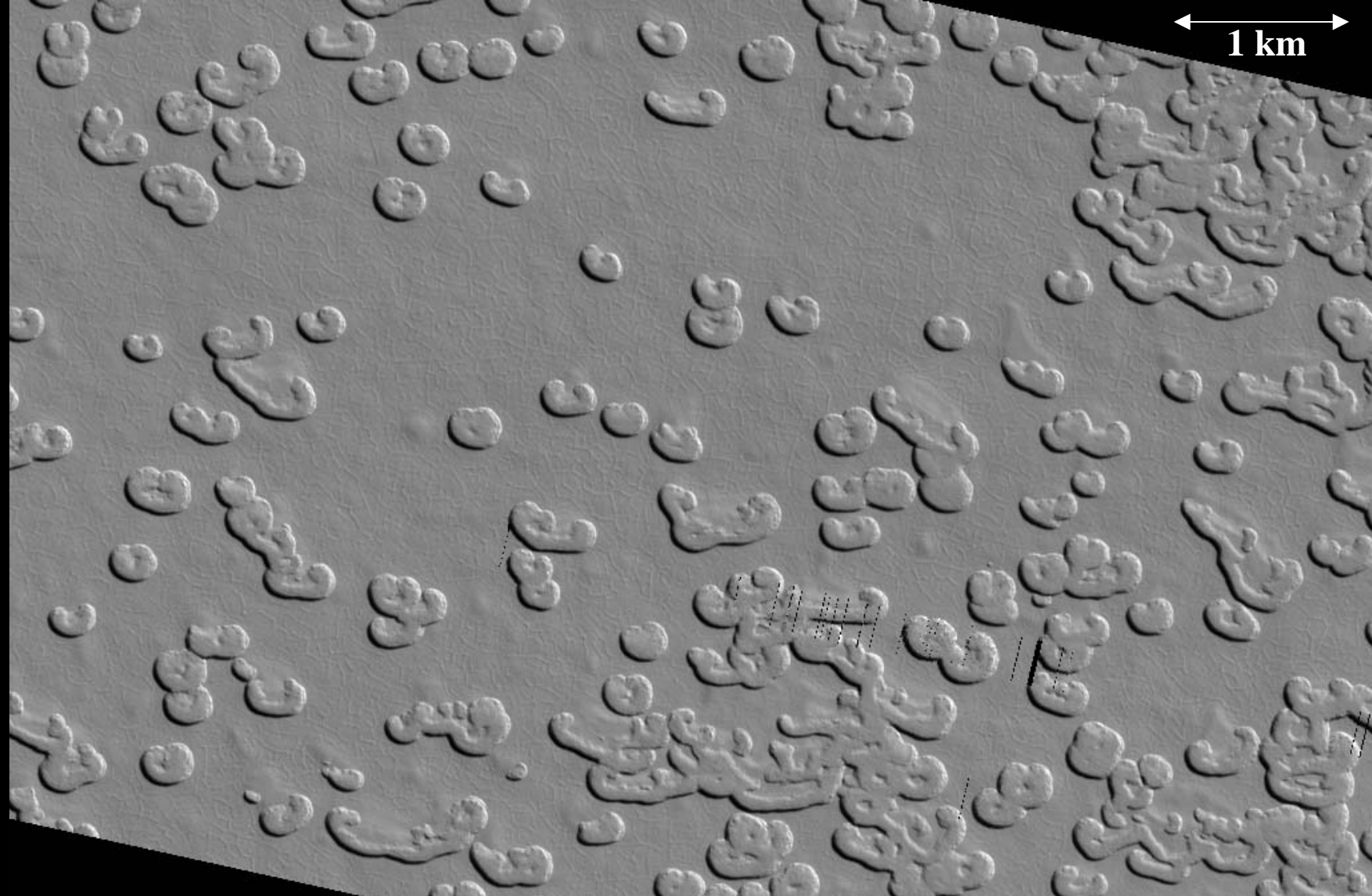
Dix mètres de glace carbonique très claire

Calotte polaire permanente sud, faite de TPL, glace d'eau sombre car très poussiéreuse

Regardons un peu cette couche de glace carbonique très claire d'une dizaine de mètres d'épaisseur, qui recouvre des terrains polaires lités tellement poussiéreux qu'ils ne sont pas blanc et où le spectre de la glace d'eau est peu visible (sauf localement).

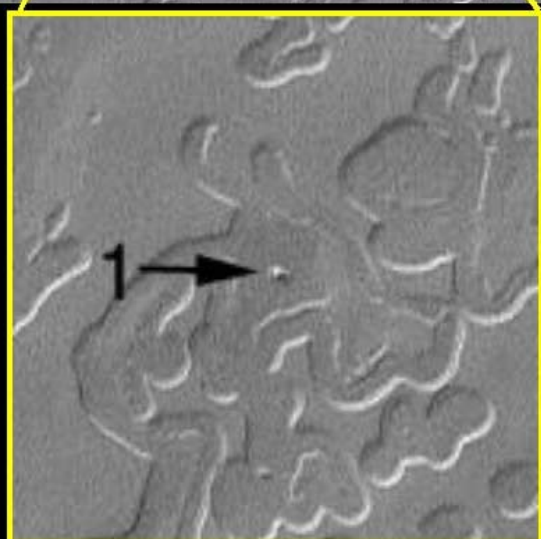
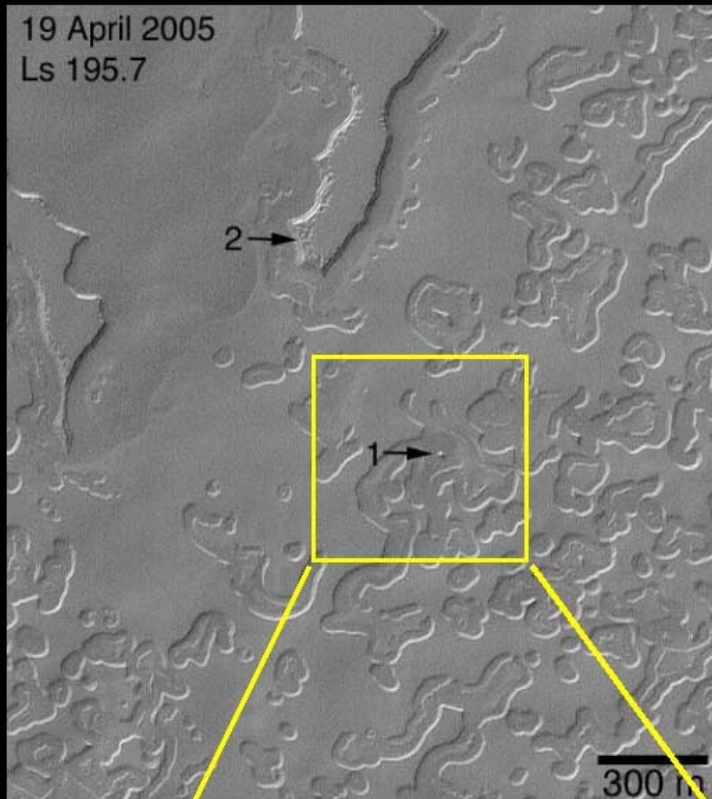
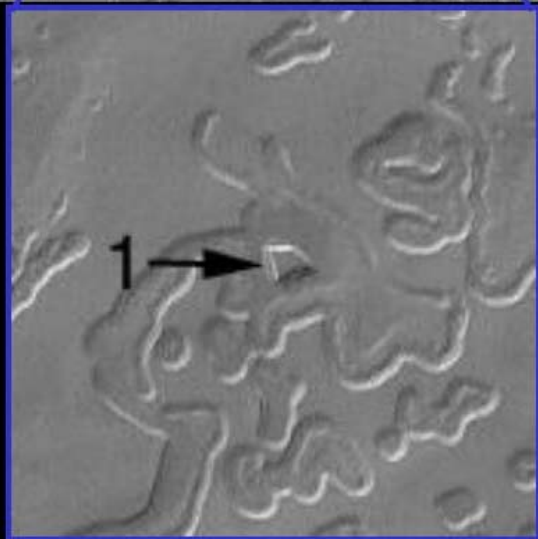
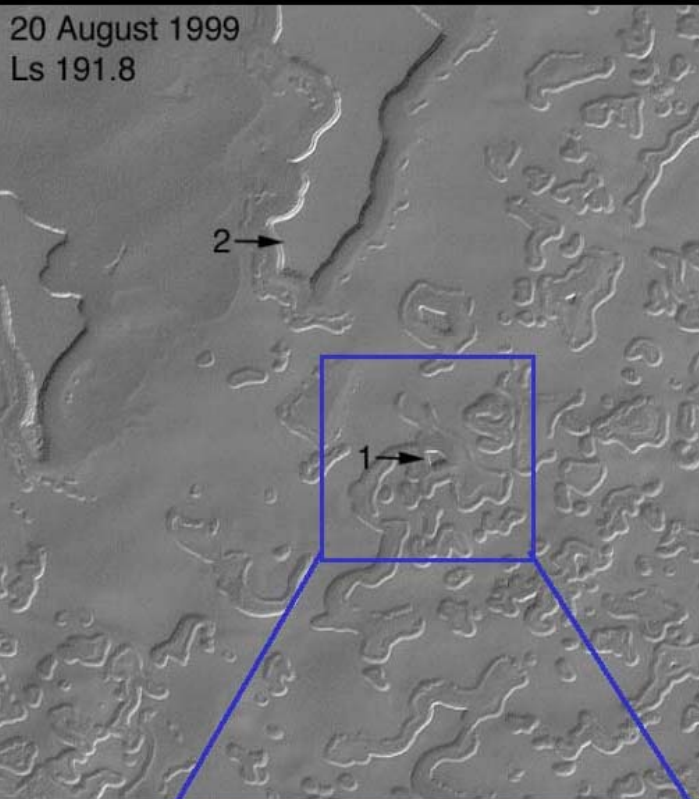


1 km



**Gros plan sur cette couche permanente de glace carbonique d'été : une structure en « gruyère »**



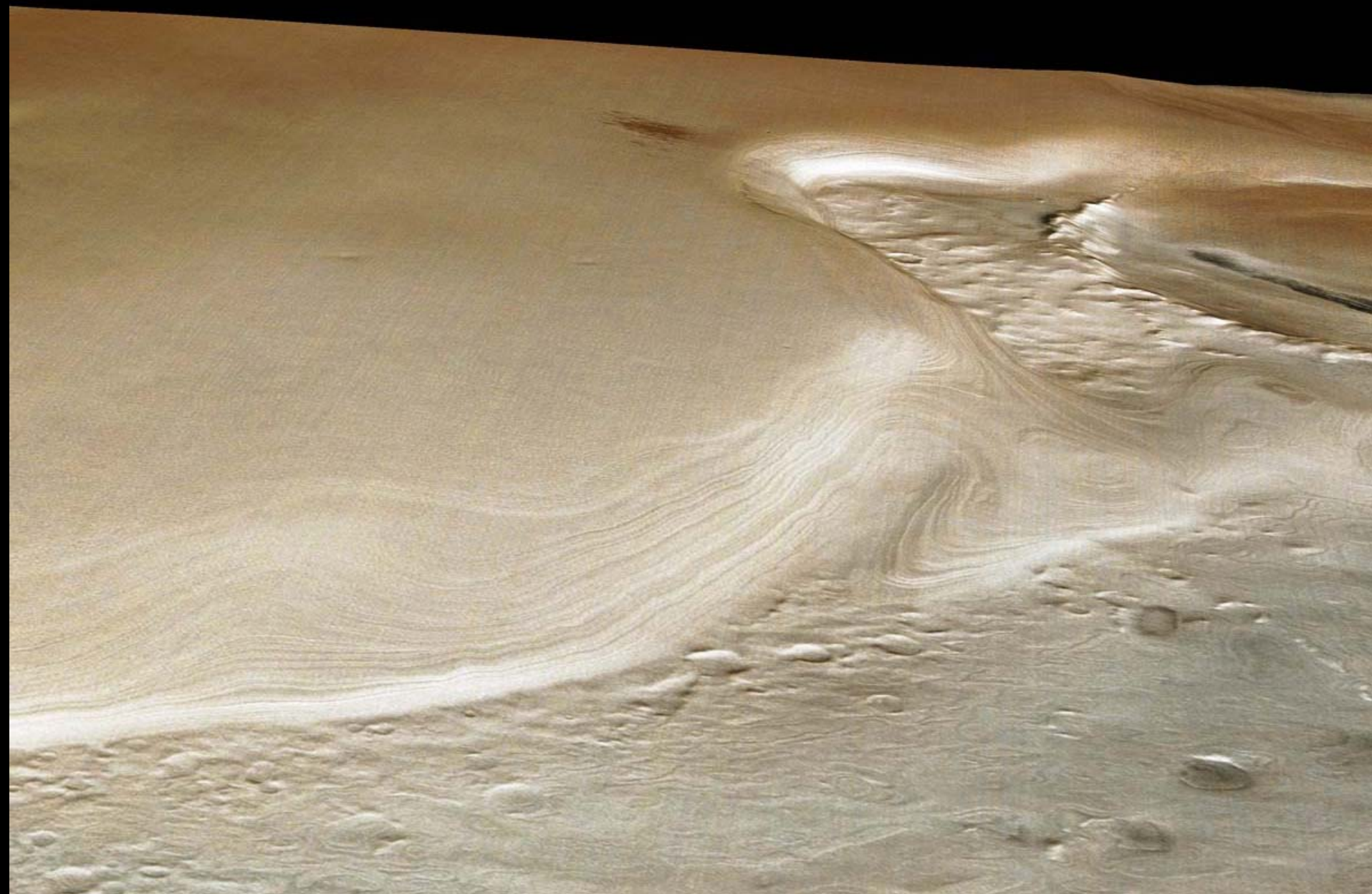


**L'hiver, tout ça est recouvert d'1 m de glace carbonique. L'été, la structure en gryère se révèle. Depuis 1999, été après été, les trous s'agrandissent ! La dizaine de mètres de glace carbonique permanente semble se sublimer été après été !**

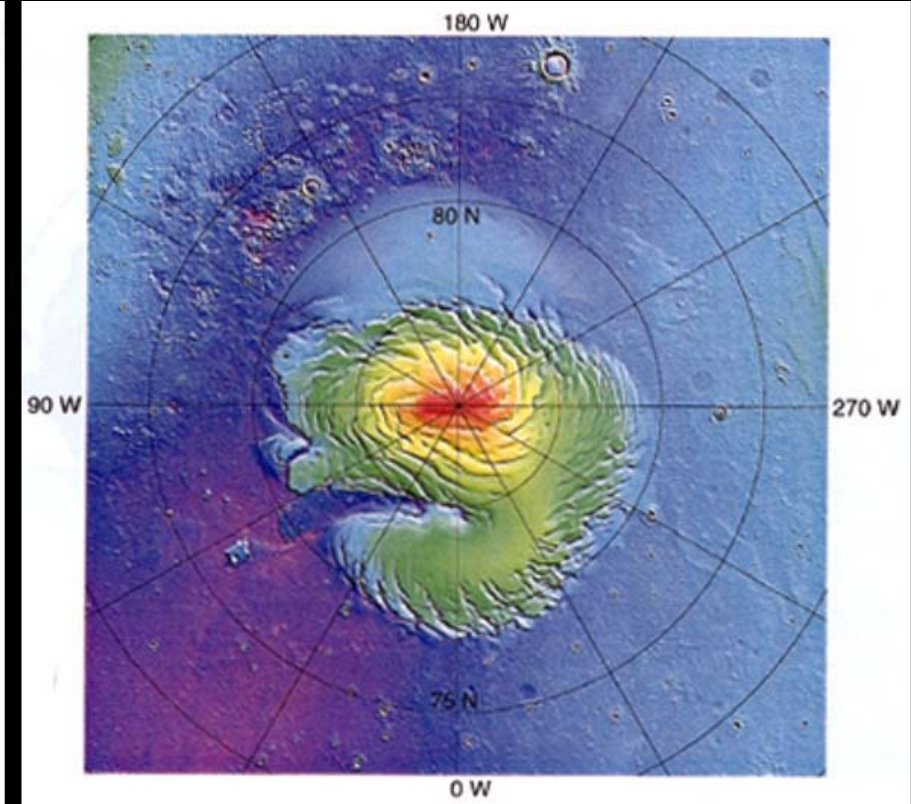
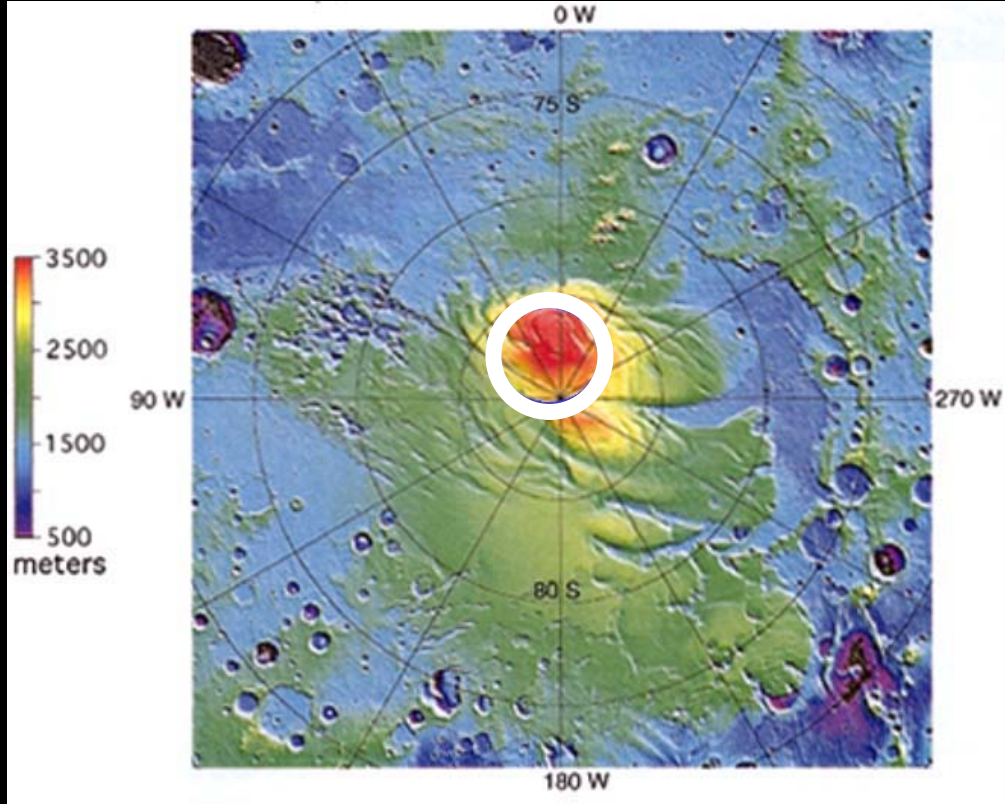


**Deux vues (hivernales) de cette calotte permanente sud masquée, faite de couches de glace d'eau poussiéreuse !**





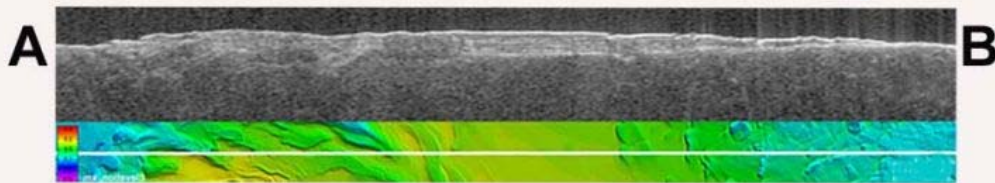
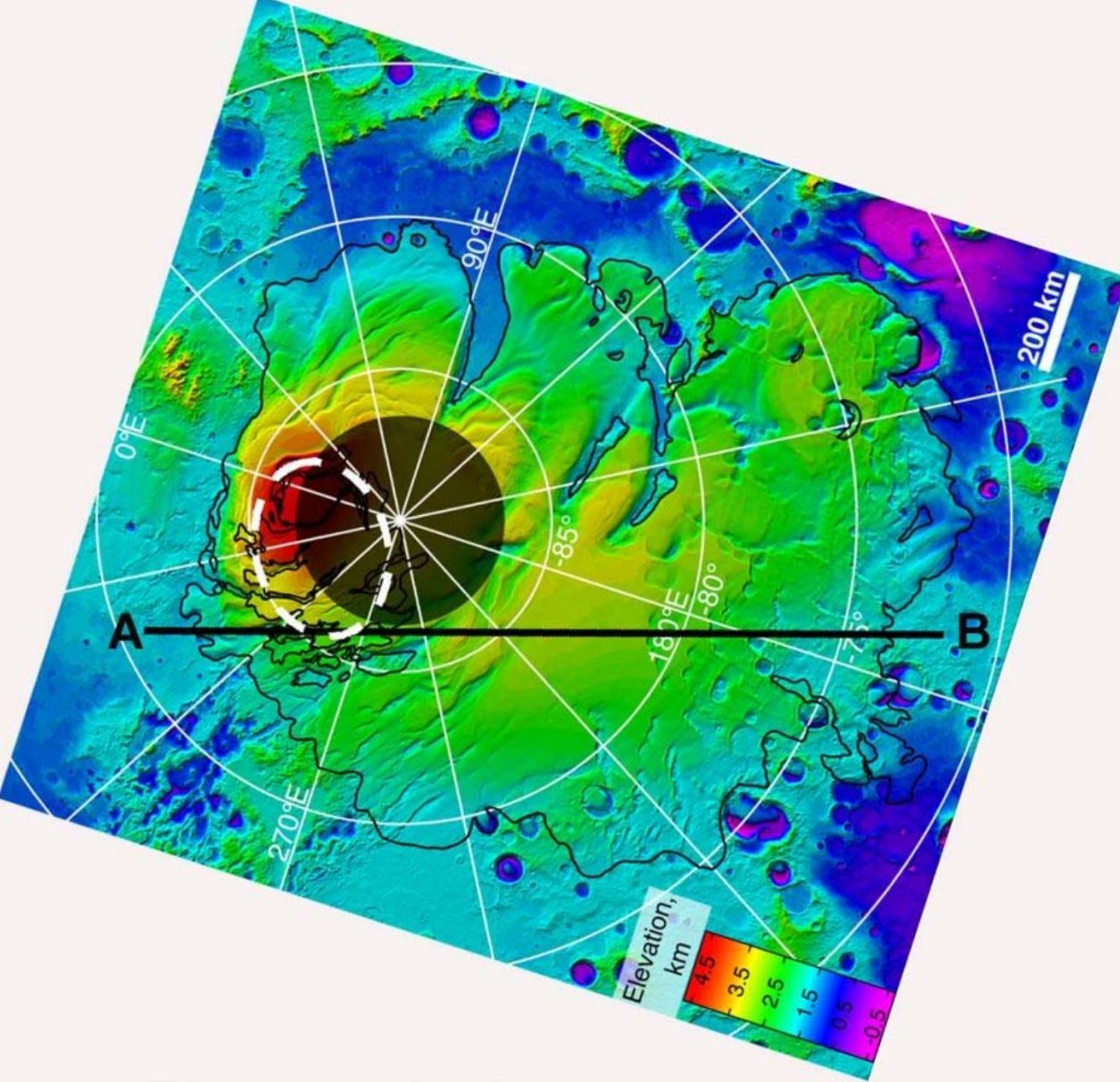
**Partout des « Terrains Polaires Lités »**

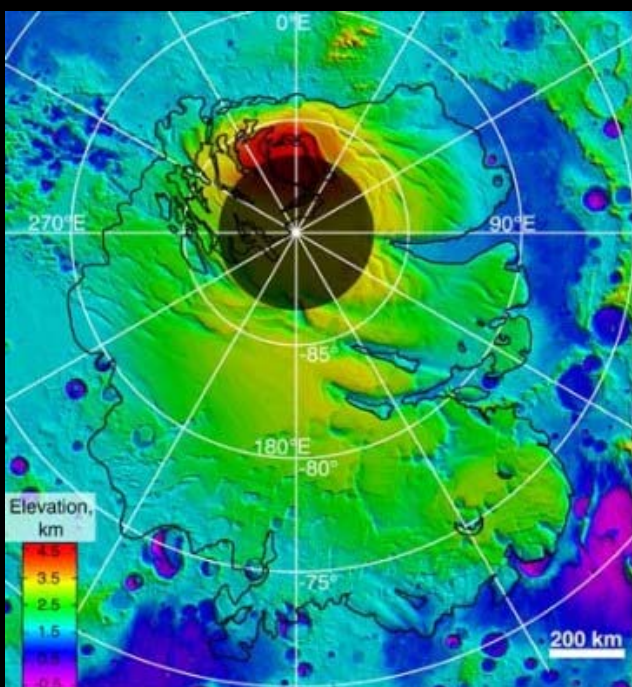


**Ces terrains polaires lités sud forment un relief de taille voisine de celle la calotte permanente nord.**

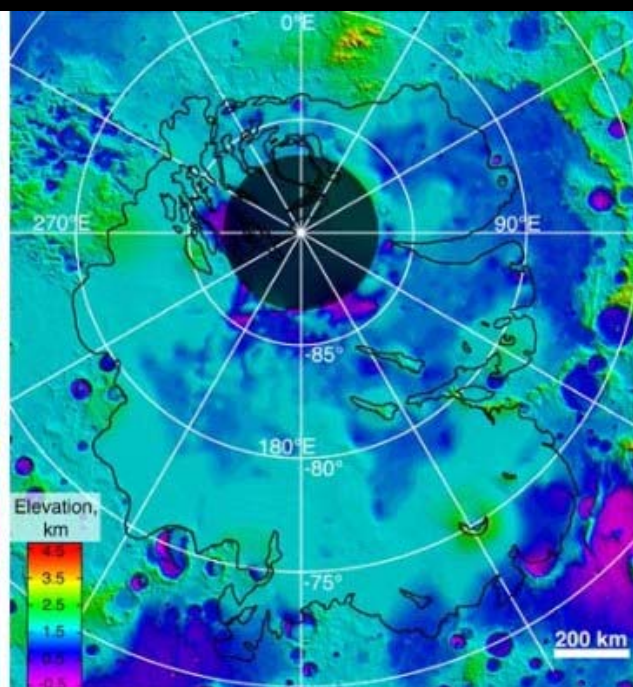


**Le radar de Mars Express leur donne une épaisseur voisine de celle de la calotte nord**

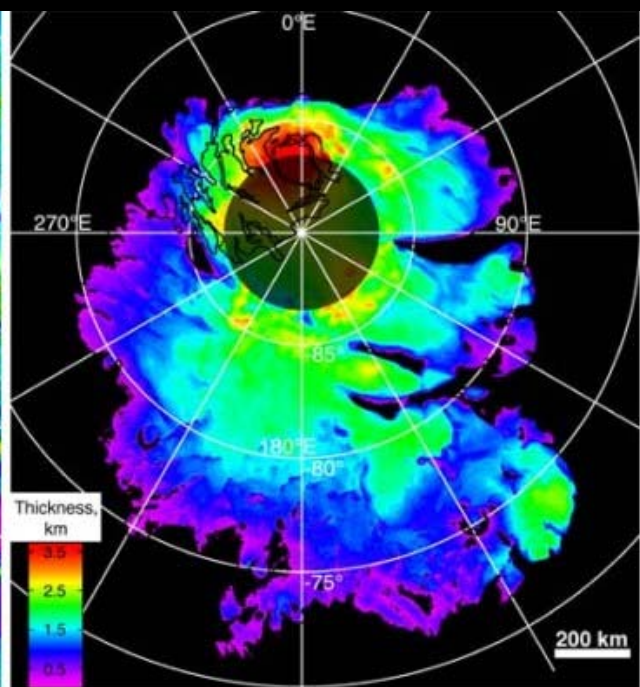




Altitude de la surface



Altitude du sommet du socle






Épaisseur des TPL

**Connaissant la topographie de la surface et celle du sommet du socle, on calcule l'épaisseur et le volume de ces Terrains Polaires Lités, calotte permanente masquée faite de glace d'eau (poussièreuse). Ce volume est comparable à celui de la calotte permanente nord. Le volume « prouvé » de la glace d'eau superficielle de Mars vient donc de doubler.**



## La calotte polaire sud en été






Pôle Sud  
 $T = -100^{\circ}\text{C}$

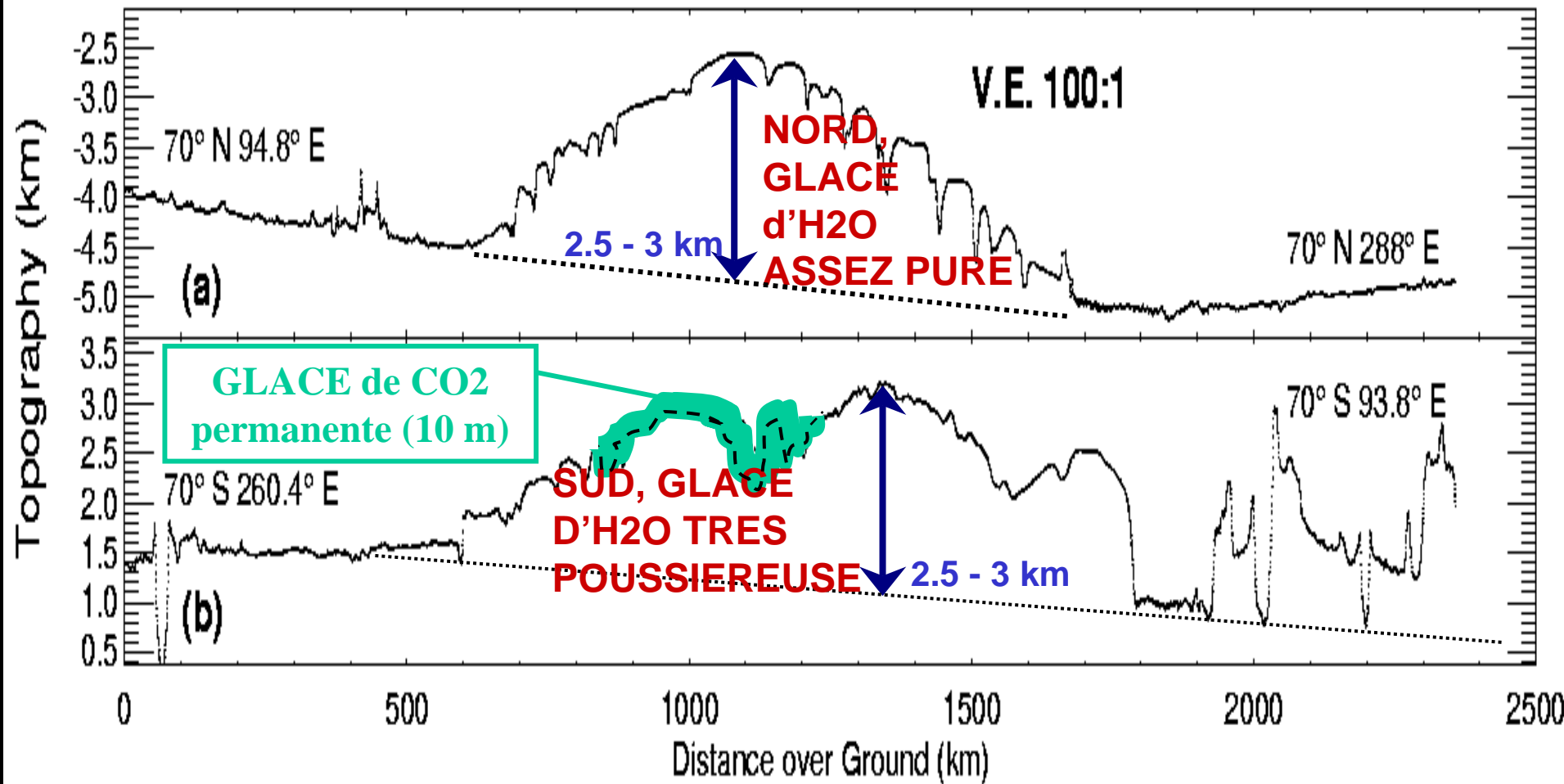
- 1 à 3 km  Calotte polaire résiduelle de glace d'eau = terrains polaires lités, alternances de couches de glace d'eau « propre » et « poussiéreuse », avec plus de poussières que dans la calotte résiduelle nord
- 10 m  Calotte polaire résiduelle de glace carbonique
-  Socle rocheux

**Le modèle « ante Phoenix » de la (des) calotte(s) polaire(s) sud.**

## La calotte polaire sud en hiver

Pôle Sud  
 $T = -130^{\circ}\text{C}$

- 1 m  Calotte saisonnière de glace carbonique (avec un peu de glace d'eau à sa base et/ou mélangée dans la masse)
- <1 mm  Givre hivernal de glace d'eau
- 10 m  Calotte polaire résiduelle de glace carbonique
- 1 à 3 km  Calotte polaire résiduelle de glace d'eau = terrains polaires lités alternances de couches de glace d'eau « propre » et « poussiéreuse » avec plus de poussières que dans la calotte résiduelle nord
-  Socle rocheux

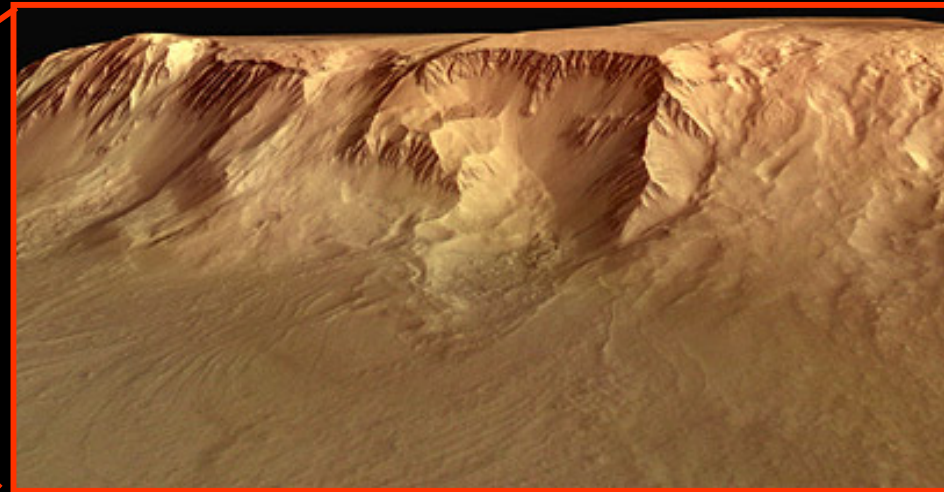
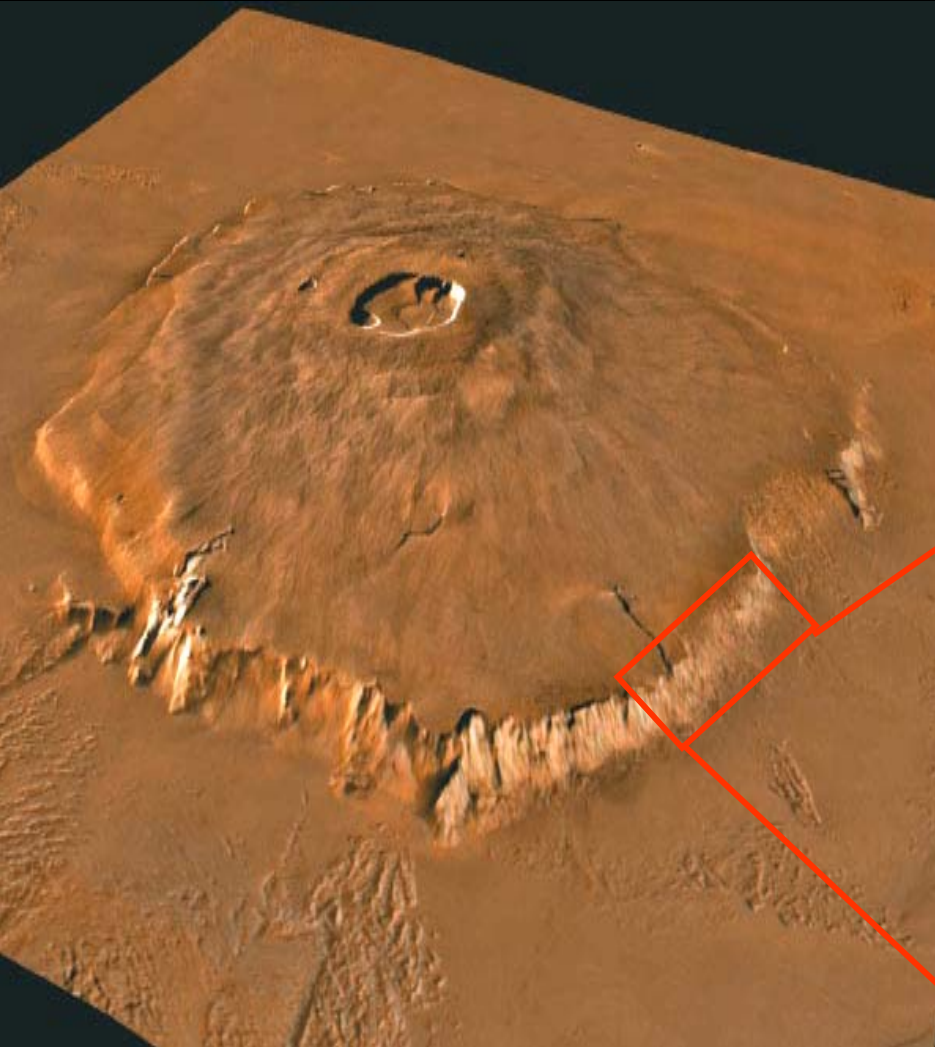


**Les dimensions et épaisseurs des calottes permanentes nord et sud sont similaires. Le volume « prouvé » de la glace d'eau superficielle de Mars est du même ordre de grandeur que celui de la calotte groenlandais. Si tout fondait, cela recouvrirait Mars d'une quarantaine de mètres d'eau liquide.**



**Y a-t-il (y a-t-il eu) des glaciers ailleurs  
qu'aux pôles ?**

**Voici les flancs  
d'Olympus Mons, le plus  
grand volcan martien  
(d = 600 km, h = 26 km)**





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. Ces anciens glaciers sont sur des montagnes équatoriales**



# Encore plus fort !

[IMAGES](#)[MULTIMEDIA](#)[NEWS](#)[MISSIONS](#)[PUBLIC SERVICES](#)[KIDS](#)[EDUCATION](#)[ABOUT JPL](#)[TOP STORIES](#)[NEWS RELEASES](#)[FEATURE STORIES](#)[SPOTLIGHTS](#)[PROFILES](#)[MISSION FACT SHEETS](#)[MISSION PRESS KITS](#)[MEDIA VISITS](#)[MEDIA CONTACTS](#)[NEWSLETTERS](#)[ANNUAL REPORTS](#)

## Receive JPL news

[+ Free Public E-mail](#)[+ RSS feed](#)

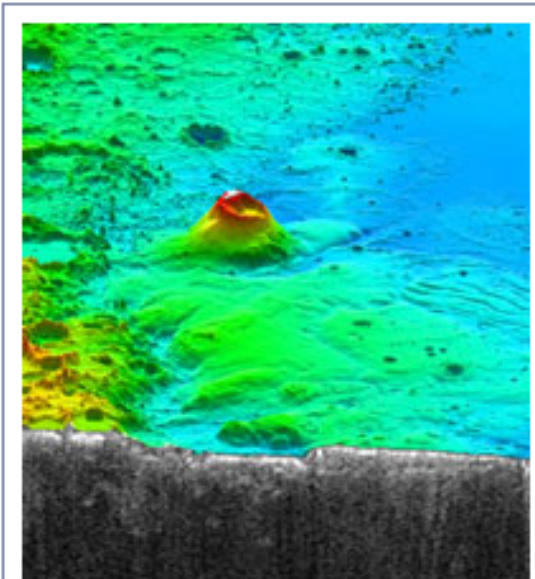
## News Releases

### Mars Express Probes Red Planet's Unusual Deposits

November 01, 2007

The radar system on the European Space Agency's Mars Express orbiter has uncovered new details about some of the most mysterious deposits on Mars: the Medusae Fossae Formation. It has provided the first direct measurement of the depth and electrical properties of these materials, providing new clues about their origin.

The Medusae Fossae Formation consists of enigmatic deposits. Found near the Martian equator along a divide between highlands and lowlands, they may represent some of the youngest deposits on the surface of the planet. This is implied because there is a marked lack of impact craters dotting these deposits.



[+ Larger image](#)

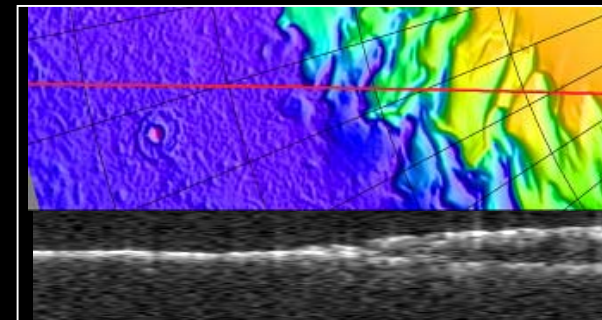
This image combining a topographic map viewed obliquely (color portion of image) with a radargram of the subsurface



# Medusae Fossae Formation

En carte  
topographique

En coupe radar



Pour comparaison,  
coupe radar de  
l'actuelle calotte nord

# Dernière nouvelle (1er novembre 2007)

[IMAGES](#)[MULTIMEDIA](#)[NEWS](#)[MISSIONS](#)[PUBLIC SERVICES](#)[KIDS](#)[EDUCATION](#)[ABOUT JPL](#)[TOP STORIES](#)[NEWS RELEASES](#)[FEATURE STORIES](#)[SPOTLIGHTS](#)[PROFILES](#)[MISSION FACT SHEETS](#)[MISSION PRESS KITS](#)[MEDIA VISITS](#)[MEDIA CONTACTS](#)[NEWSLETTERS](#)[ANNUAL REPORTS](#)[Receive JPL news](#)[+ Free Public E-mail](#)[+ RSS feed](#)

## News Releases

### Mars Express Probes Red Planet's Unusual Deposits

November 01, 2007

The radar system on the European Space Agency's Mars Express orbiter has uncovered new details about some of the most mysterious deposits on Mars: the Medusae Fossae Formation. It has provided the first direct measurement of the depth and electrical properties of these materials, providing new clues about their origin.

The Medusae Fossae Formation consists of enigmatic deposits. Found near the Martian equator along a divide between highlands and lowlands, they may represent some of the youngest deposits on the surface of the planet. This is implied because there is a marked lack of impact craters dotting these deposits.



[+ Larger image](#)

This image combining a topographic map viewed obliquely (color portion of image) with a radargram of the subsurface

A variety of scenarios has been proposed for the origin and composition of these deposits. Firstly, they could be volcanic ash deposits from now-buried vents or nearby volcanoes. Secondly, they could be deposits of wind-blown materials eroded from Martian rocks. Thirdly, they could be ice-rich deposits, somewhat similar to the layered ice deposits at the poles of the planet, but formed when the spin axis of Mars tilts over, making the equatorial region colder.



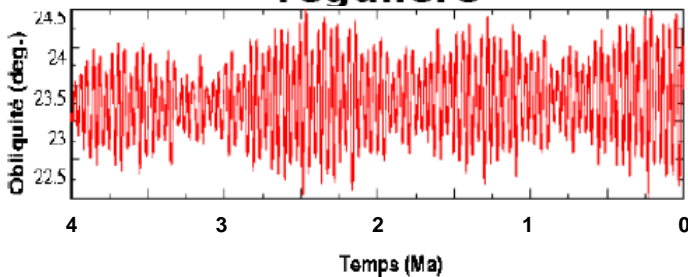
## Obliquité (II)



Terre



**Dynamique régulière**



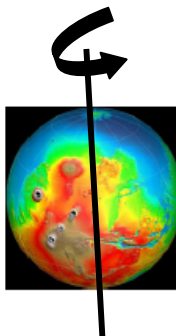
Entre 22,5 et 24,5°

Périodes dominantes:

~41 000 ans

~39 600 ans

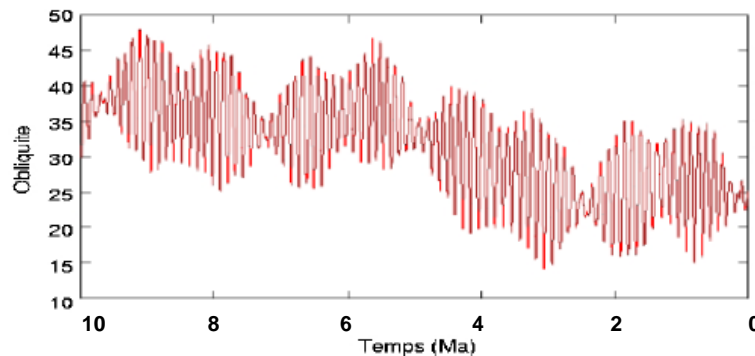
Modulation: ~ 1.2 Ma



Mars



**Dynamique chaotique**



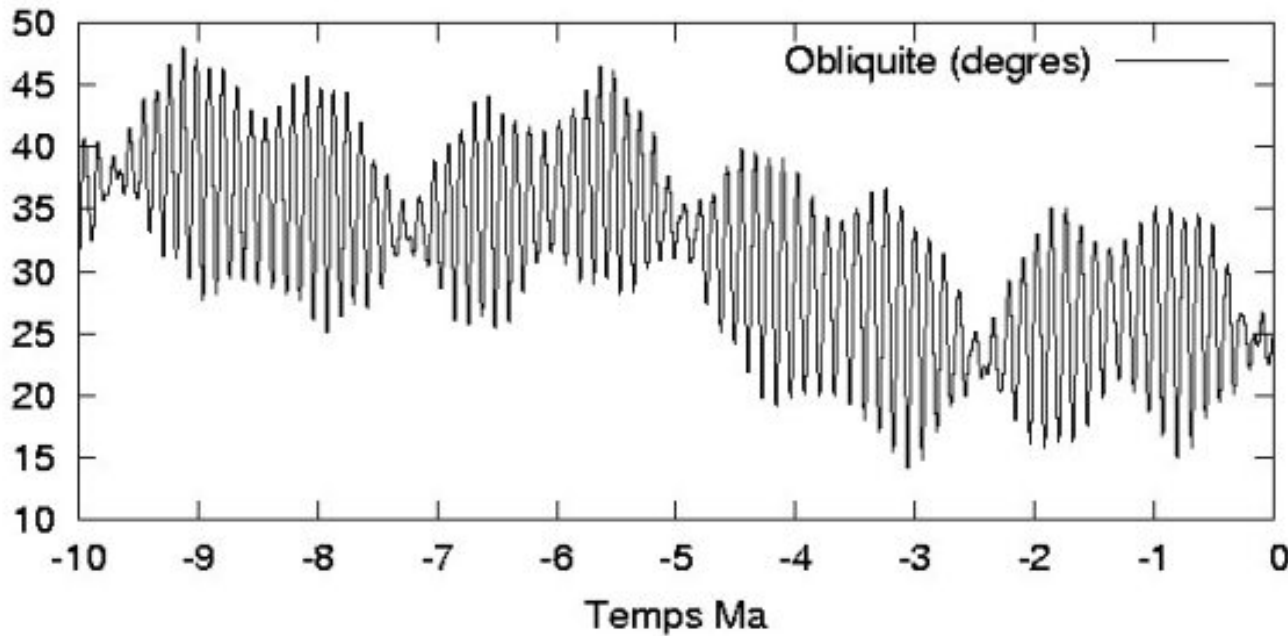
**Mouvement chaotique entre 0 et 80°  
(Laskar et Robutel, 1993)**

Période dominante  
~ 120 000 ans

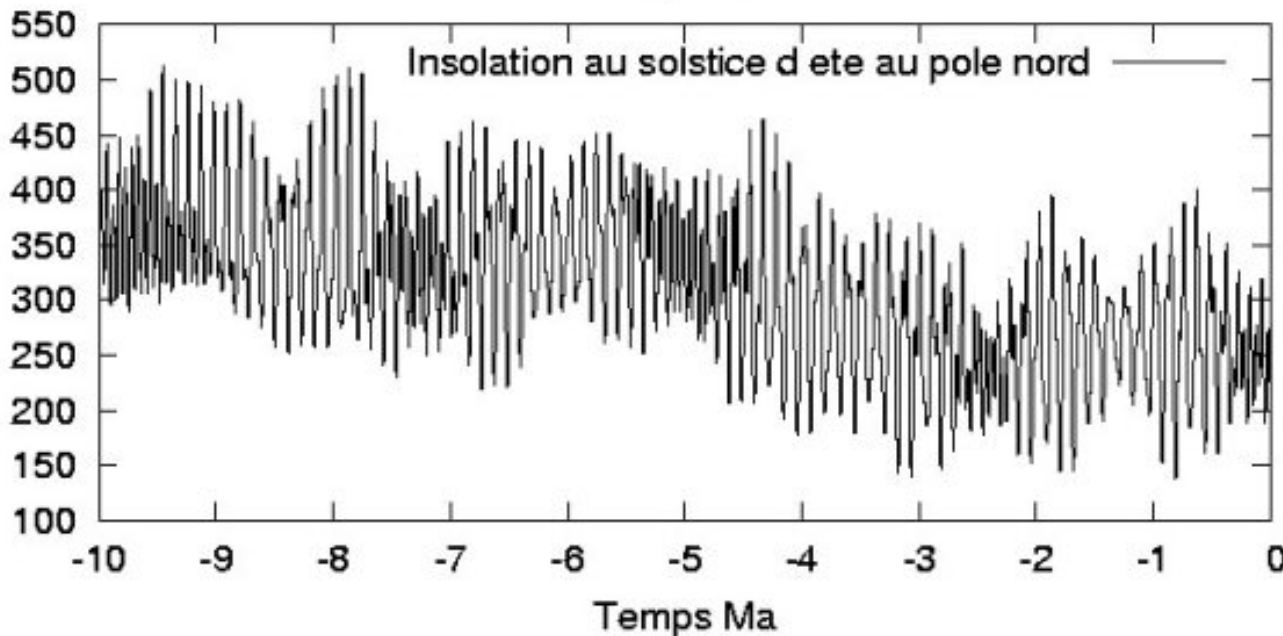
**Sur Terre, cette inclinaison est « bornée » par l'action forte de la Lune**

**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**

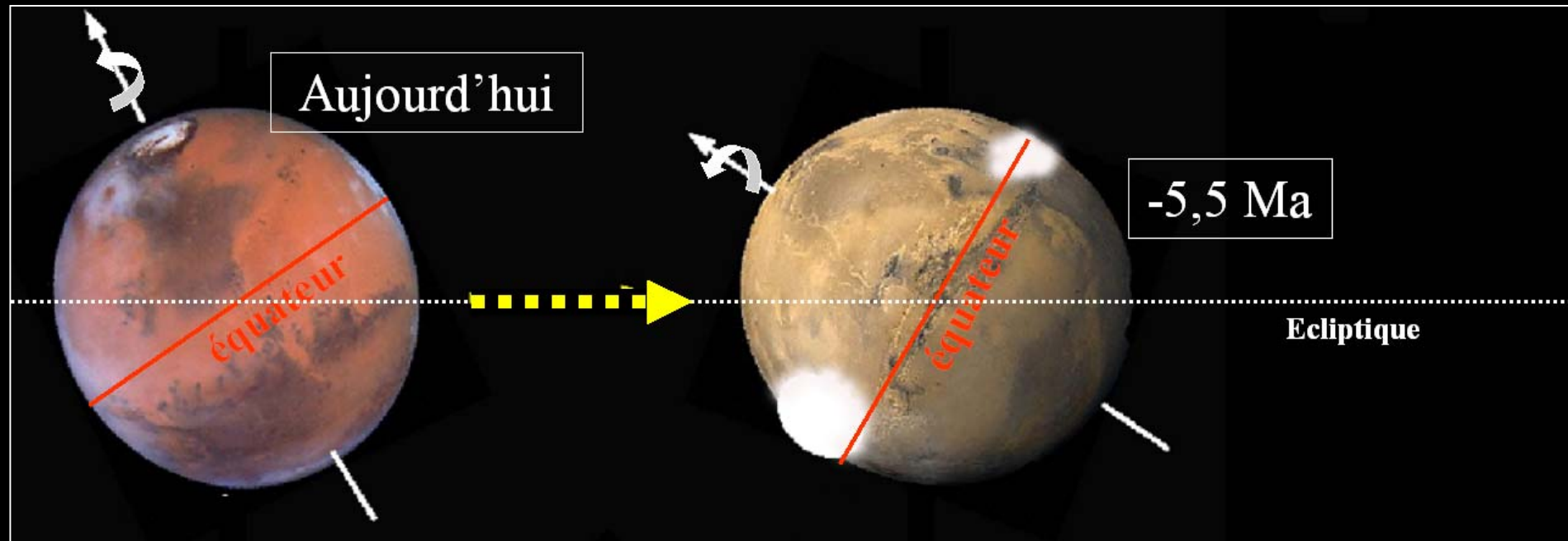


**Sur les 10 derniers millions d'années, l'inclinaison de Mars a varié entre 15° et 45°**



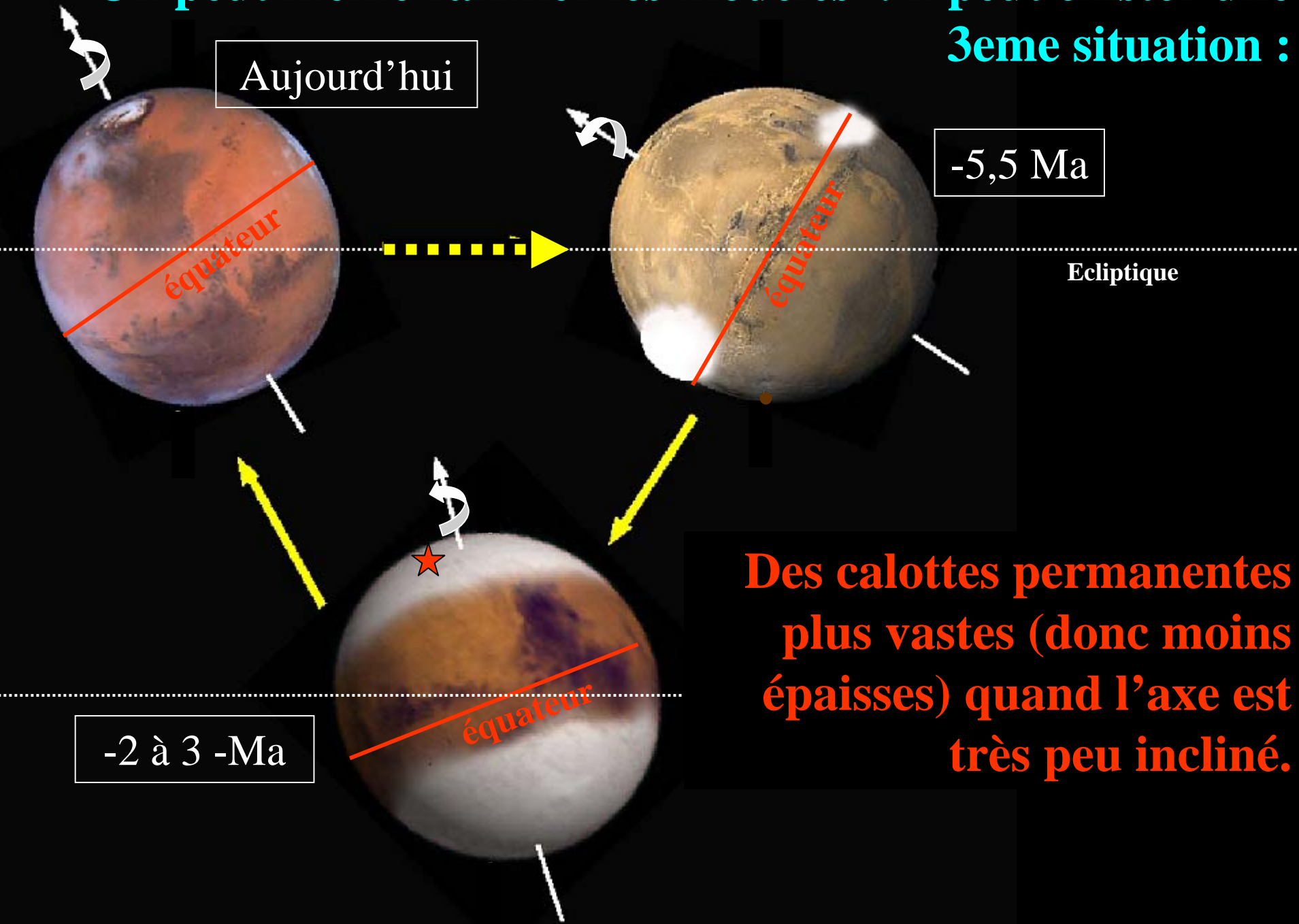
**Cela a entrainé une variation d'insolation polaire l'été de 150 à 500  $\text{W/m}^2$**





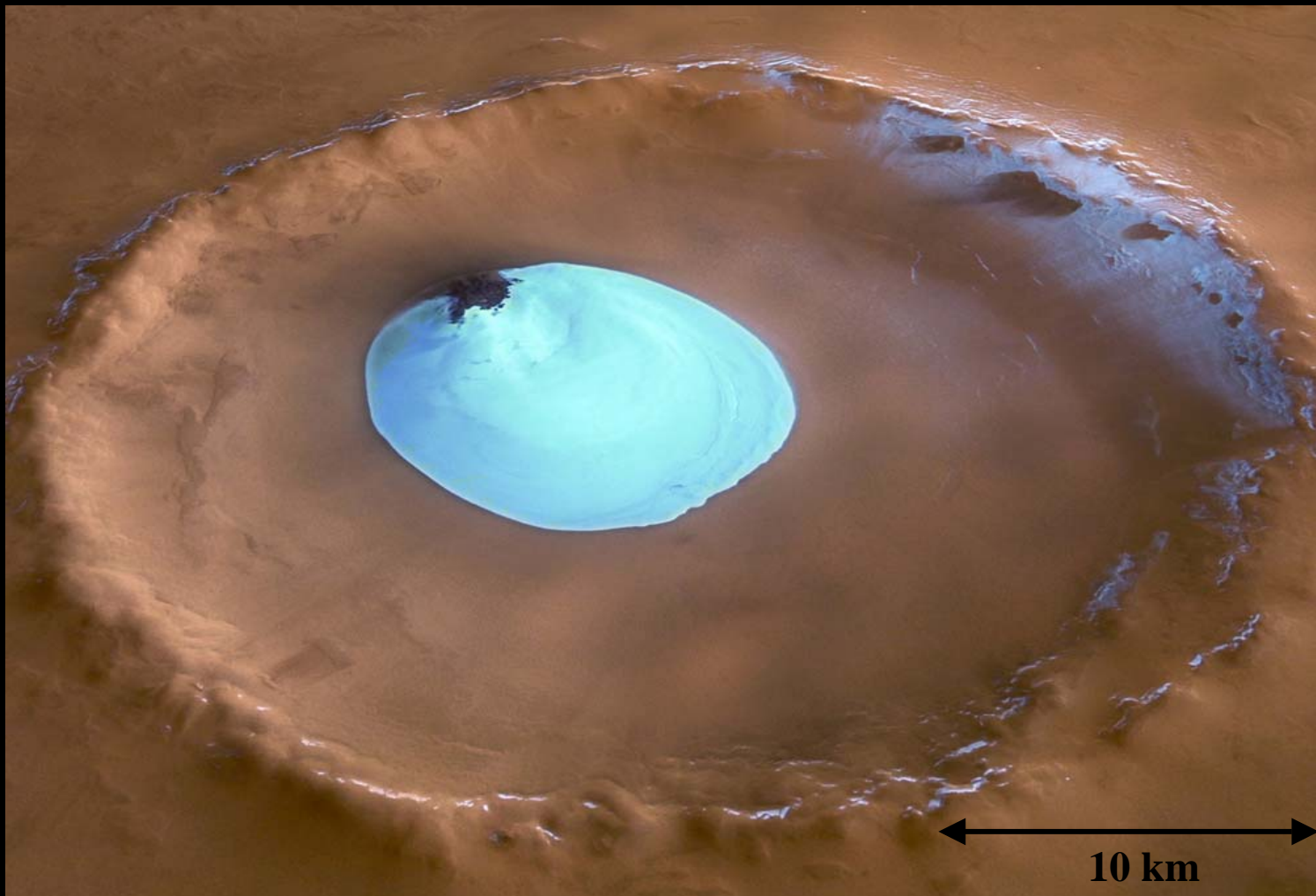
**Et quand l'axe est très incliné (comme il y a  $-5,5$  Ga), ce n'est pas aux pôles que la température moyenne est la plus froide, mais à l'équateur, en particuliers sur les montagnes équatoriales. La glace aura tendance à quitter les pôles (par sublimation) pour se condenser à l'équateur.**

# On peut même raffiner les modèles : il peut exister une 3eme situation :

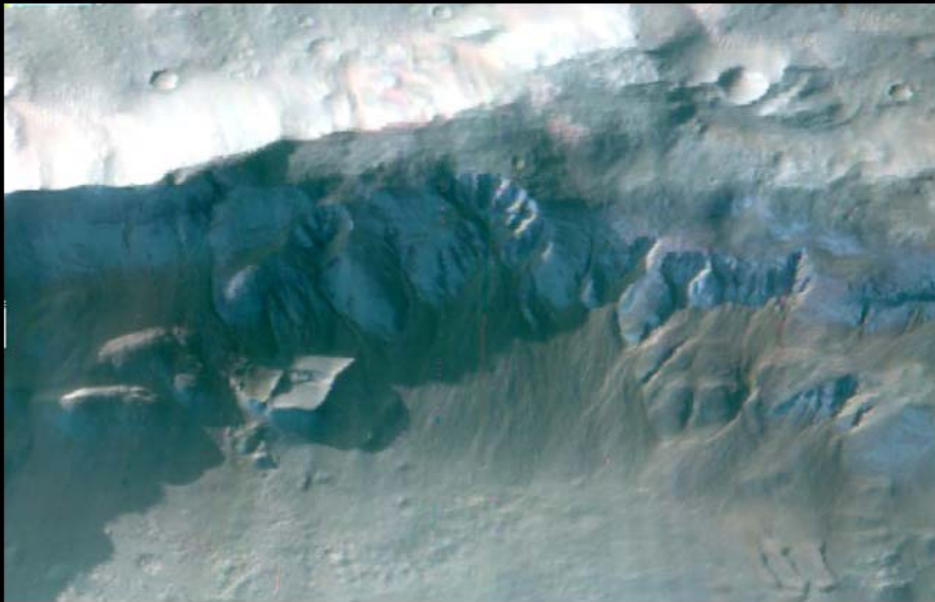


**Des calottes permanentes plus vastes (donc moins épaisses) quand l'axe est très peu incliné.**

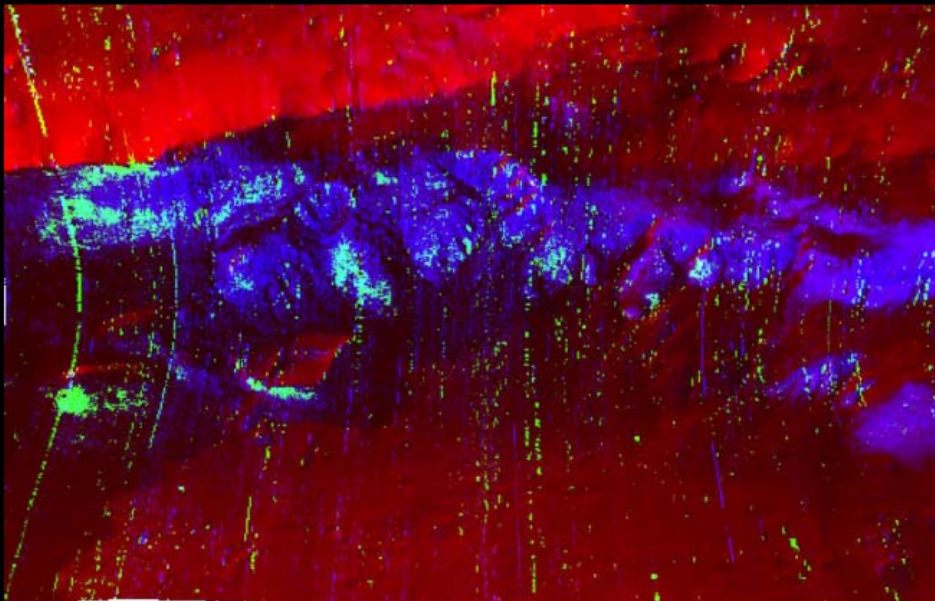




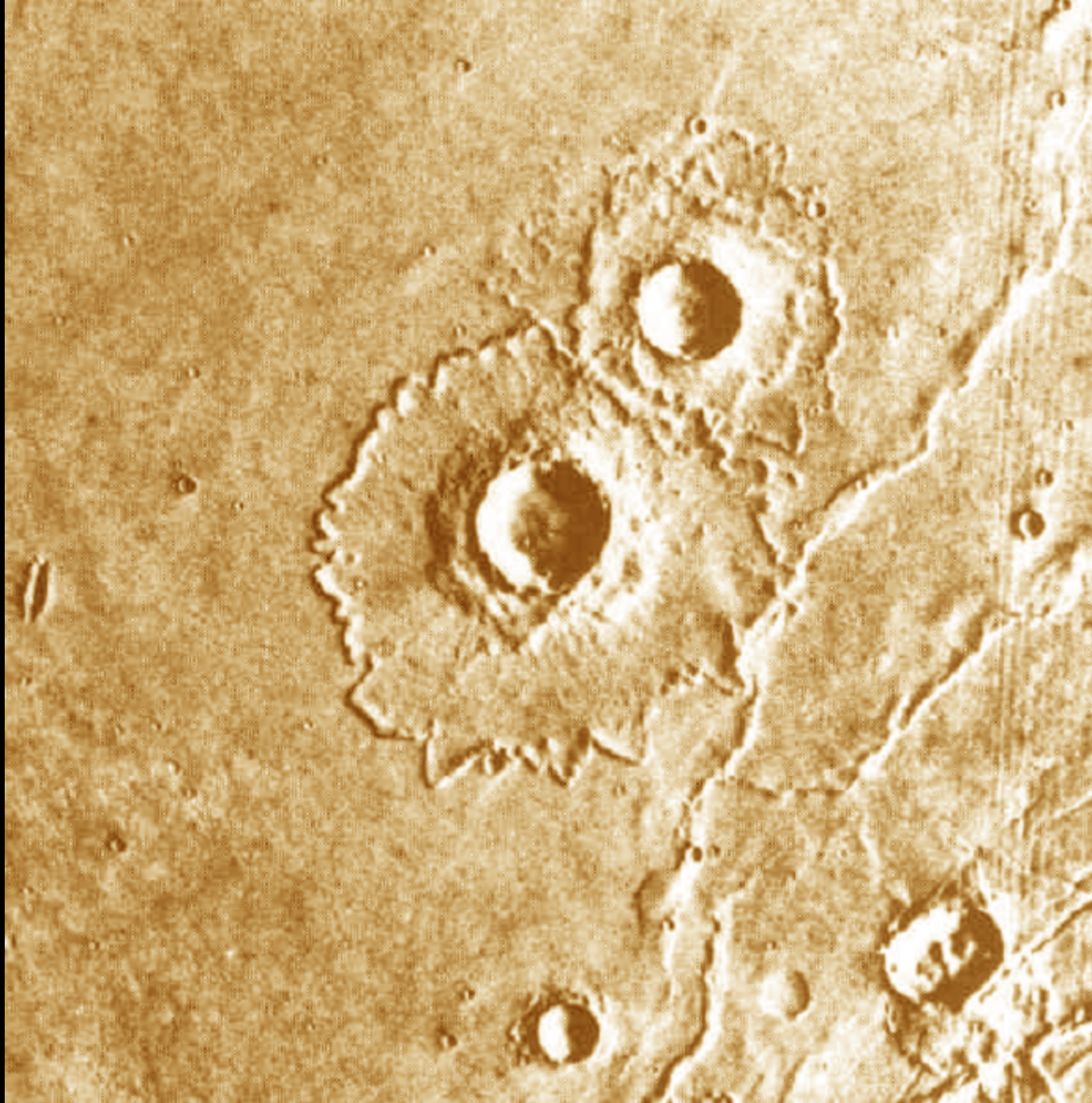
**Et voici, au fond d'un cratère ( $70^{\circ}$  N) un possible reste « permanent » de cette « calotte transitoire ». Noter que comme tous les versants « à l'ombre » au petit matin, ses flancs nord sont recouverts de givre ou de neige.**



**Ce givre est majoritairement constitué de glace d'H<sub>2</sub>O, avec parfois en plein hivers, du givre de glace de CO<sub>2</sub>. Cette composition est révélée par les spectres IR des spectro-imageurs**



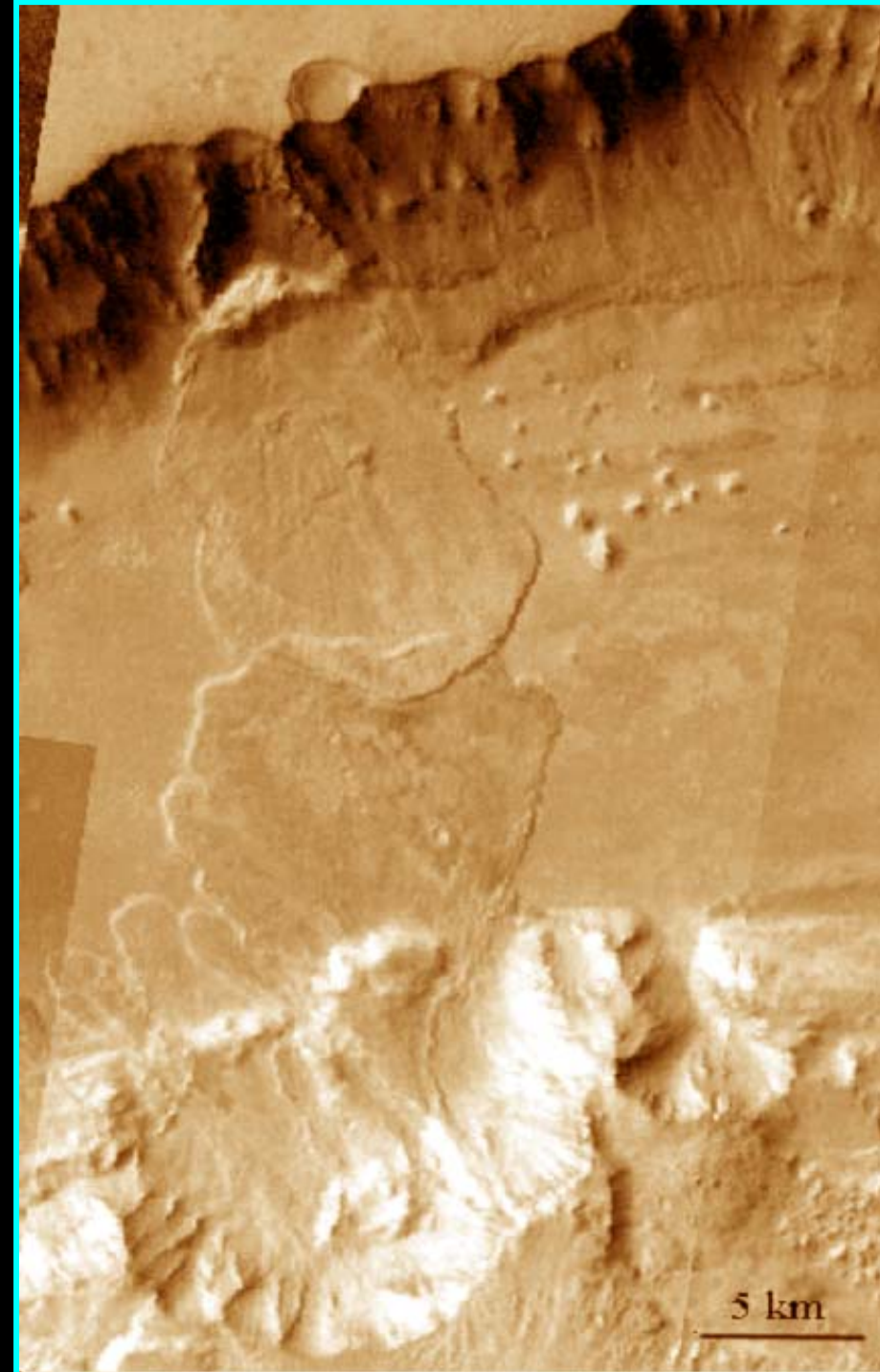




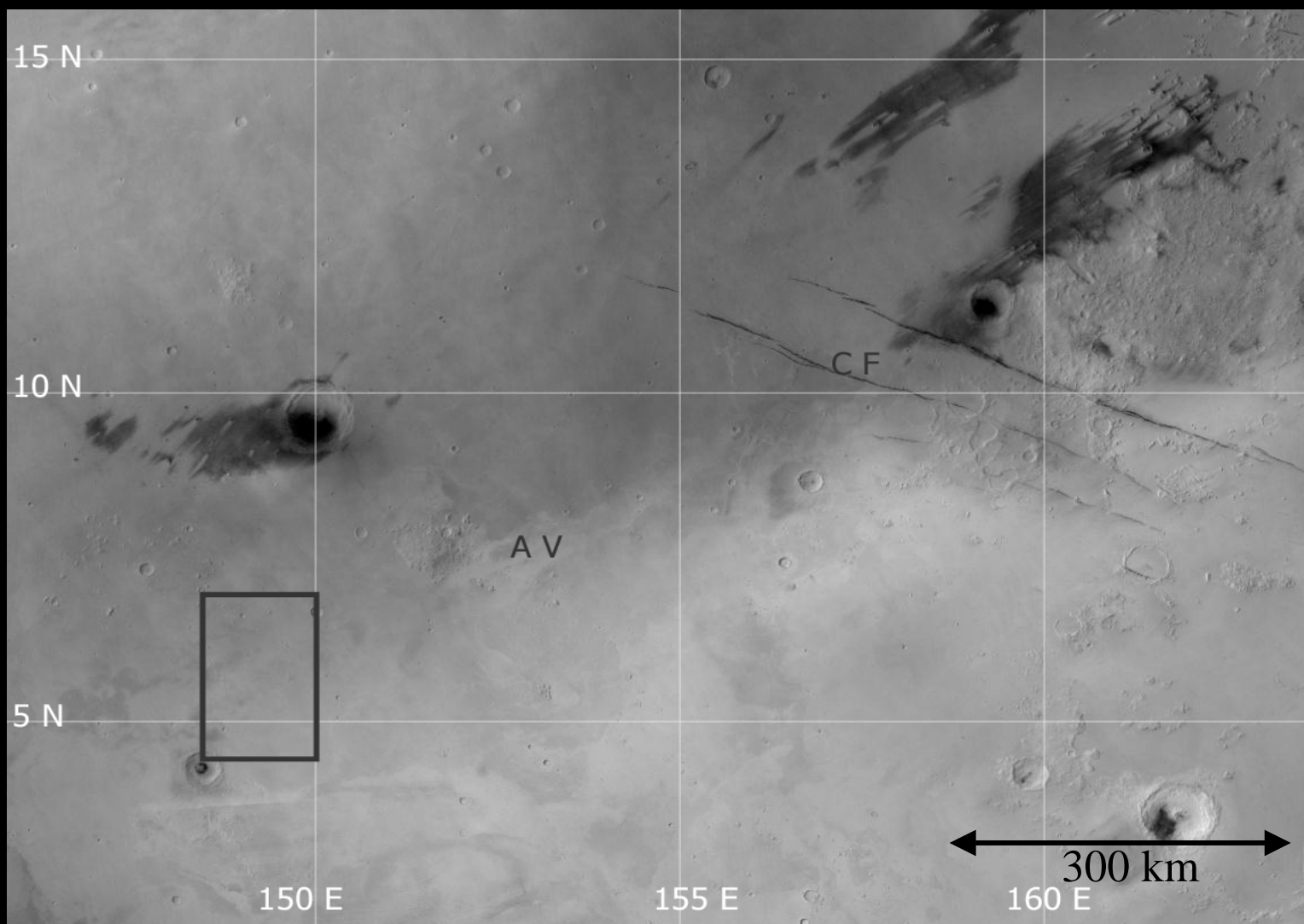
**Il y a de la  
glace dans le  
sous-sol  
profond. Les  
cratères y  
font  
« sploch ».**

**Connaitre la  
quantité qu'il  
y a dans le  
sous-sol est  
une des  
grandes  
questions  
actuelles**

**En cas de « coup de chaud », cette glace « ramollit », ce qui engendre des glissements de terrains qui ressemblent à des coulées de boue.**

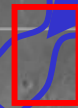
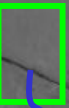
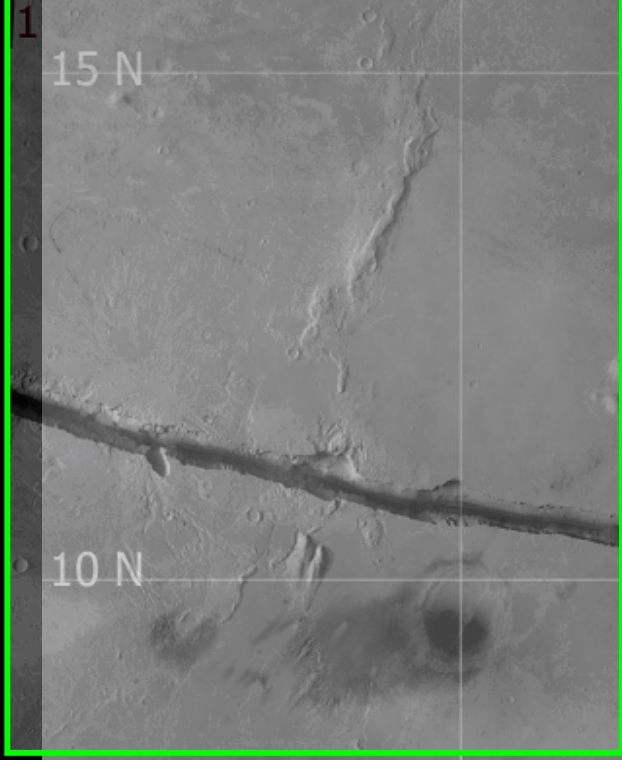
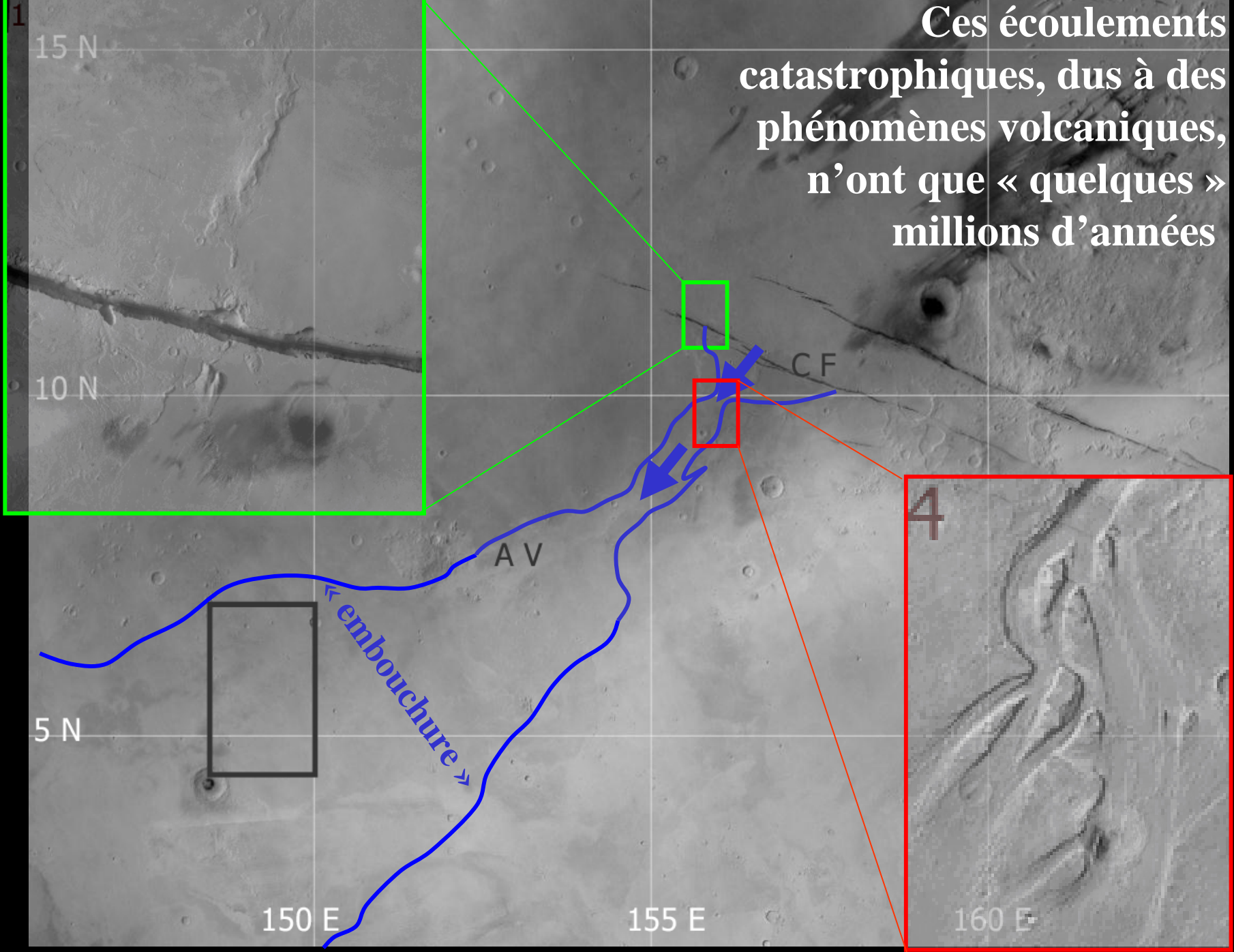




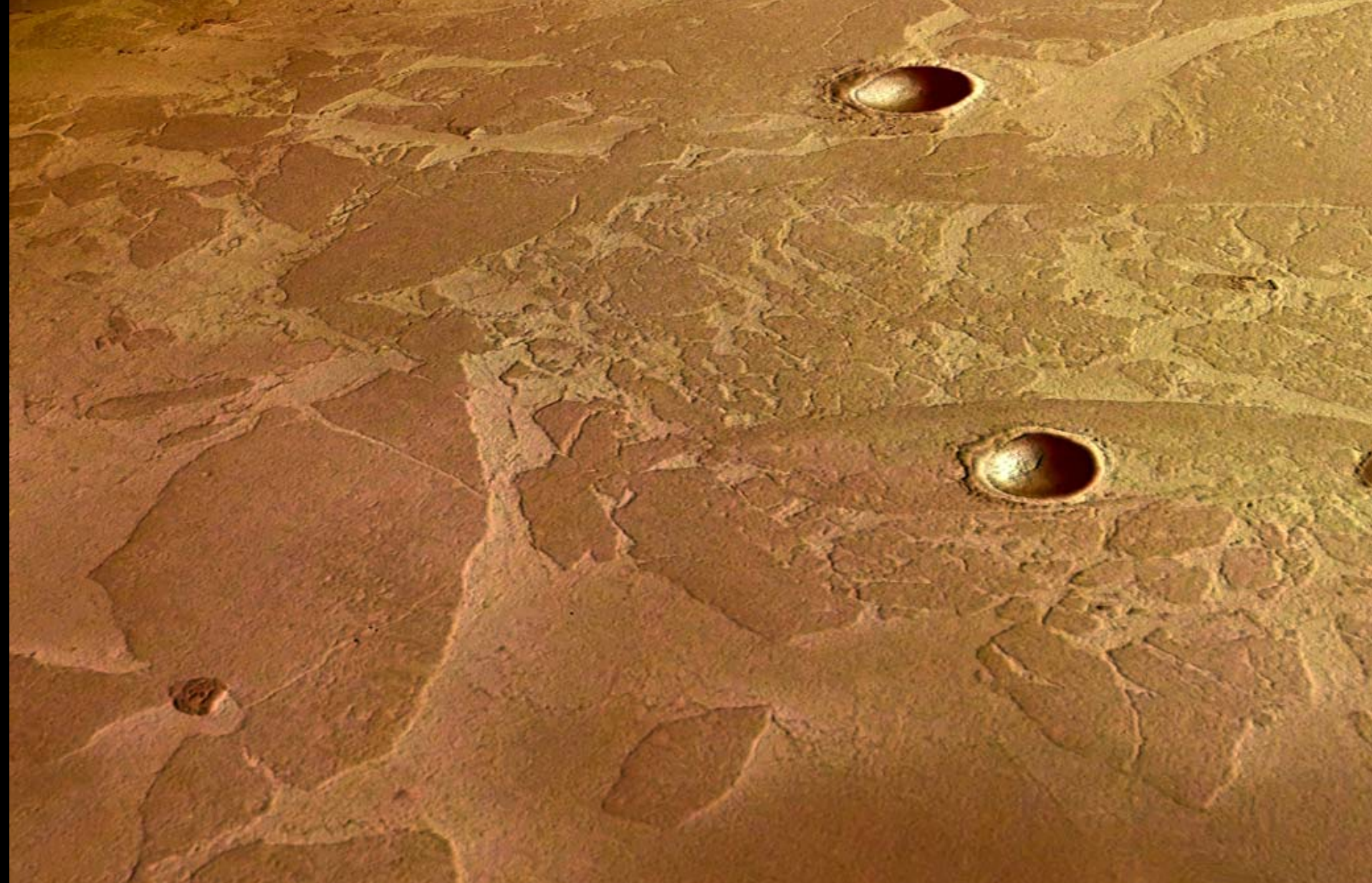


**Continuons nos observations orbitales dans la région de Cerberus Fossae (CF) et d'Athabasca Valles (AV)**

Ces écoulements  
catastrophiques, dus à des  
phénomènes volcaniques,  
n'ont que « quelques »  
millions d'années







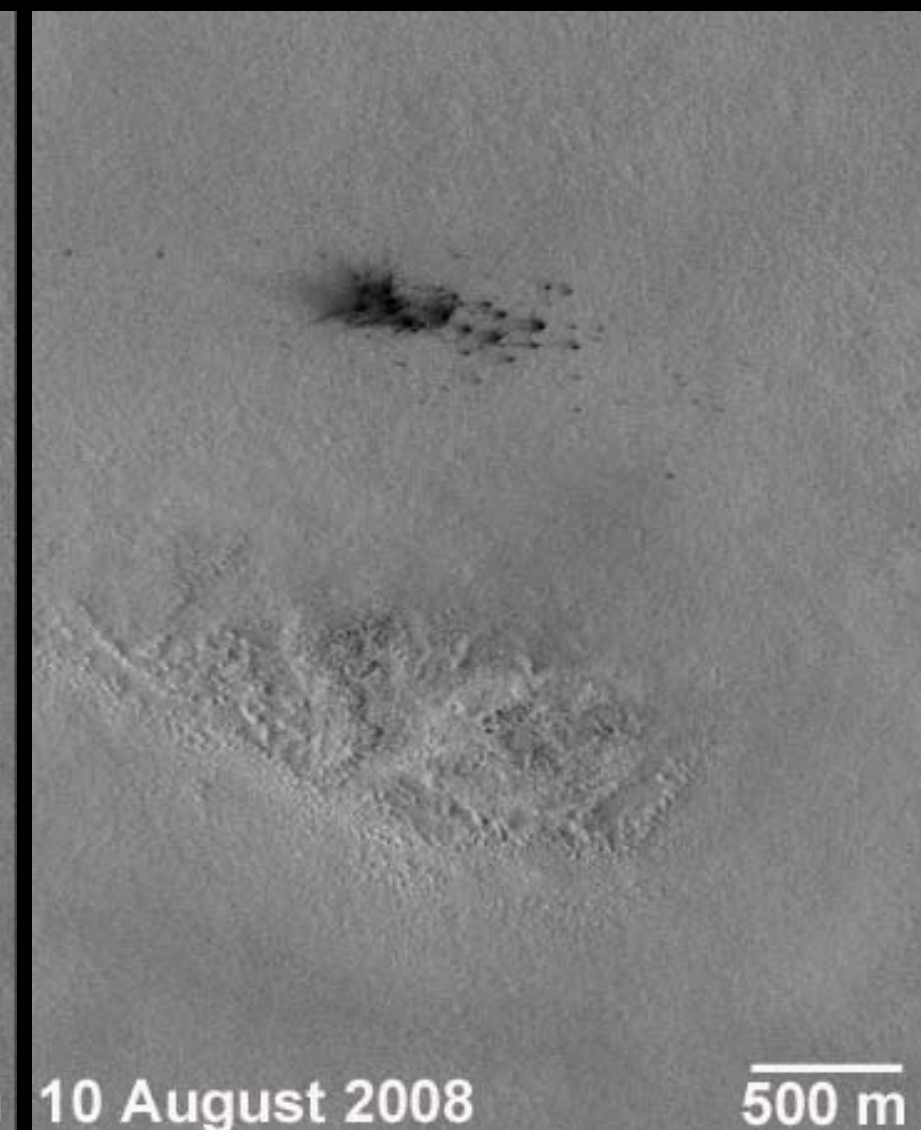
**L'embouchure : une paléo-banquise dérivante sur un paléo-lac gelé (âge : quelques millions d'années seulement)**





**Deux possibles  
équivalents  
terrestres**



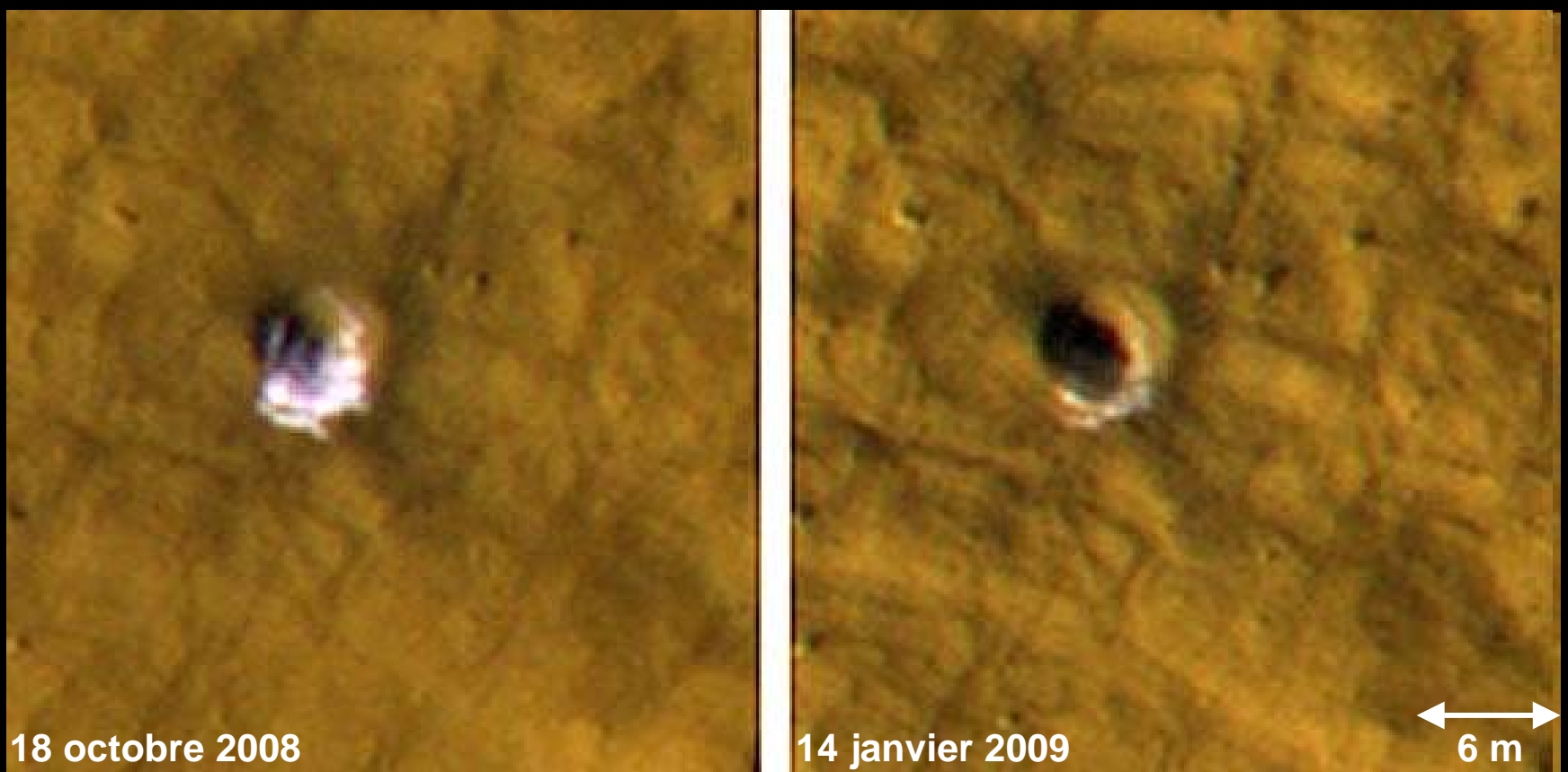


**Sur Mars, il tombe parfois des « petites »  
météorites, laissant des traces qu'on voit  
« apparaître » entre deux survols**

**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**

Super Novae

Comment quantifier la glace dans le sol martien ? Une utilisant une particularité de Mars : la faiblesse de son atmosphère et l'absence de champ magnétique

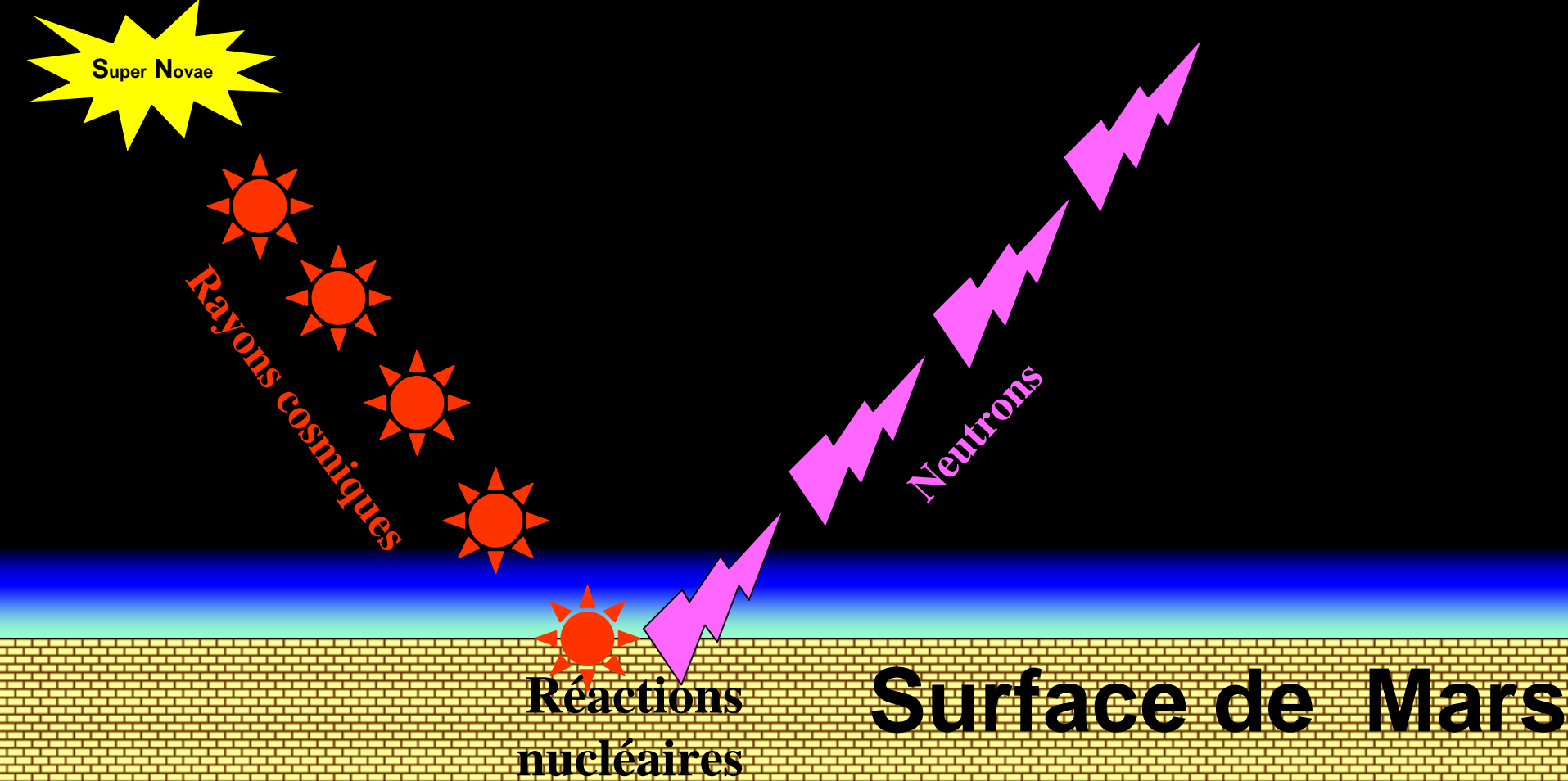
Rayons cosmiques

ATMOSPHERE  
EPAISSE

Surface de la Terre

Sur Terre, l'atmosphère épaisse et le champ magnétique « arrêtent » ou dévient les rayons cosmiques





**Sur Mars, peu d'atmosphère et pas 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.**

Neutrons  
lents

Super Novae

Neutrons  
rapides

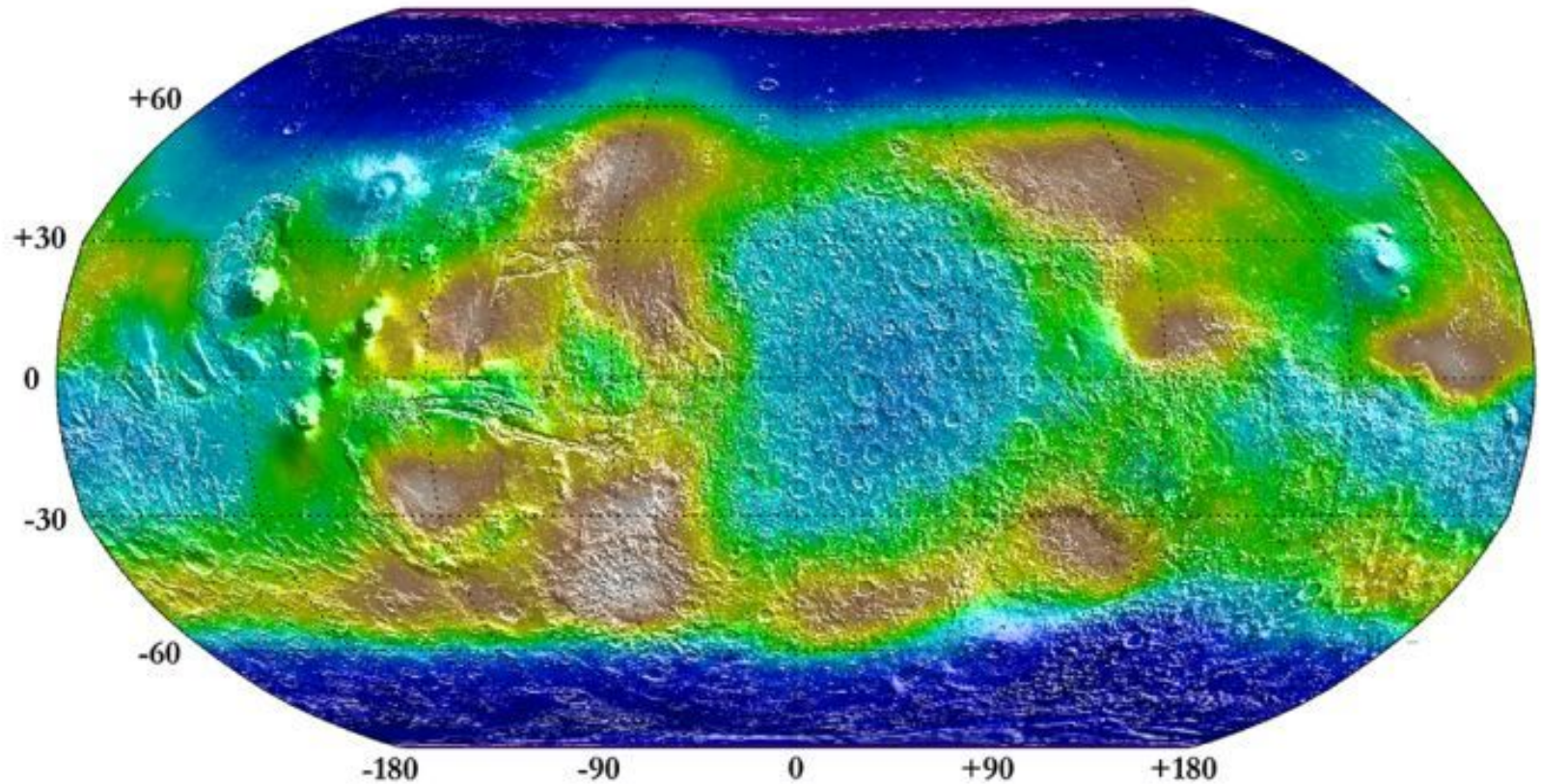
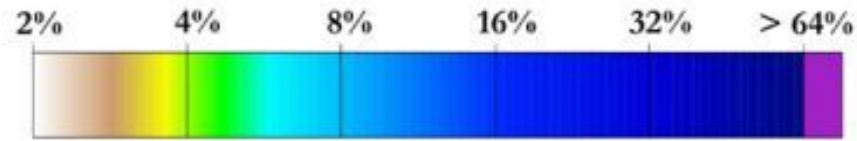
Surface de Mars avec glace

Surface de Mars sans glace

**Il n'y a qu'à mesurer l'énergie des neutrons émis par le sol de Mars pour quantifier la quantité de Deutérium (donc de glace) présent dans les premiers mètres du sol de Mars. C'est ce qu'à fait Mars Odyssey**



## Lower-Limit of Water Mass Fraction on Mars



**Le résultat : 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**

# Dernières nouvelles (Science du 20 février 2009)

Science AAAS SUBSCRIBE FEEDBACK SEARCH: Science Magazine GO Advanced

Magazine News Signaling Careers Multimedia Collections Site Help For: Readers GO

Home > Science Magazine > 20 February 2009 > Mumma et al., pp. 1041 - 1045

Article Views

- Abstract
- Full Text (HTML)
- Full Text (PDF)
- Figures Only
- Supporting Online Material

Originally published in *Science Express* on 15 January 2009  
*Science* 20 February 2009  
Vol. 323, no. 5917, pp. 1041 - 1045  
DOI: 10.1126/science.1165243

REPORTS

## Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003

Michael J. Mumma,<sup>1</sup> Geronimo L. Villanueva,<sup>2,3</sup> Robert E. Novak,<sup>4</sup> Tilak Hewagama,<sup>3,5</sup> Boncho P. Doney,<sup>2,3</sup> Michael A. DiSanti,<sup>3</sup> Avi M. Mandell,<sup>3</sup> Michael D. Smith<sup>3</sup>

Living systems produce more than 90% of Earth's atmospheric methane; the balance is of geochemical origin. On Mars, methane could be a signature of either origin. Using high-dispersion infrared spectrometers at three ground-based telescopes, we measured methane and water vapor simultaneously on Mars over several longitude intervals in northern early and late summer in 2003 and near the vernal equinox in 2006. When present, methane occurred in extended plumes, and the maxima of latitudinal profiles imply that the methane was released from discrete regions. In northern midsummer, the principal plume contained ~19,000 metric tons of methane, and the estimated source strength ( $\geq 0.6$  kilogram per second) was comparable to that of the massive hydrocarbon seep at Coal Oil Point in Santa Barbara, California.

<sup>1</sup> NASA Goddard Space Flight Center, Mailstop 690.3, Greenbelt, MD 20771, USA.  
<sup>2</sup> Department of Physics, Catholic University of America, Washington, DC 20008, USA.  
<sup>3</sup> NASA Goddard Space Flight Center, Mailstop 693, Greenbelt, MD 20771, USA.  
<sup>4</sup> Department of Physics, Iona College, New Rochelle, NY 10801, USA.  
<sup>5</sup> Department of Astronomy, University of Maryland, College Park, MD 20742-2421, USA.

\* To whom correspondence should be addressed. E-mail: [michael.j.mumma@nasa.gov](mailto:michael.j.mumma@nasa.gov)

The atmosphere of Mars is strongly oxidized, composed primarily of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>, 95.3%), along with minor nitrogen (N<sub>2</sub>, 2.7%), carbon monoxide (CO, 0.07%), oxygen (O<sub>2</sub>, 0.13%), water vapor (H<sub>2</sub>O, 0 to 300 parts per million), and radiogenic argon (1.6%); other species and reduced gases such as methane (CH<sub>4</sub>) are rare. CH<sub>4</sub> production by atmospheric chemistry is negligible, and its lifetime against removal by photochemistry is estimated to be several hundred years (1–3) or shorter if strong oxidants such as peroxides are present in the surface or on

Preparing the Proteome for Mass Spectrometry  
Life Science Technology Feature

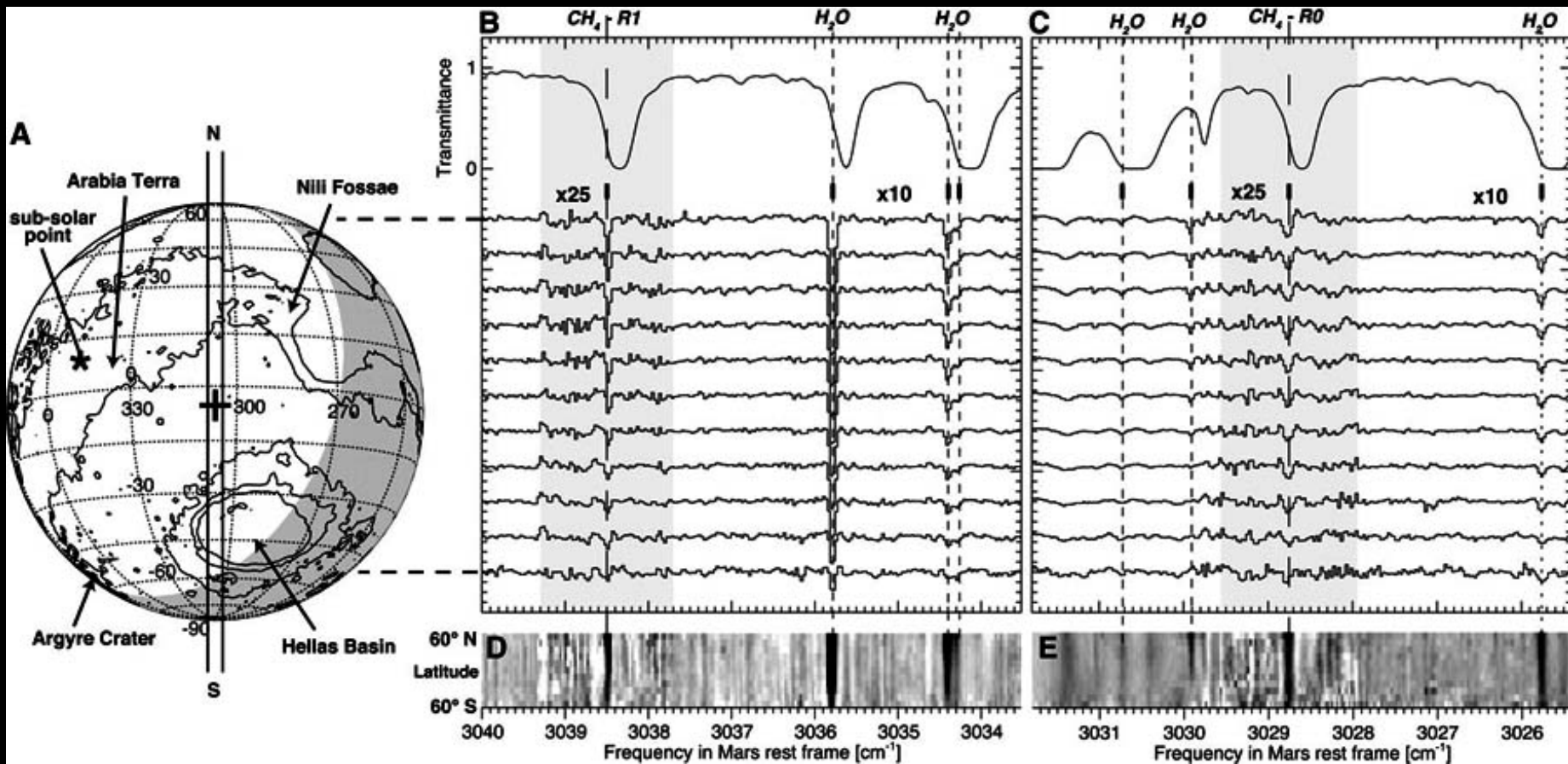
ADVERTISEMENT

Exclusive New Benefit for AAAS Members

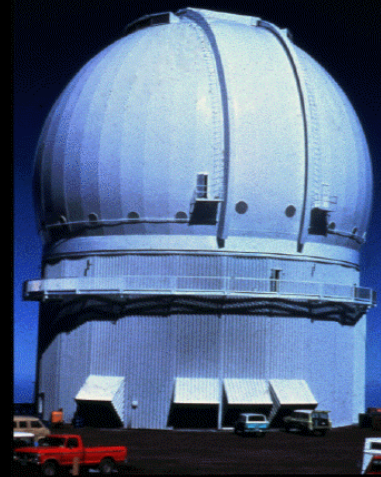
AAAS Policy Alert

Federal S&T budget  
Pending and passed legislation  
Congressional and Executive Branch





Un suivi spectral avec des télescopes terrestres montre la présence estivale de **méthane ( $\text{CH}_4$ )** dans le secteur de Nili Fossae





**Le méthane ( $\text{CH}_4$ ),  
qu'est-ce que c'est ?**

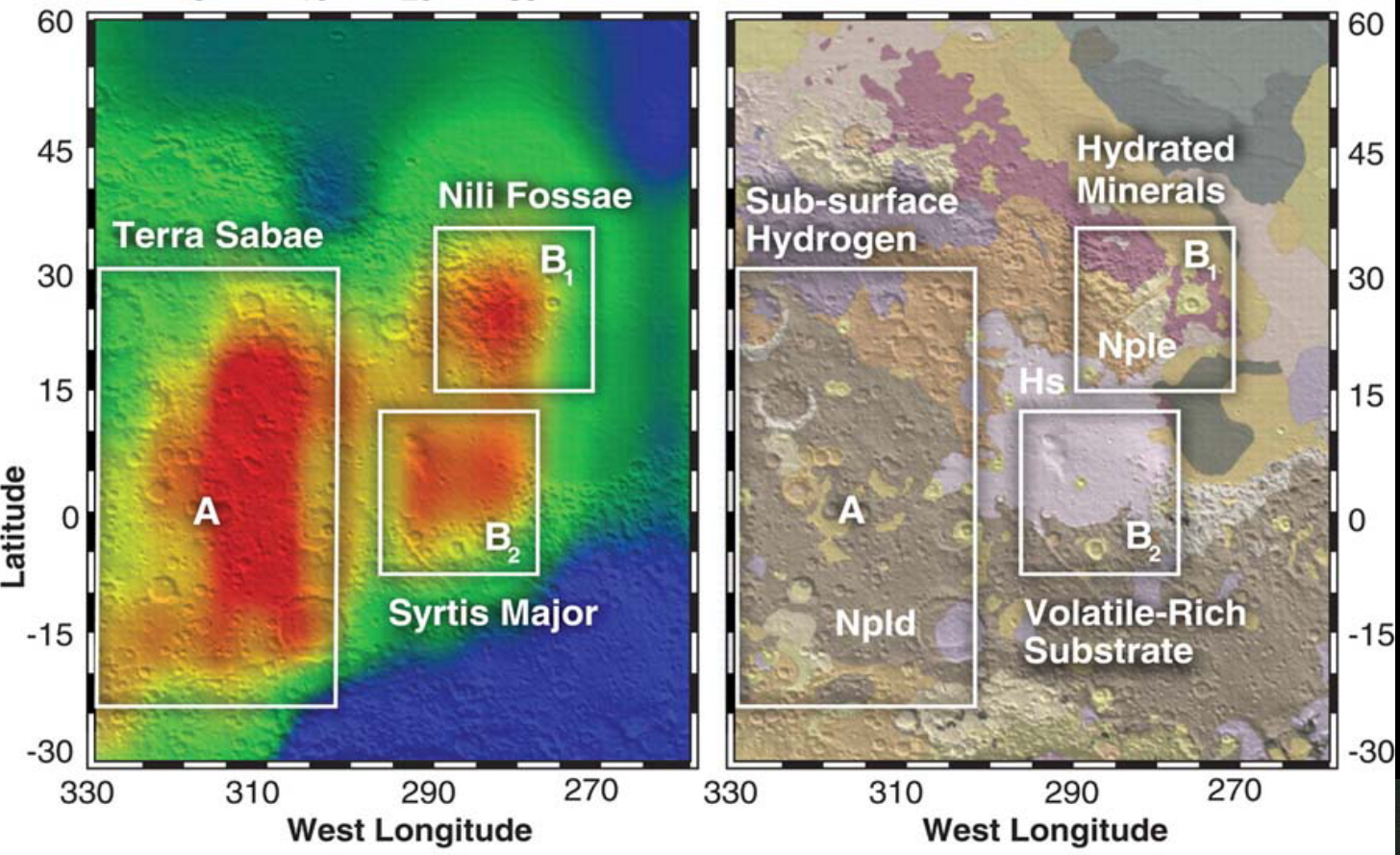
**Tout simplement  
notre bon vieux gaz  
de ville !**





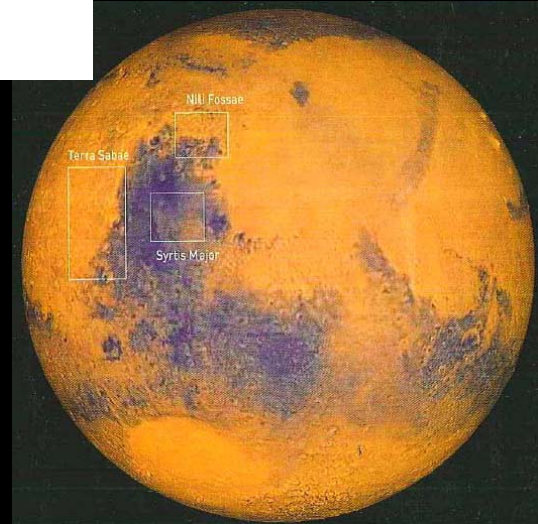


Geological provinces



**Ce méthane martien correspondrait à des dégagements totaux de 0,1 à 1kg/s.**

**Rappelons que la durée de vie du méthane dans l'atmosphère martienne n'est que de quelques centaines d'années (destruction par UV)**





Dégagement de méthane



Dégagement direct de méthane

**Sur Terre, d'où vient le méthane ? Quatre mécanismes principaux en produisent. L'immense majorité du méthane terrestre est directement ou indirectement d'origine biologique (rectangle vert)**

**Production de méthane par un ou plusieurs mécanismes**

(1) Cracking de macromolécules organiques

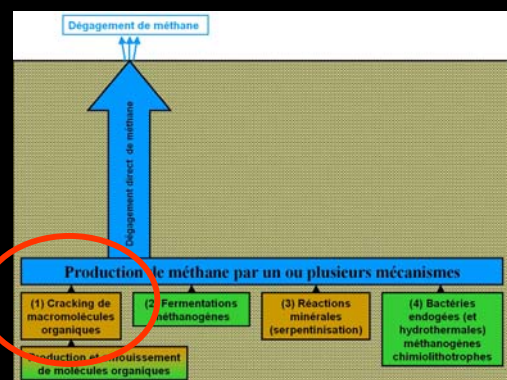
(2) Fermentations méthanogènes

(3) Réactions minérales (serpentinisation)

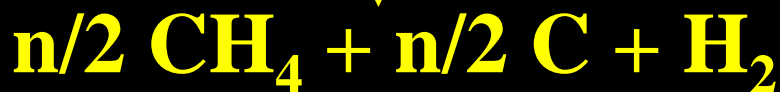
(4) Bactéries endogées (et hydrothermales) méthanogènes chimolithotrophes

Production et enfouissement de molécules organiques





**Première possibilité sur Terre : le méthane issu du cracking (thermique) de macromolécules organiques (issues de la fossilisation et de la diagénèse de « cadavres » faits de molécules biologiques)**

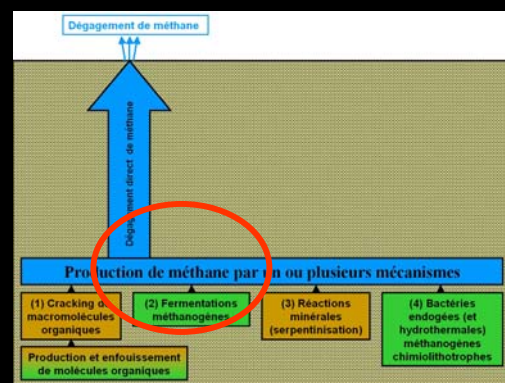


Coup de grisou dans une mine de charbon



C'est l'origine de la quasi totalité du «gaz naturel»

# Deuxième possibilité (terrestre) : le méthane fermentaire

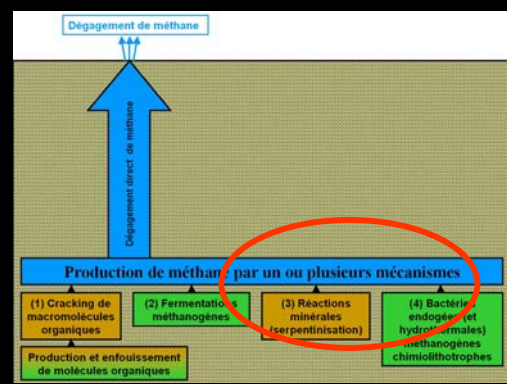


avec comme exemples les fermentations dans marécages et tourbières, les fermentations digestives des ruminants ...

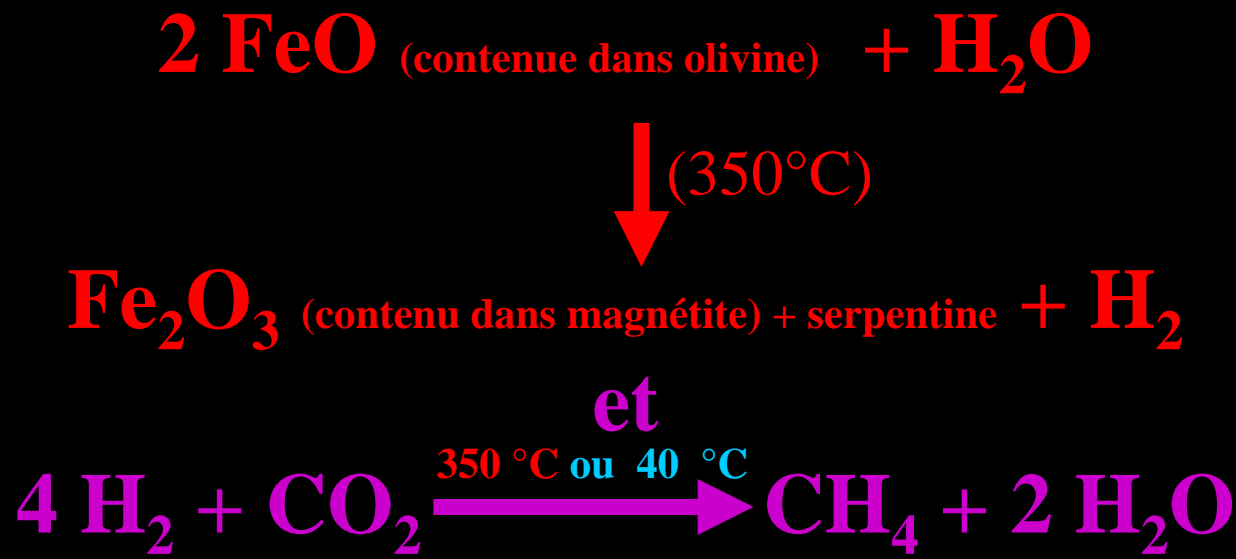


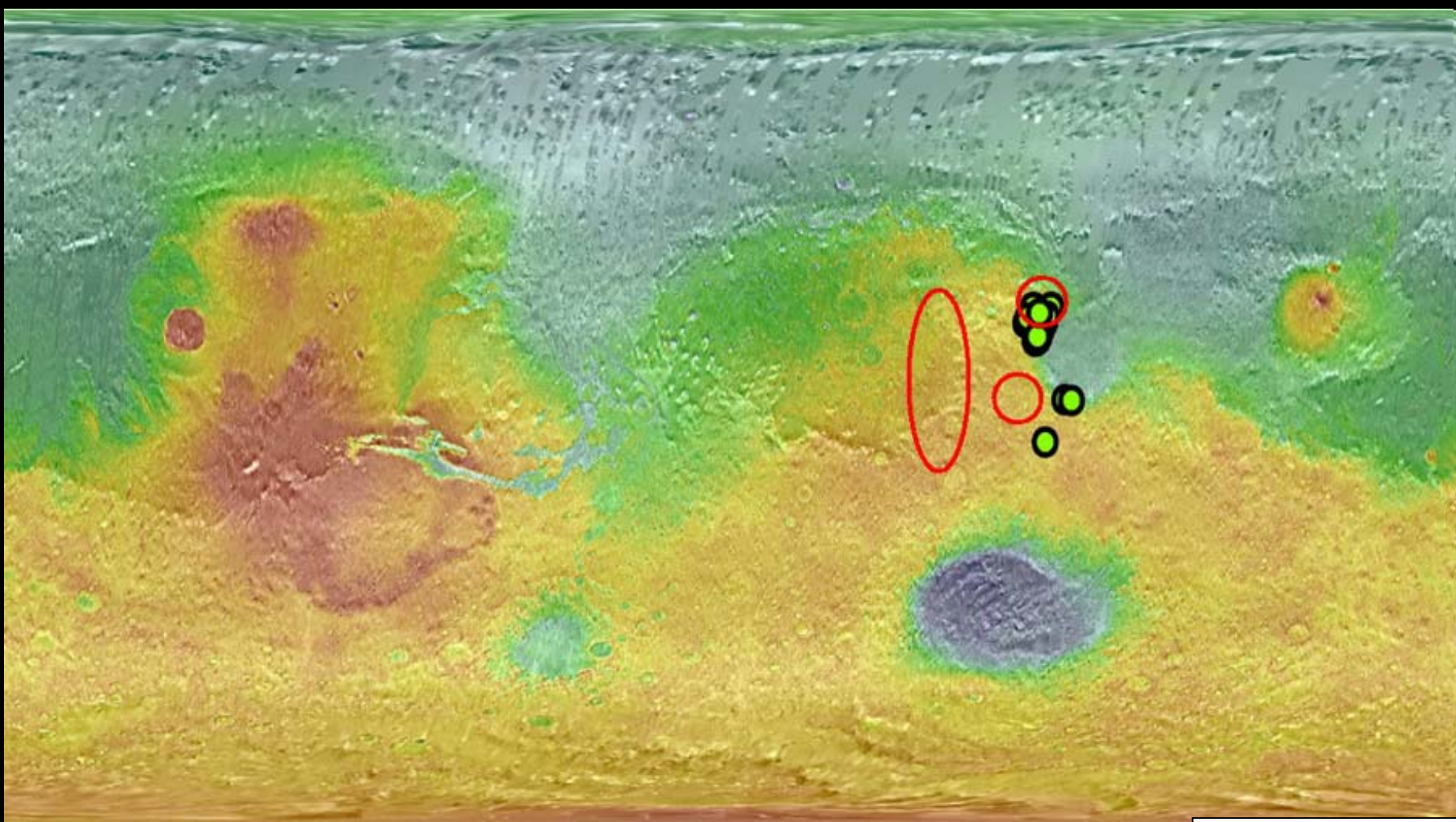


# Troisième et quatrième possibilités (sur Terre) :

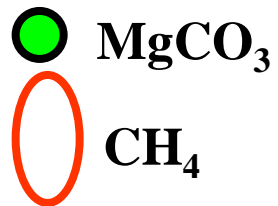


- \* Réactions minérales souterraines spontanées à Haute Température,
- \* Action (à plus Basse Température) de bactéries chimio-lithotrophes méthanogènes (comme à chaque fois qu'une réaction chimique libère de l'énergie):





**Ce processus d'altération de l'olivine libère des ions  $Mg^{++}$ , qui avec du  $CO_2$  vont faire du  $MgCO_3$ . Et justement, il y en a aux mêmes endroits que le méthane**





Dégagement de méthane

Dégagement de méthane

Dégagement direct de méthane

Déstabilisation  
des clathrates

Clathrates

Dégagement et  
piégeage dans  
des clathrates

Production de méthane par un ou plusieurs mécanismes

(1) Cracking de  
macromolécules  
organiques

(2) Fermentations  
méthanogènes

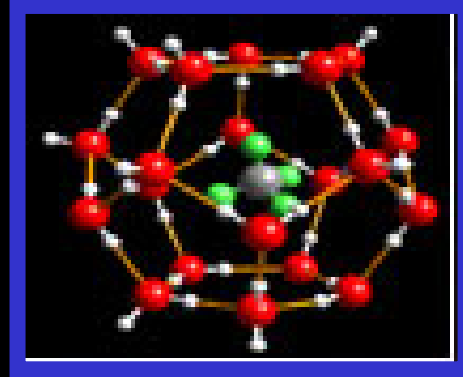
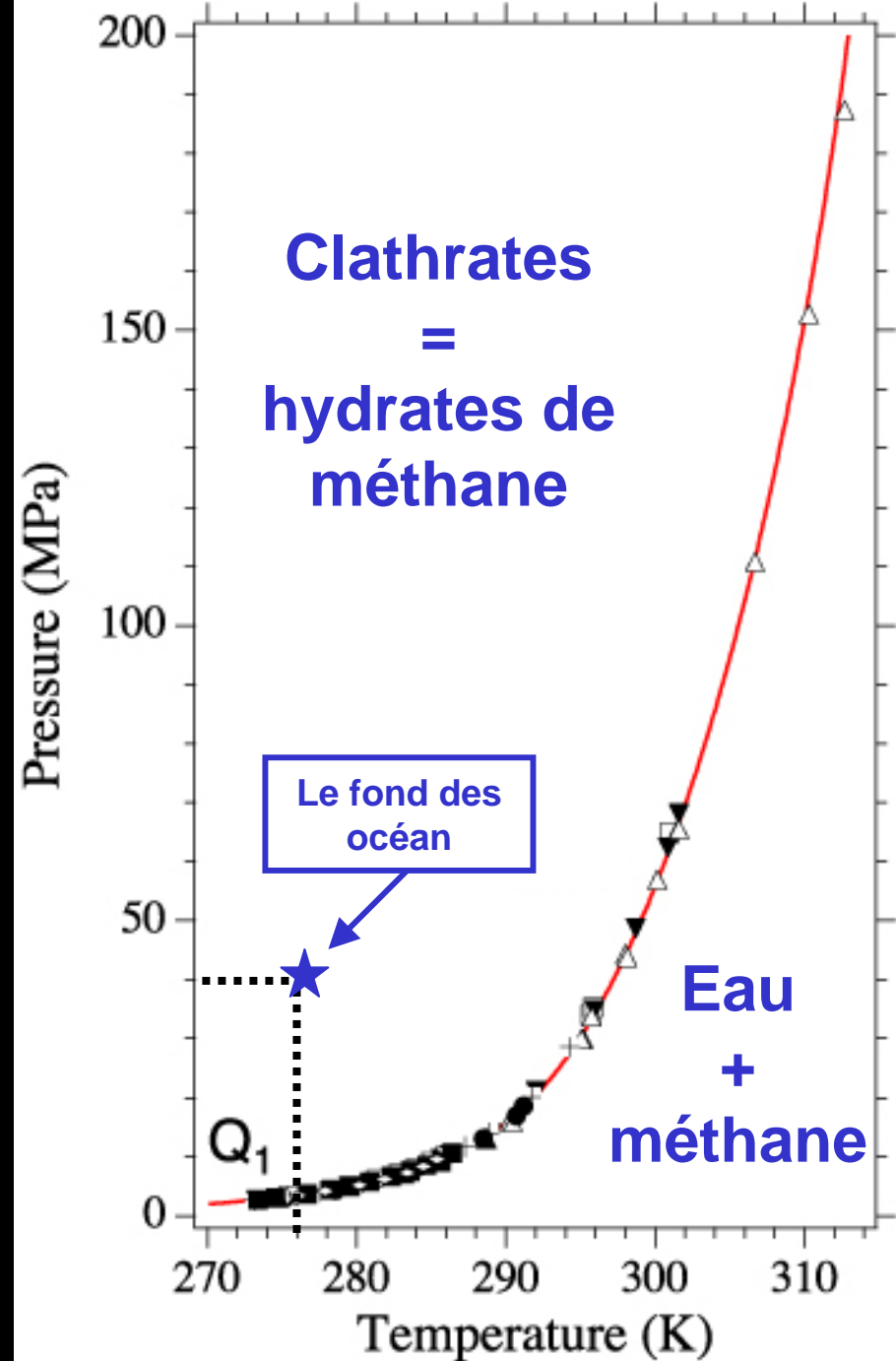
(3) Réactions  
minérales  
(serpentinisation)

(4) Bactéries  
endogées (et  
hydrothermales)  
méthanogènes  
chimolithotrophes

Production et enfouissement  
de molécules organiques

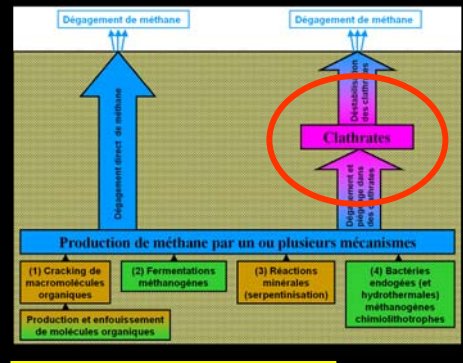
**Autre  
possibilité:**

**Si le méthane, une fois fait, peut sortir directement, il peut aussi être stocké sous forme de clathrates, qui redonneront du méthane en se déstabilisant.**



**A haute pression et/ou basse température, le méthane réagit avec l'eau pour former des hydrates de méthane, appelés clathrates**





**Méthane**  
+  
**eau**  
↕  
**Glace**  
**« mixte »**  
**appelée**  
**Clathrate**

Sur Terre, les clathrates, glaces de formule  $[CH_4, nH_2O]$  sont stables par plus de 1000 m de fond ( $T < 4^\circ C$ ) ou dans les sols gelés des toundras. Ces clathrates devraient être stables sur Mars à partir de quelques dizaines de mètres de profondeurs dans le sous-sol.

**Alors, quelle est l'origine de ce méthane martien ???**

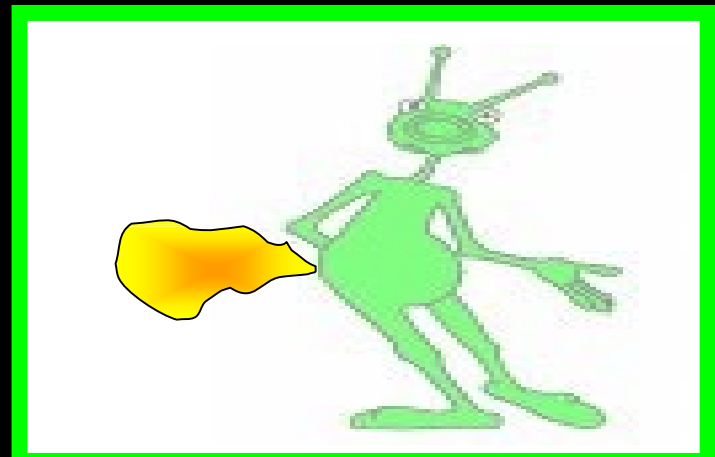
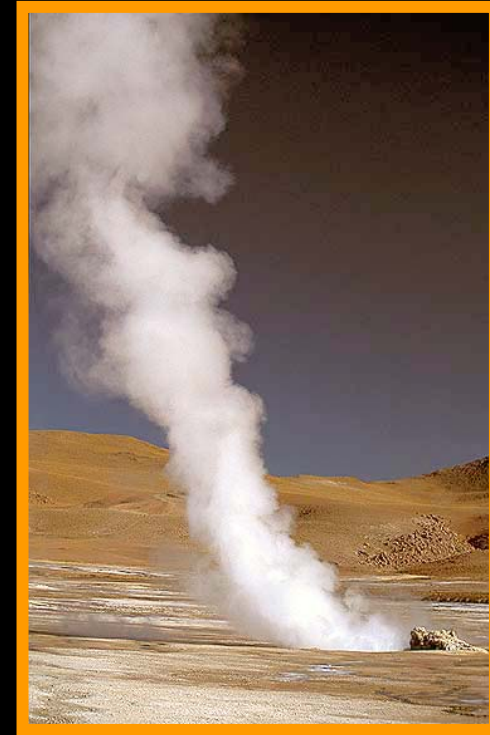
**La saisonnalité suggère une déstabilisation de clathrates, ce qui repousse le problème dans le temps : qu'est ce qui a formé les clathrates ?**

**Réactions minérales ? Cela indiquerait qu'il y a encore de l'eau chaude ( $T > 300^{\circ}\text{C}$ )**

**aujourd'hui (ou il n'y a pas trop longtemps) !**

**Réactions biologiques ???**

**Affaire à suivre !**





*Avec nos détecteurs  
hyper-spécialisés,  
va enfin savoir si  
il y a de la vie sur Mars*

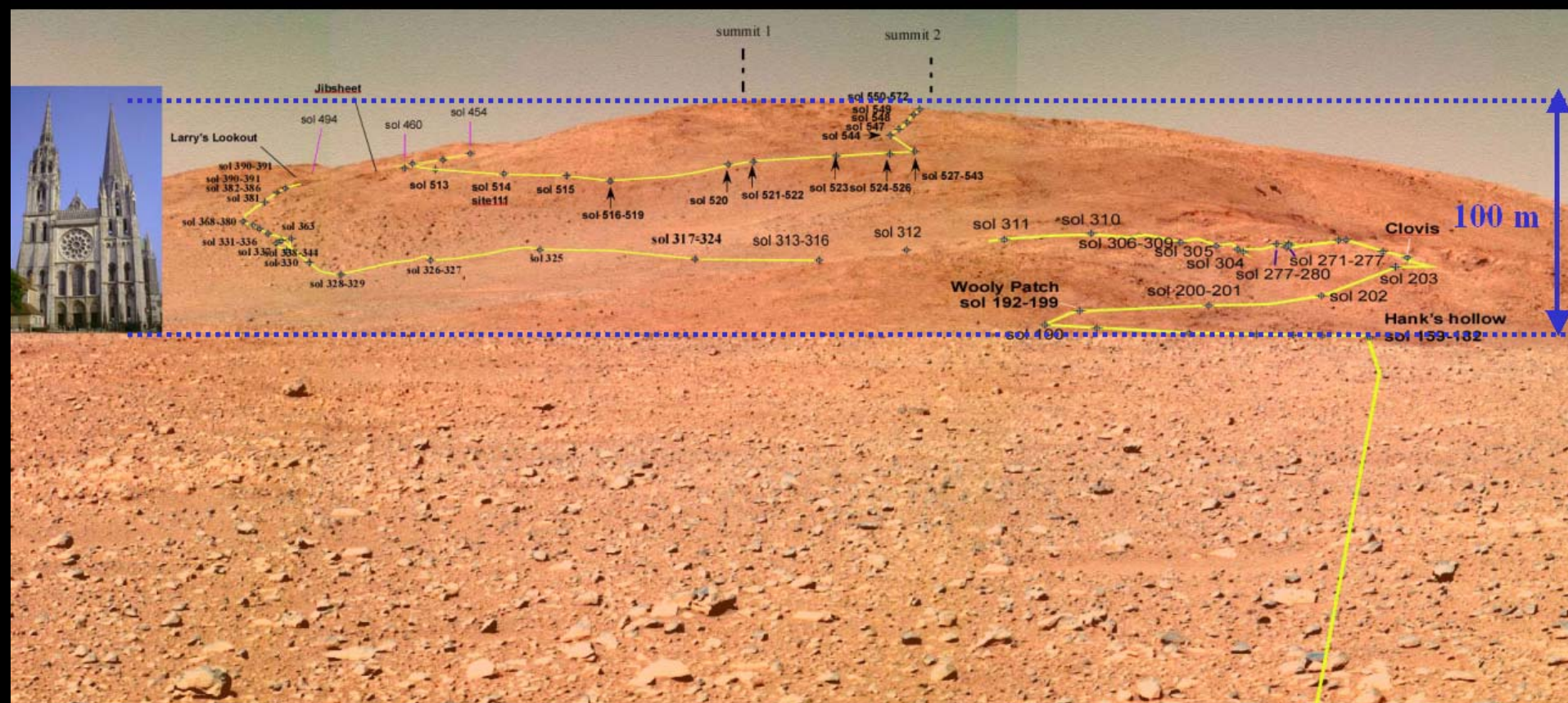


**Les résultats des 3 robots  
Spirit, Opportunity et Phoenix**



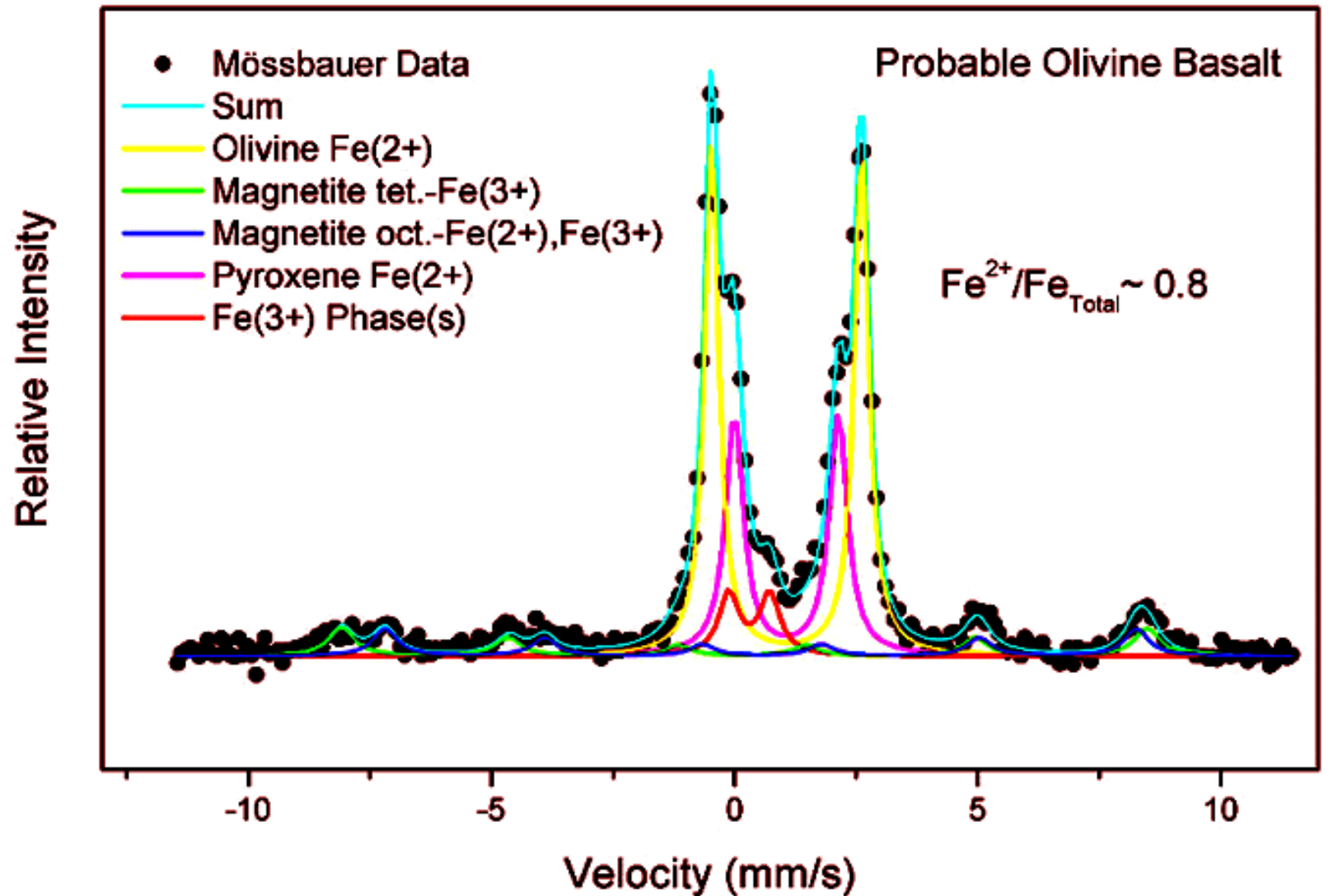
**Les deux robots « géologues » Spirit et Opportunity se sont posés sur Mars en janvier 2004, pour étudier l'environnement passé de régions où les images orbitales laissaient penser qu'il y avait eu de l'eau liquide.**





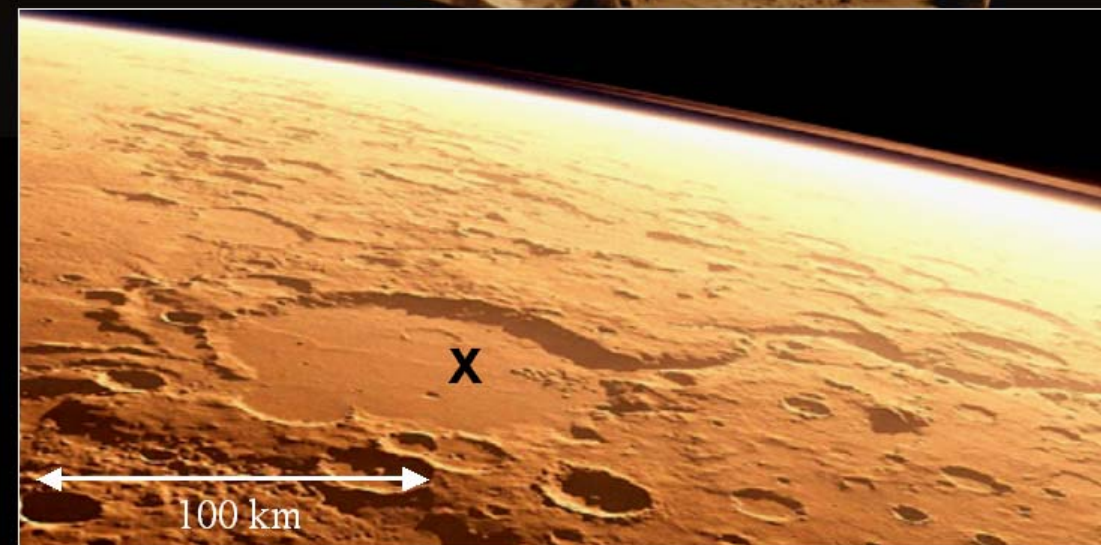
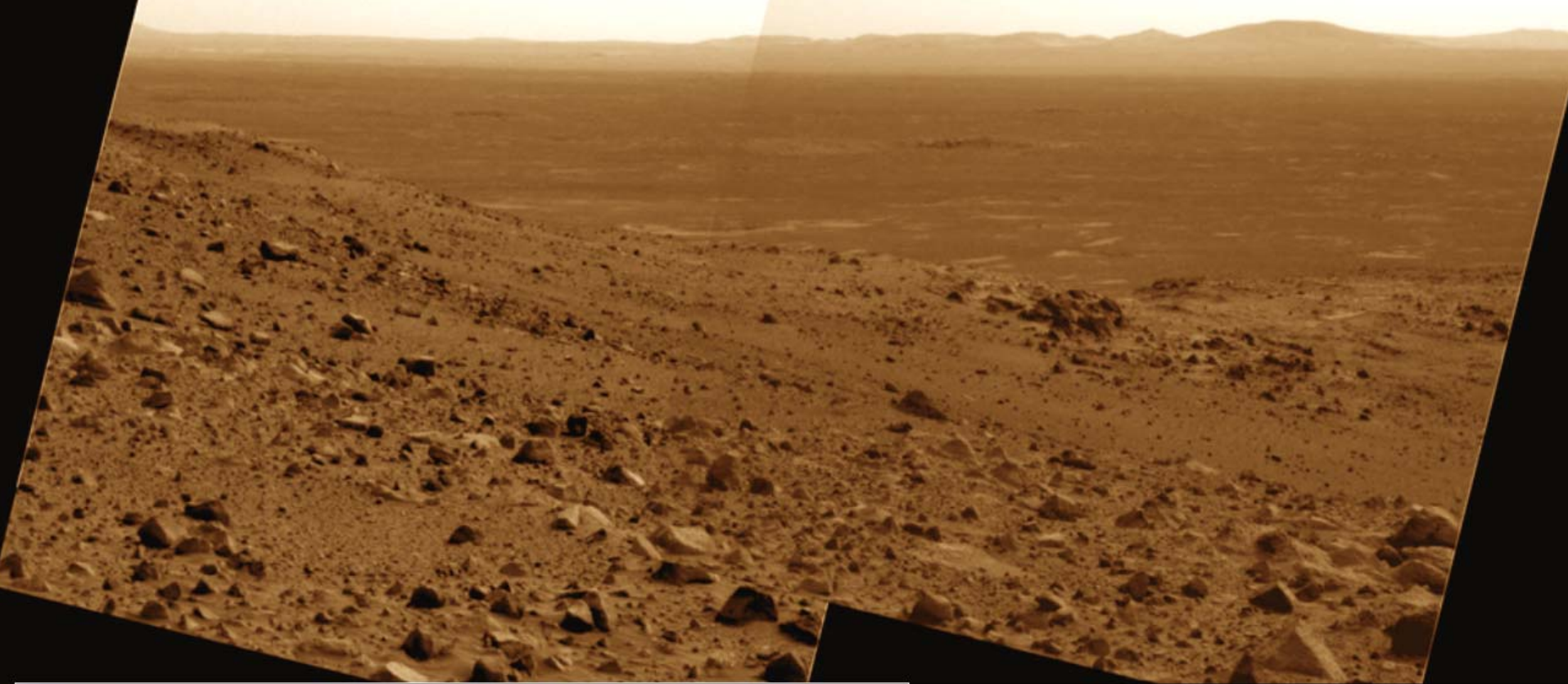
**Spirit s'est posé dans une plaine (1er plan) avec rien que du basalte. Cruelle déception ! A 3 km, des collines. Il essaye d'y aller pour y chercher autre chose. Et il y arrive. Il monte même jusqu'au sommet (août 2005) et est redescendu de l'autre côté où il se trouve et fonctionne toujours, bien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

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



**Exemple d'analyse minéralogique in situ  
montrant les minéraux usuels d'un basalte**

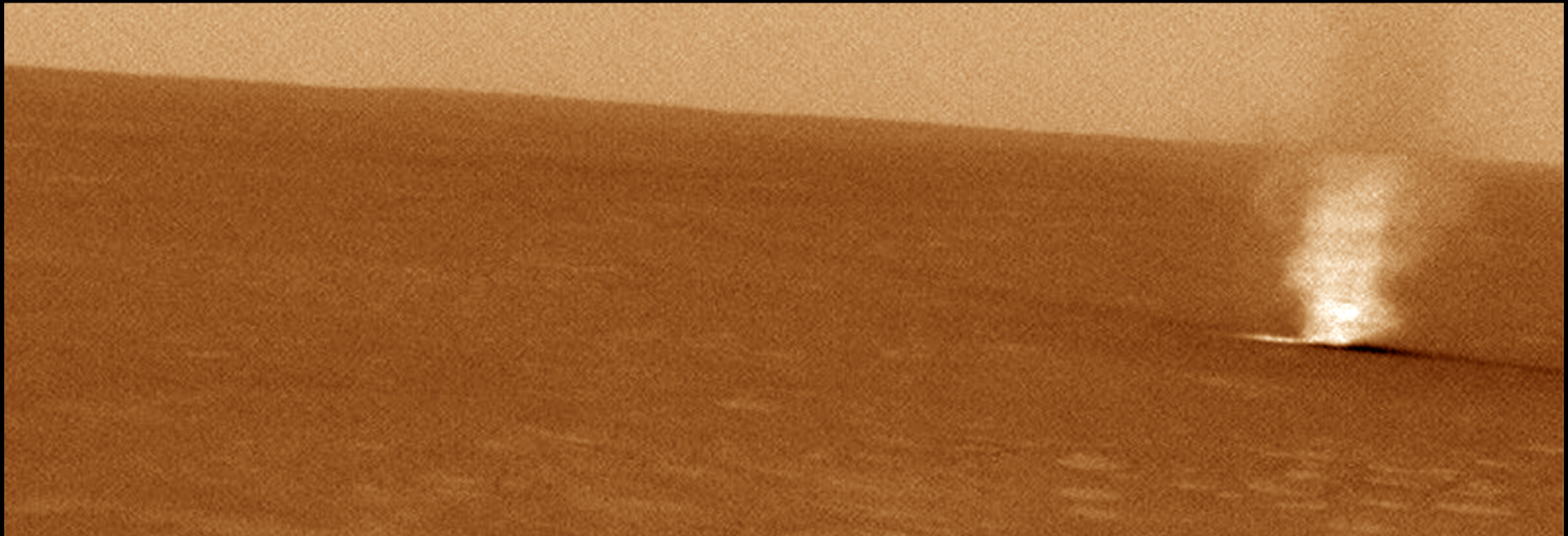
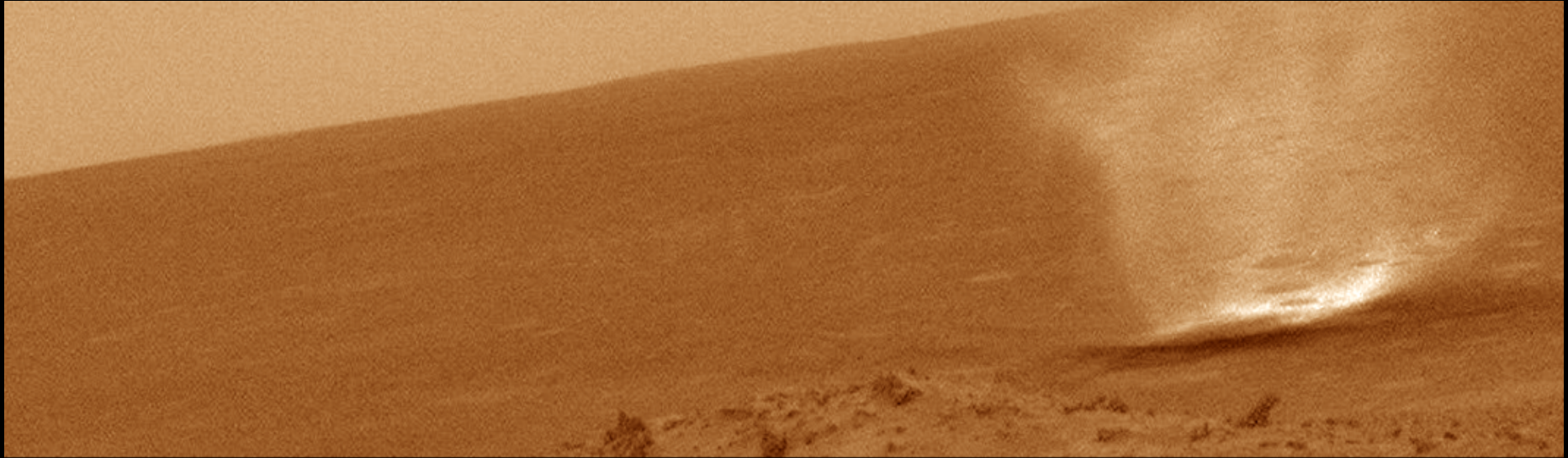




**Avant de parler  
« roche », un paysage :  
quand il fait clair, on  
découvre les bords du  
cratère Gusev, à 50 km  
de là.**



# Et dans la plaine, Spirit observe des mini-tornades







**Exemple de mini-tornade terrestre dans le désert  
de Gobi (= dust devil = poussières du diable)**



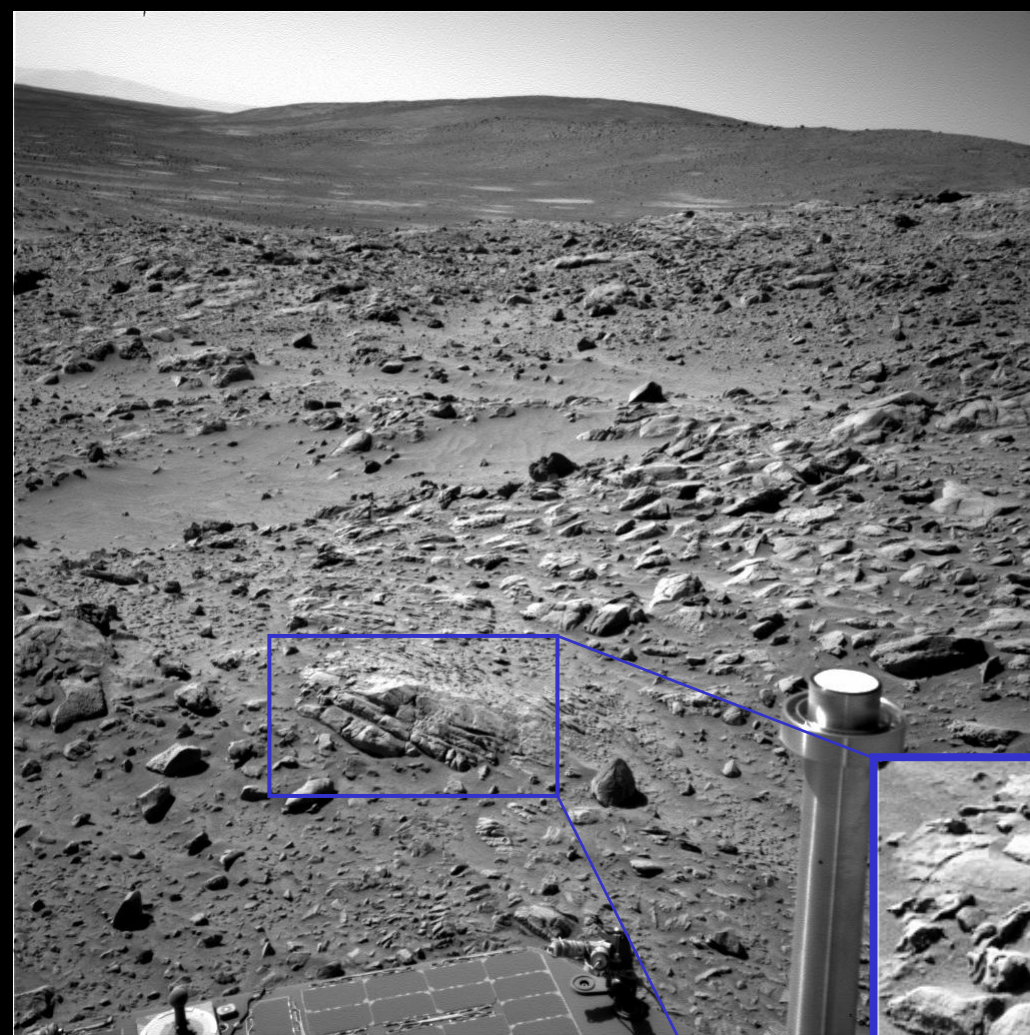
**Animation : 1 image prise toutes les 21  
secondes, passées en accéléré**

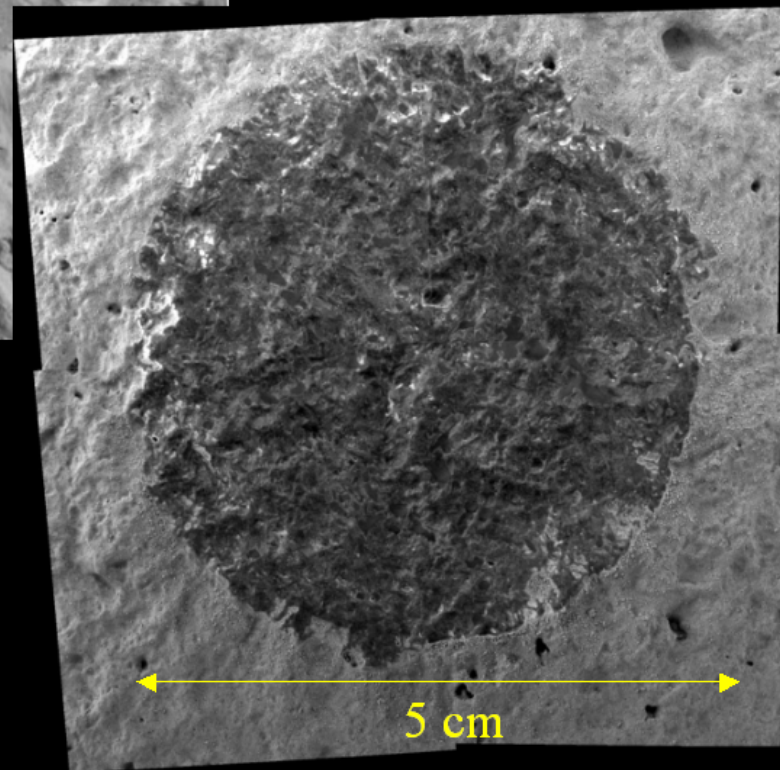
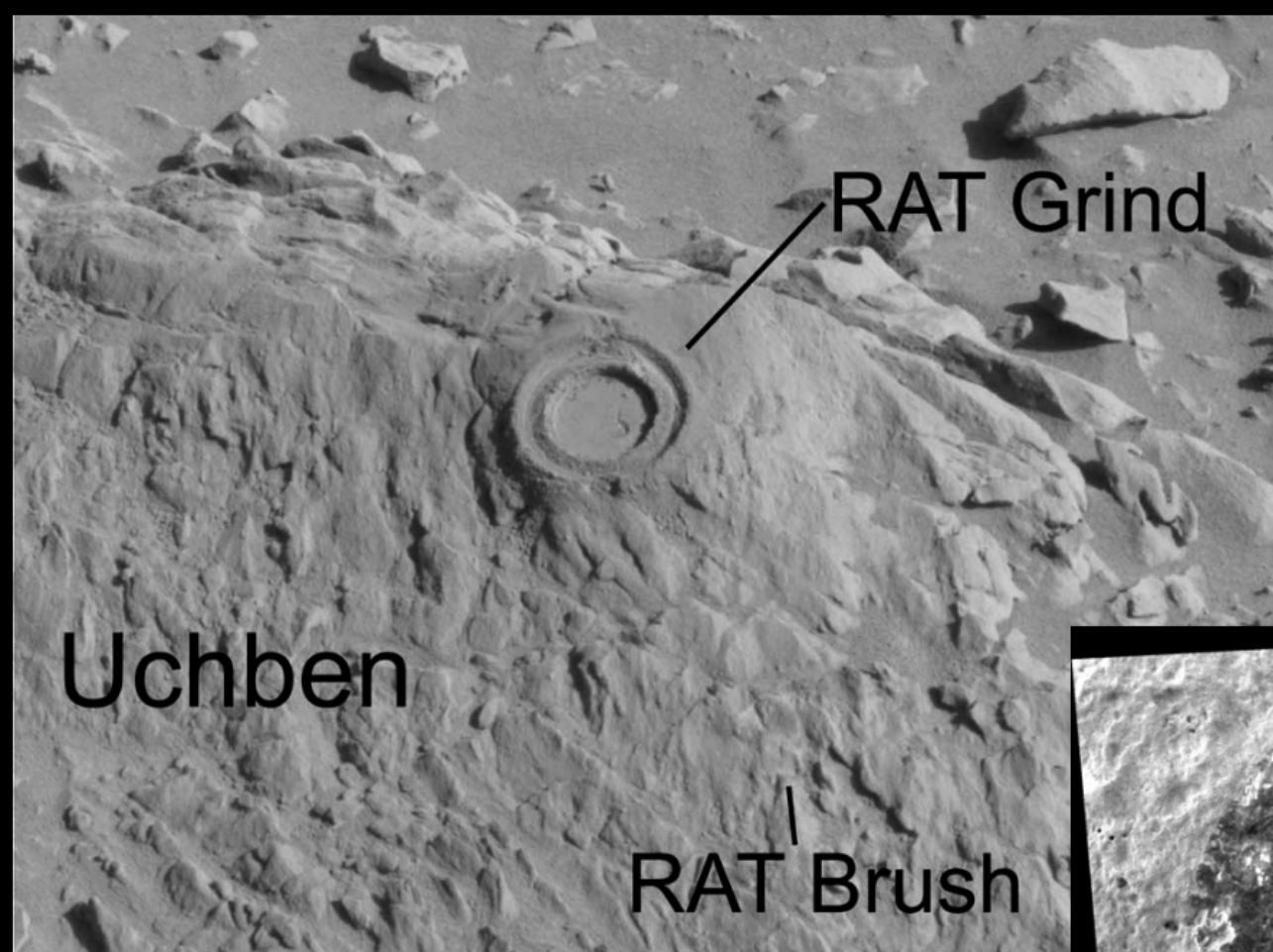
**En bas à gauche, de décompte des secondes**

**Une tornade arrive à la seconde n° 242**



**Dans la montagne, il trouve aussi des roches stratifiées. Sédiments, cendres volcaniques ? Chimiquement, ça ressemble à des cendres volcaniques altérées par de l'eau**

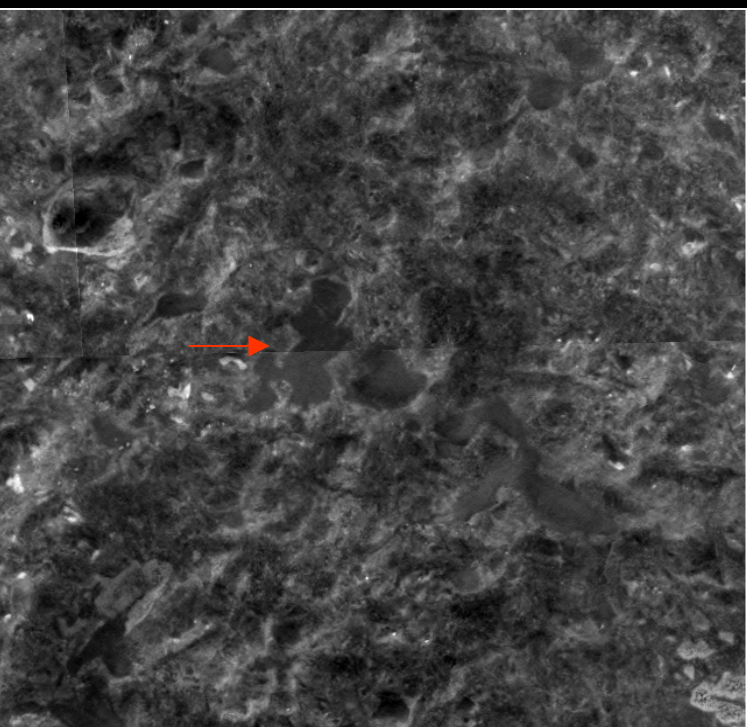
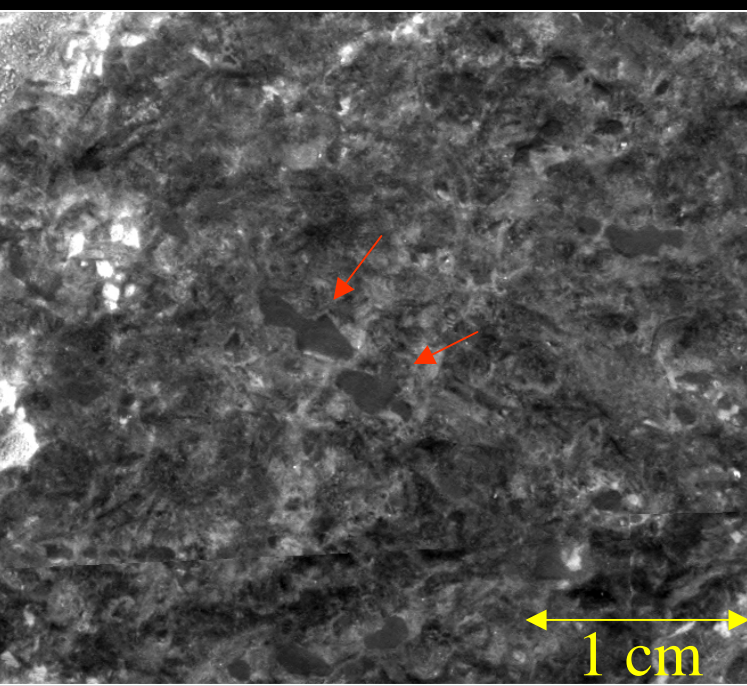




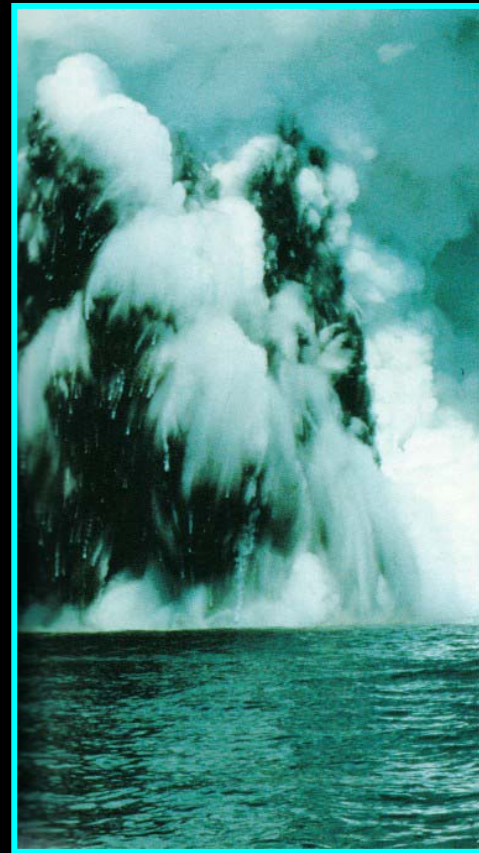
**Contournons ce rocher ;  
polissons sa surface  
supérieure ; époussetons ;  
regardons.**

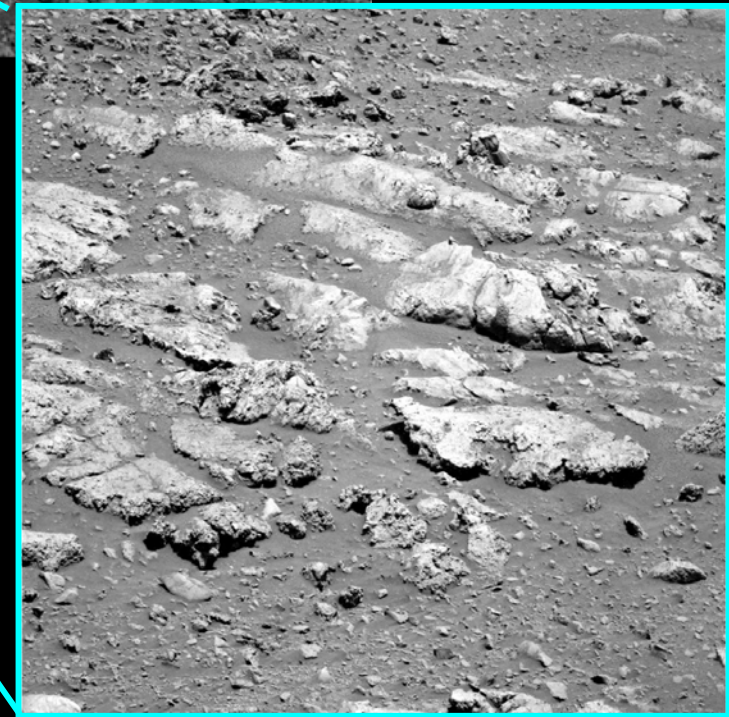
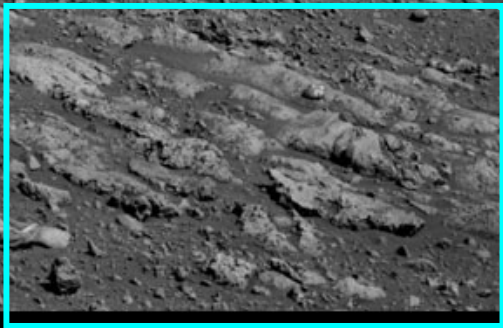
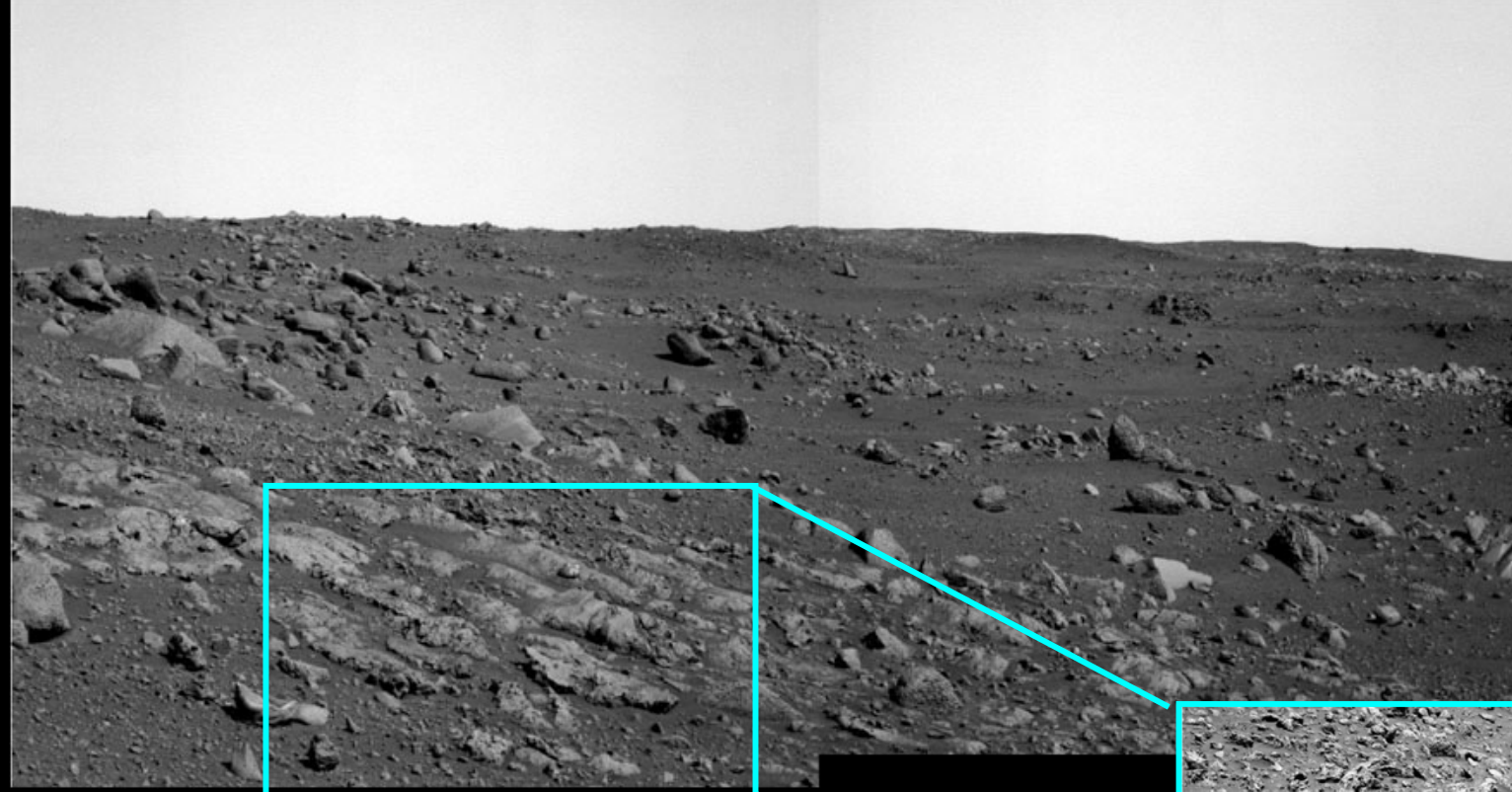


**En regardons au  
« microscope », on découvre  
des formes géométriques  
(cristaux ?)**



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



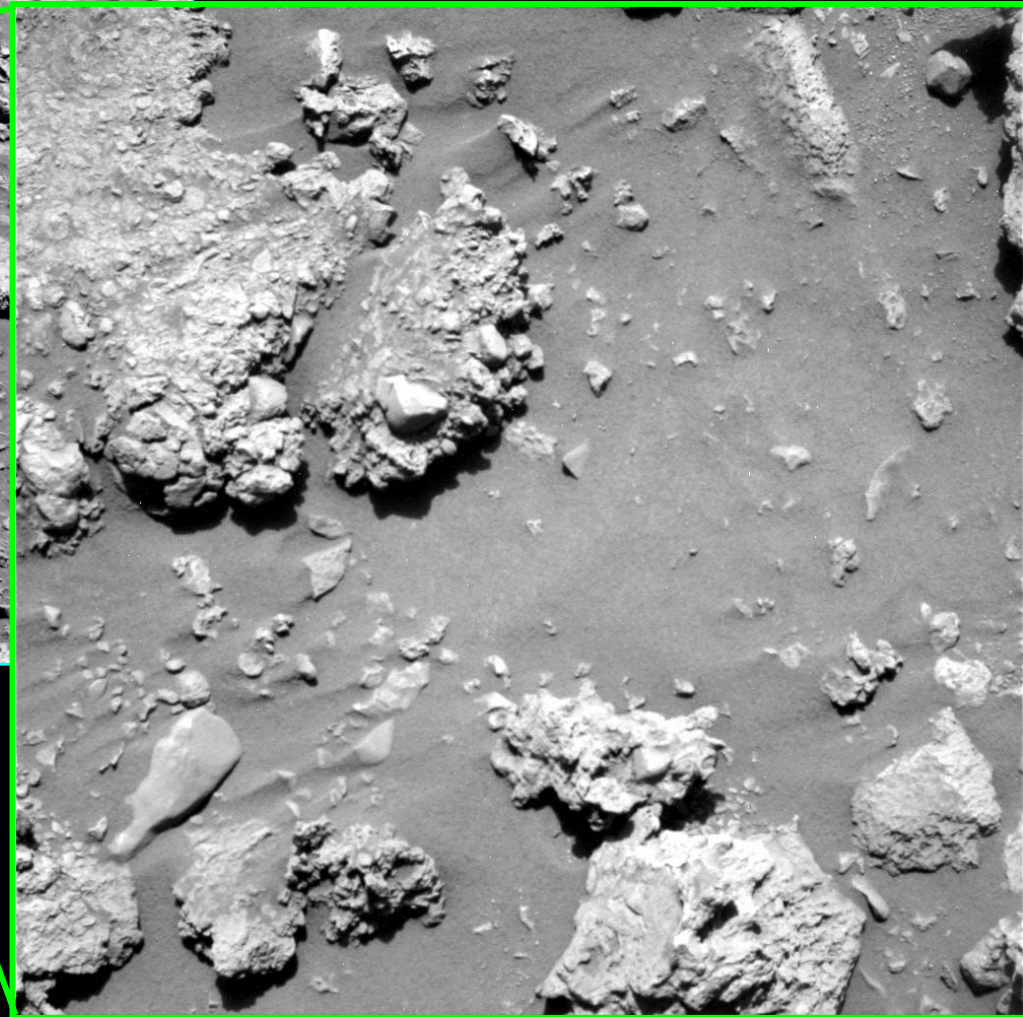
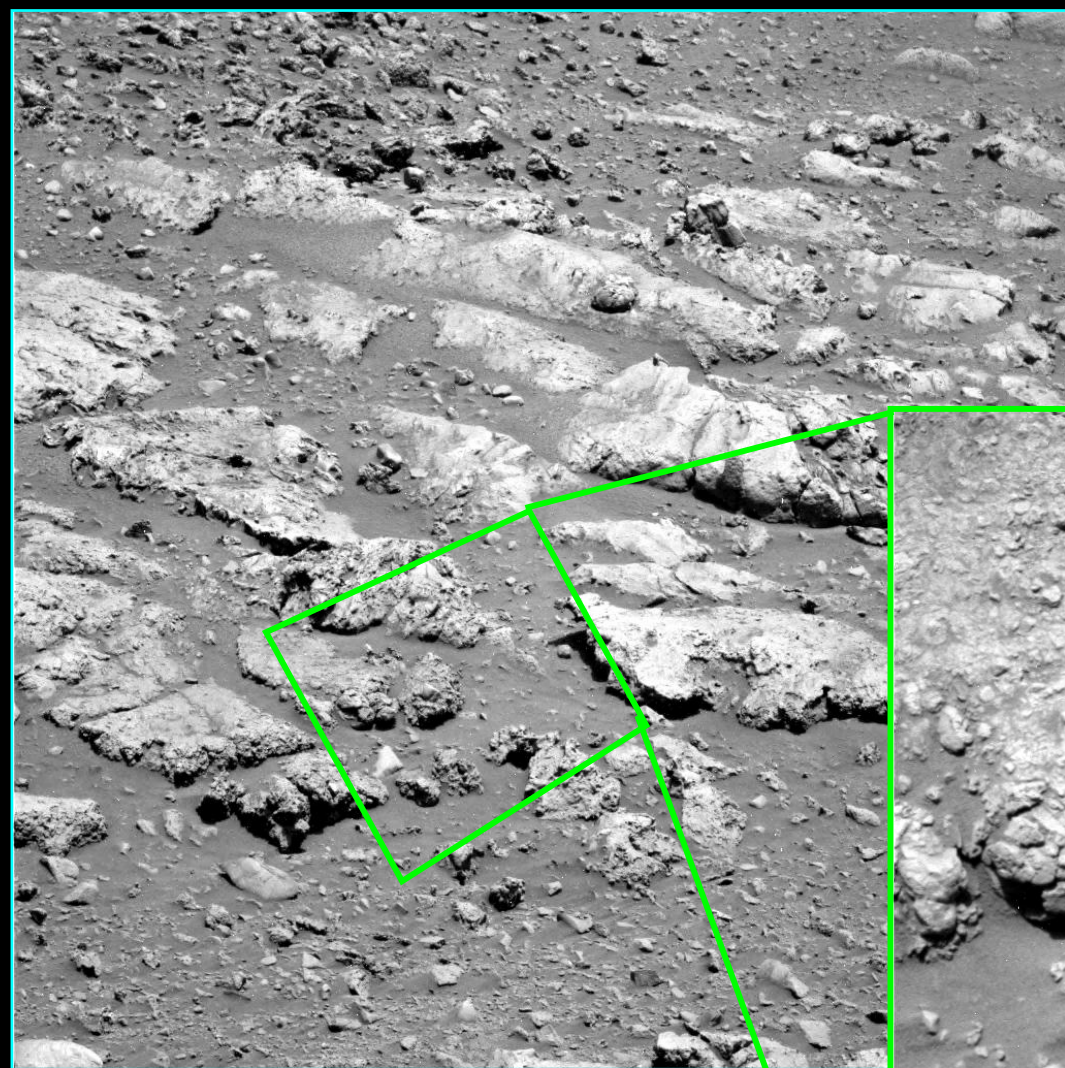


**Près du sommet, de  
nouveaux affleurements**

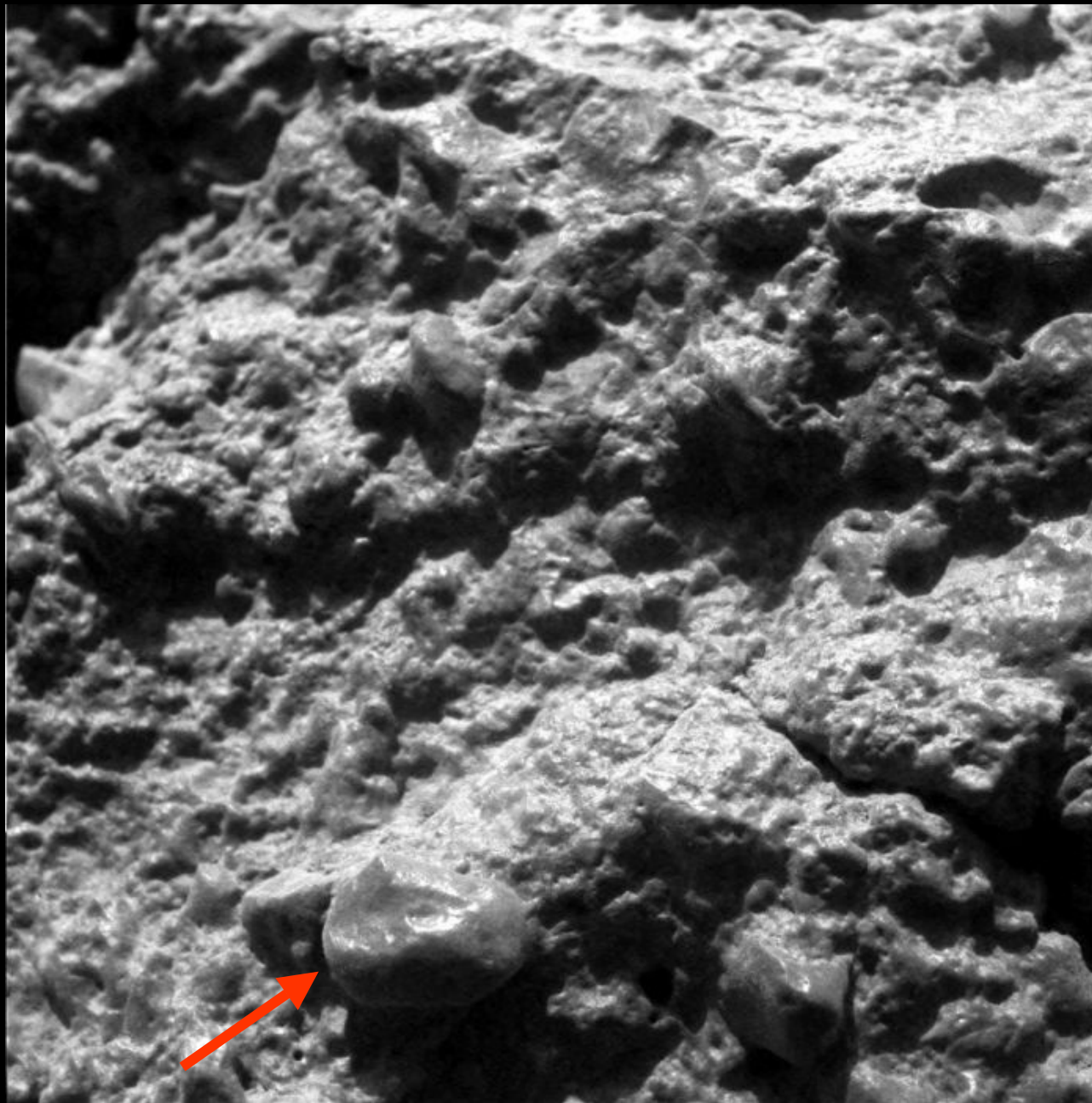
**Détaillons cet  
affleurement vaguement  
stratifié**



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



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



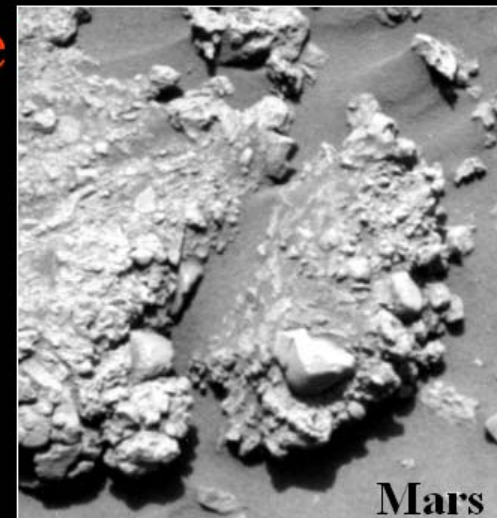
**Certains  
« galets » de  
la brèche  
sont  
arrondis. Ils  
ont été  
« roulés » par  
de l'eau ou  
dans du  
matériel  
« boueux »**





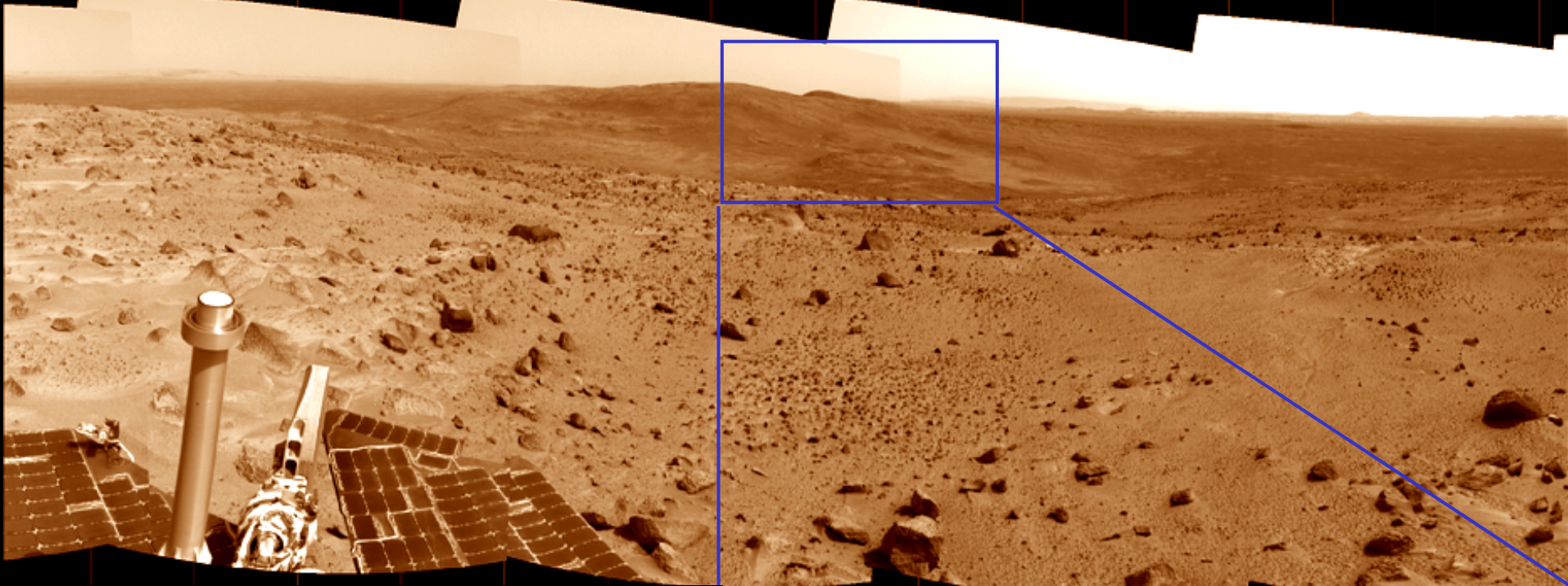
Terre

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

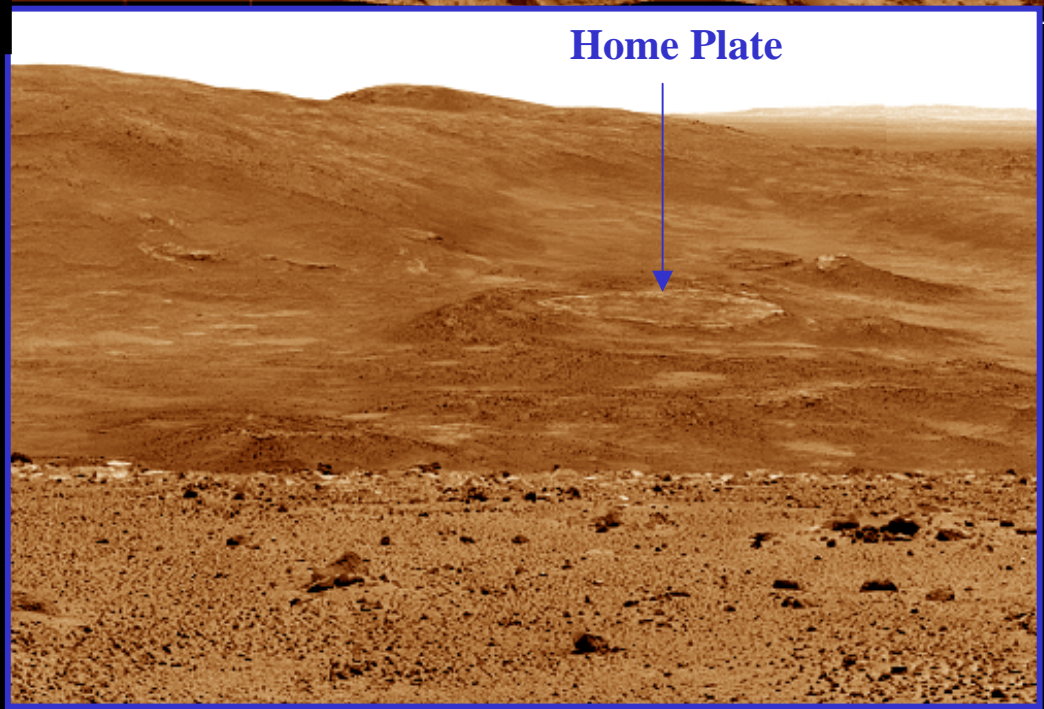


Mars

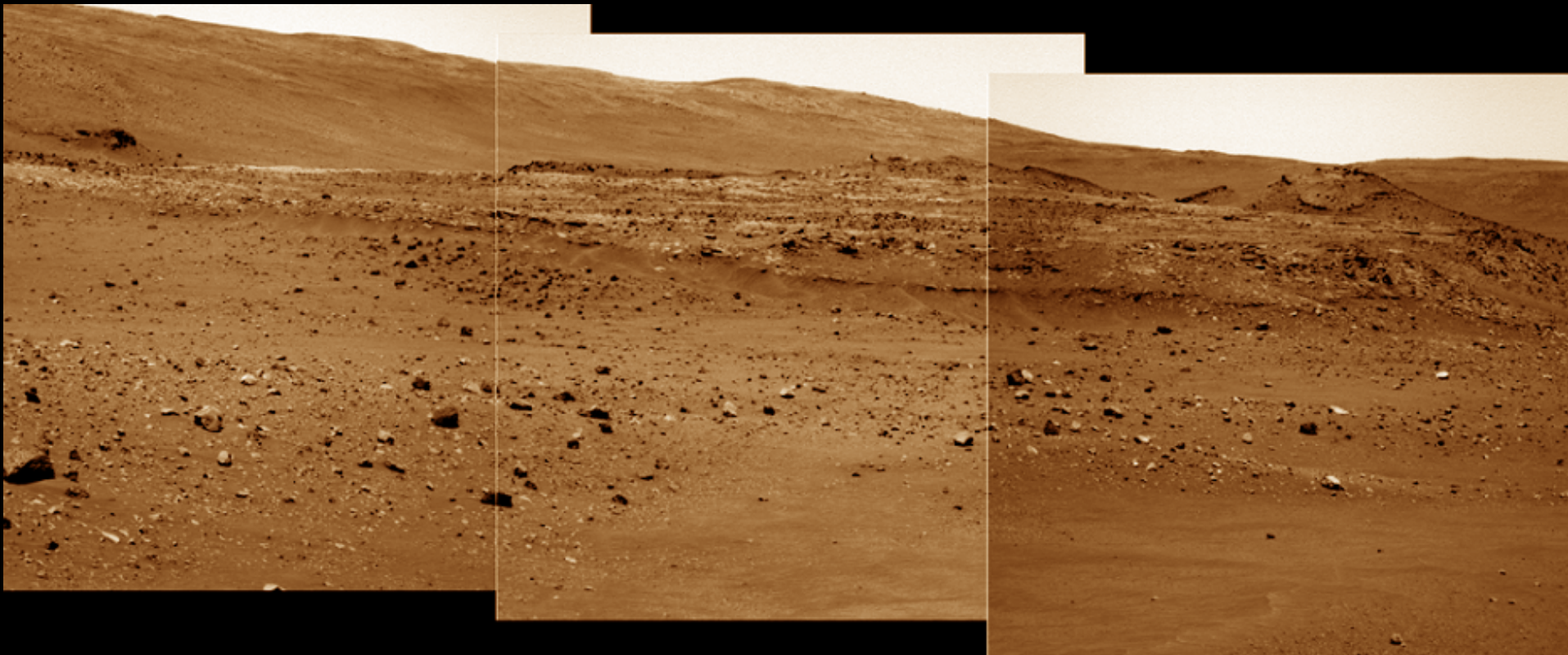




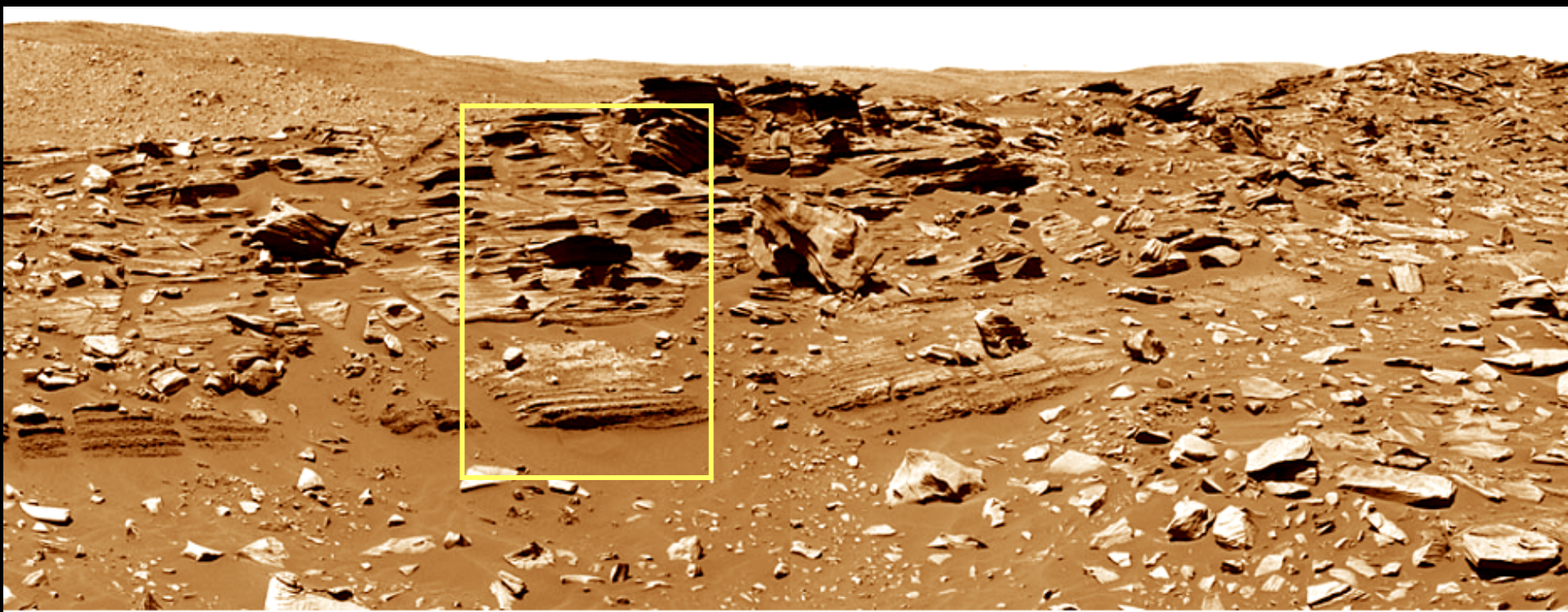
**Voici un panorama pris  
du sommet, vers l'autre  
coté. Une étrange  
structure, Home Plate  
(origine ?) sera la  
prochaine destination de  
Spirit**





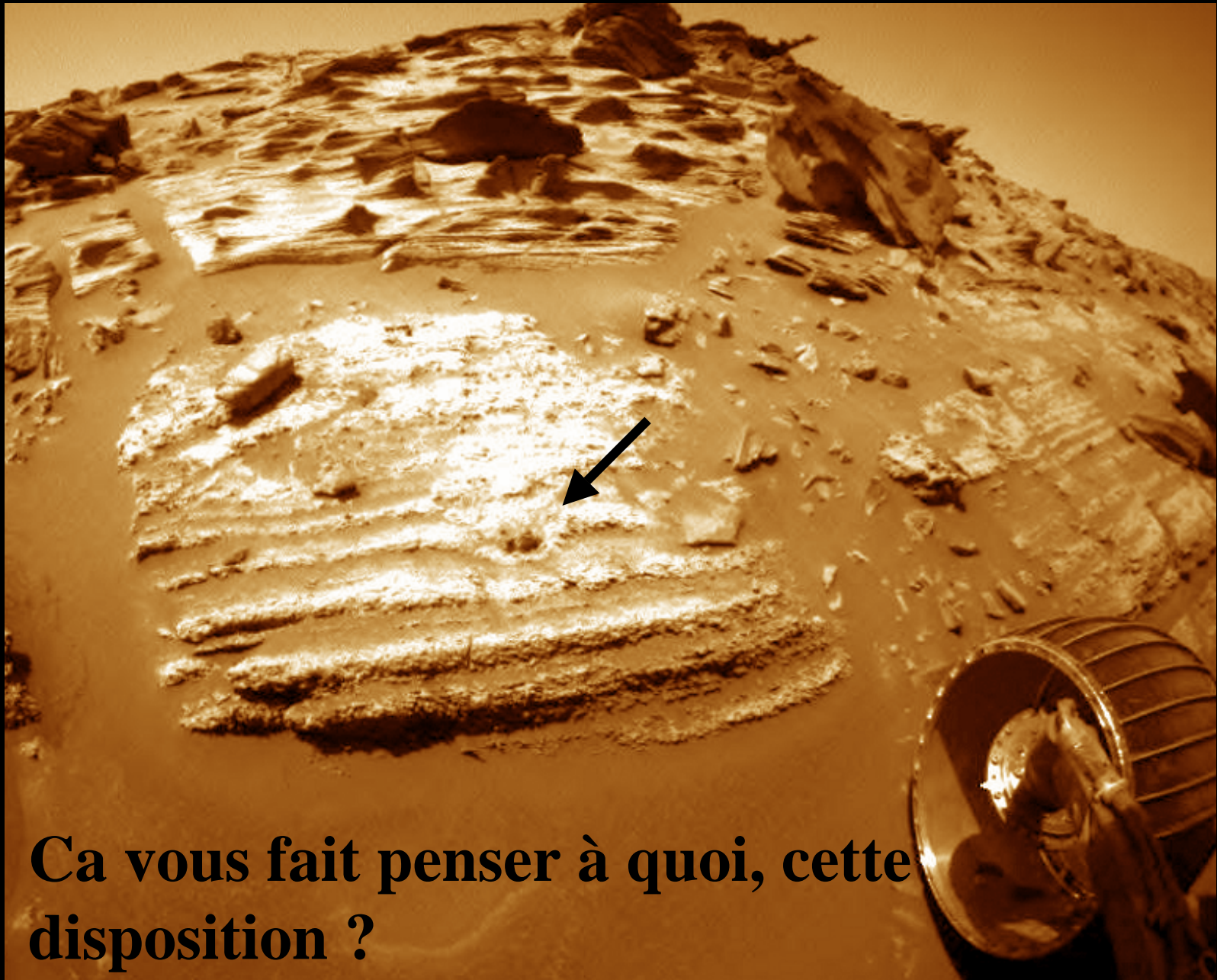


**On s'approche de Home Plate.  
Que de belles strates !**



**On s'approche. Zoomons sur le rectangle jaune.**





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

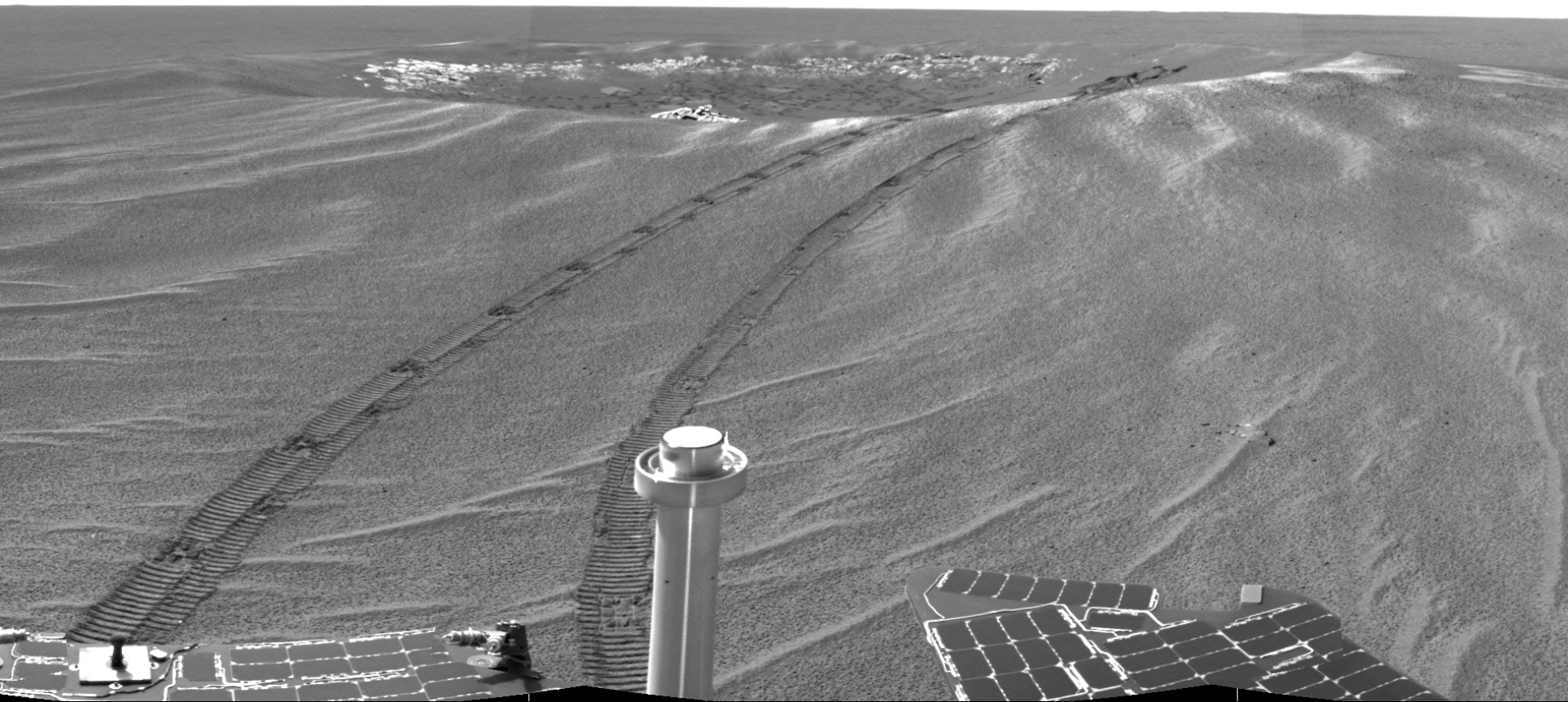


**A des figures de chocs dues à la chute d'objets pesants, éjectés par des éruptions explosives**

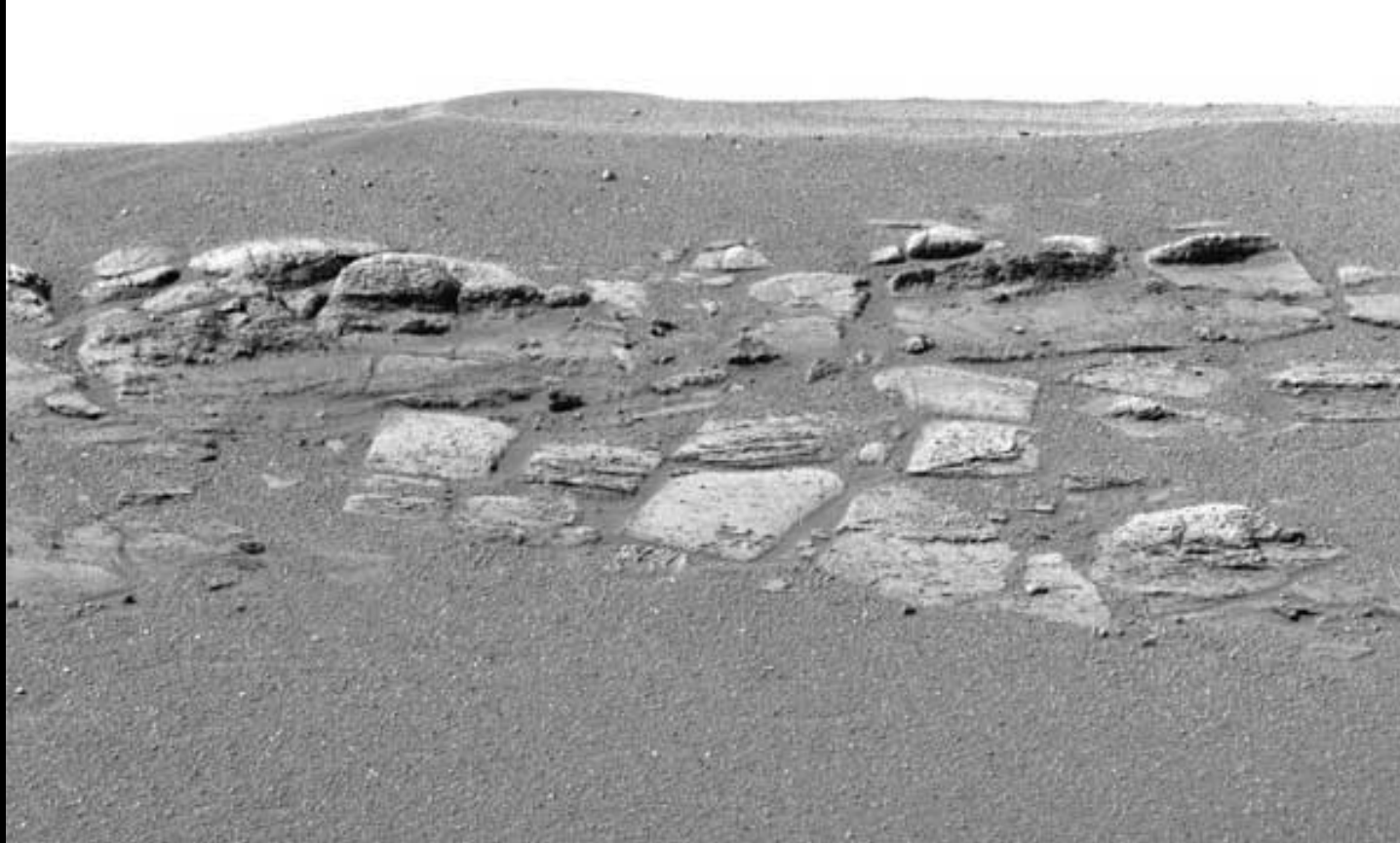
**Et qui dit volcanisme explosif dit gaz, donc très probablement vapeur d'H<sub>2</sub>O.**

**La suite ? Cela fait maintenant plus de 2 ans que Spirit est « coincé » par un rocher. Il va servir de station météo fixe, en attendant la panne finale.**





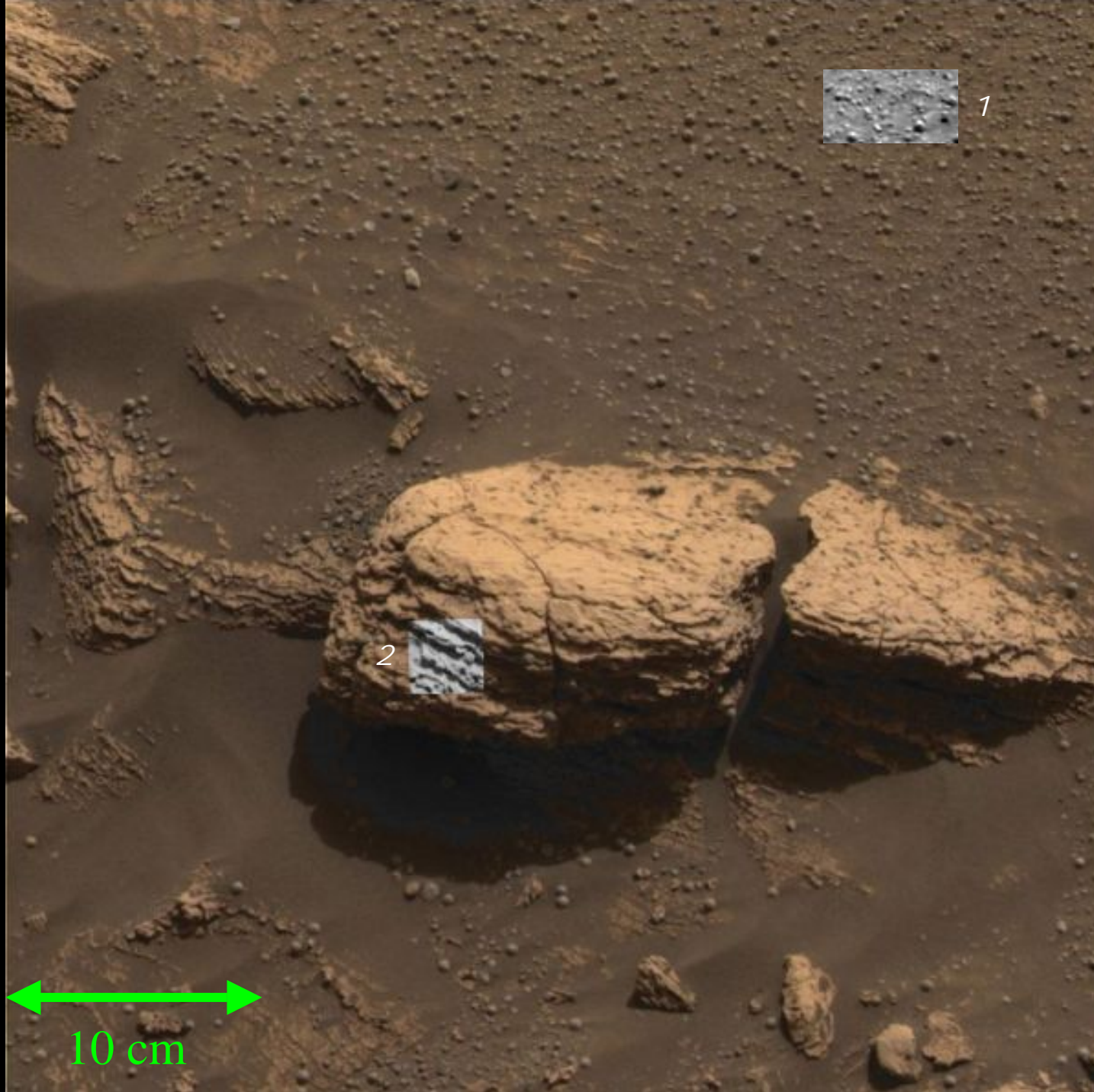
**Après Spirit, voici Opportunity. Ce 2eme robot s'est posé dans la plaine « Méridiani », plus précisément dans le petit cratère Eagle (d = 20m, profondeur de 2 m). Voici les traces qu'il a fait pour en sortir, après 2 mois d'études géologiques approfondies.**



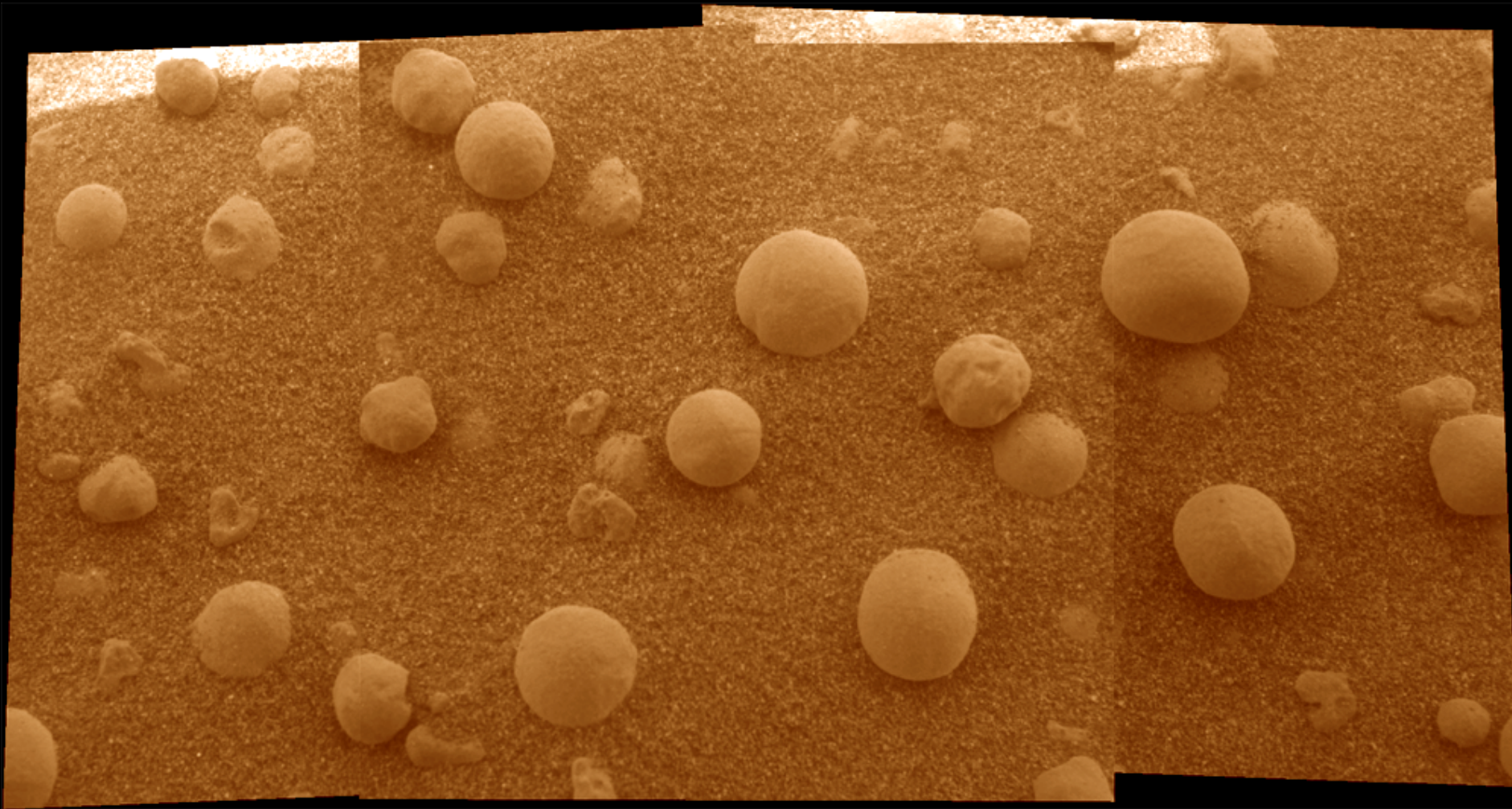
↑  
«Falaise»  
de 75 cm  
↓  
de haut

**Dans ce cratère Eagle, on voit des affleurements disposés en 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 » ... ?**



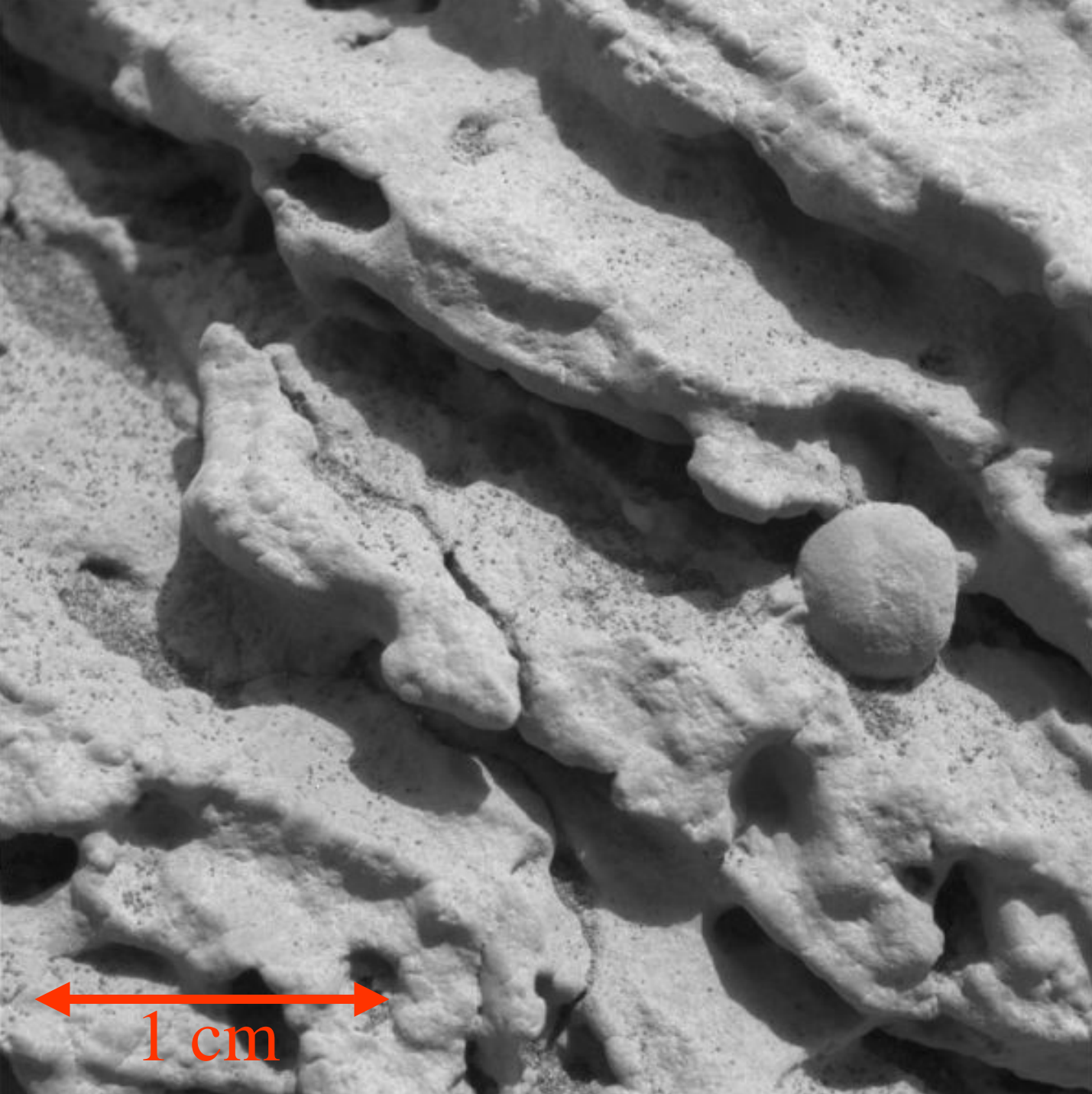


**Dans le sol, des petites boules. Il y en a partout, autour des rochers, dans les couches des rochers. Regardons de près !**



**Des milliers de petites boules, de quelques mm de diamètre et dorénavant appelées «myrtille» (berry).**





**De près,  
voici une  
petite boule  
enchâssée  
dans la  
roche,  
petites  
boules De  
quoi sont-  
elles faites ?**

**Une analyse  
Mössbauer  
différentielle montre  
que ces myrtilles sont  
très riches en hématite  
(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

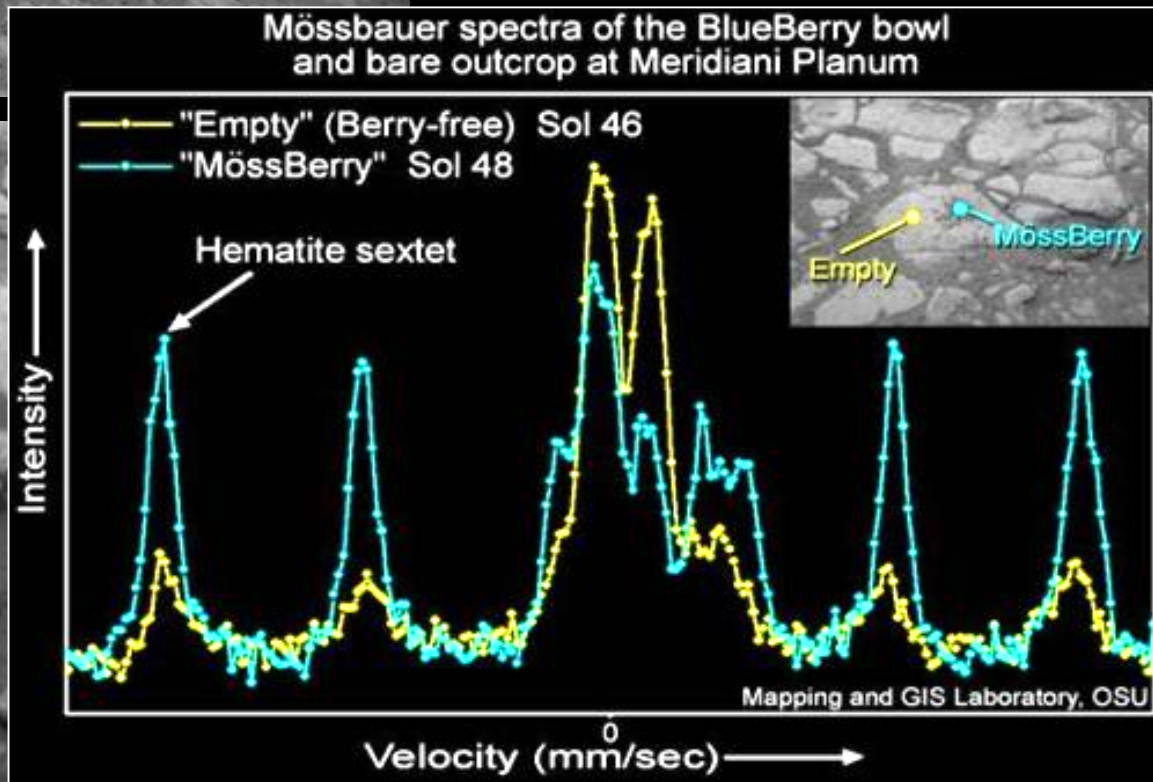






Photo Pierre Thomas

**Sur terre, on connaît de telles sphérules  
(riches en oxyde de fer) dans calcaire,  
des cuirasse latéritique, des argiles ....**



Photo Pierre Thomas

Ici dans les séries  
basales de l'Oligocène  
de Limagne



**Sur Terre, les sphérules en  
hématite (ou limonite) se font  
souvent « in situ » dans des  
sols humides, souvent  
tropicaux**

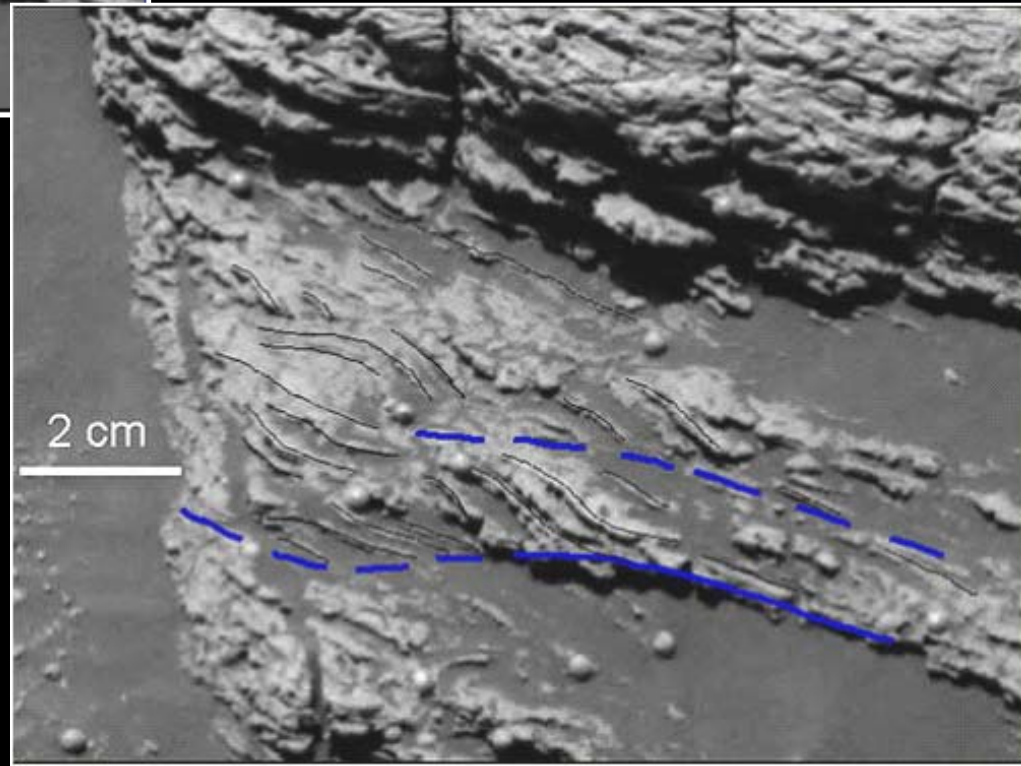
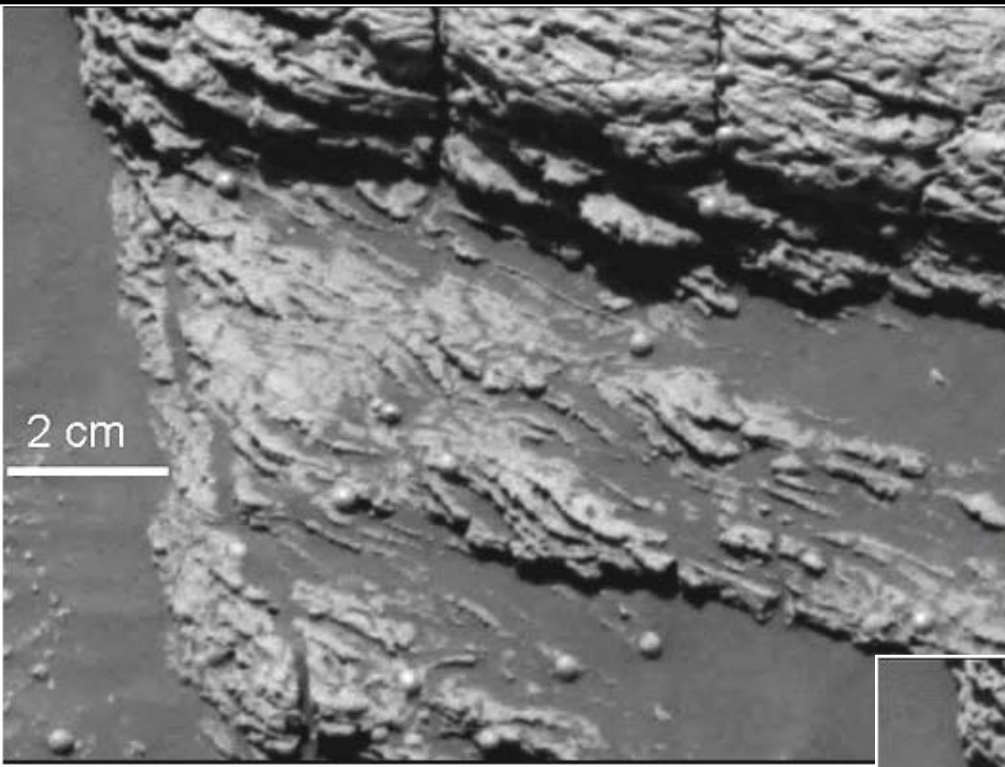


**Les myrtilles  
martiennes  
ressemblent à ces  
sphérules  
pédologiques !**





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

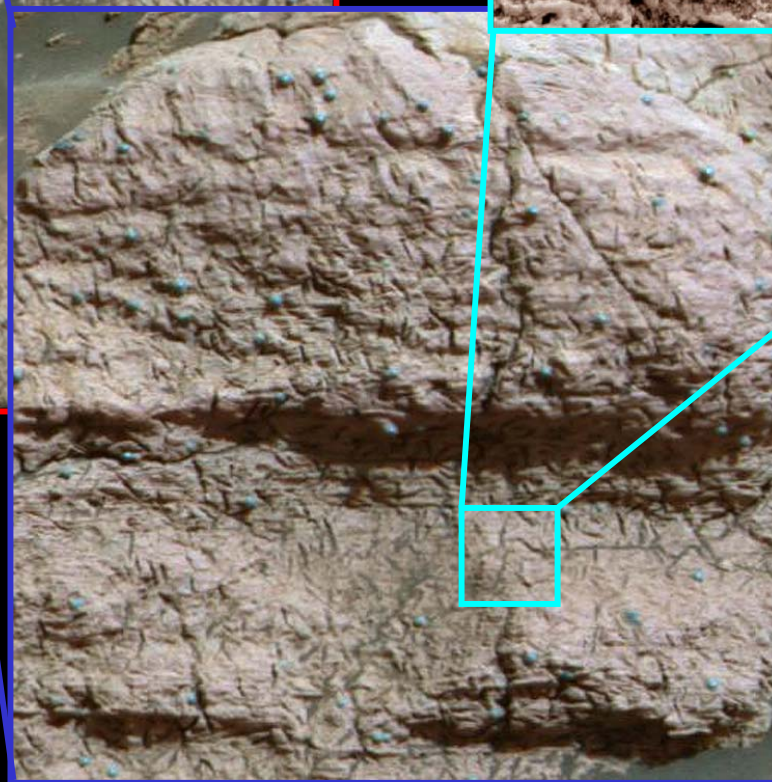
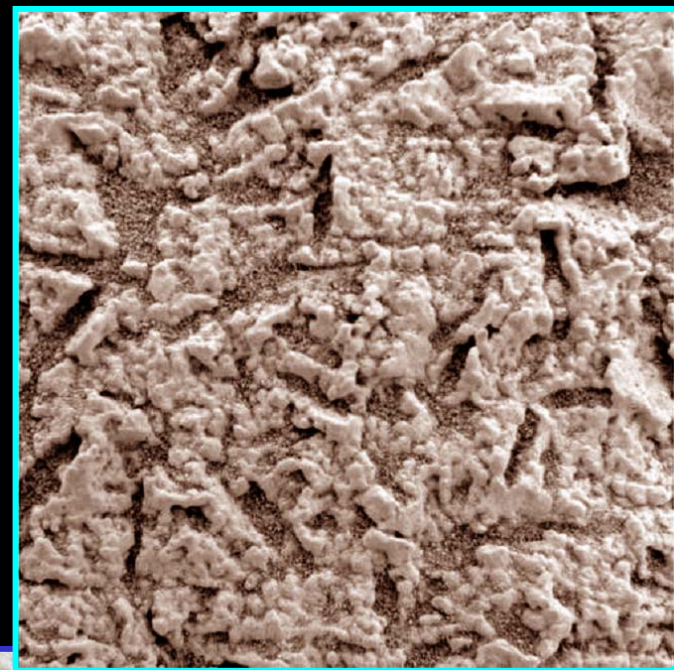
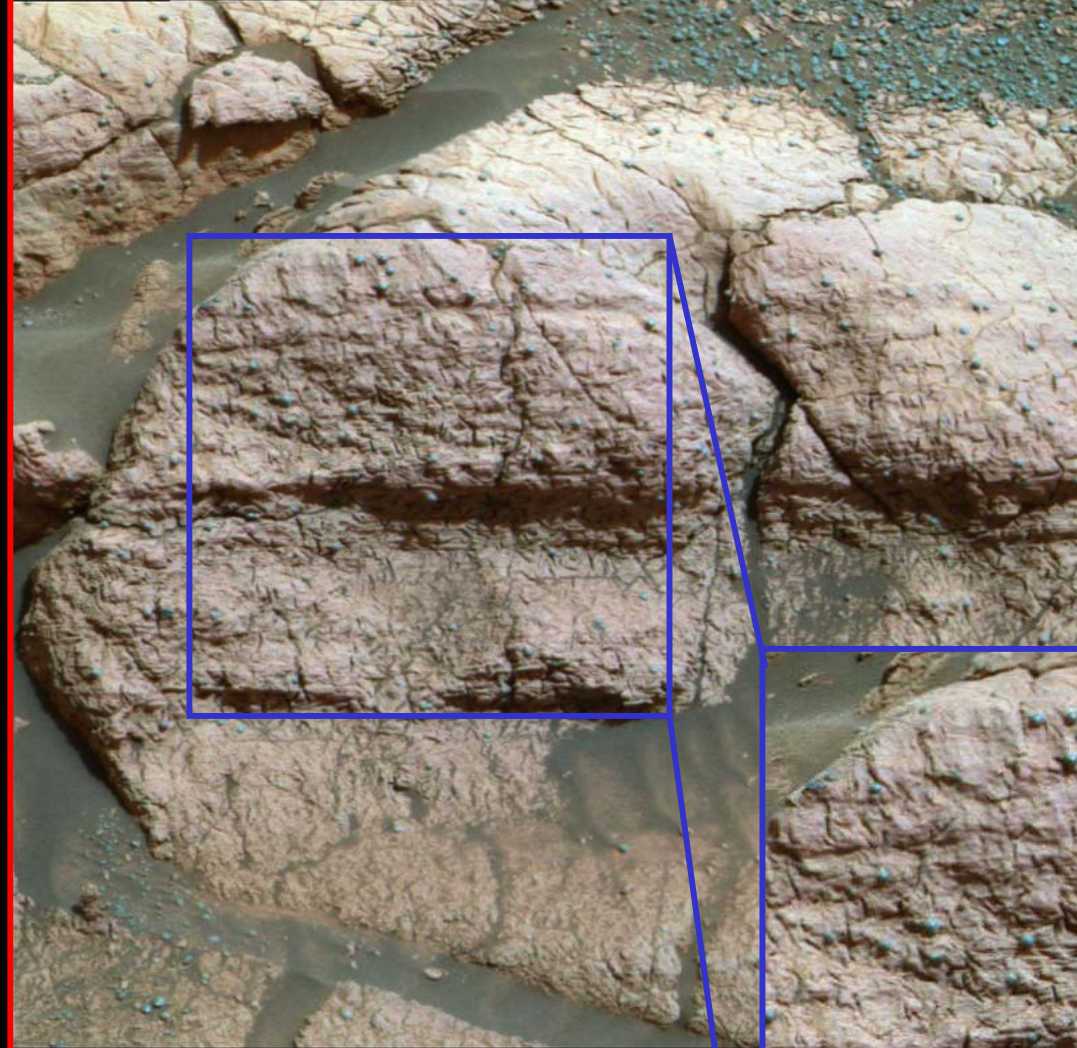


**Et des sédimentologues patentés nous affirment que se sont des stratifications faites sous un courant d'eau**



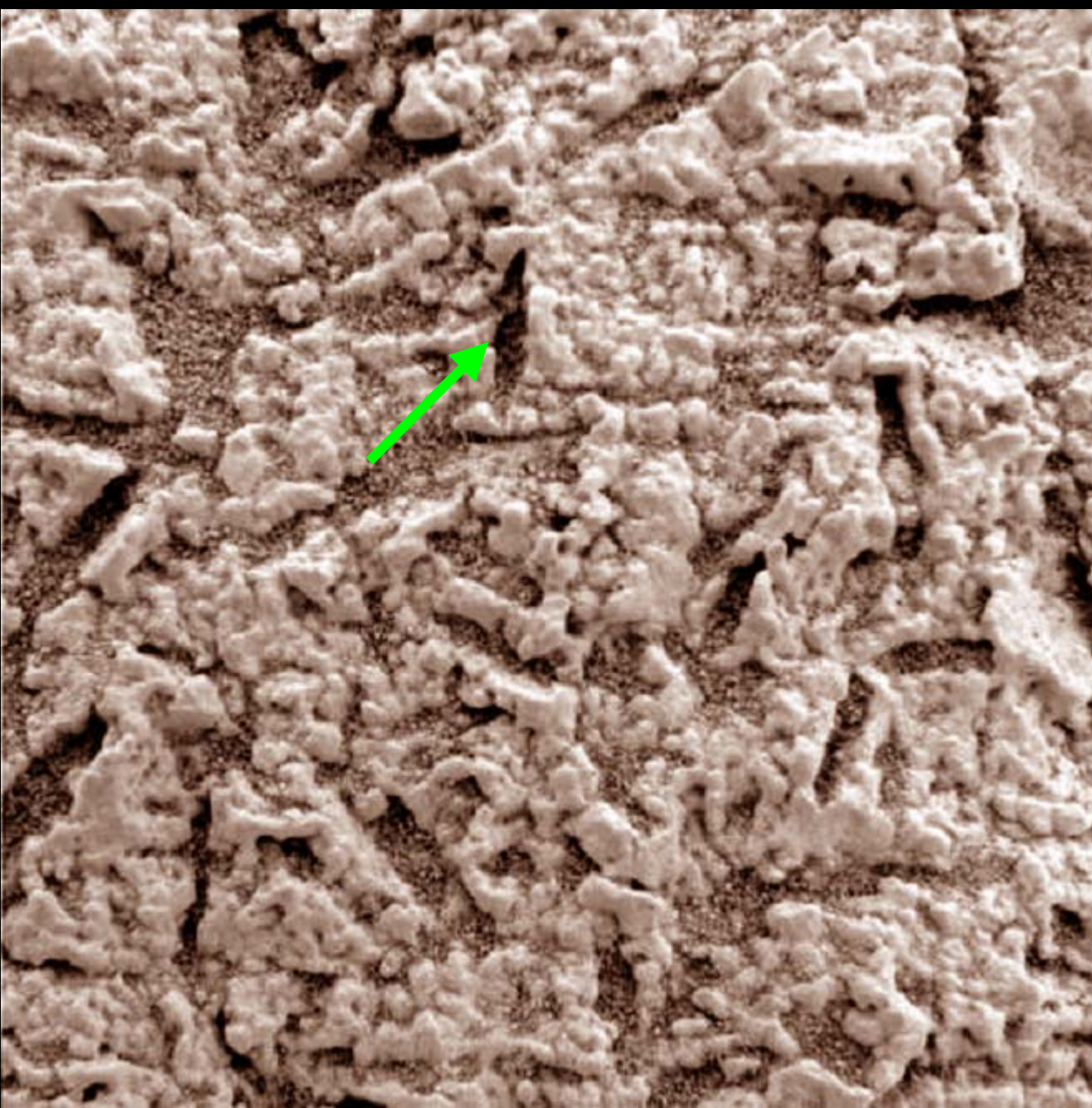
**Une analogie  
terrestre des  
stratifications  
obliques du cratère  
Eagle, ici dans le  
Crétacé supérieur  
des Corbières**





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





**Les « vugs » ?**

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





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

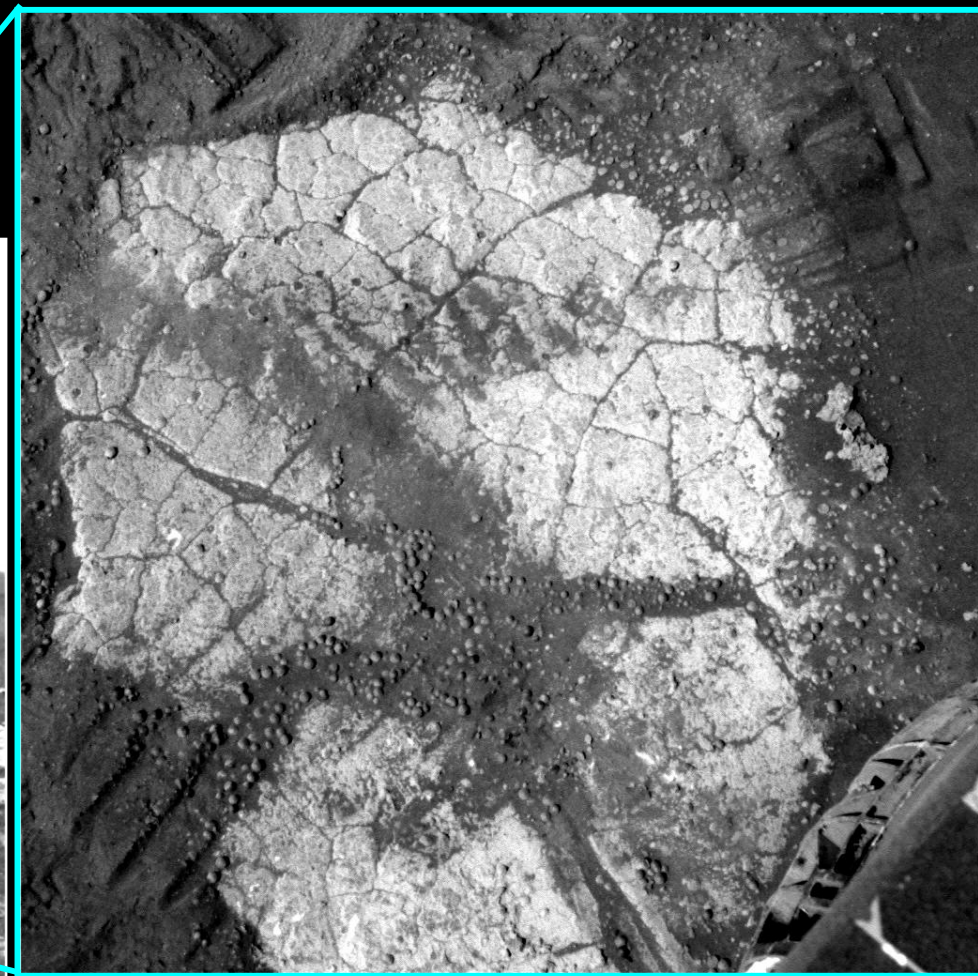
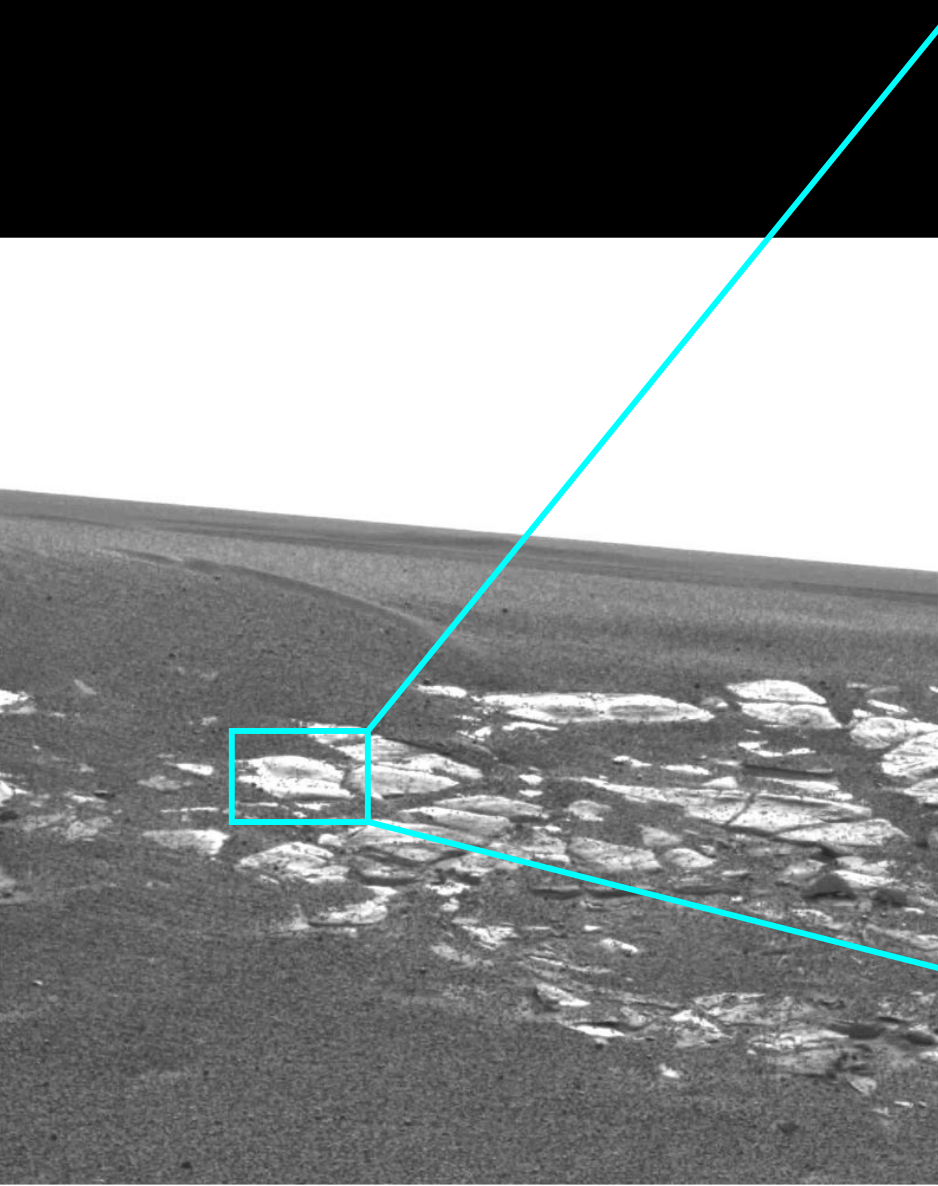






**Gypse, et autres sels,  
ça se dépose dans des  
lacs salés, des lagunes  
en bord de mer ...**

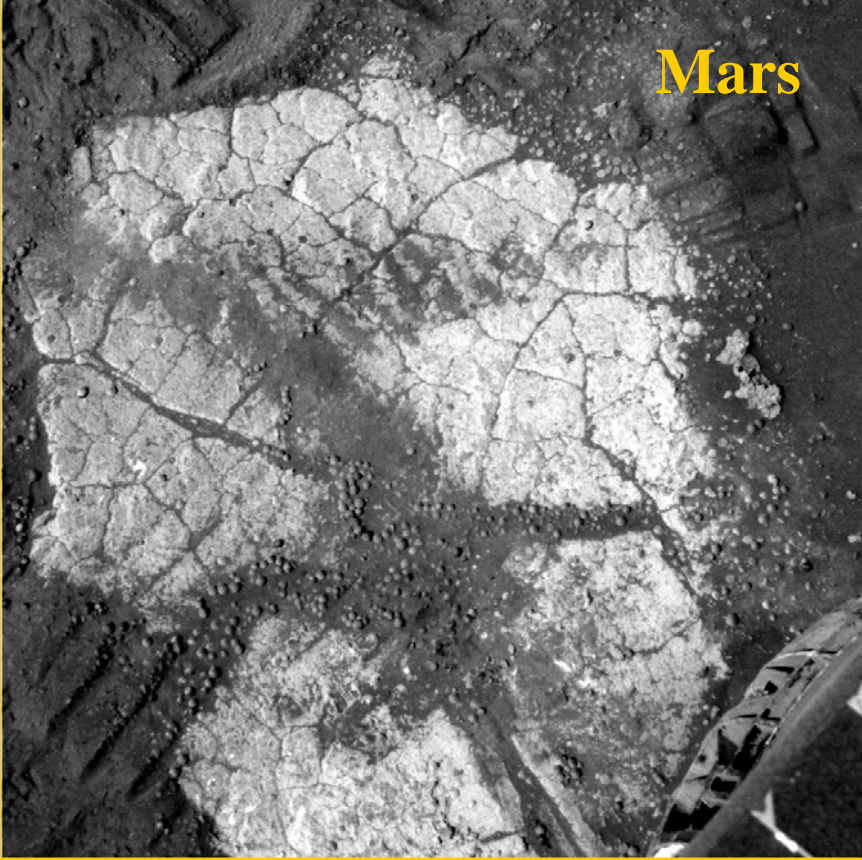




**Allons voir maintenant là où l'on voit les couches  
« par dessus » !**



Mars



Terre



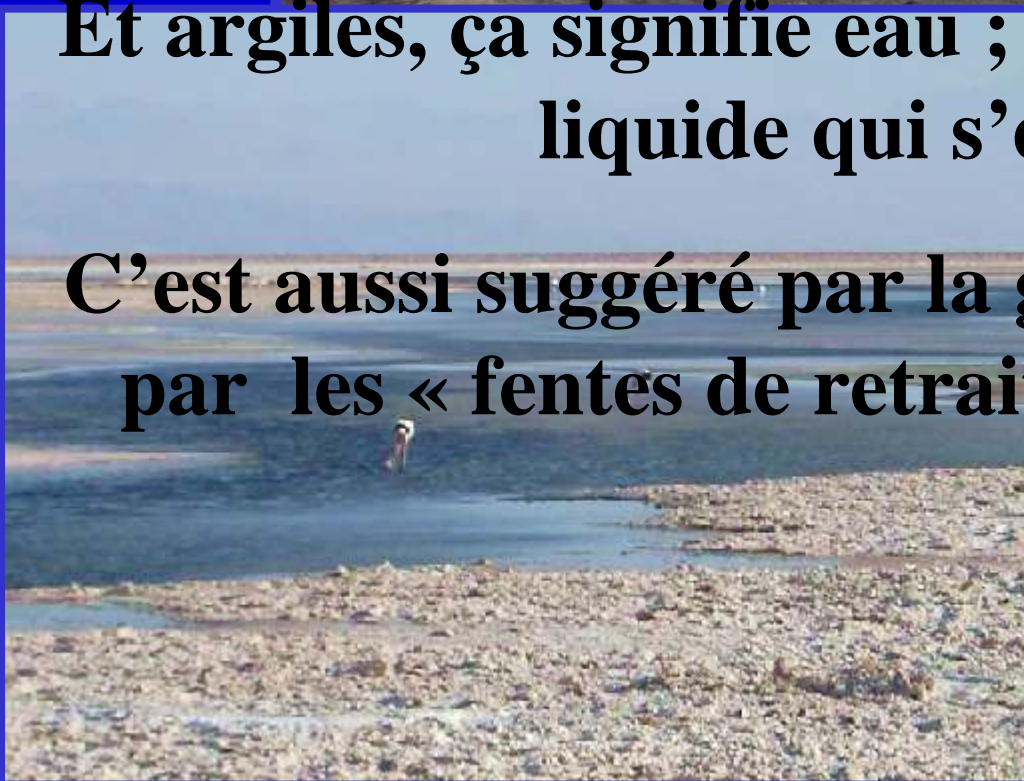
**Certaines de couches, vues de dessus, présentent un réseau de fentes polygonales, comme une argile qui se rétracte ! Et sur Terre, ces fentes de rétractions se font en général par dessiccation !**

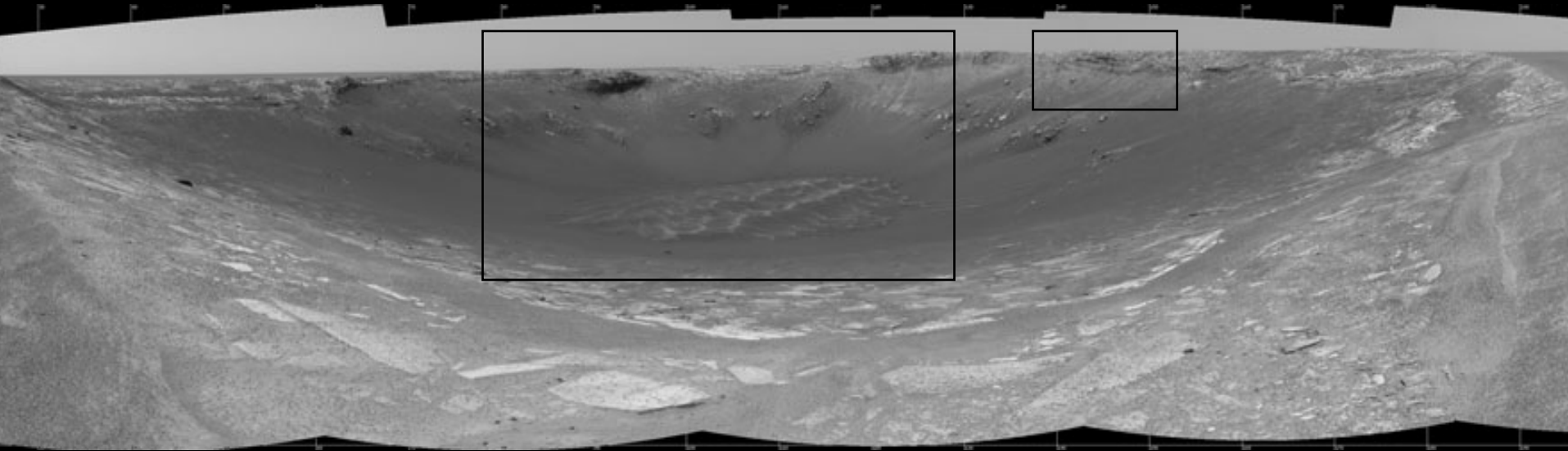
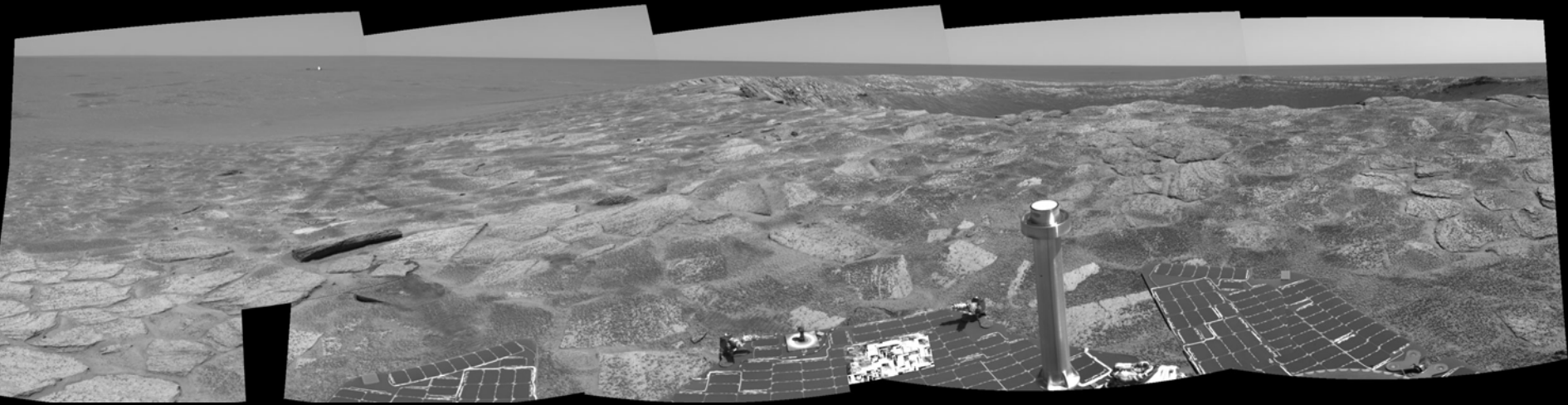


**Globalement, la roche d'Eagle ressemble, chimiquement et minéralogiquement à des argiles, argiles salines, riches en Fe, Ca et Mg, bien que les raies spectrales des argiles n'aient pas été identifiées à cet endroit précis .**

**Et argiles, ça signifie eau ; et sels, ça signifie eau liquide qui s'évapore.**

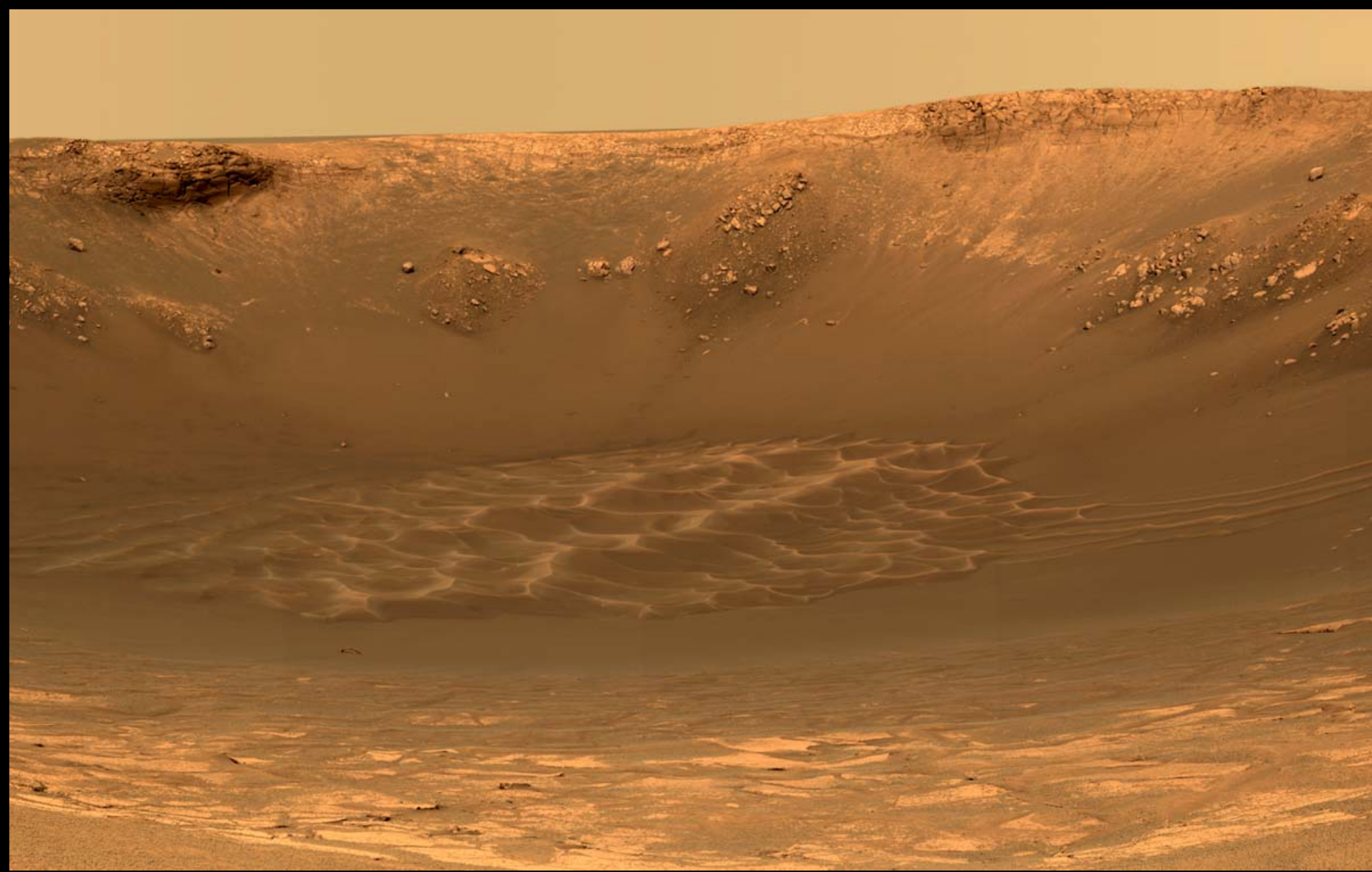
**C'est aussi suggéré par la géométrie des strates, par les « fentes de retrait » (dessiccation ?) !**



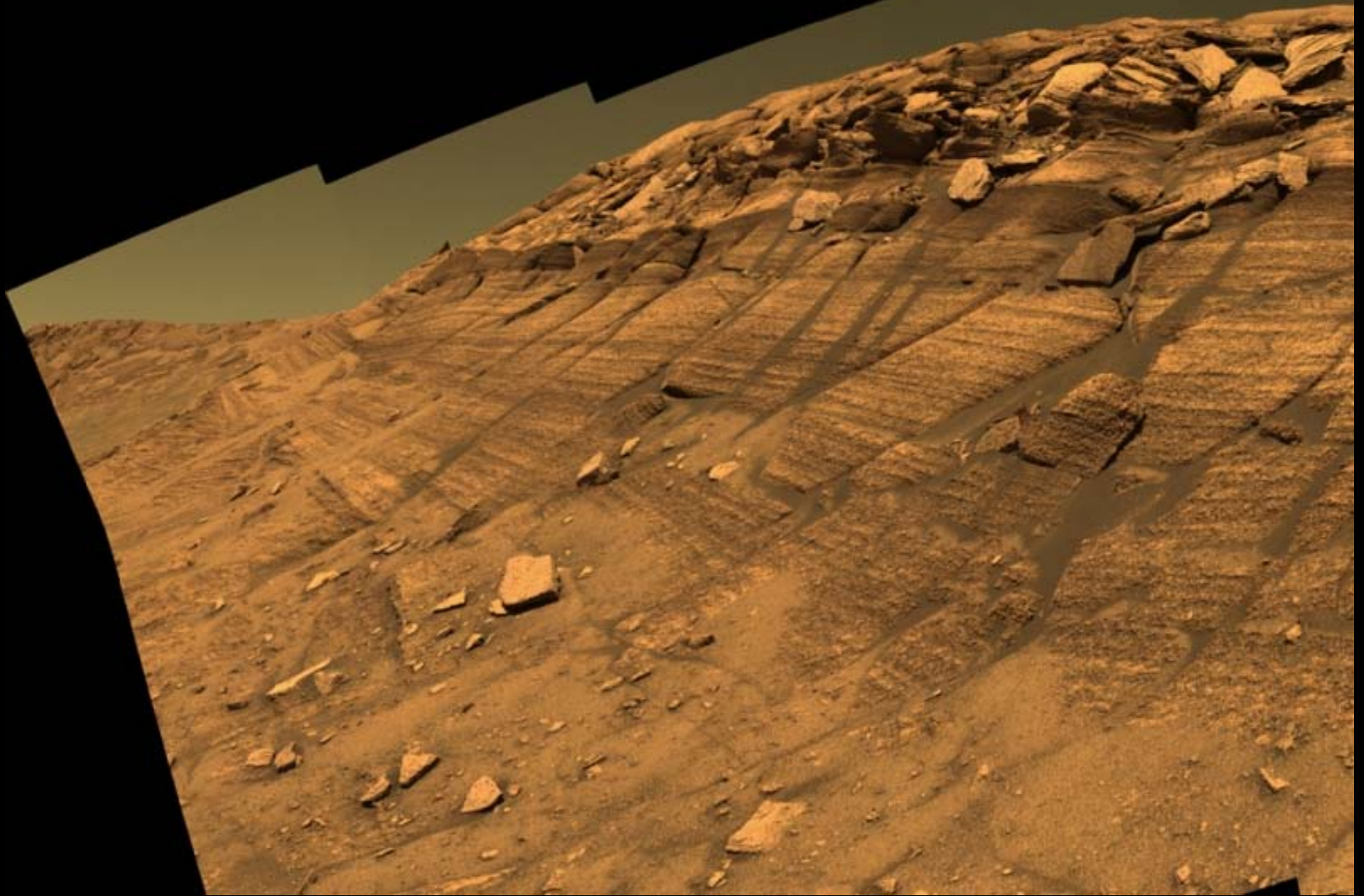


**Après 2 mois dans son petit cratère, et 600 m de trajet dans la plaine, Opportunity arrive au bord du cratère « Endurance » (D = 200 m, P = 20m)**





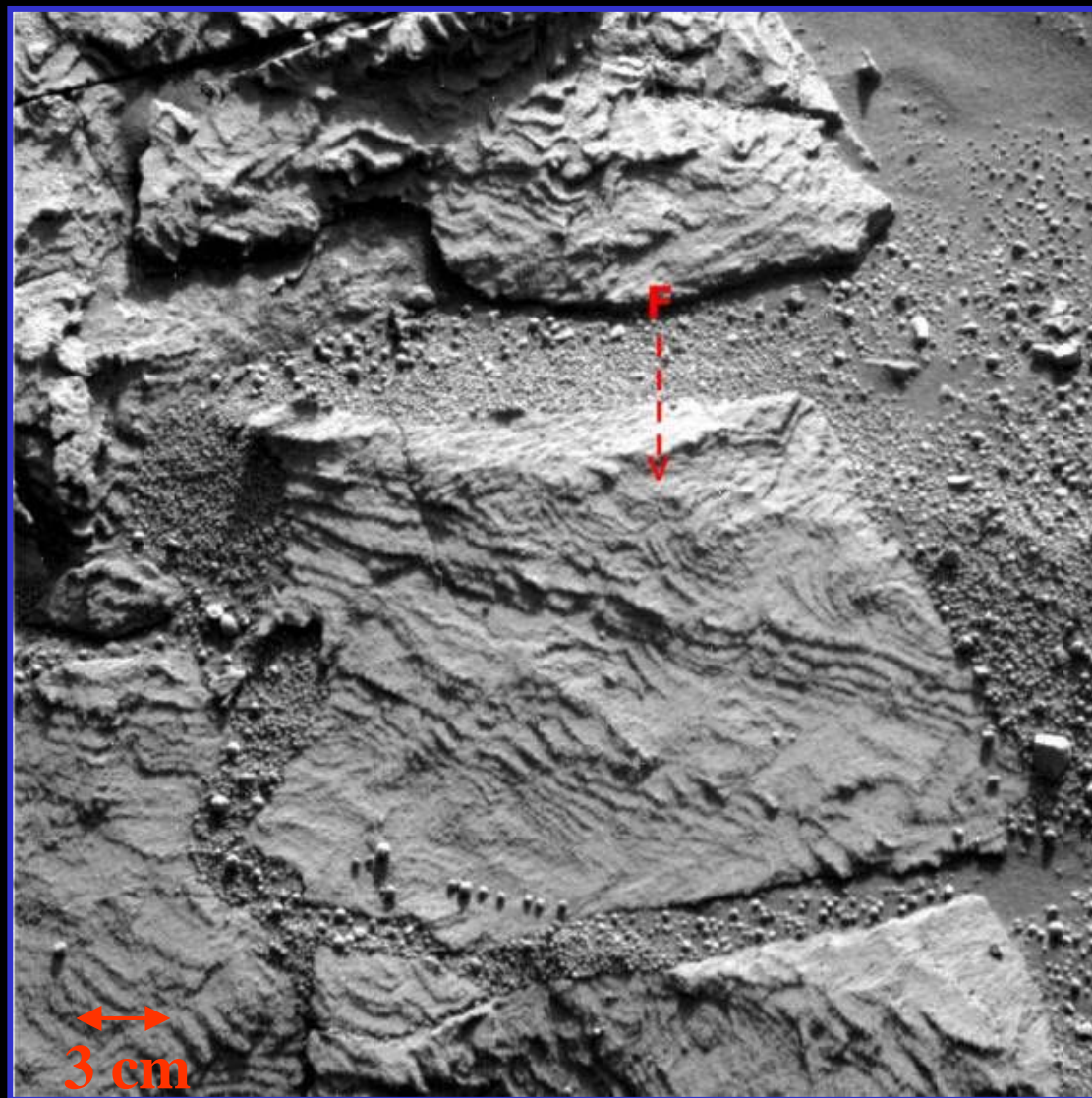
**Au fond, un joli champ de dunes**



**Les bords sont parfois constitués de belles falaises,  
ici Burn Cliff**



**Dans un autre 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.**






**On peut reconstituer la suite des couches et donc la succession des environnements passés dans la région d'Endurance : un environnement de plages en bord d'un lac salé peu profond, entouré de dunes**


### Facies sédimentaire


 **Ripple marks et stratifications entrecroisées sous-aquatiques (quelques cm de profondeur)**

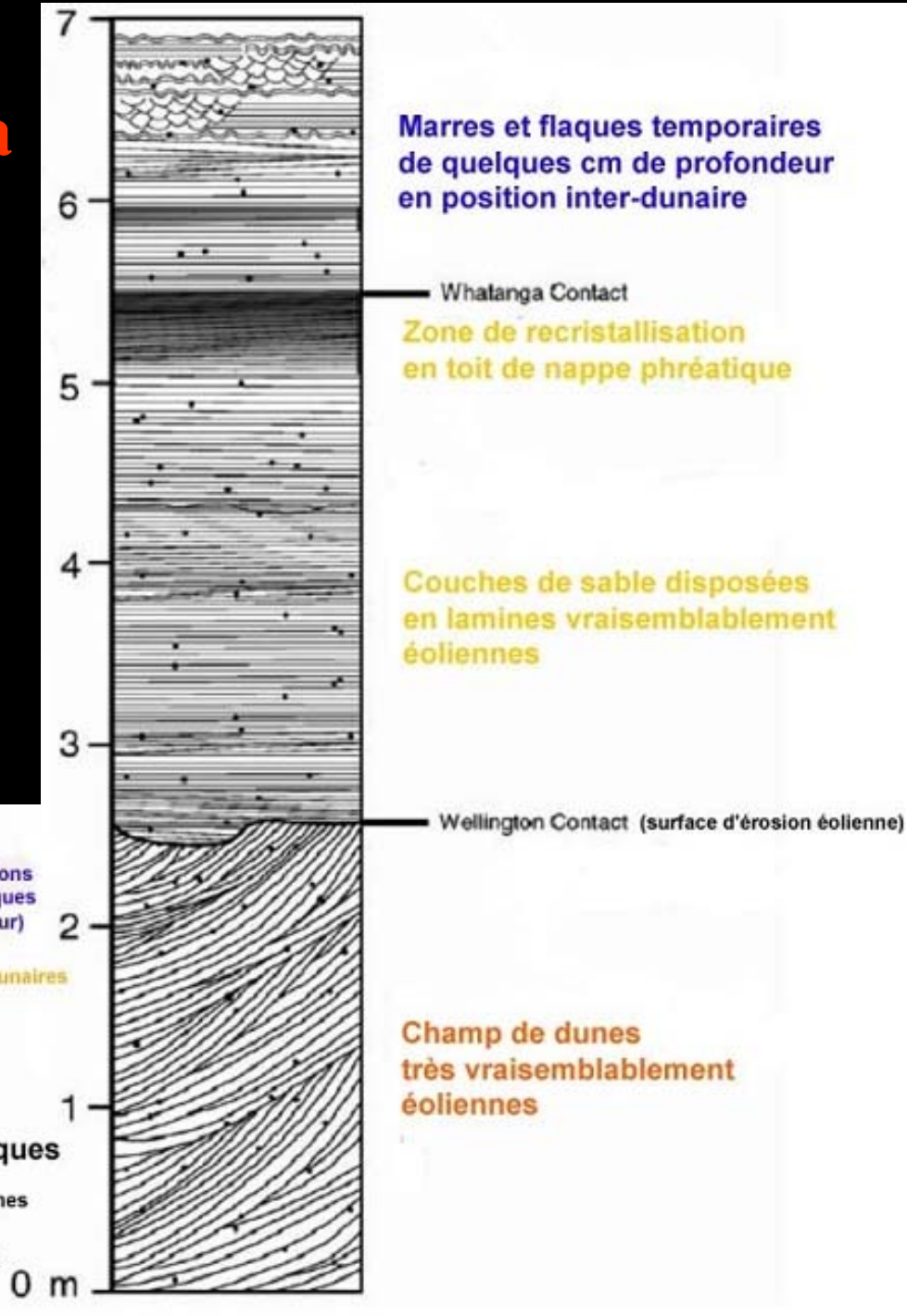
 **Couches sableuses interdunaires sèches à humides**

 **Stratifications obliques de dunes probablement éoliennes**

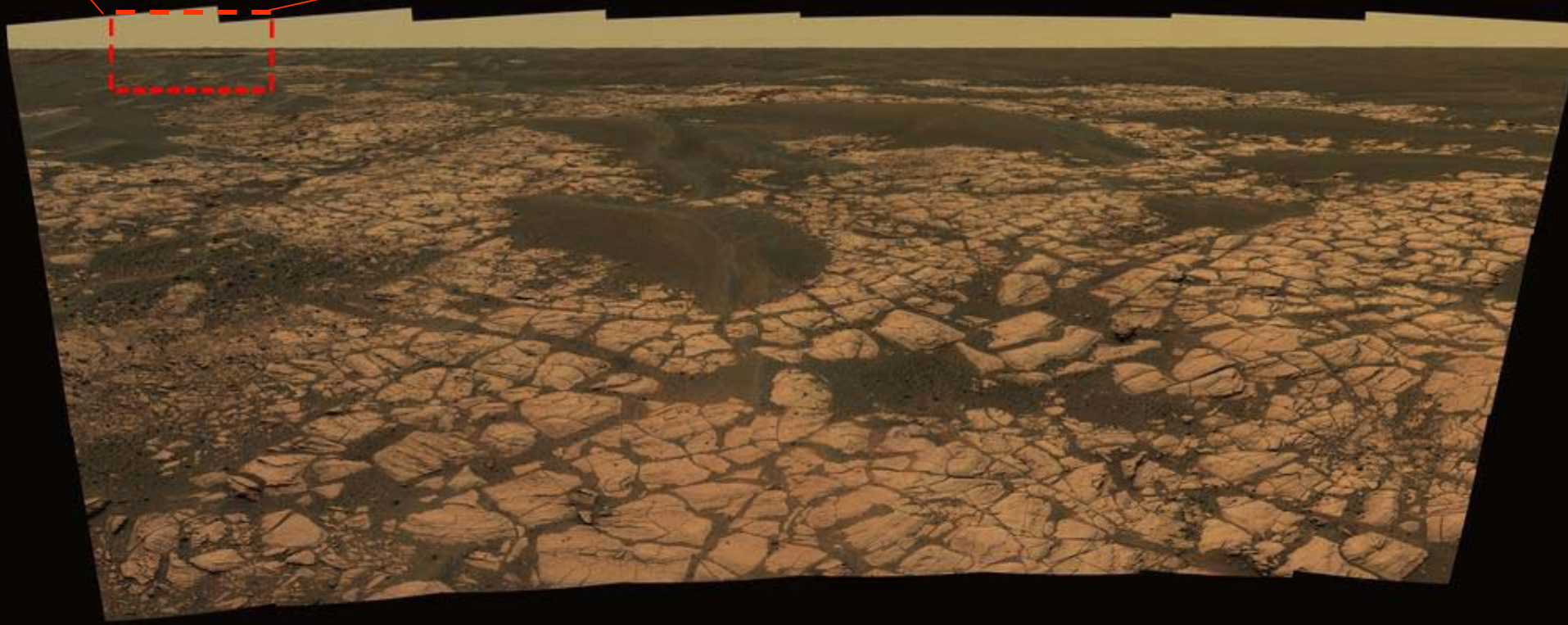
### Modifications diagénétiques

 **Concrétionnements en zones phréatiques (myrtilles)**

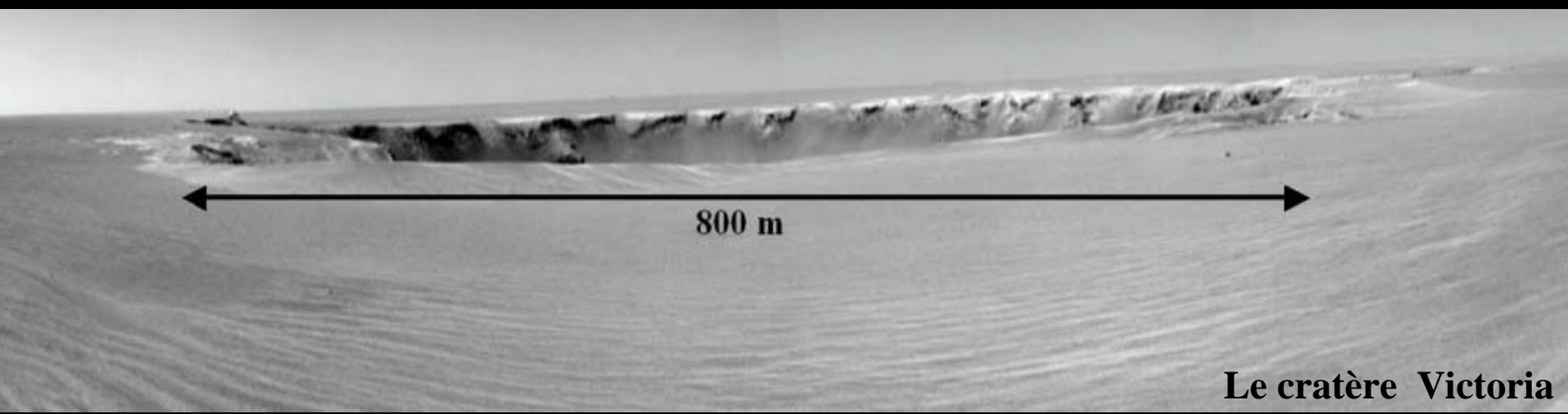
 **Recrystallisations en zone de toit de nappe phréatique**



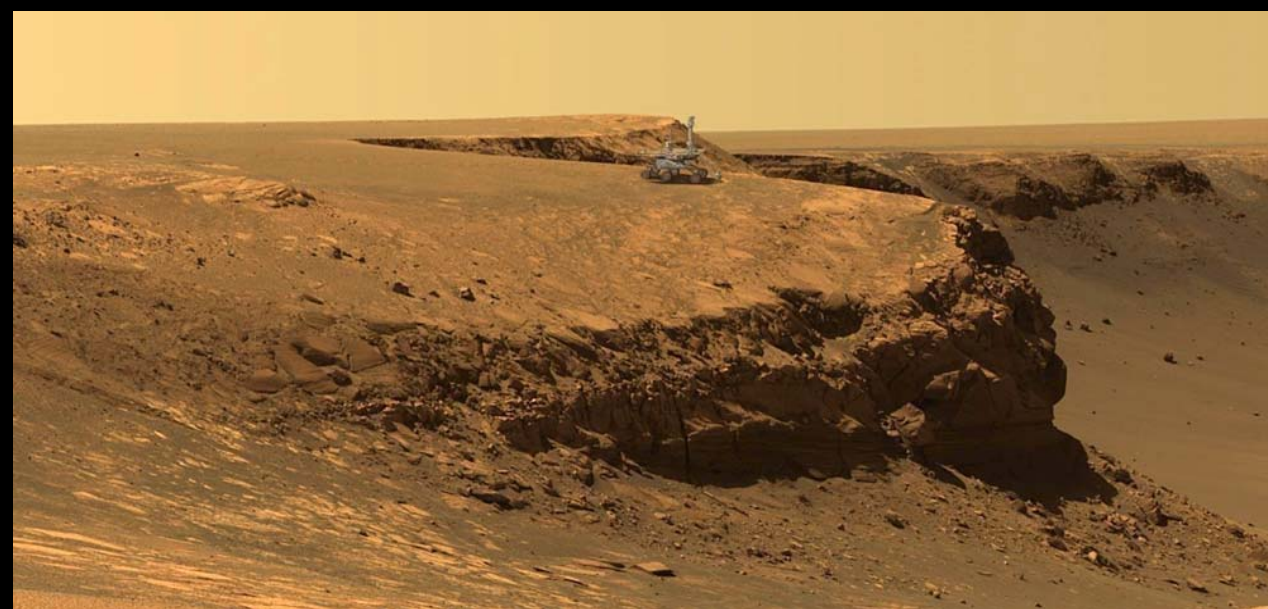
**Après avoir quitté le cratère, Opportunity roule des kilomètres dans une plaine. Entre les dunes, on découvre toujours le même type de roche.**







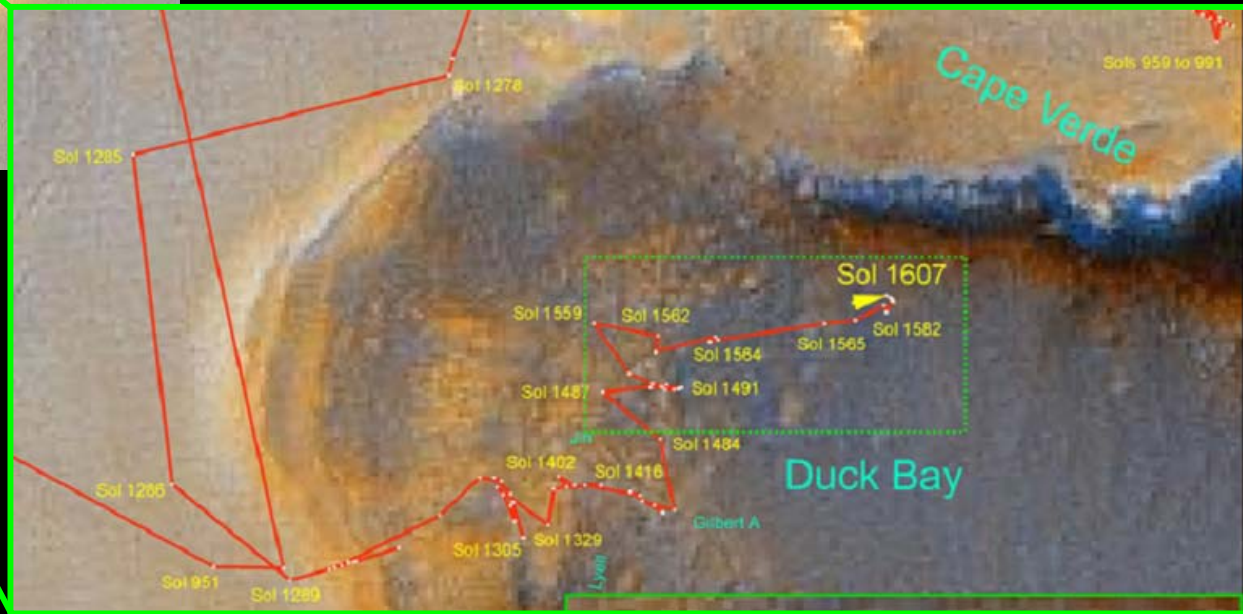
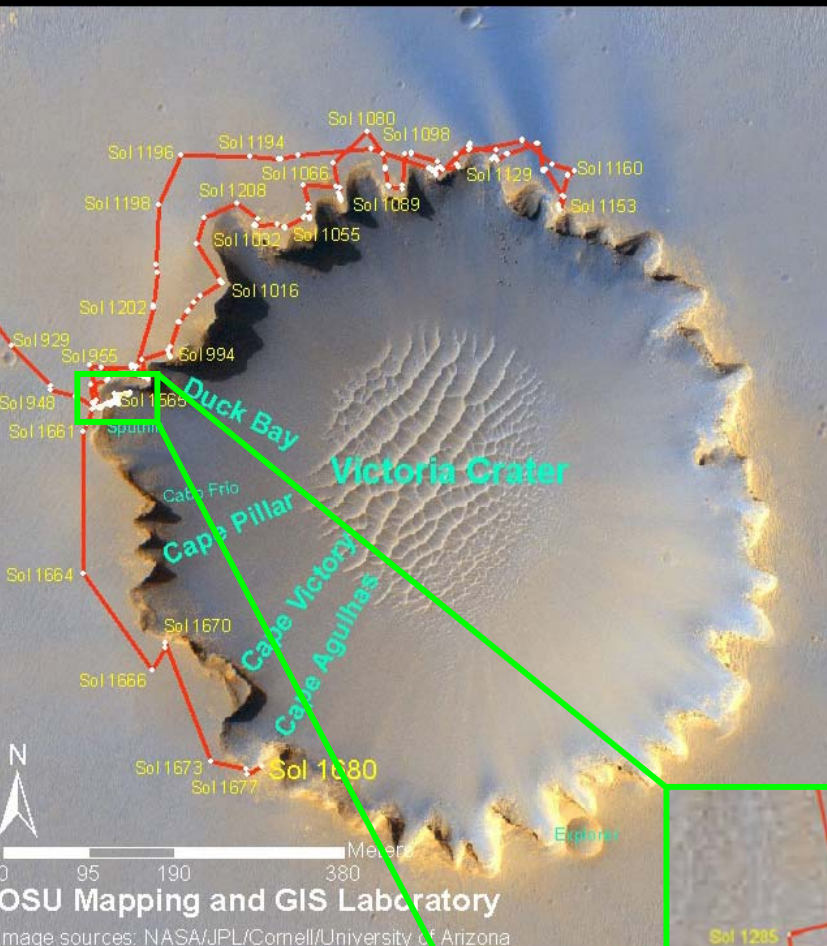
Le cratère Victoria



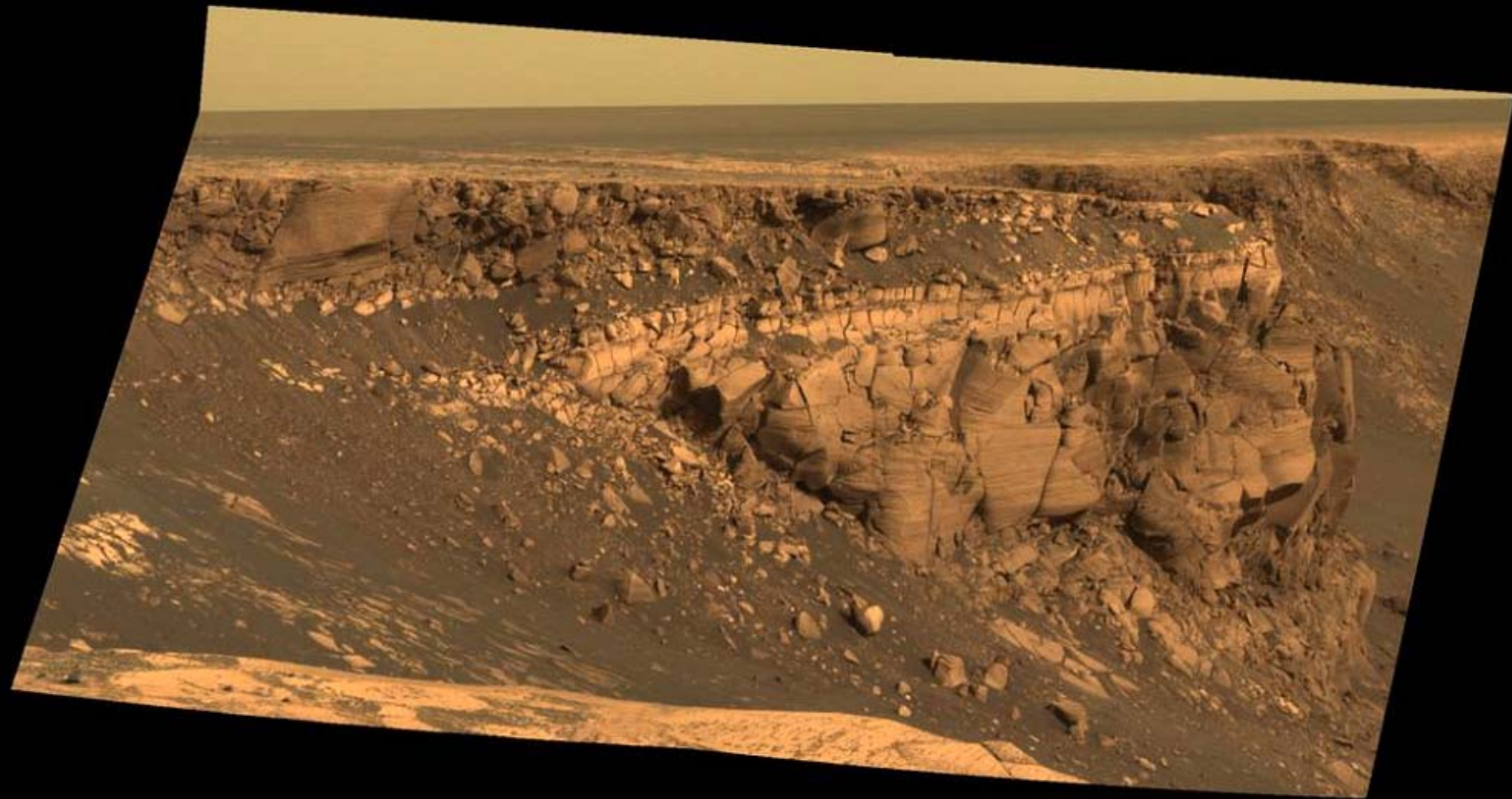
**Et après avoir roulé plus de 10 km, notre robot atteint un grand et profond cratère, le cratère Victoria. Après**

**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 ??**

**Opportunity étudie les bords du cratère, descend dans le cratère, y reste plus de 300 jours ...**







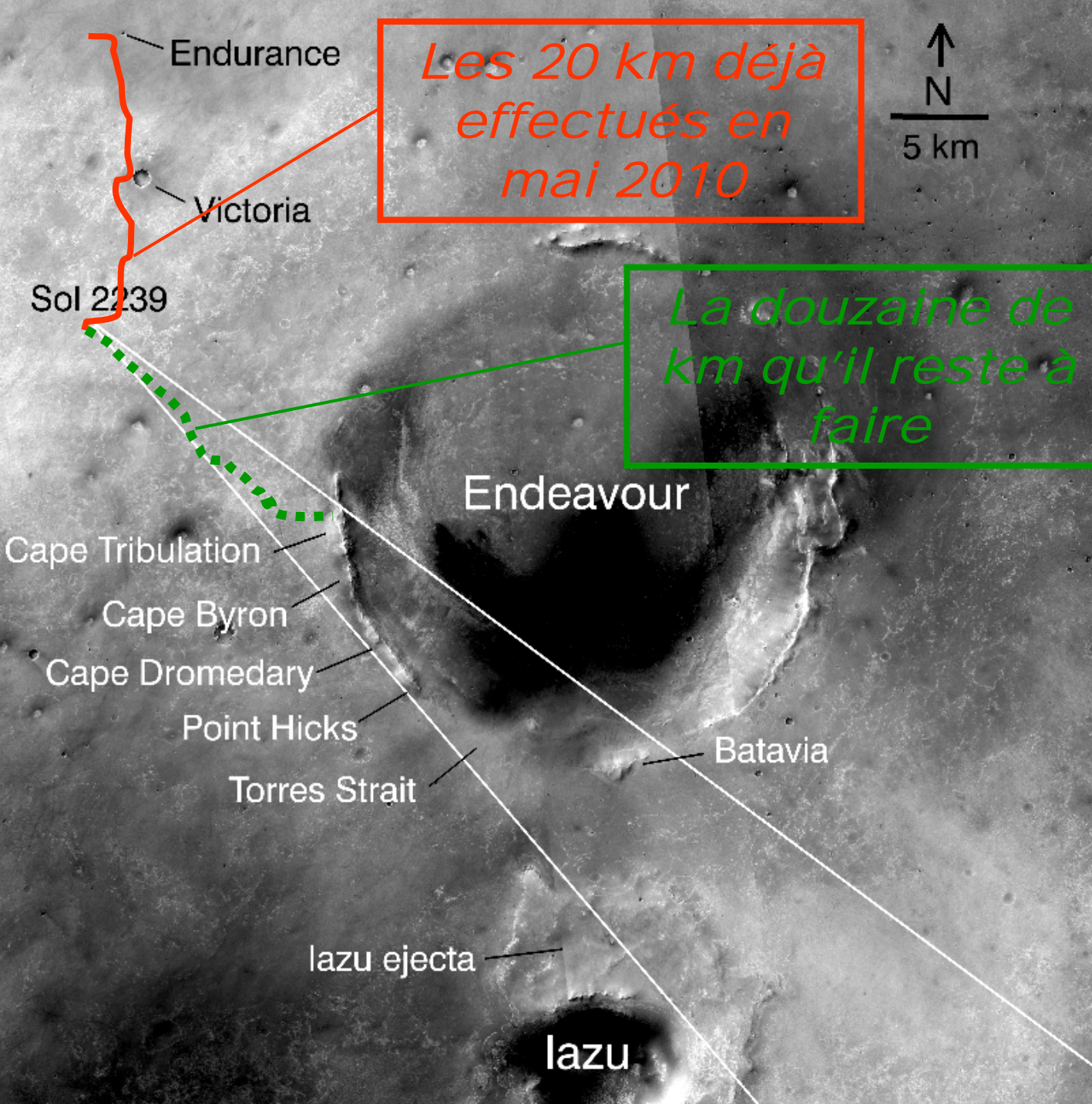
**C'est beau et spectaculaire, mais y aura-t-il du nouveau ?**

**... mais 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 !**



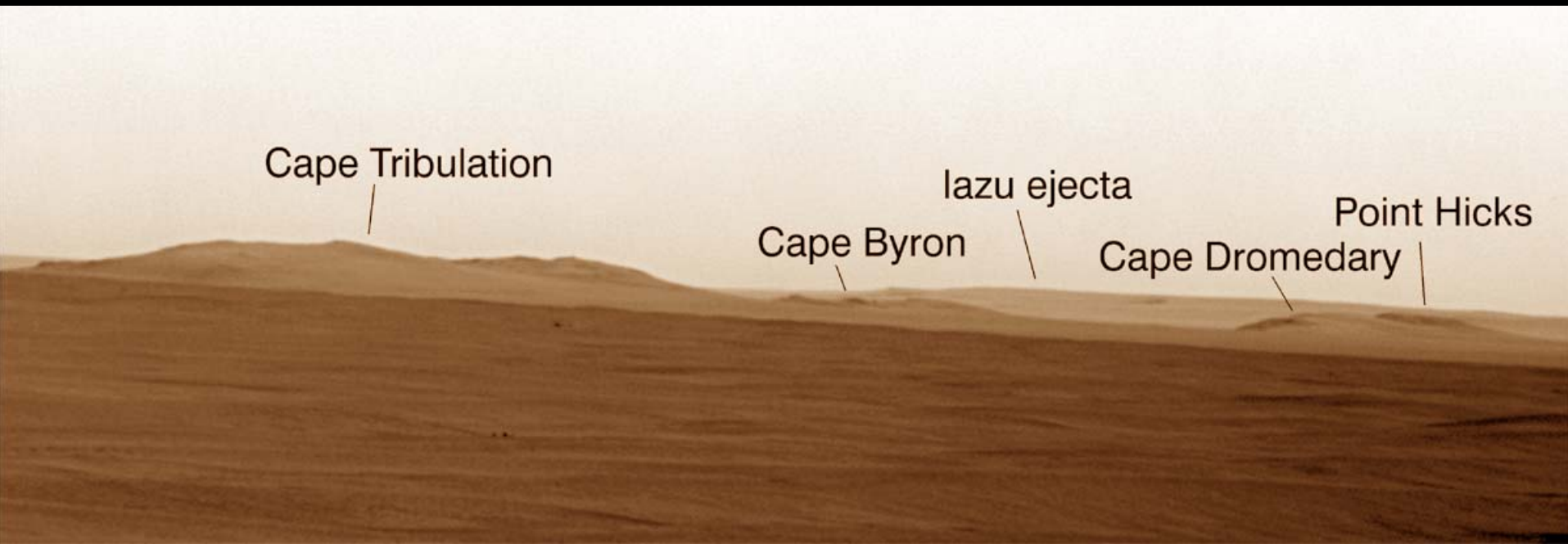




*Les 20 km déjà effectués en mai 2010*

*La douzaine de km qu'il reste à faire*

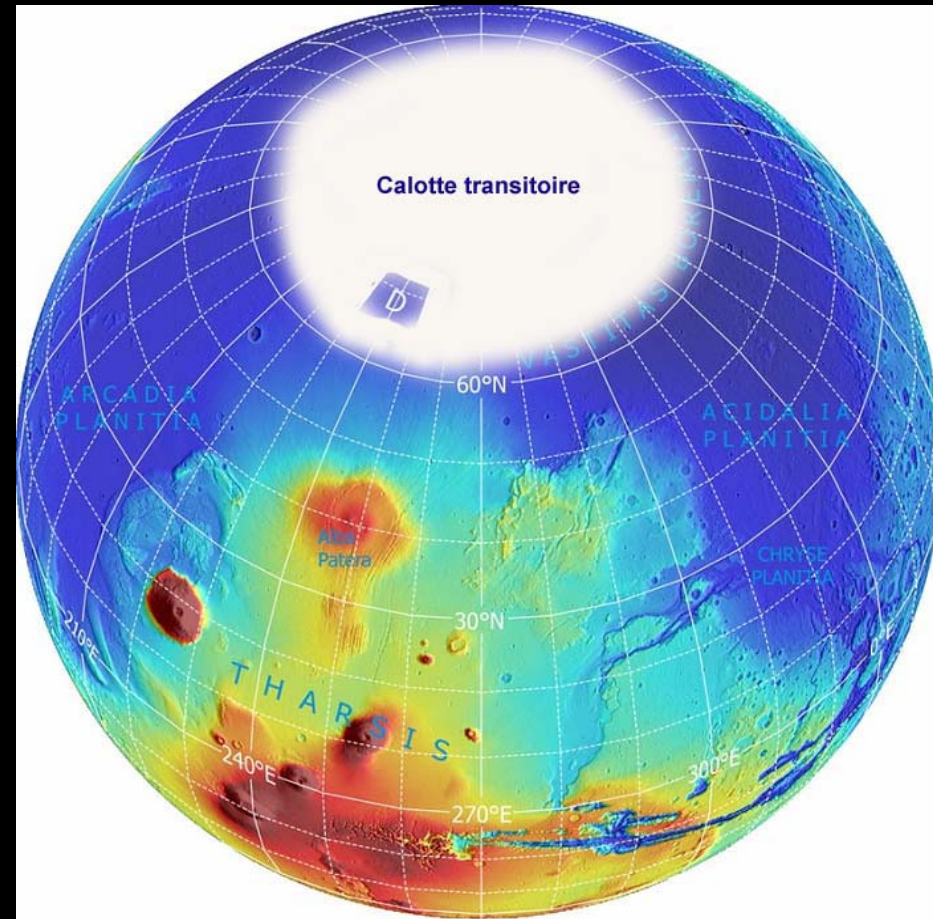
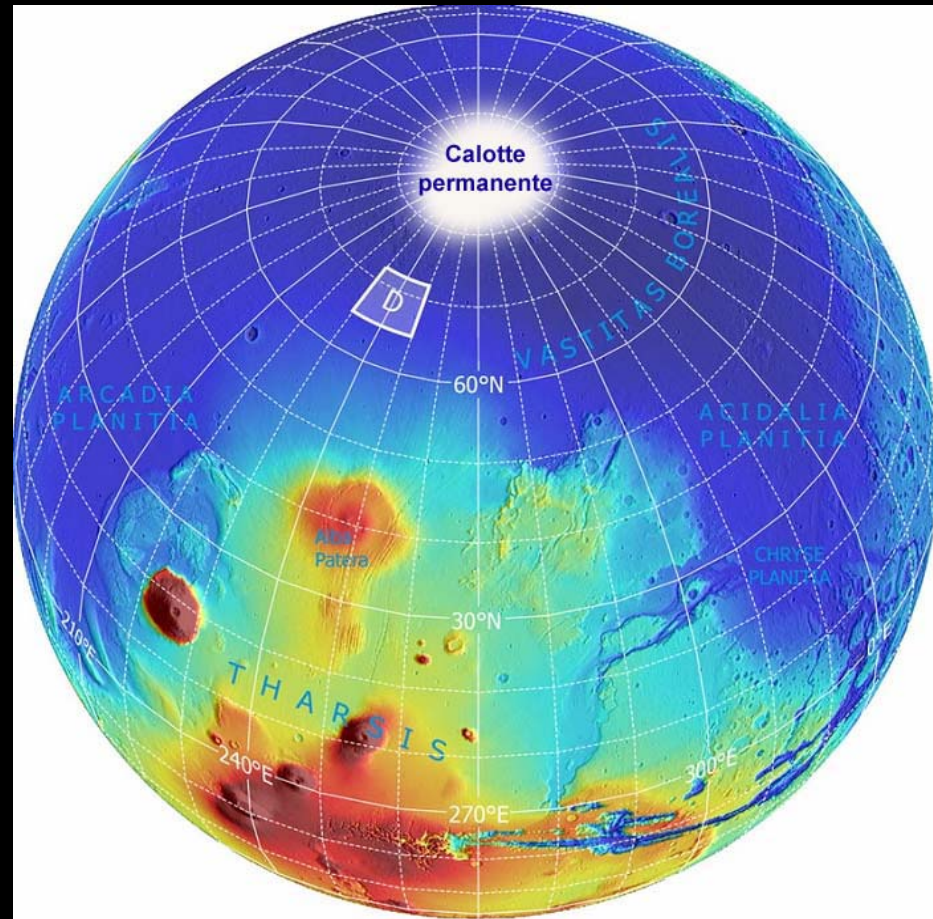
**Il ressort de Victoria, et tente d'atteindre le cratère Endeavour (> 1km de profondeur), donc une section de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.**



**Une vue en direction du rebord SO du cratère Endeavour, où les sondes en orbite ont identifié de l'argile. Le « trou » d'1 km de profondeur est juste derrière ces collines,**

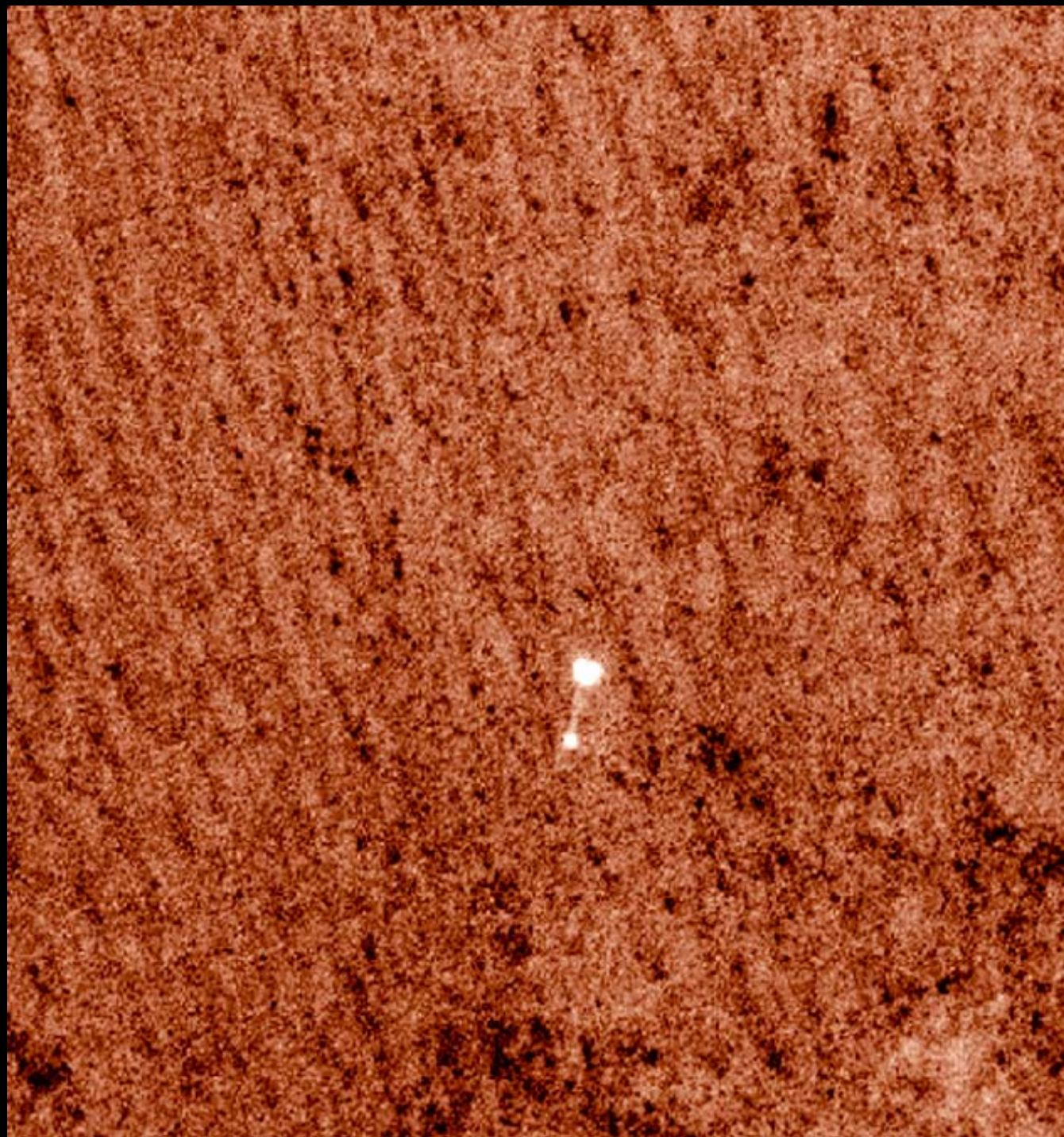
**A suivre !**





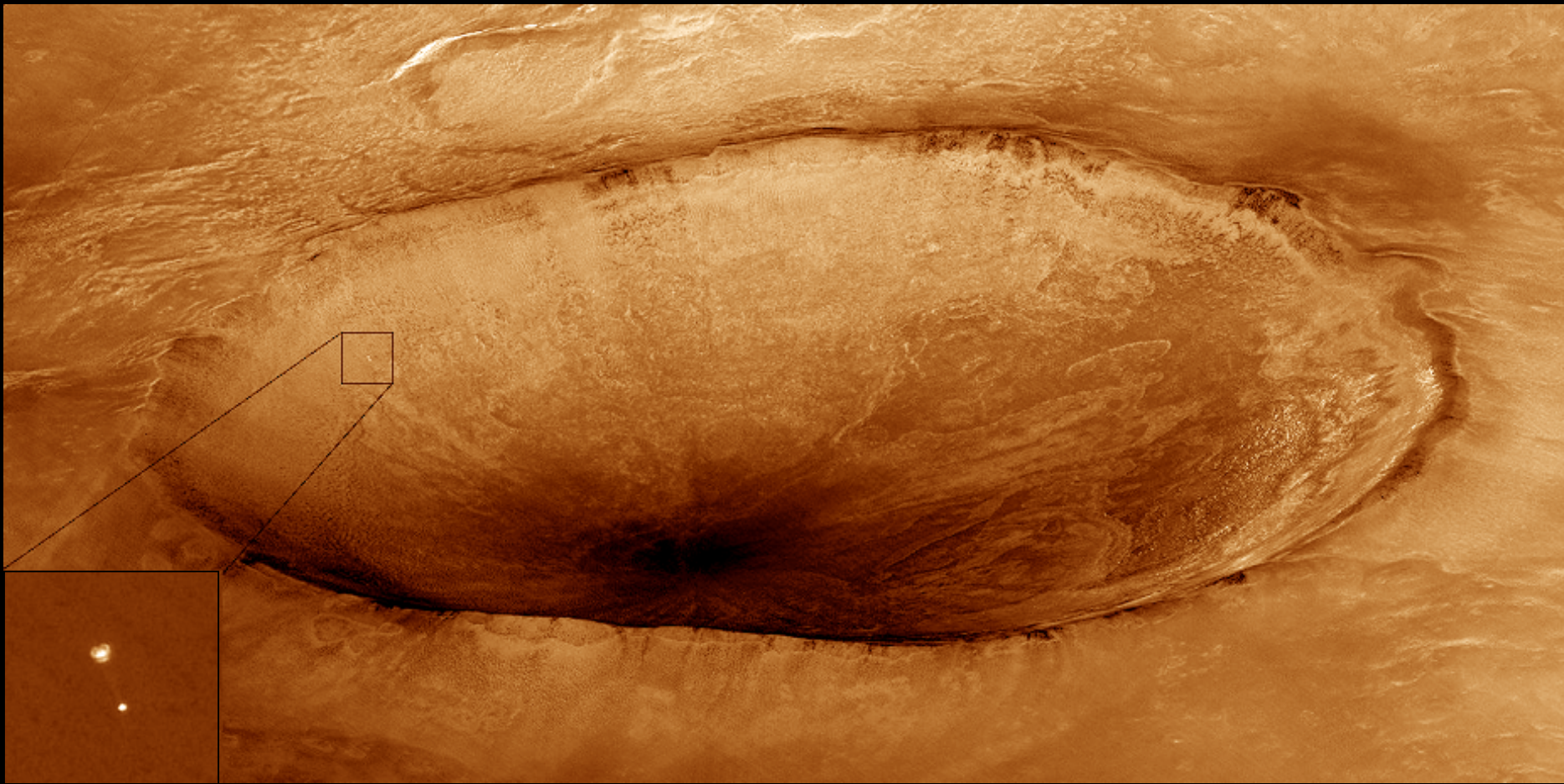
**Phoenix (robot fixe) s'est posé en mai 2008 par 68° latitude Nord. Sa mission : comprendre les échanges actuels de CO<sub>2</sub> et d'H<sub>2</sub>O entre l'atmosphère et les glaces polaires et péri-polaires, connaître la composition de ces glaces (en volatils et en composés dissous), étudier la météo des hautes latitudes.**





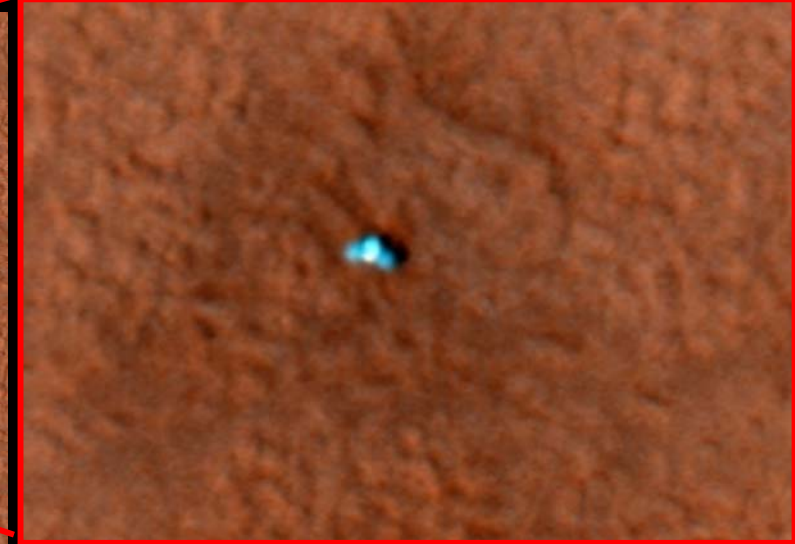
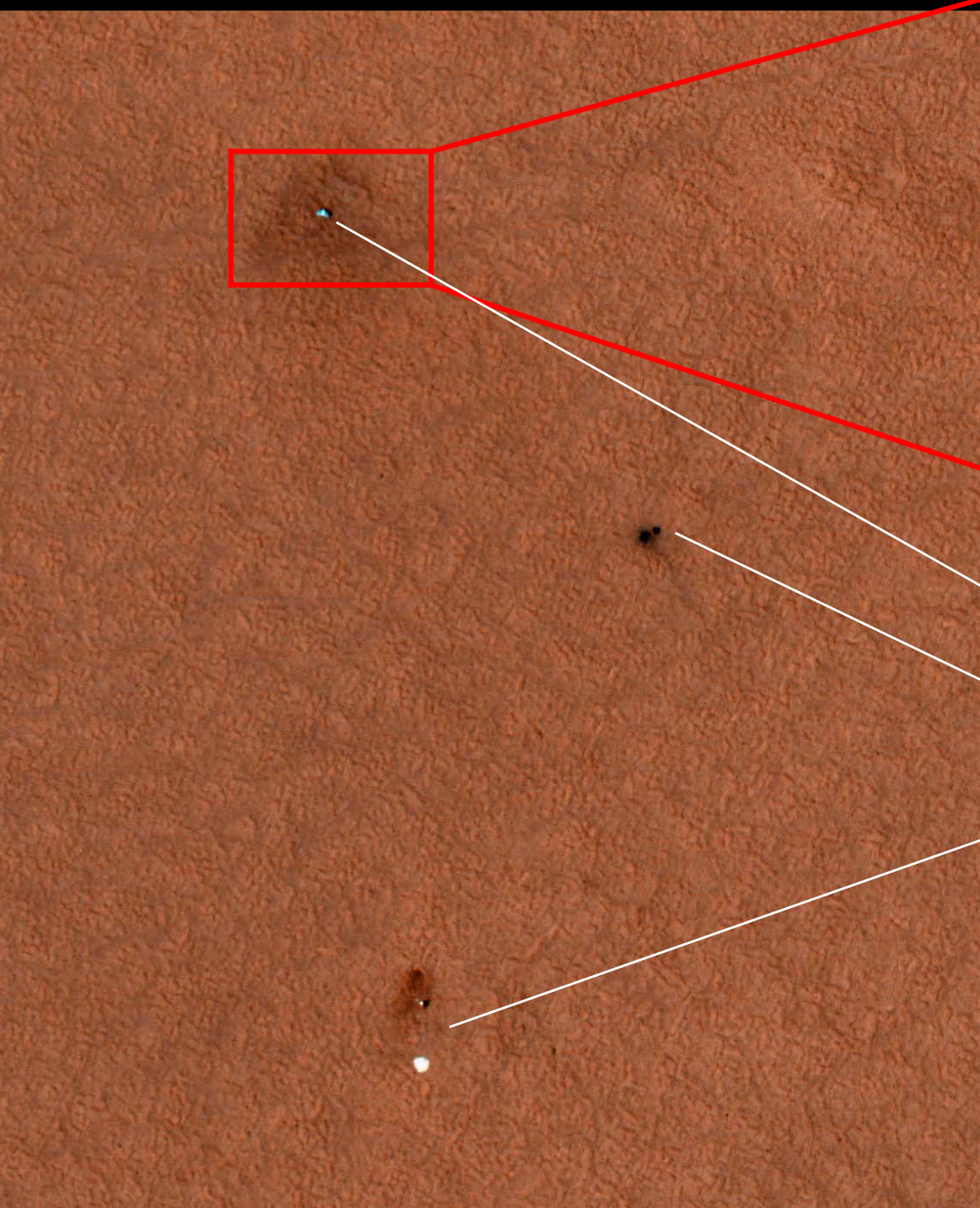
**Une  
« première » :  
le 26 mai  
2008, la  
caméra Haute  
Résolution de  
MRO  
photographie  
Phoénix en  
train de  
descendre au  
bout de son  
parachute**





**Une autre image, donnant l'impression que Phoenix va se poser dans un cratère de 10 km de diamètre. C'est un effet de perspective, et Phoenix se situe 20 km en avant du cratère**





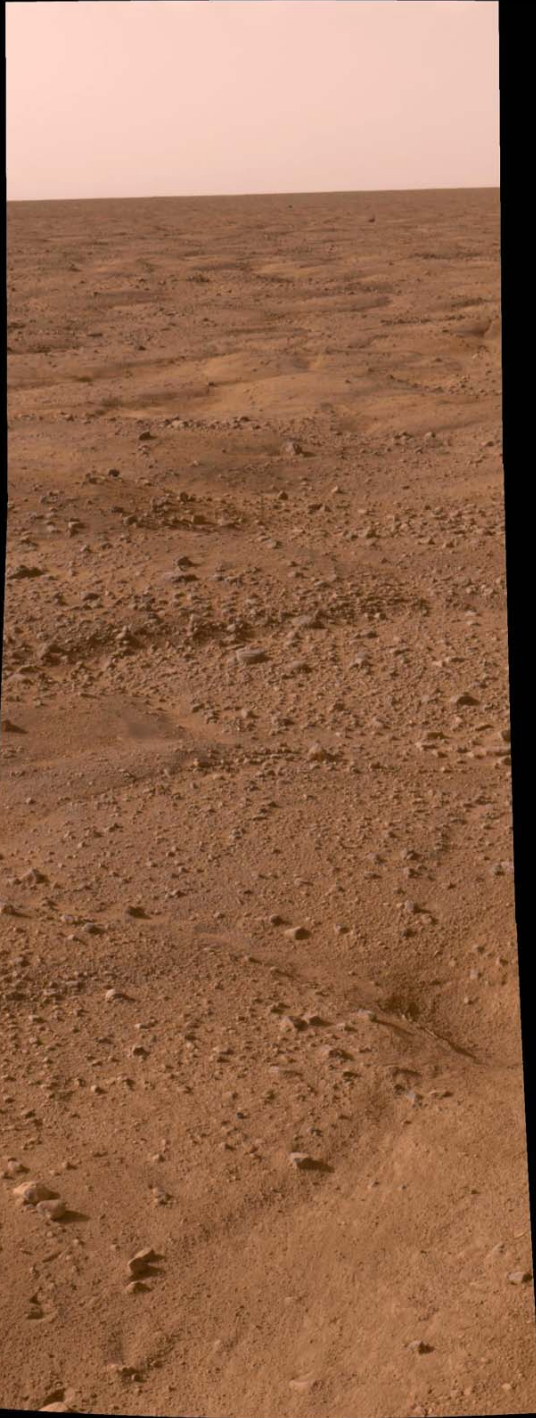
Phoenix

Le bouclier thermique

Le parachute et la «coquille»

**Le 26 mai, à 01h 53  
(heure française),  
Phoenix se pose en  
douceur sur Mars**





**Le 26 mai 2008, à 01h  
53 (heure française),  
Phoenix se pose en  
douceur sur Mars.  
Des sol polygonaux,  
à perte de vue, avec  
des polygones de  
dimension  
métrique**



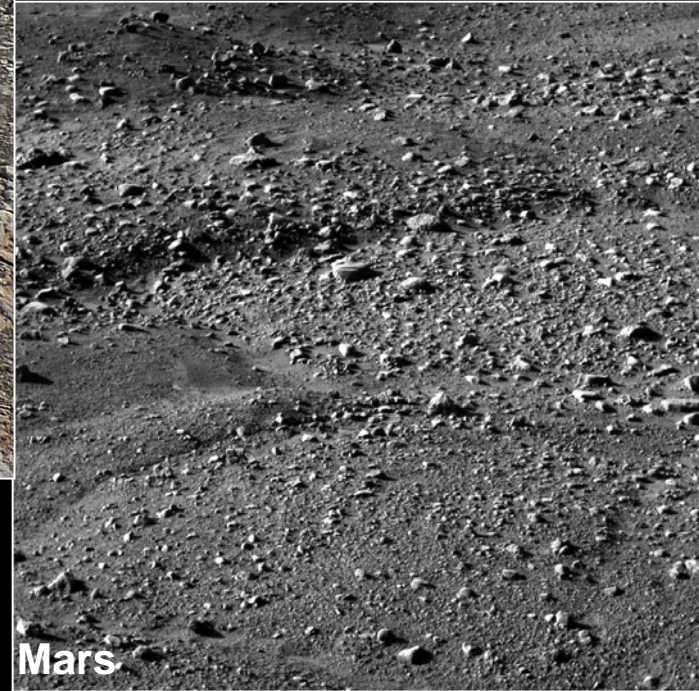


**On connaît aussi sur Terre des sols polygonaux (ici à 2700 m dans les Alpes), semblables à ceux de Phoenix**





Terre



Mars

**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 !**



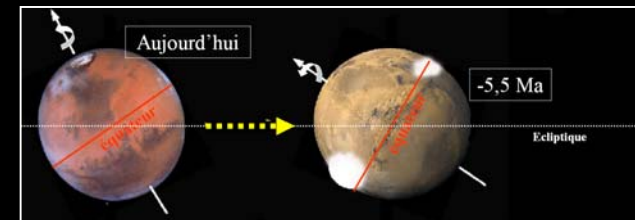
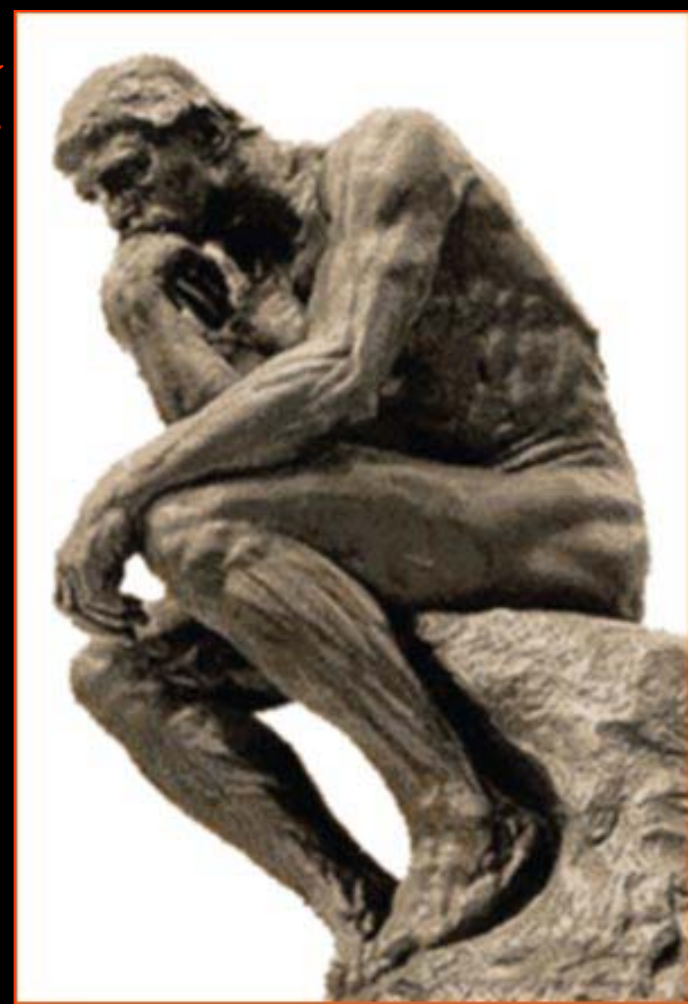
Depuis l'atterrissage, en début d'été, la température oscille entre  $-25^{\circ}\text{C}$  le jour et  $-95^{\circ}\text{C}$  la nuit ! Et ça va encore baisser avec l'arrivée de l'hivers martien.

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 ??





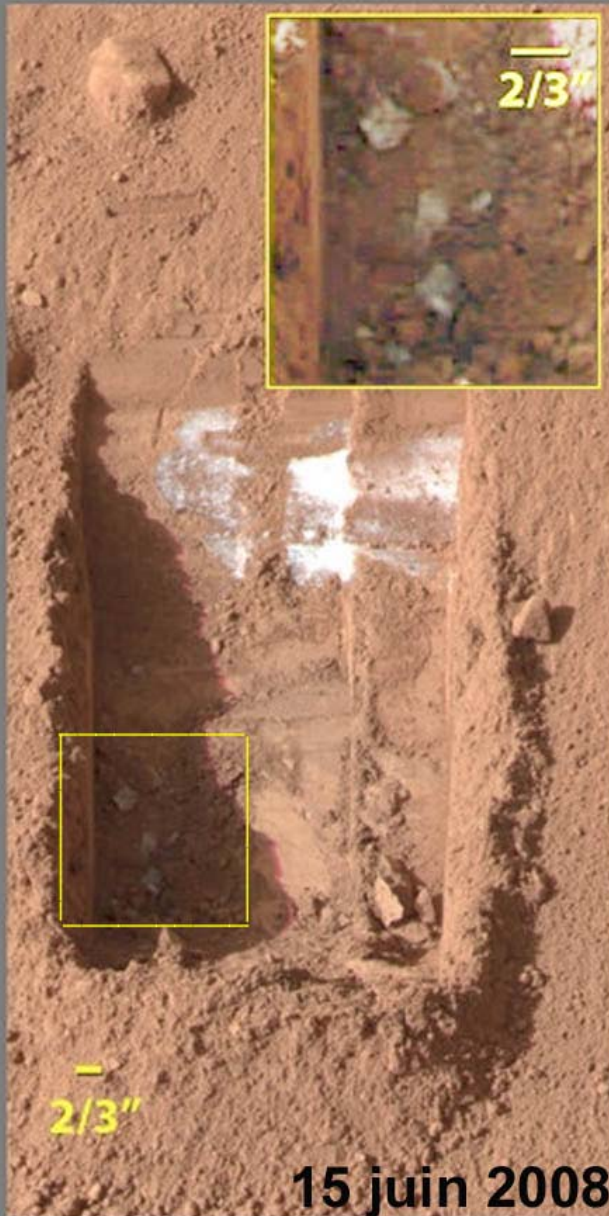
**Avec une  
« pelle » (5 cm  
de large) au  
bout d'un bras  
articulé,  
Phoenix  
creuse des  
petites  
tranchées.  
Dans les  
tranchées  
comme dans le  
contenu de la  
pelle, on voit  
une substance  
blanche.**





15 juin

19 juin



... substance  
blanche qui se  
sublime  
(partiellement)  
en 4 jours.

De la glace !

Mais est-ce de  
l'eau pure ?

Contient-elle des  
volatils ( $\text{CH}_4$  ...)

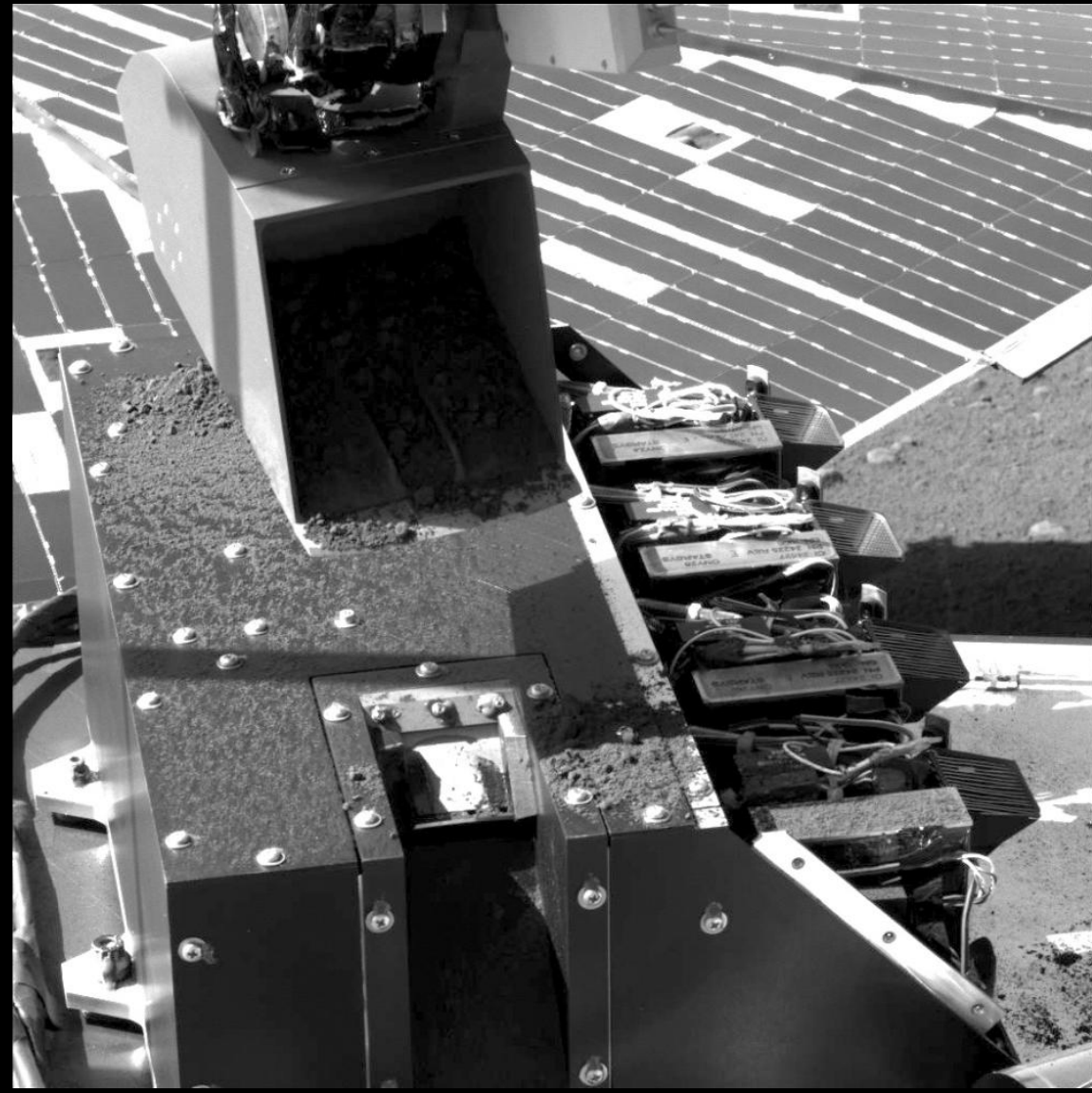
des sels

( $\text{SO}_4^{2-}$  ...), 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)**

**Résumé des 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 et jusqu'à 5% de carbonate de calcium. Tout cela révèle un « passé » humide !**



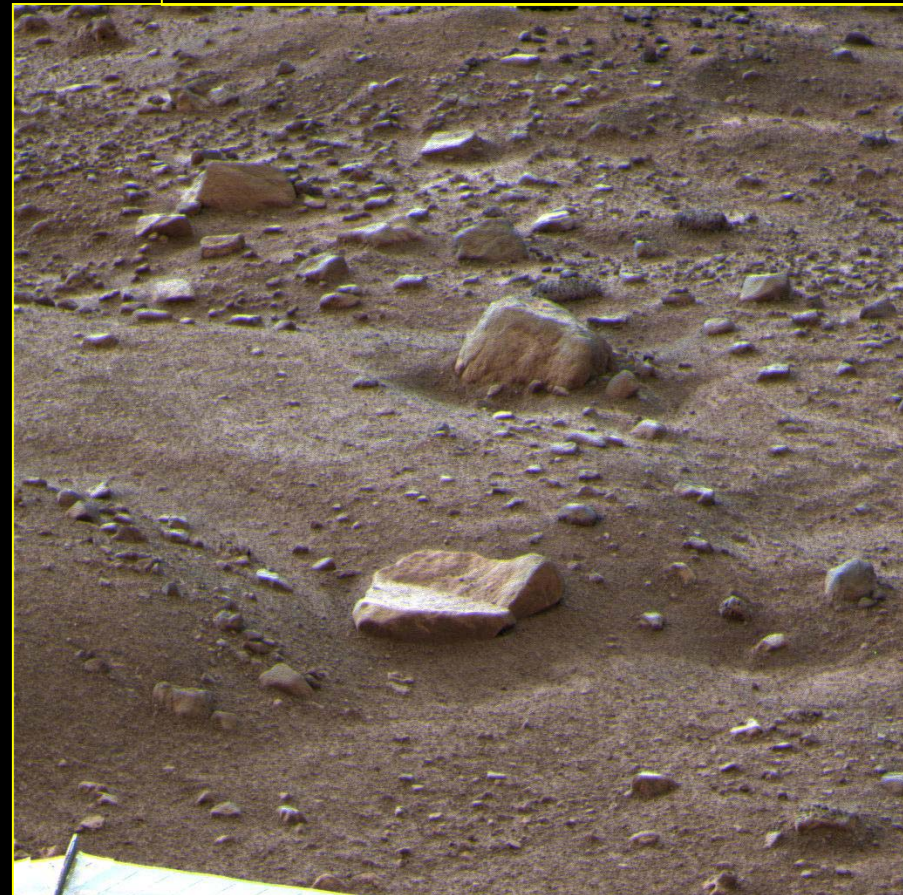
**Petit chimiste vert analysant le sol de Mars**



**Avec l'automne martien, du givre se dépose chaque nuit, pour disparaître au petit matin.**

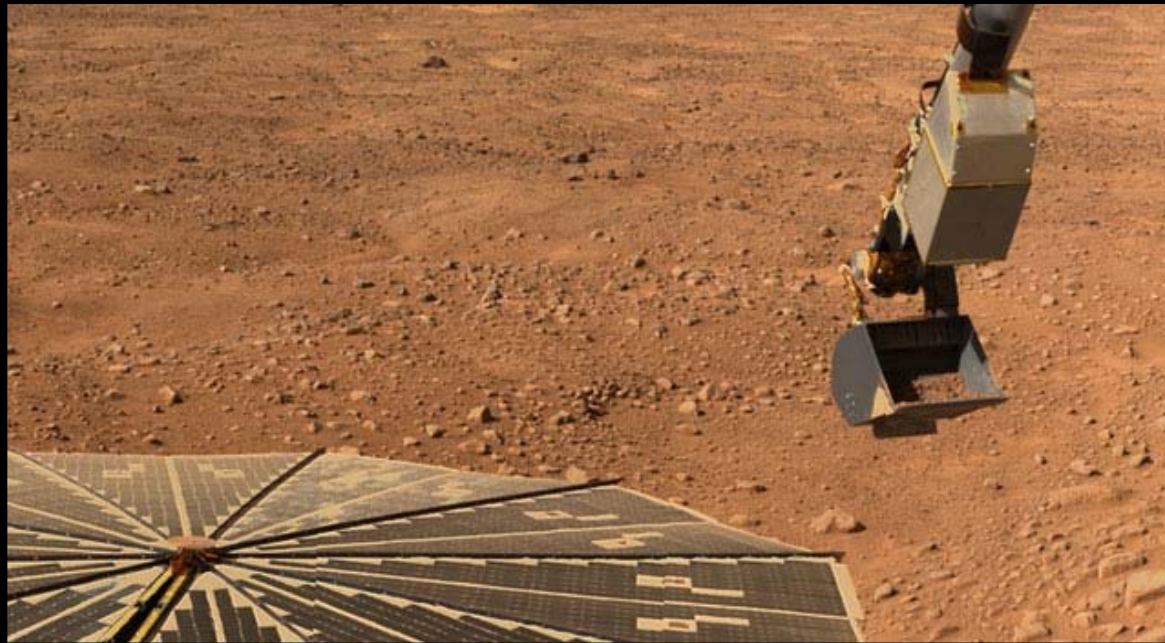
**Givre du 14 août 2008**

**Givre du 27 octobre 2008**



**de plus en plus de givre !**





**Et le 2 novembre  
2008, les  
communications  
s'interrompent  
(c'était prévu) !  
Voici « l'avis de  
décès » officiel :**

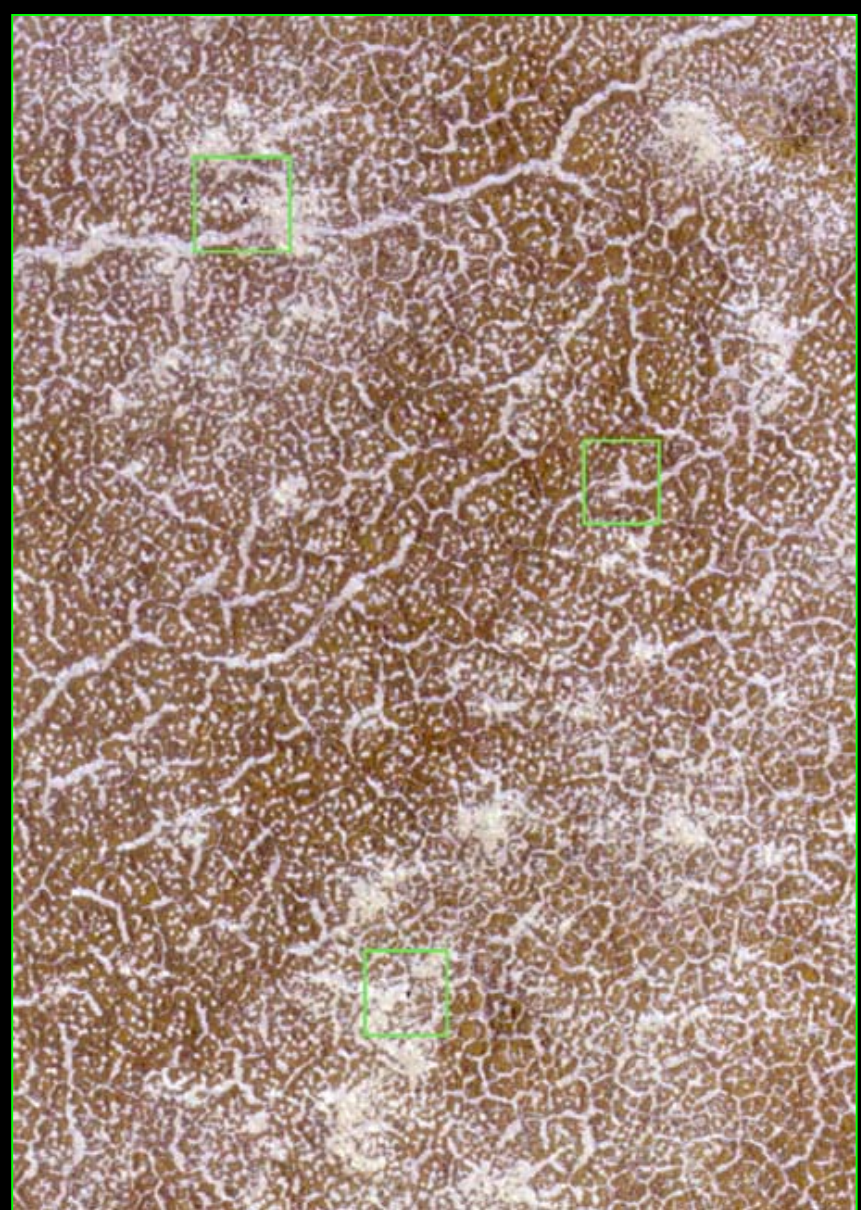
**November 10, 2008**

**PASADENA, Calif. -- NASA's Phoenix Mars Lander has ceased communications after operating for more than five months. As anticipated, seasonal decline in sunshine at the robot's arctic landing site is not providing enough sunlight for the solar arrays to collect the power necessary to charge batteries that operate the lander's instruments.**





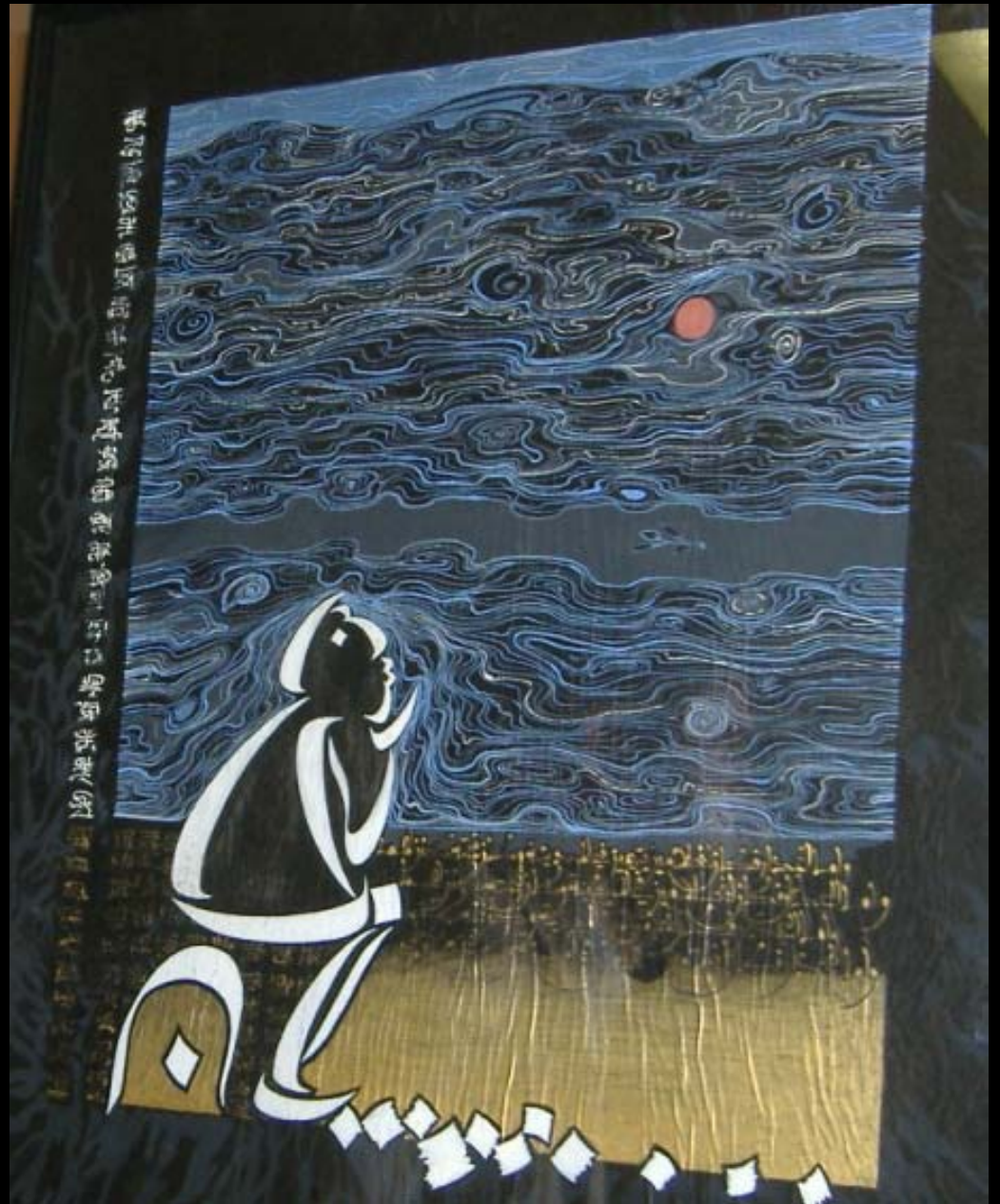
**Le site d'atterrissage de  
Phoenix en plein été**



**Le site d'atterrissage de  
Phoenix en fin d'hiver**



# En guise de conclusions







**On se posait la question de l'eau pérenne sur Mars. La réponse est : il y en a eu, longtemps ... et peut-être même plus encore !**

**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



Une question pour finir :

Terre  
trop  
chaude

Eau liquide

Ere des bactéries et des êtres unicellulaires

Bactéries,  
végétaux,  
animaux.

Histoire de l'eau et de la vie sur Terre

4,5 Ga

4 Ga

3 Ga

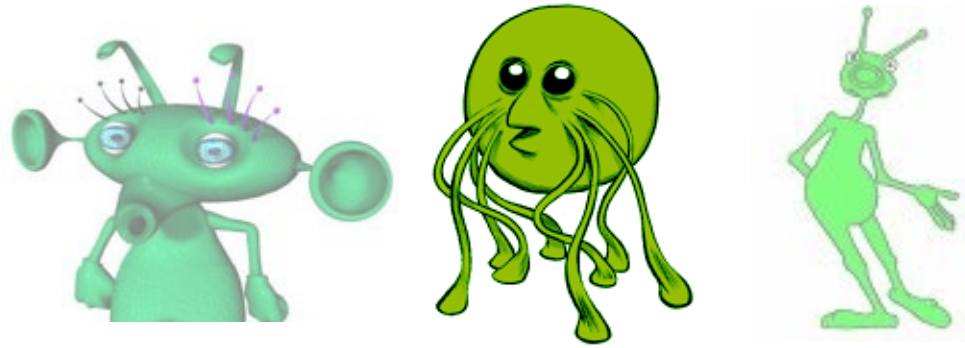
2 Ga

1 Ga

Présent

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

# Plus vieilles traces de vie sur Terre



Mars trop chaud

Eau liquide sur Mars

Mars trop froid et trop sec (en surface).  
En profondeur, à partir de 4 km, l'eau doit être liquide, voire chaude.

Histoire de l'eau sur Mars

Terre trop chaude

Eau liquide

Ere des bactéries et des êtres unicellulaires

Bactéries, végétaux, animaux.

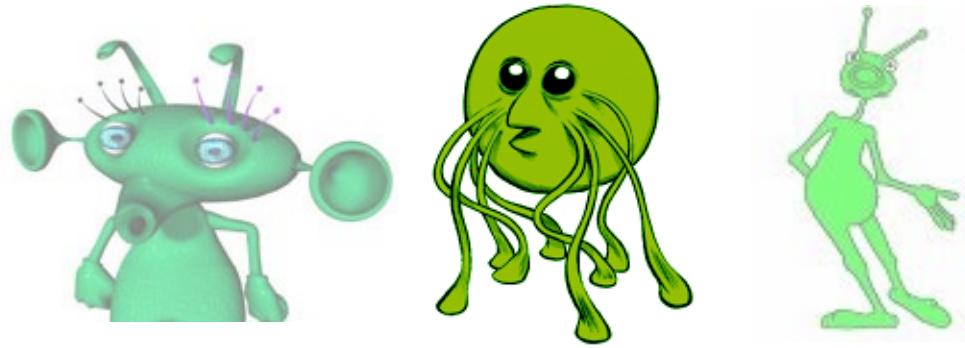
Histoire de l'eau et de la vie sur Terre



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



# Plus vieilles traces de vie sur Terre



Mars trop chaud | Eau liquide | Mars trop froid et trop sec (en surface).  
En profondeur, à partir de 4 km, l'eau doit être liquide, voire chaude.

de l'eau sur Mars

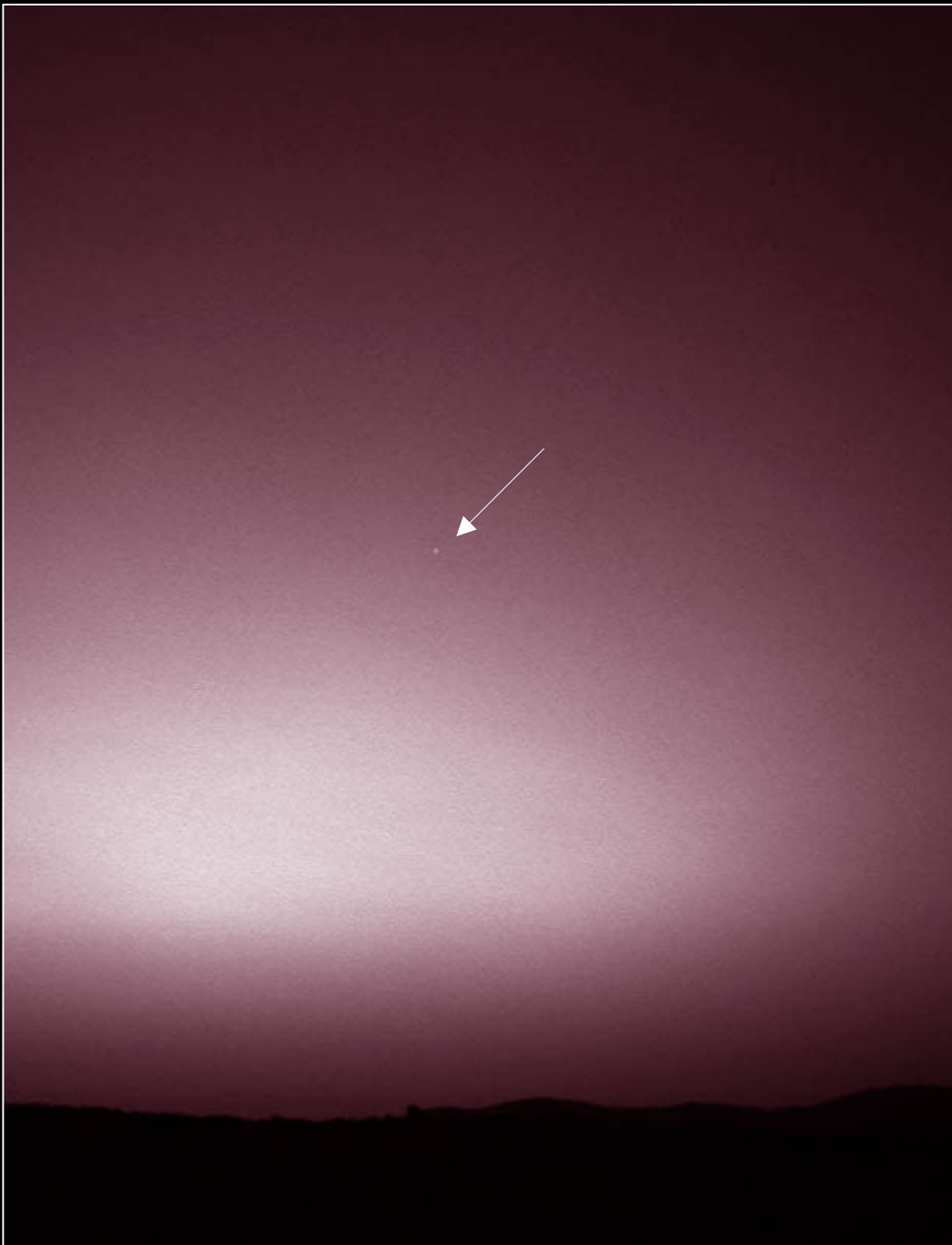
**Tous les espoirs sont permis !**

Terre trop chaude | Eau liquide | Ere des bactéries et... | Bactéries, végétaux, animaux.

Histoire de l'eau et de la vie sur Terre

4,5 Ga    4 Ga    3 Ga    2 Ga    1 Ga    Présent

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



**Et avant de se  
quitter, regardons  
cette belle « étoile »  
qui brillait dans les  
lueurs du crépuscule  
martien en ce début  
du mois de mars  
2004, au dessus de  
Spirit.**

**C'est notre bonne  
vieille Terre !**