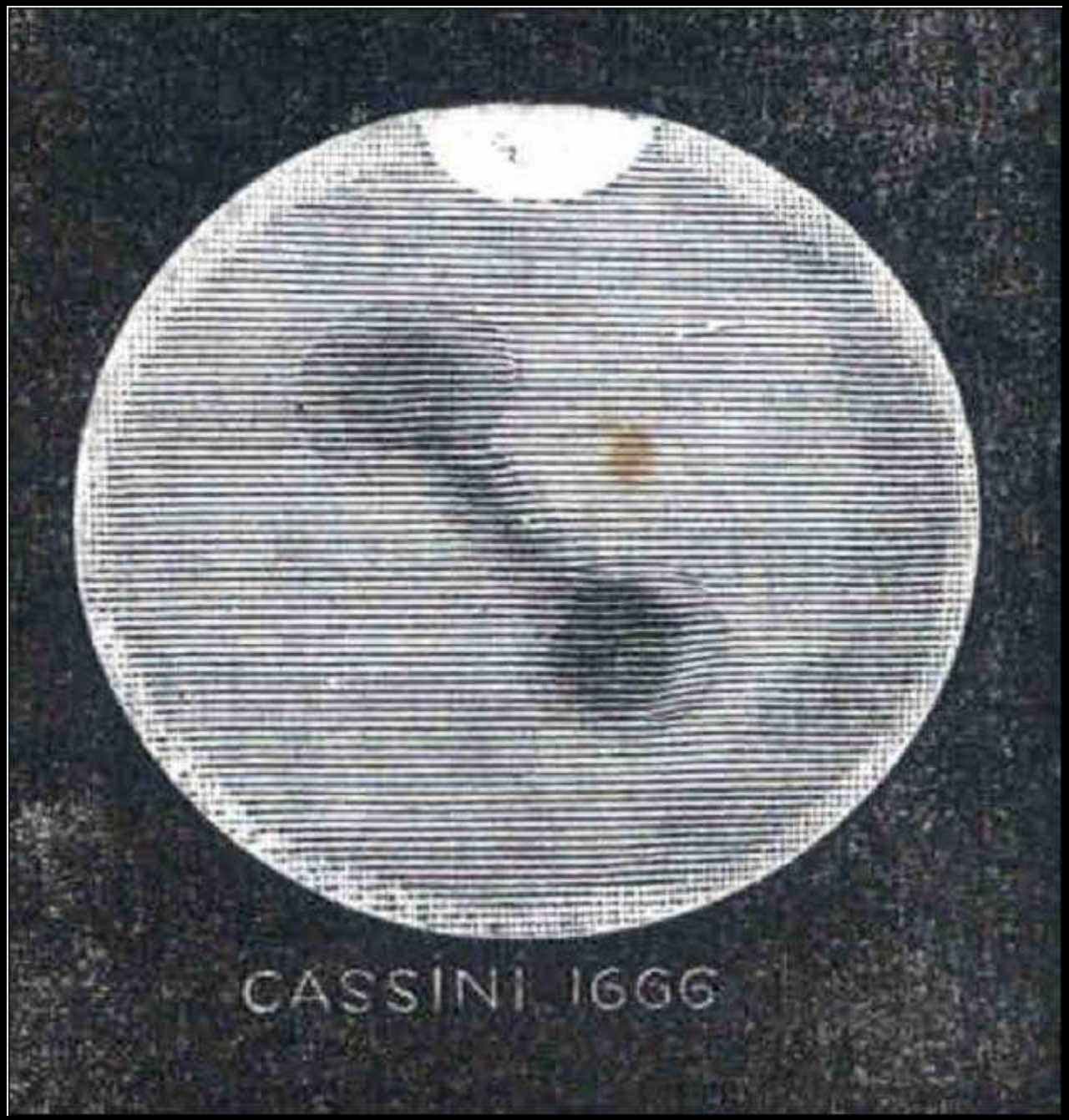
Les calottes polaires de Mars

Pierre Thomas, ENS Lyon

Novembre 2008



Les calottes polaires de Mars, découvertes au 17ème siècle, conjointement par Cassini et Huygens

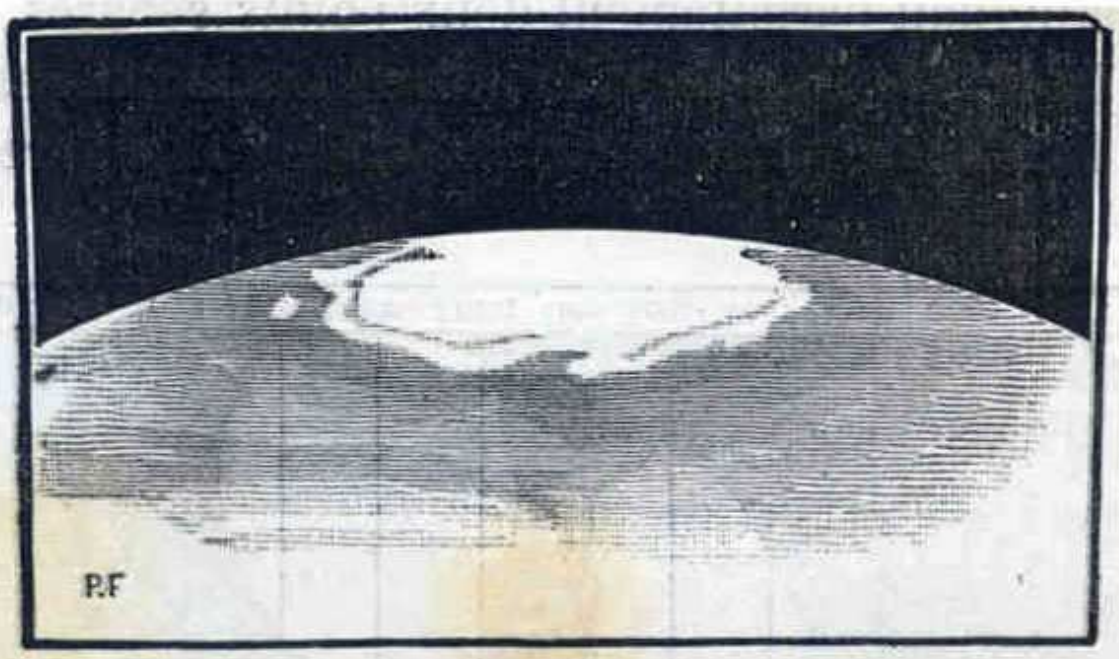
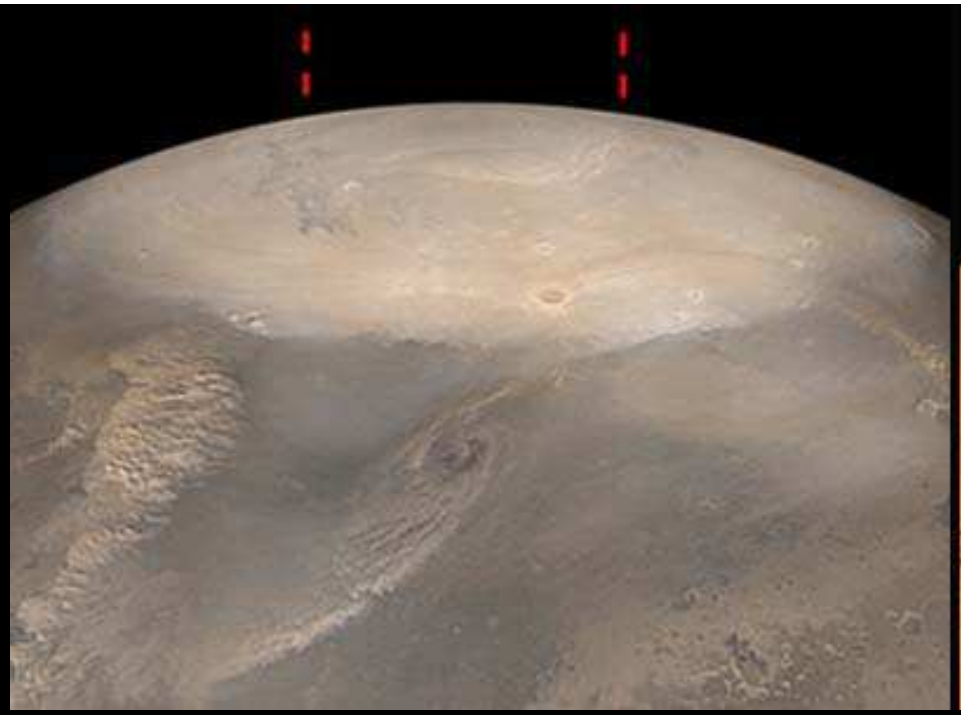


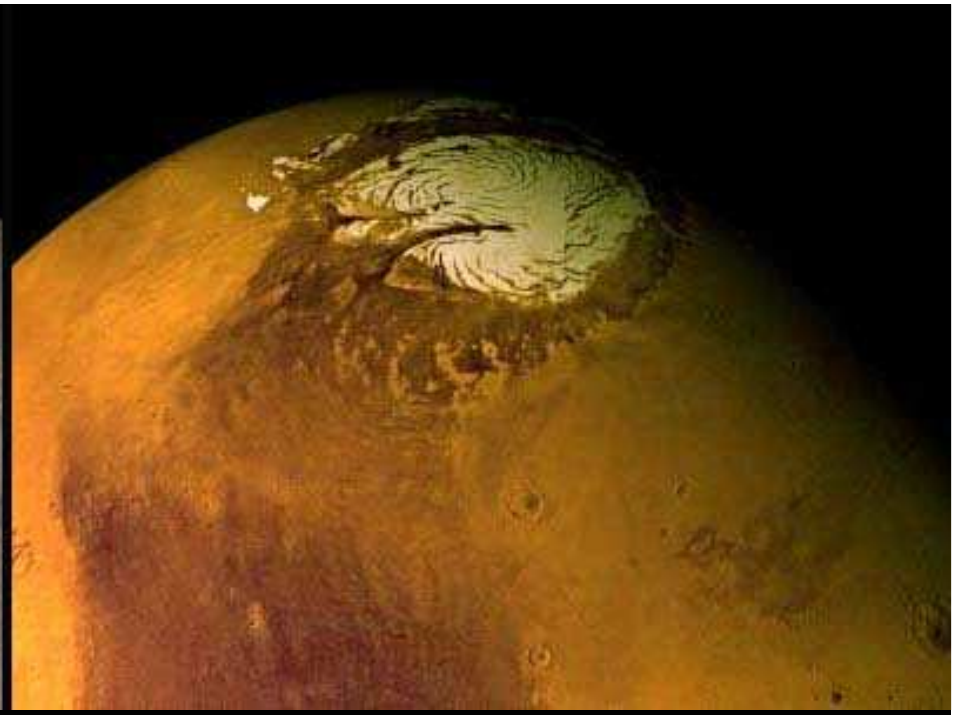
Fig 69. — Les neiges du pôle sud de Mars (1er septembre 1877.)

Bien étudiées dès le 19ème siècle

Fig. 70. — Les neiges du pôle sud de Mars (10 septembre 1877.)



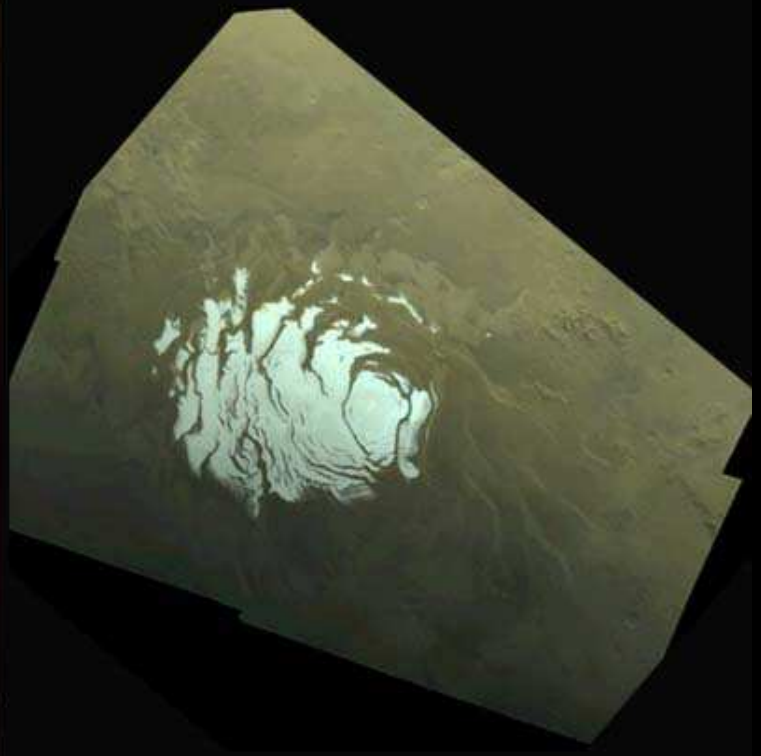
La calotte nord l'hiver
D = 3000 km

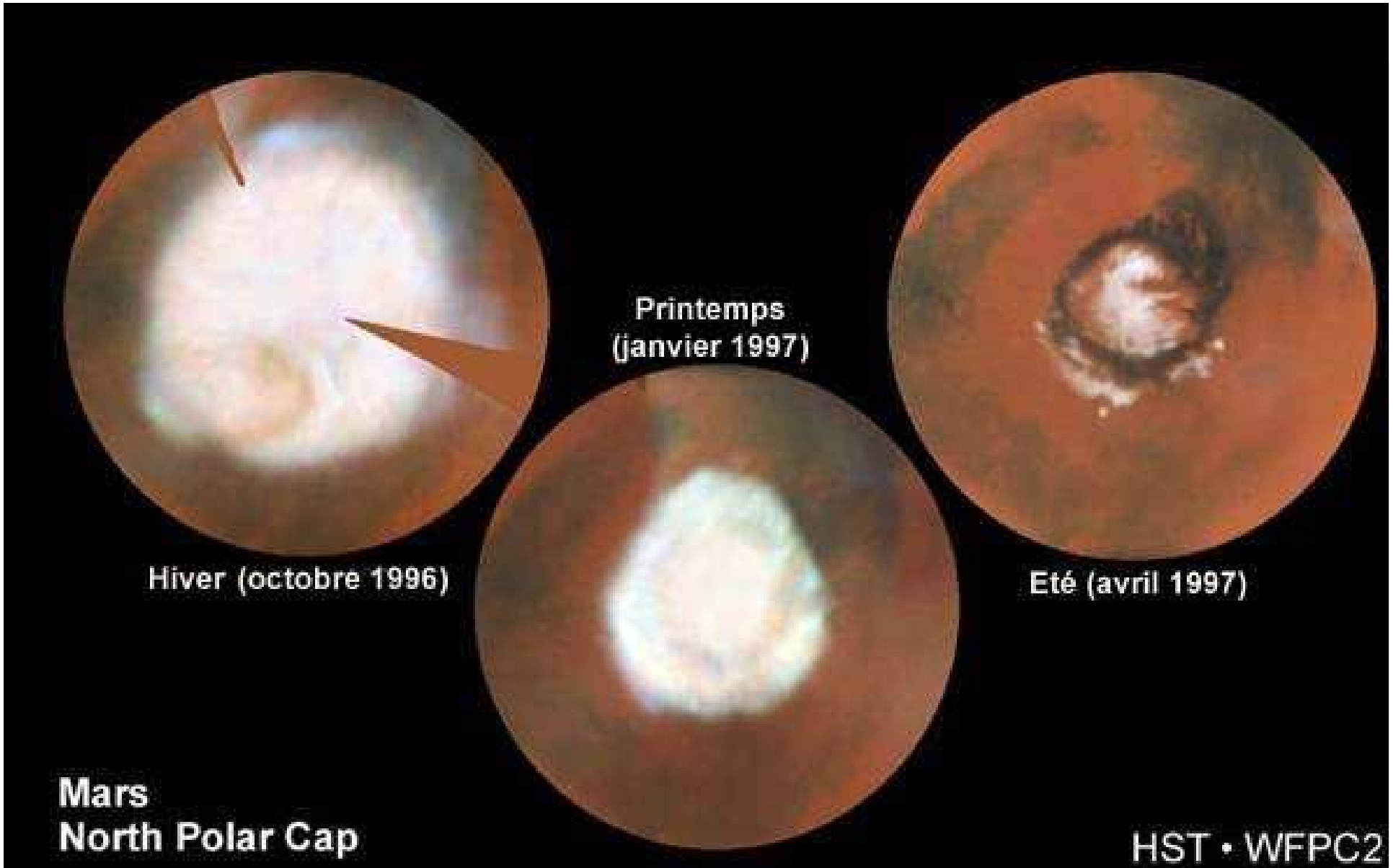


La calotte nord l'été
D = 1000 km

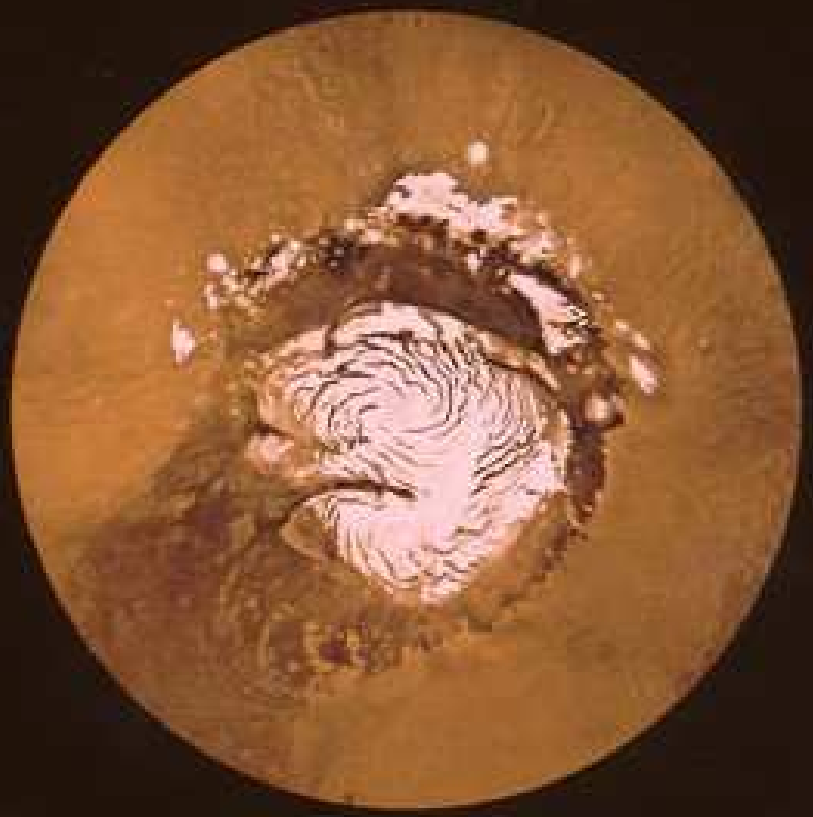
Ces calottes changent de taille avec les saisons. Elles sont petites l'été (= calotte résiduelle = calotte permanente = calotte estivale). Elles sont grande l'hiver (= calotte transitoire = calotte hivernale)

La calotte sud, l'été (à droite, D = 300 km) et l'hiver (à gauche)

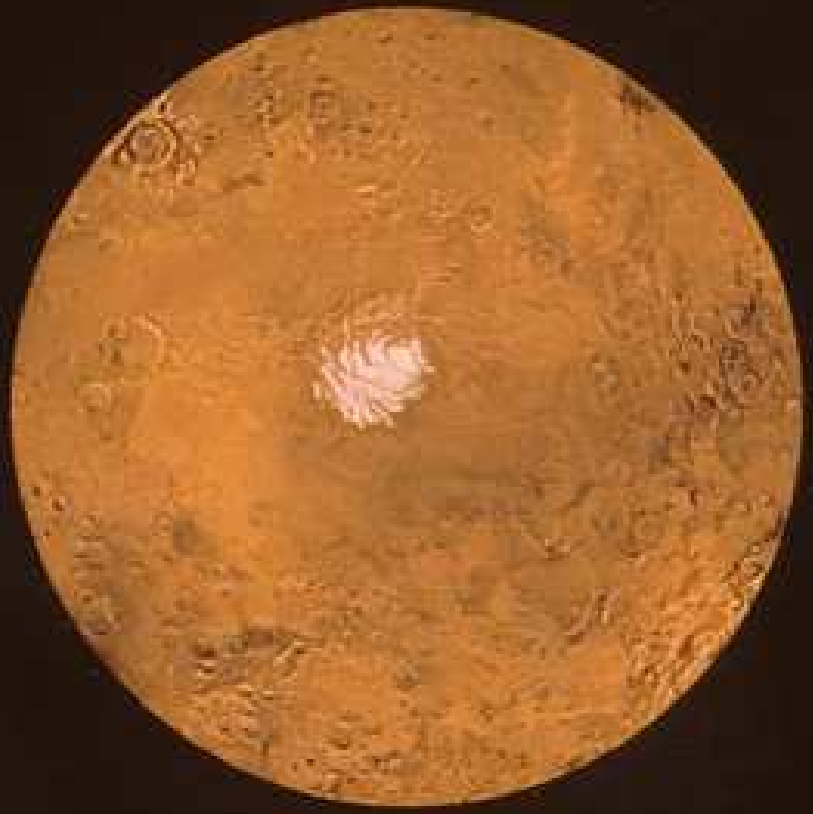




La variation de taille de la calotte nord vue par le télescope spatial

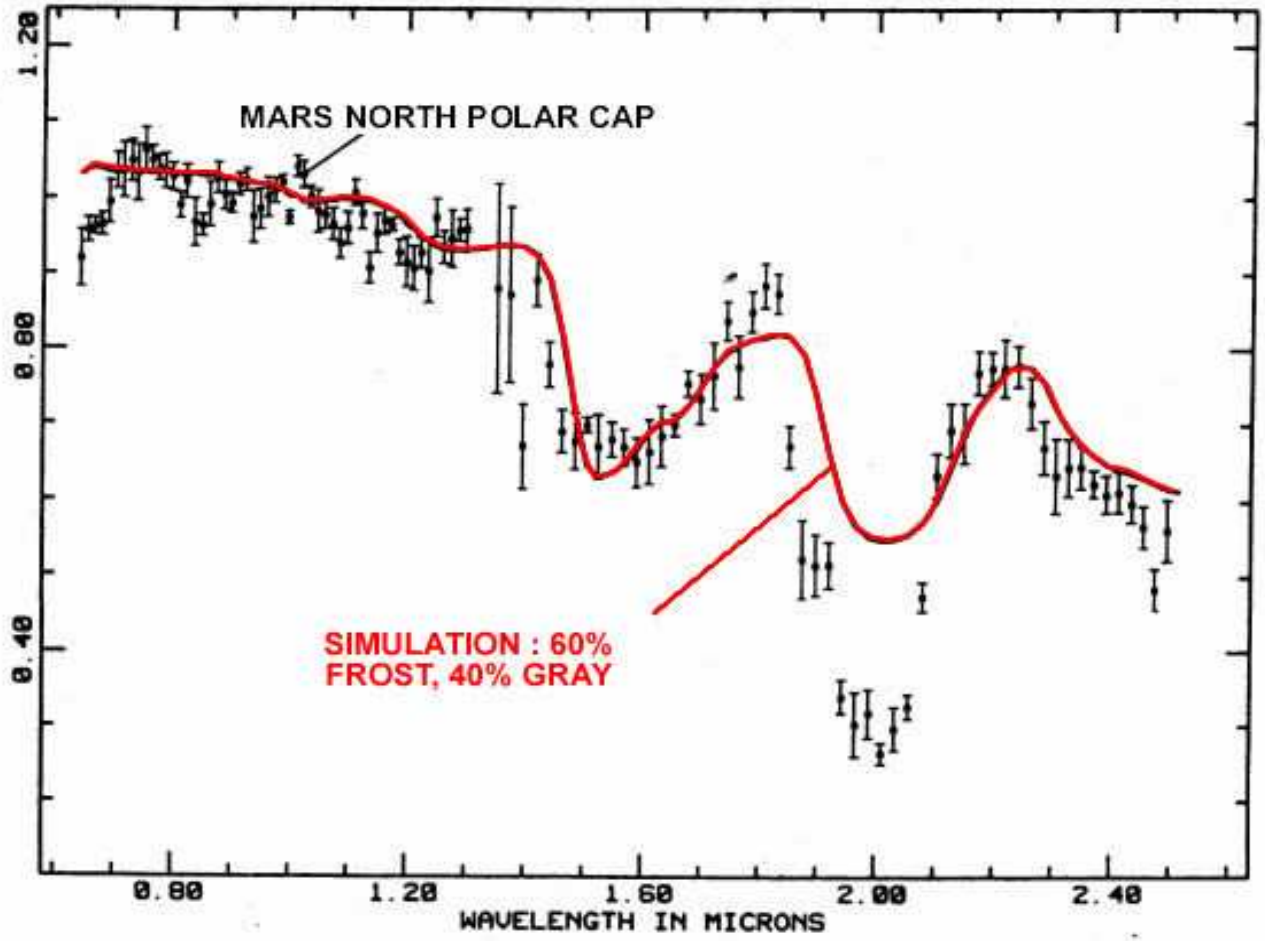


Calotte nord (D = 1000 km)



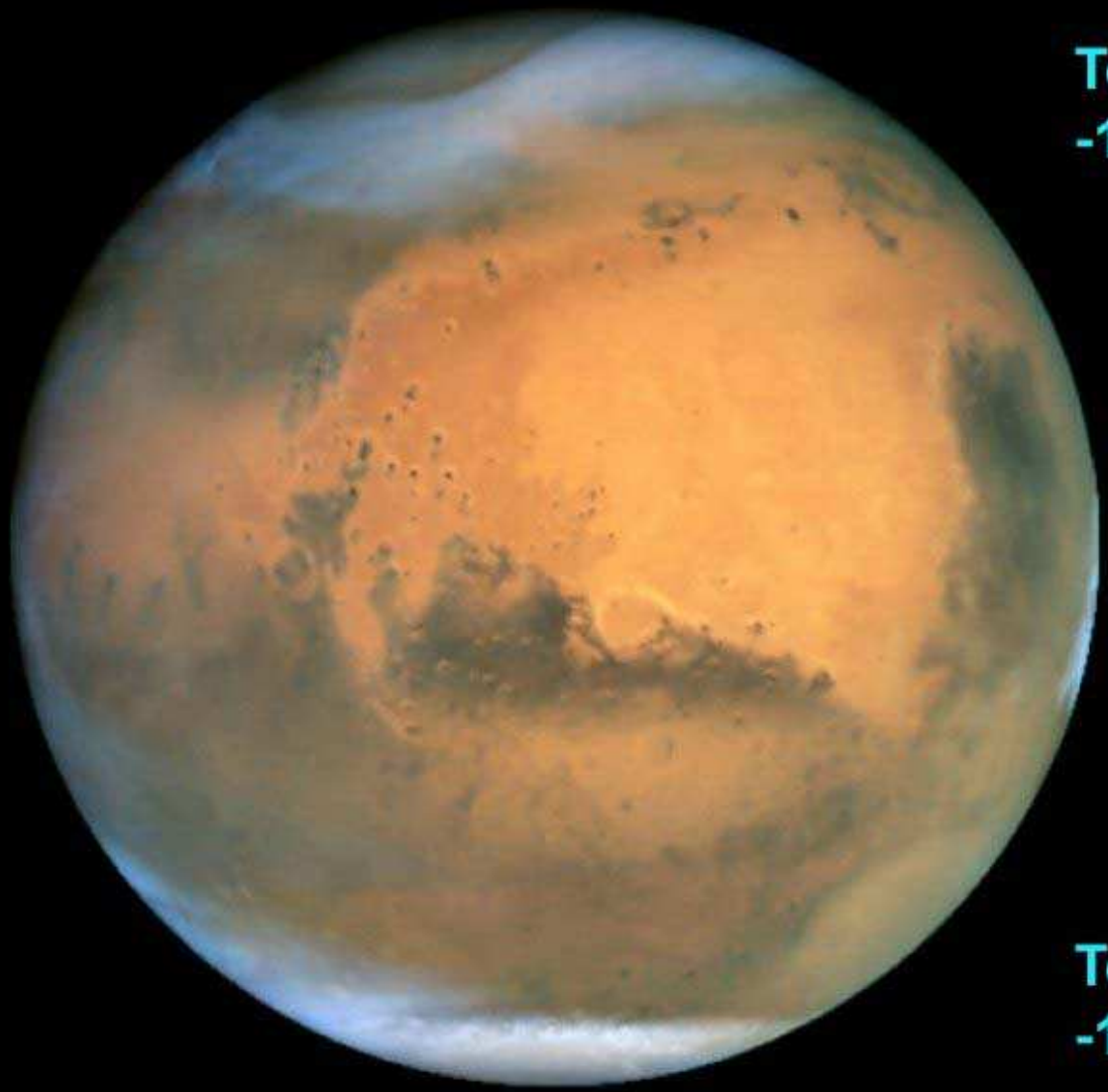
Calotte sud (D = 300 km)

Les 2 calottes résiduelles n’ont pas la même taille



Reflection spectrum of the retreating north polar cap (L_s = 50) derived from observations by McCord et al. (1982) along with a laboratory spectrum for a mixture of 60% H_2O frost mixed with 40% gray material. From Clark and McCord (1982*b*).

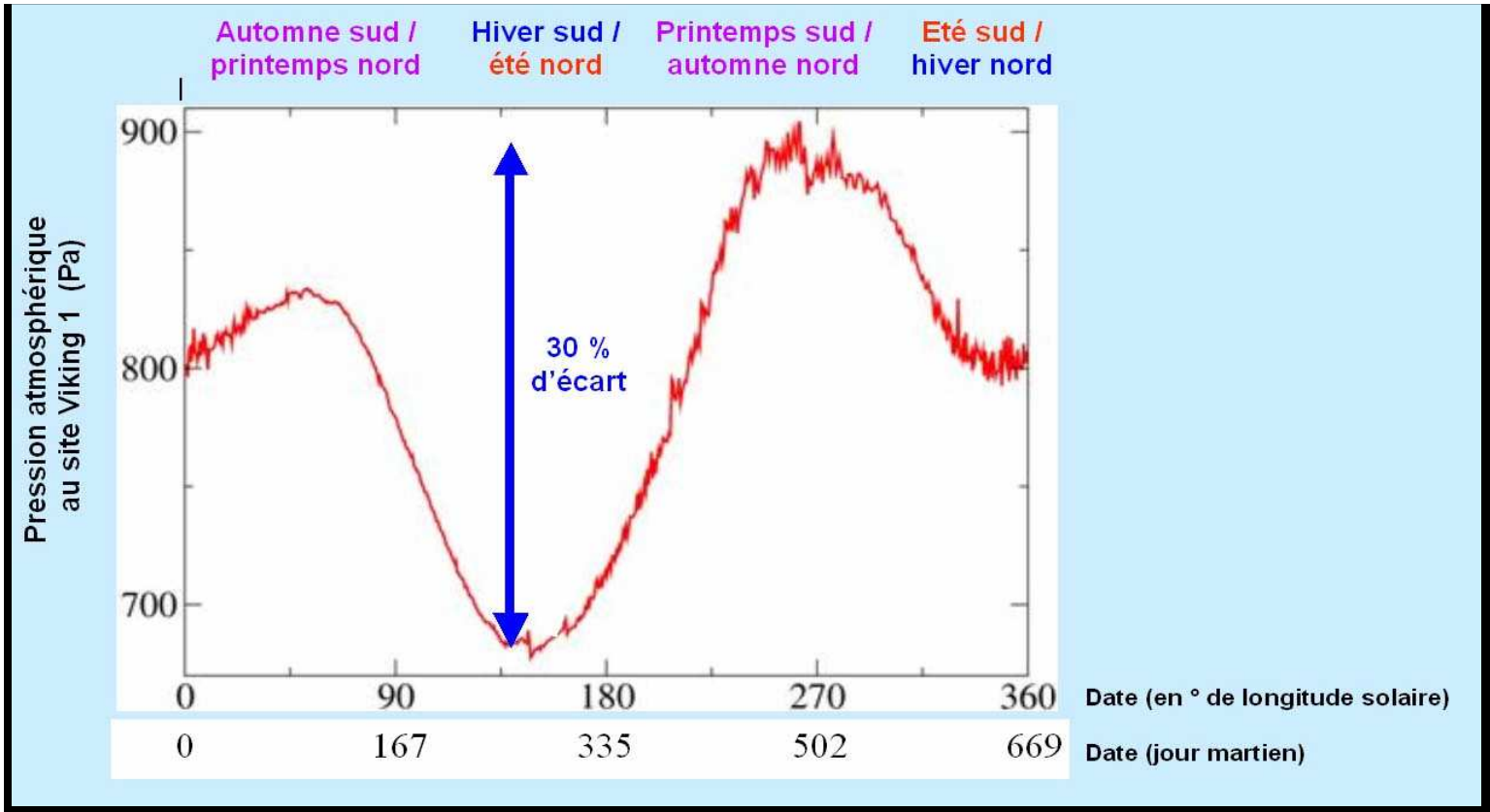
Les raies spectrales de la glace d'H2O ont été trouvées depuis la Terre dans la calotte résiduelle nord en 1964, résultat mainte fois confirmé depuis. Pas de trace «spectrale» d'H2O dans la calotte sud étudiée depuis la Terre ; le « blanc » que l'on voit, c'est de la glace carbonique.



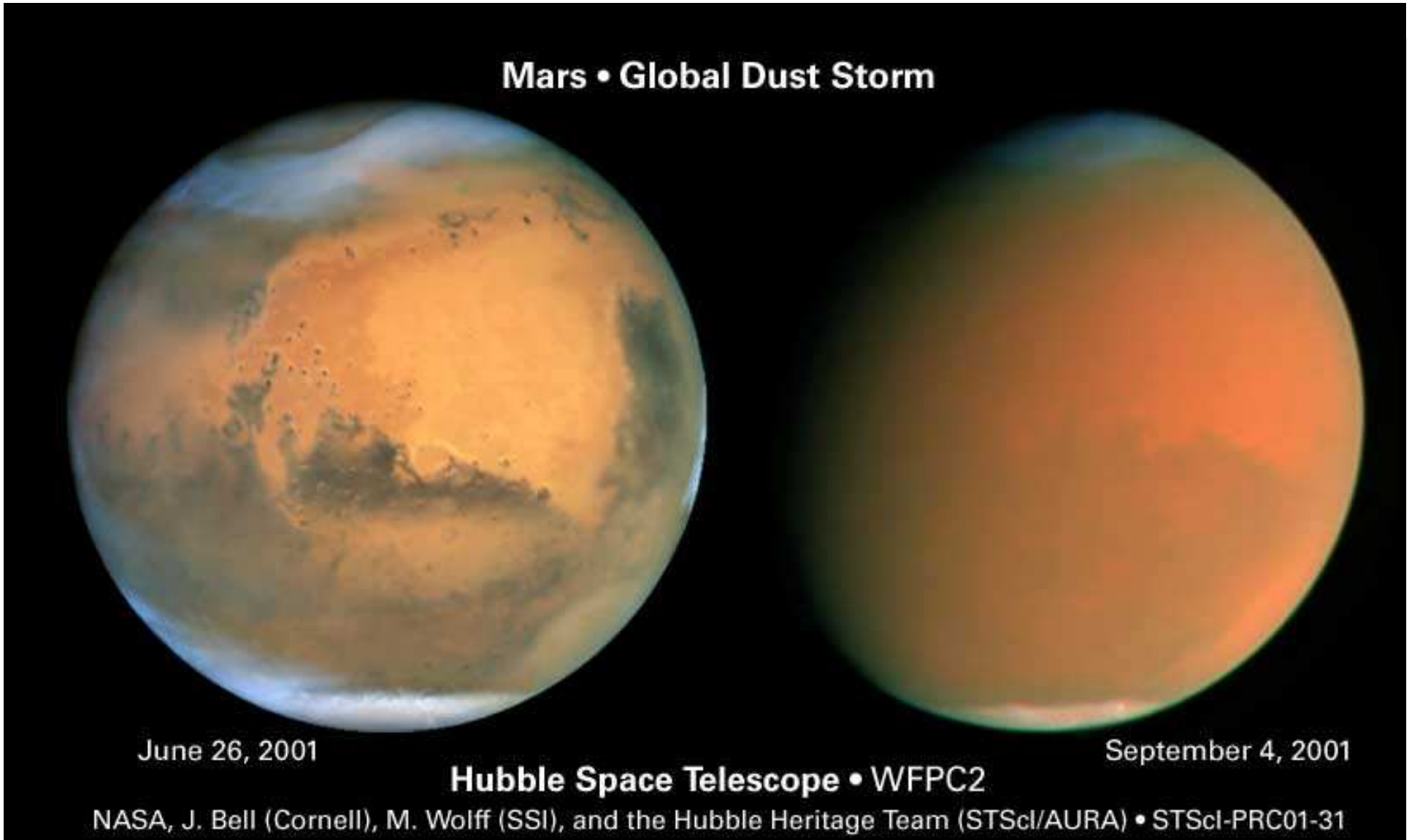
Température au Pole Nord :
-120° (l'hiver) à -50° (l'été)

Température au Pole Sud :
-130° (l'hiver) à -100° (l'été)

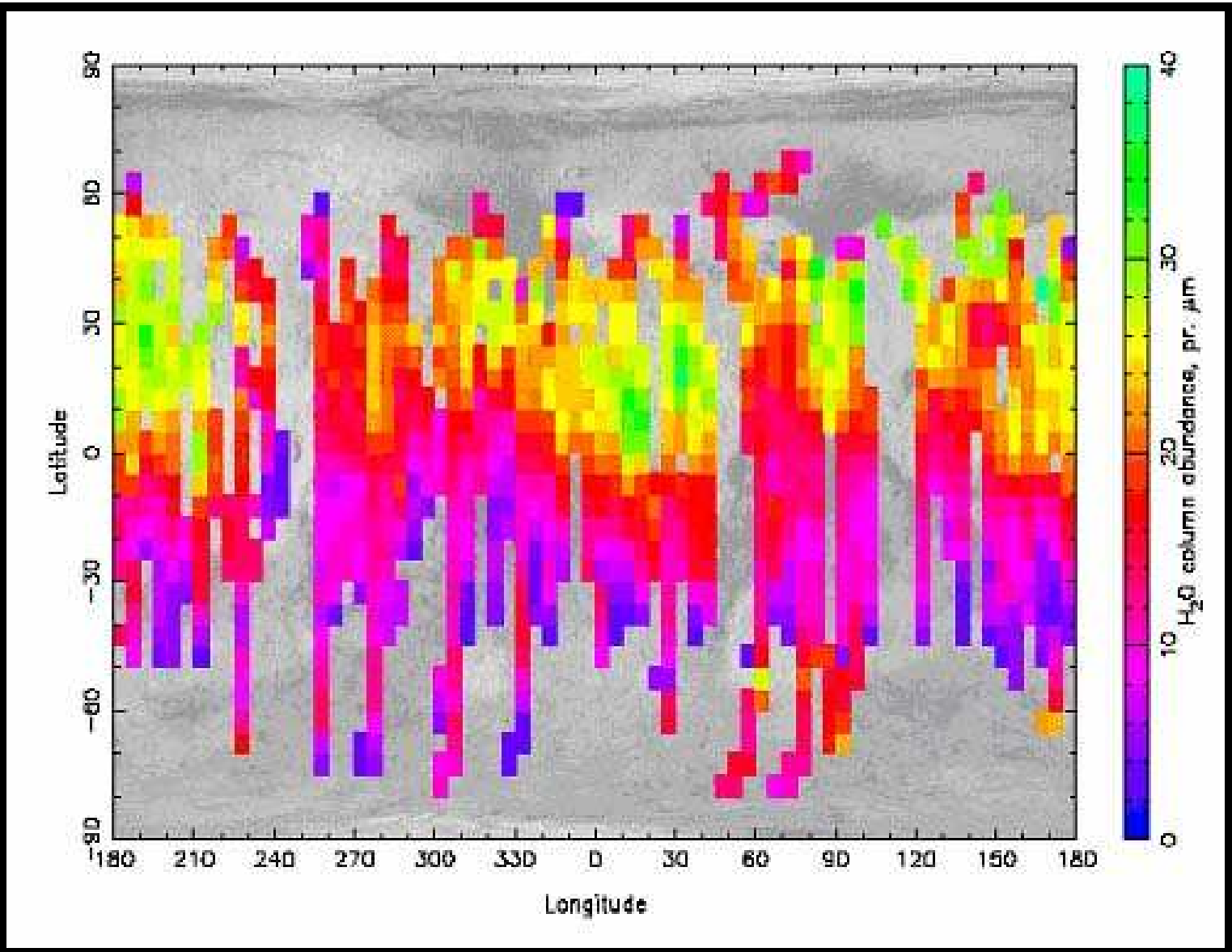
Les conditions de température aux pôles.
Ici, photo prise à l'intersaison



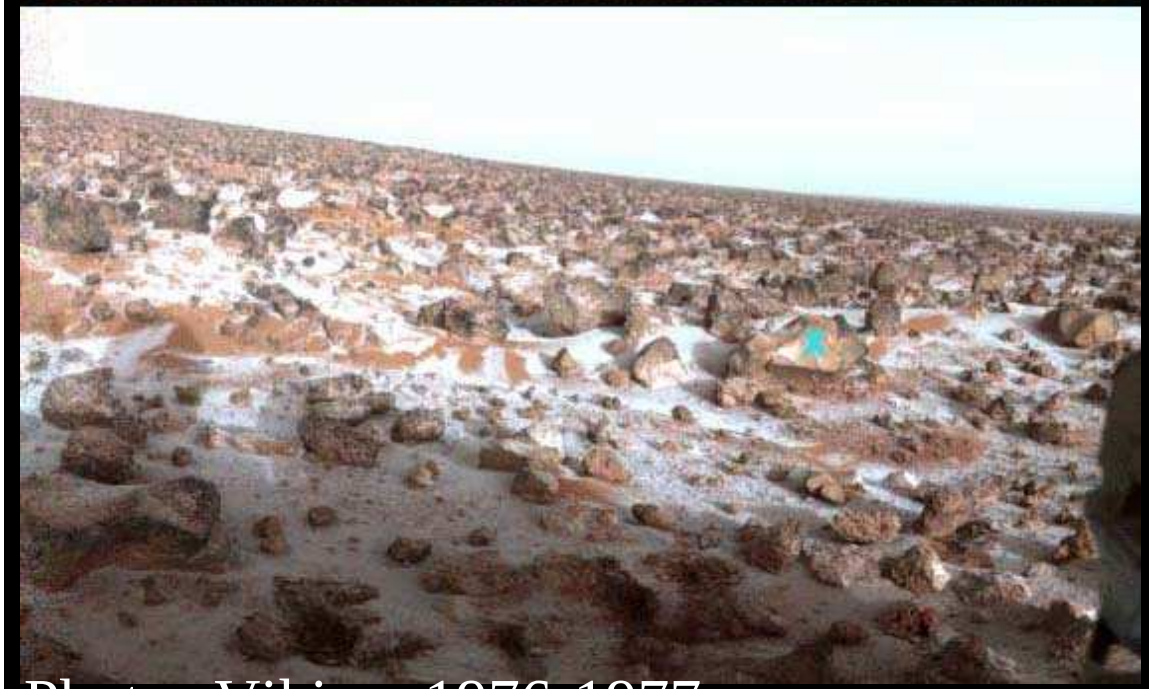
Les températures polaires d'hiver permettent l'existence de glace carbonique. Les variations saisonnières de la pression atmosphérique montrent que de 15 à 30% du CO2 atmosphérique se condensent l'hivers et se subliment au printemps, sauf sur un petit cercle au niveau du pôle sud (la calotte résiduelle sud) où la glace de CO2 résiste à l'été. En divisant la masse de CO2 mise en jeu par la surface des calottes transitoires et par la masse volumique de la glace carbonique, on trouve 1m d'épaisseur pour les couches hivernales transitoires de glace carbonique



Ces passages du CO_2 de la calotte transitoire nord vers l'atmosphère puis vers la calotte transitoire sud génèrent des tempêtes (de vent et de poussières) globales chaque fin d'hiver australe

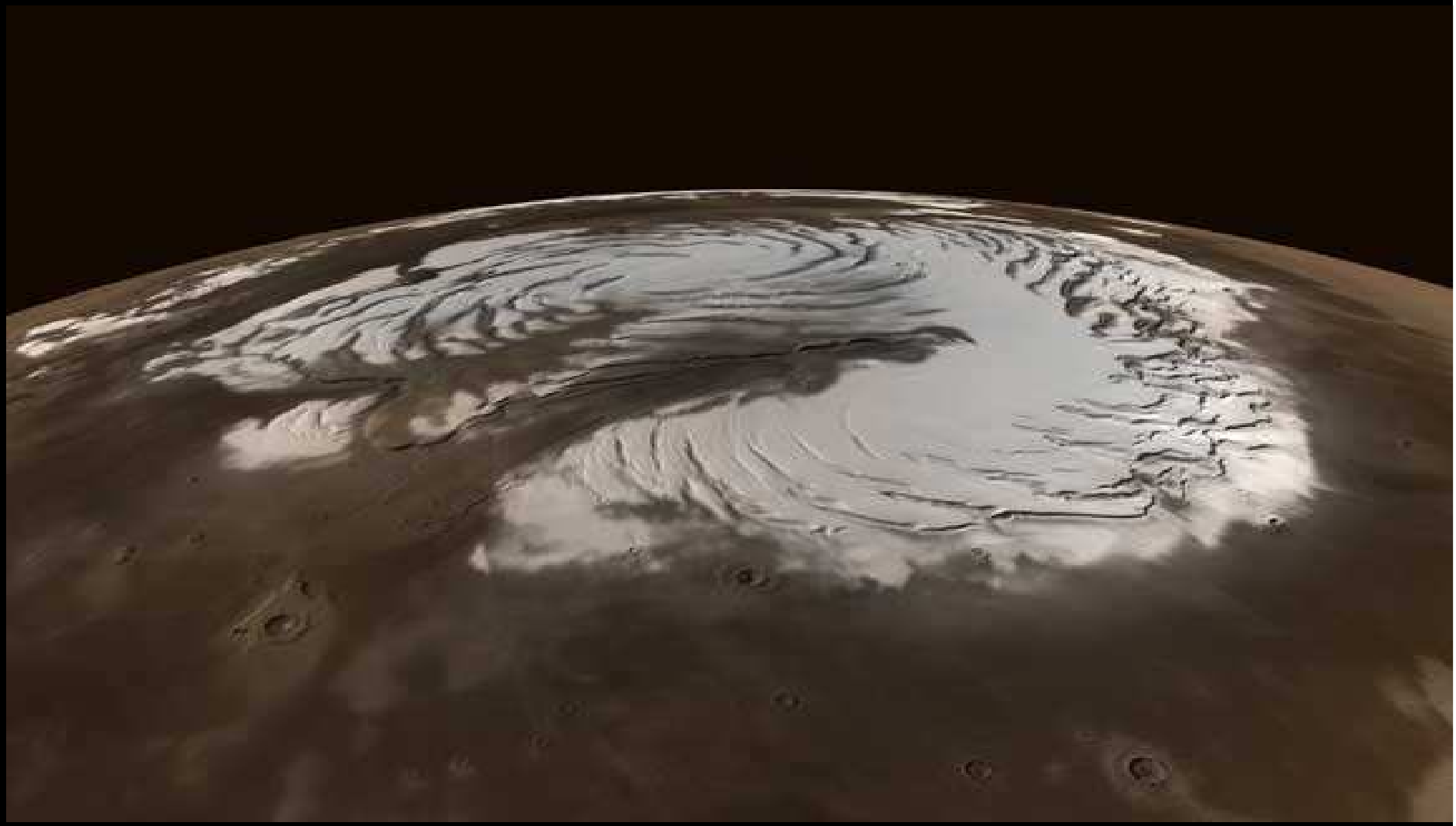


Il y a aussi de la vapeur d'H2O dans l'atmosphère (12 pr µm). La aussi cette quantité de vapeur d'eau varie avec les saisons, prouvant un passage périodique glace ←→ vapeur

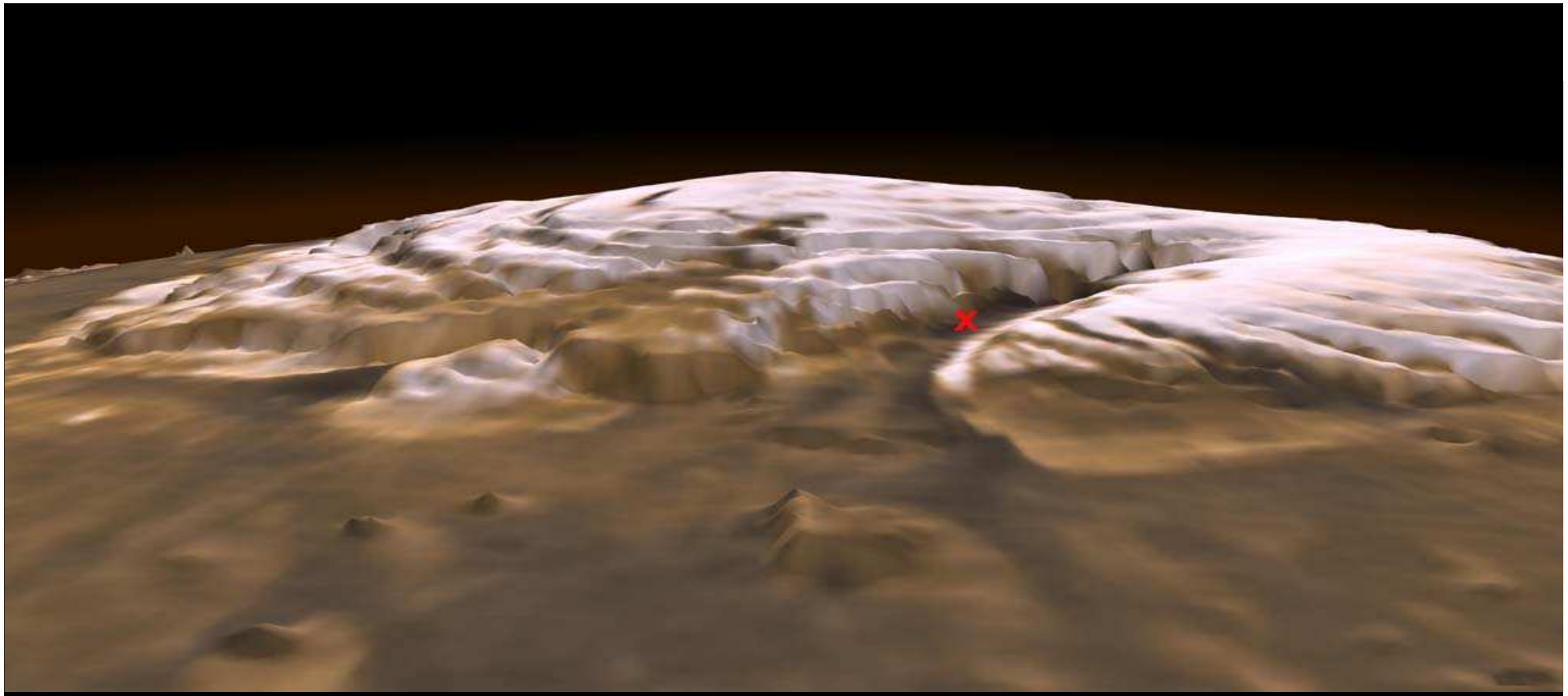


Photos Viking, 1976-1977

Ce passage glace ←→ vapeur d'H2O se voit très bien pour les latitudes supérieures à 45°, où le paysage se recouvre de givre toutes les nuits d'hivers, givre qui se sublime en fin 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'H2O

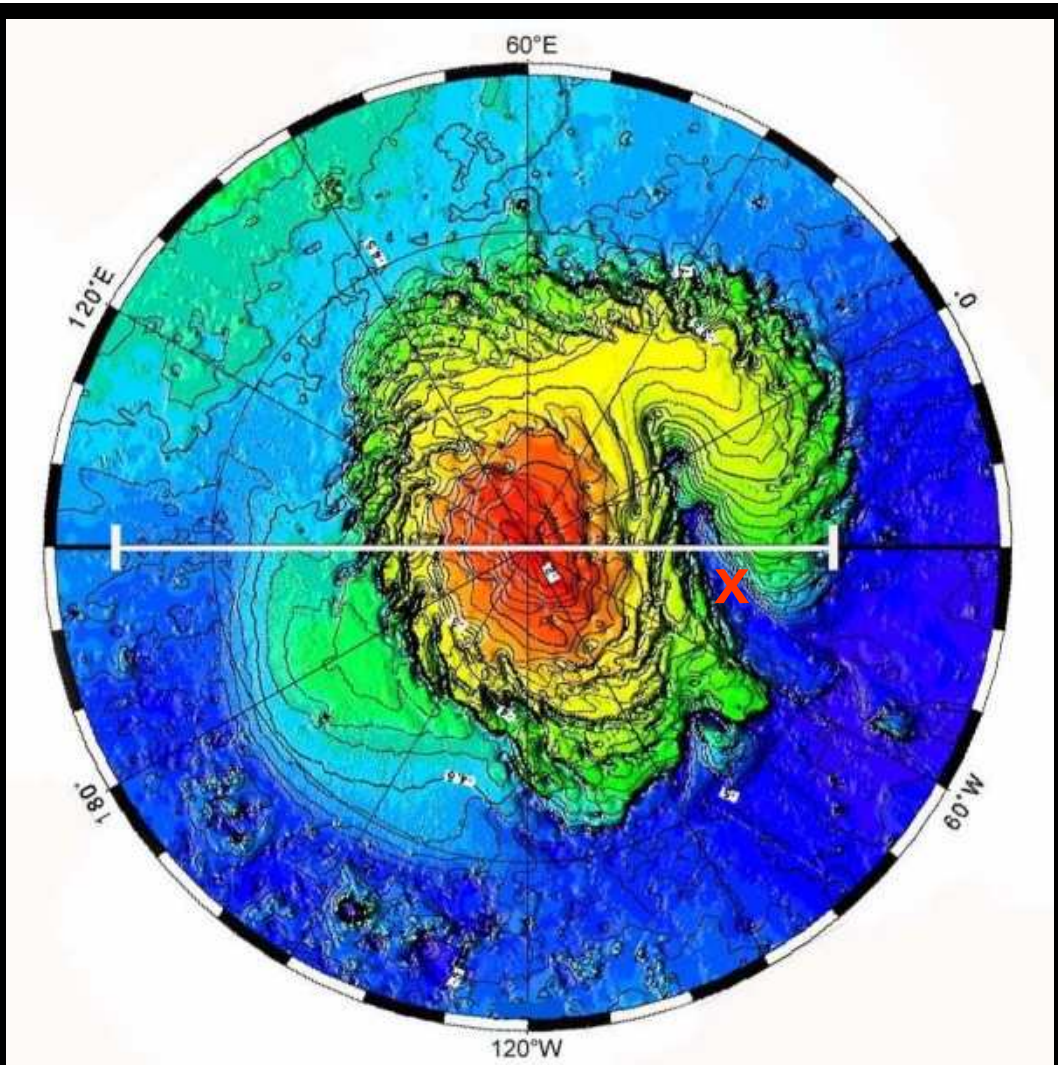


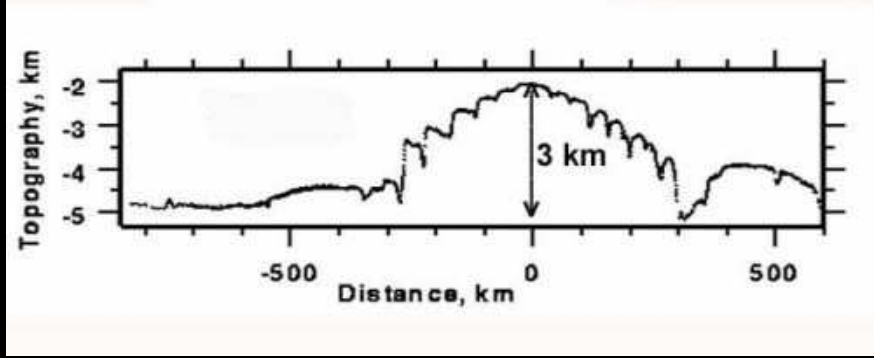
Commençons par la calotte nord
(D = 1000 km pour la calotte résiduelle).



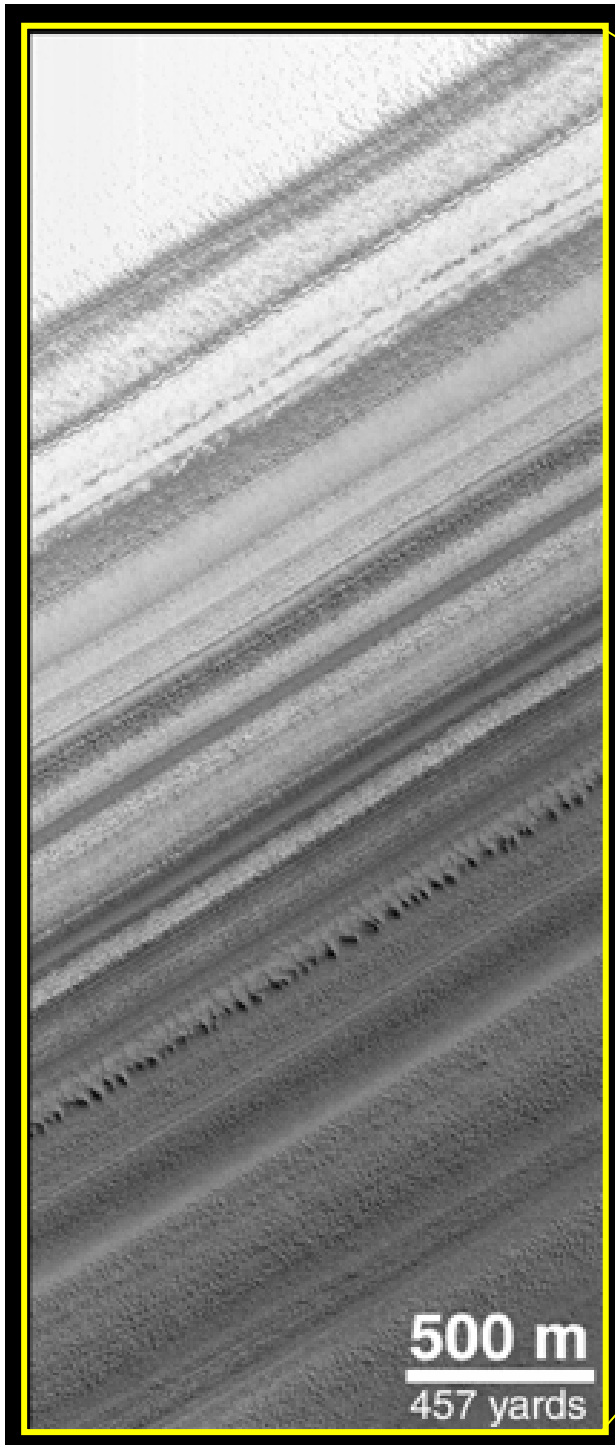
La calotte nord.

Ici, vue 3D (relief exagéré) montrant la calotte résiduelle d'été, parcourue par des vallées ou fossés (Chasma), d'origine mal comprise, dont « Boréale Chasma »

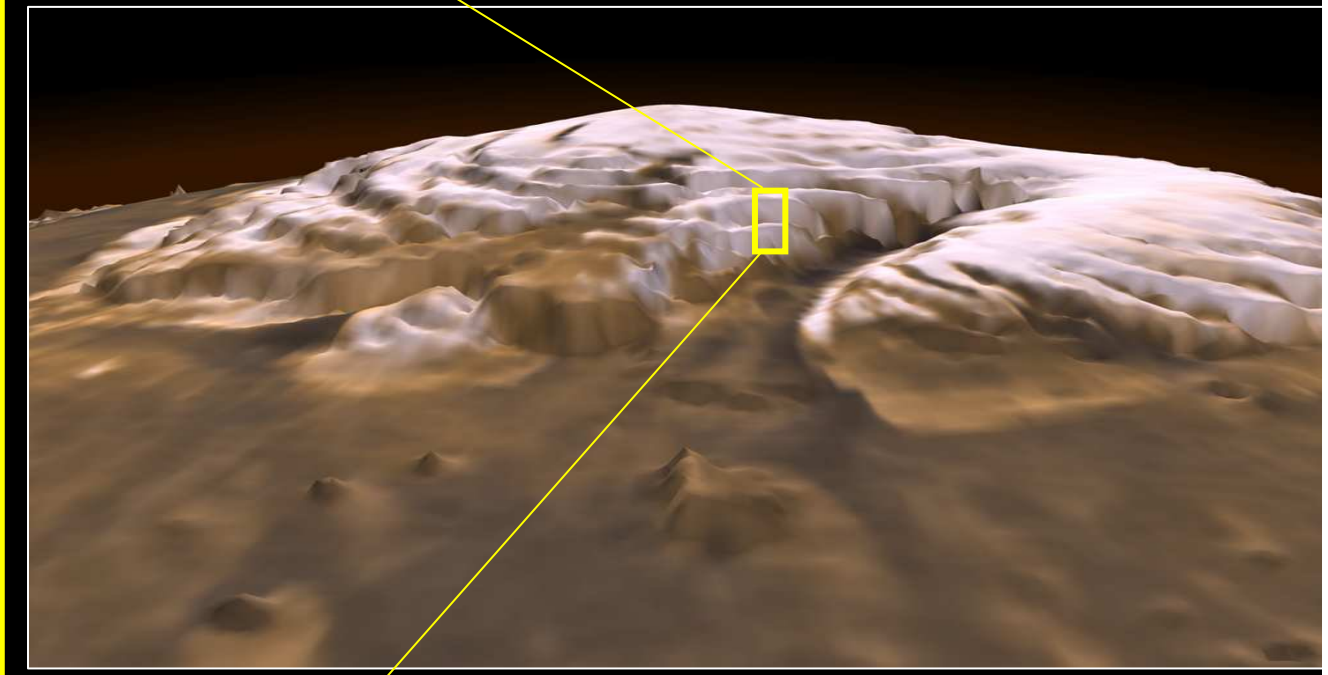




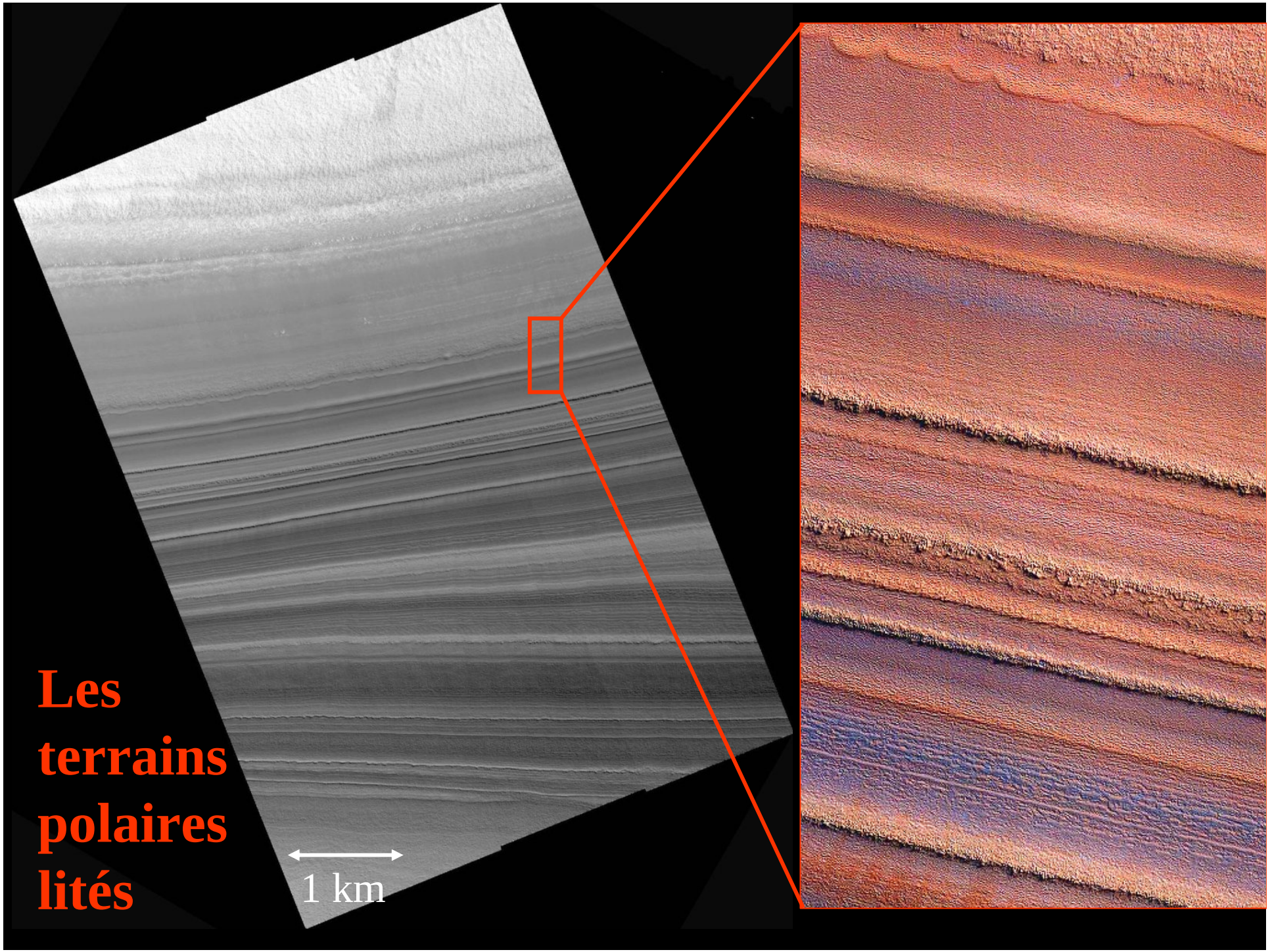
Carte et coupe topographique à travers la calotte permanente nord.

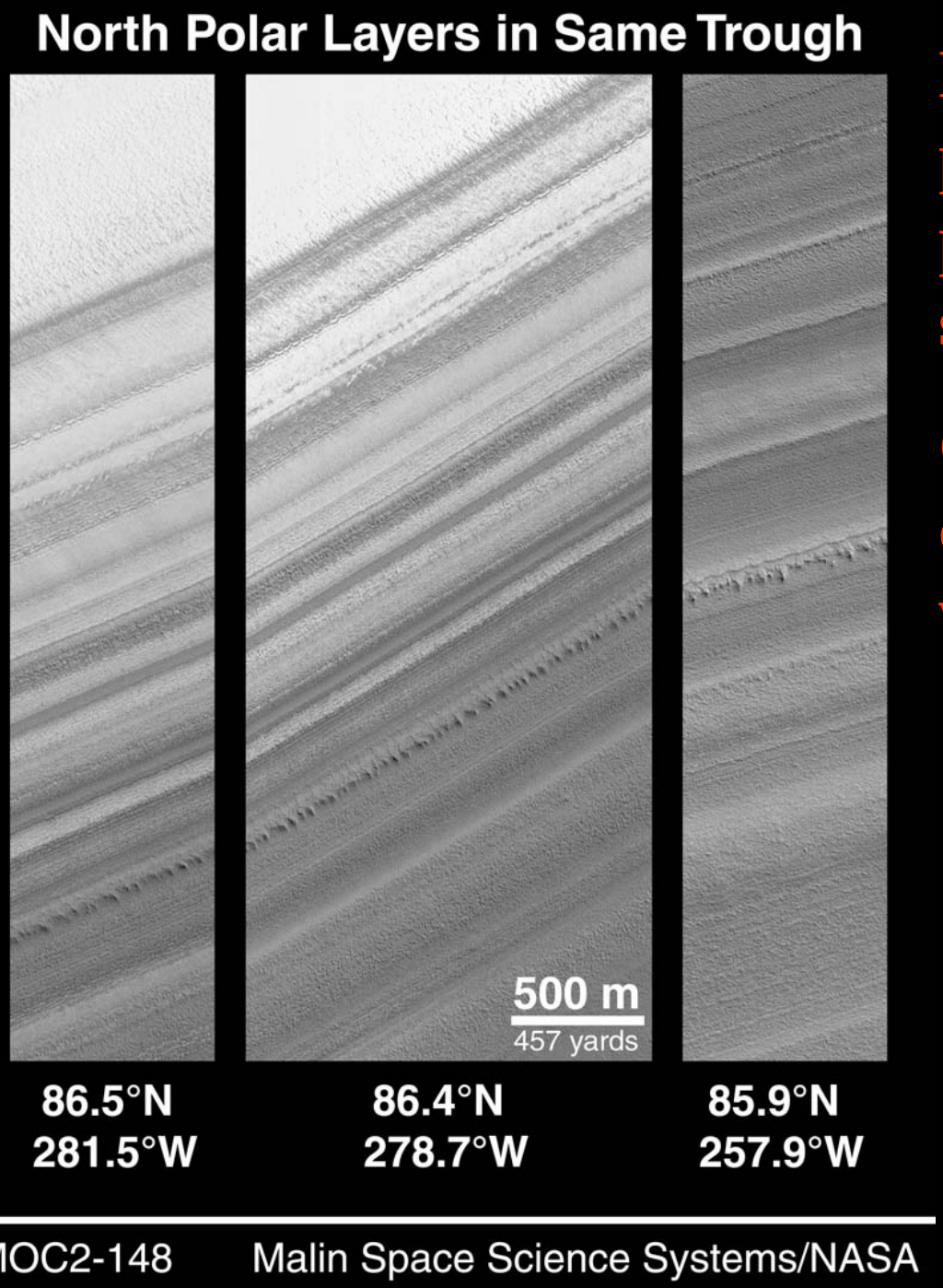


Les résultats des sondes « récentes » en orbite : on peut étudier les calottes polaires avec un luxe de détail.



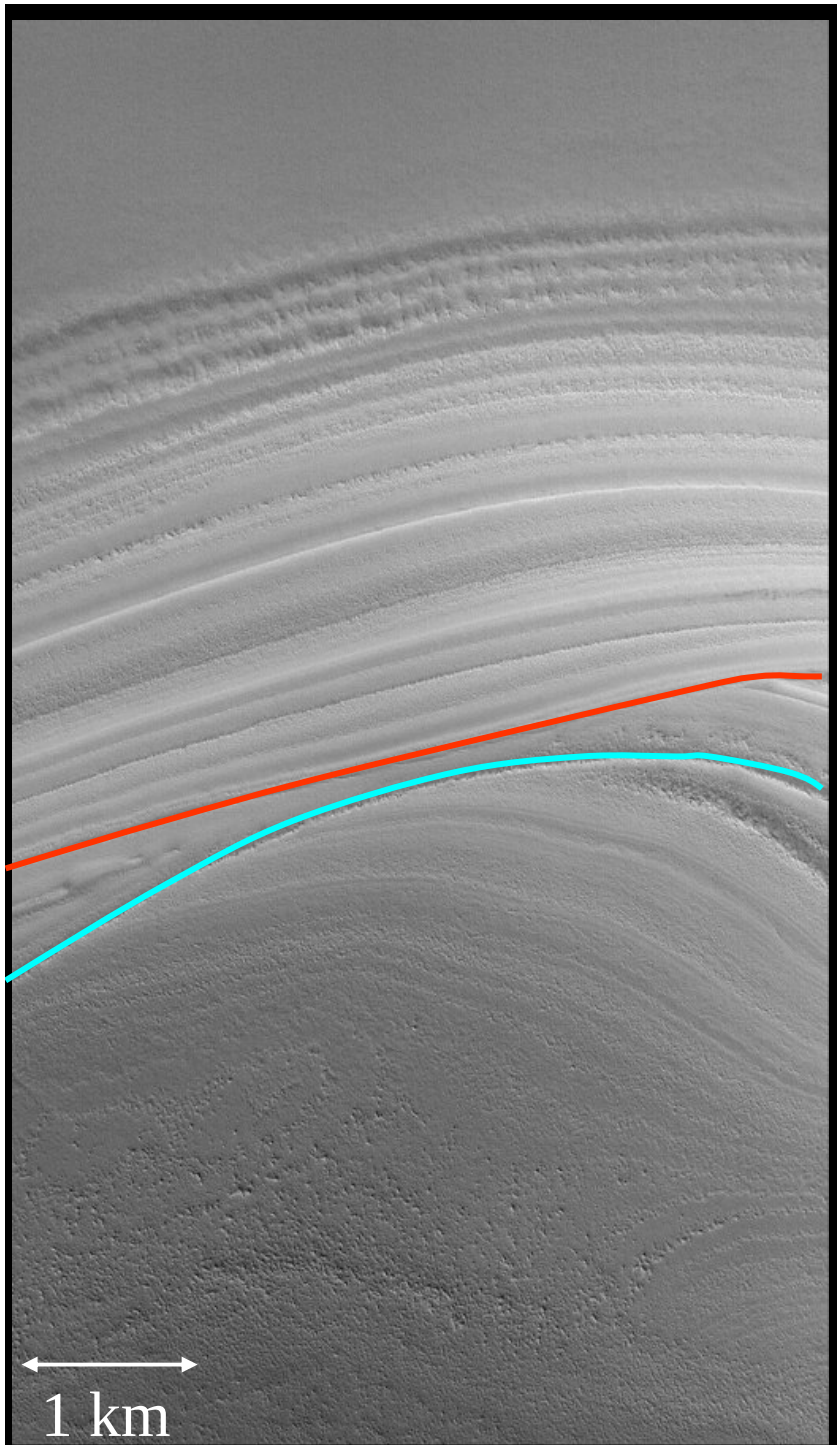
Les falaises bordières montrent des falaises (ici 1000m) qui permettent de voir que la calotte est constituée d'une succession de couches de glace d'H2O plus ou moins riche en poussières


Les terrains polaires lités
1 km

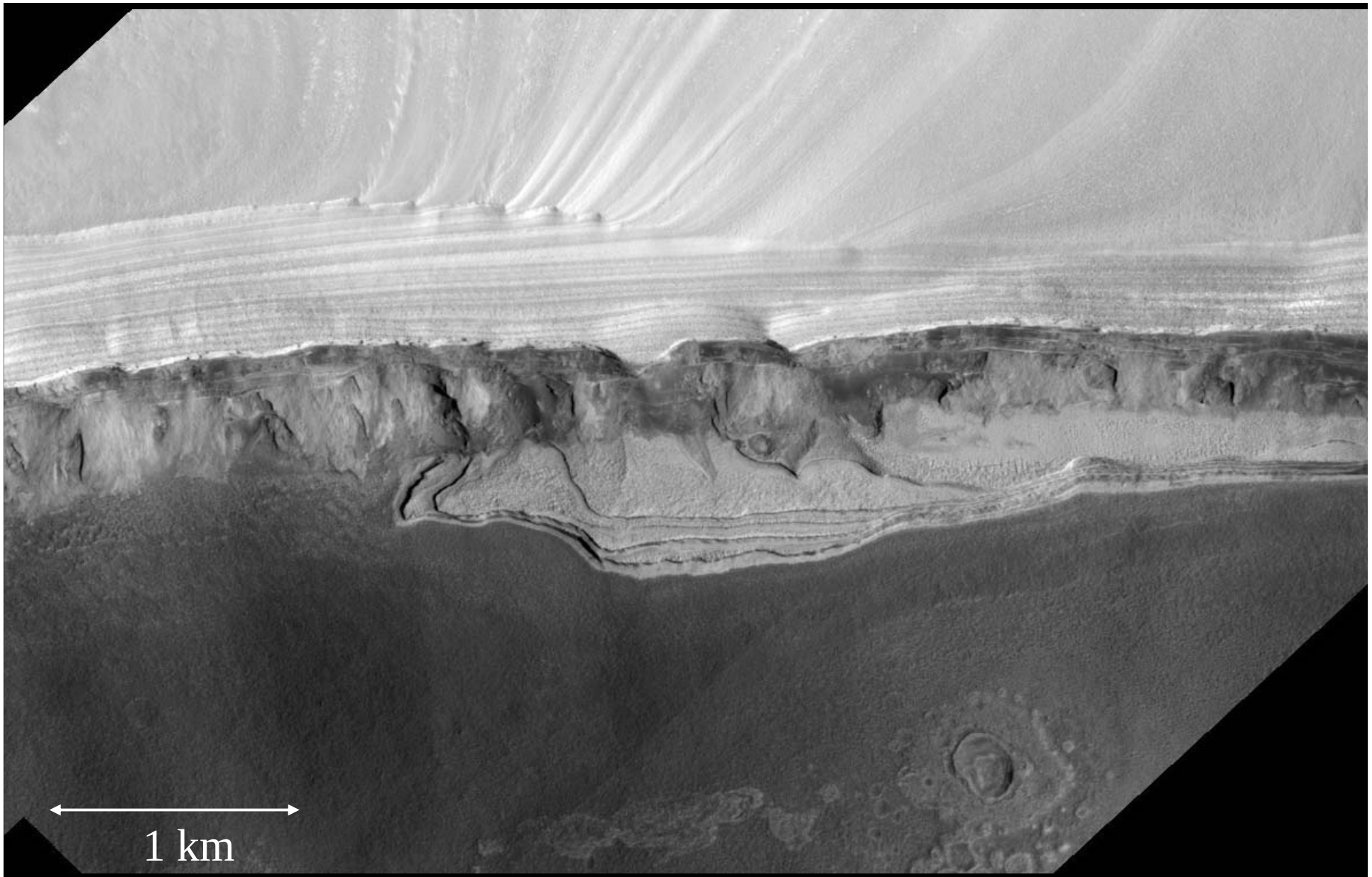


Des couches de glace plus ou moins poussiéreuses, qui se suivent des km.

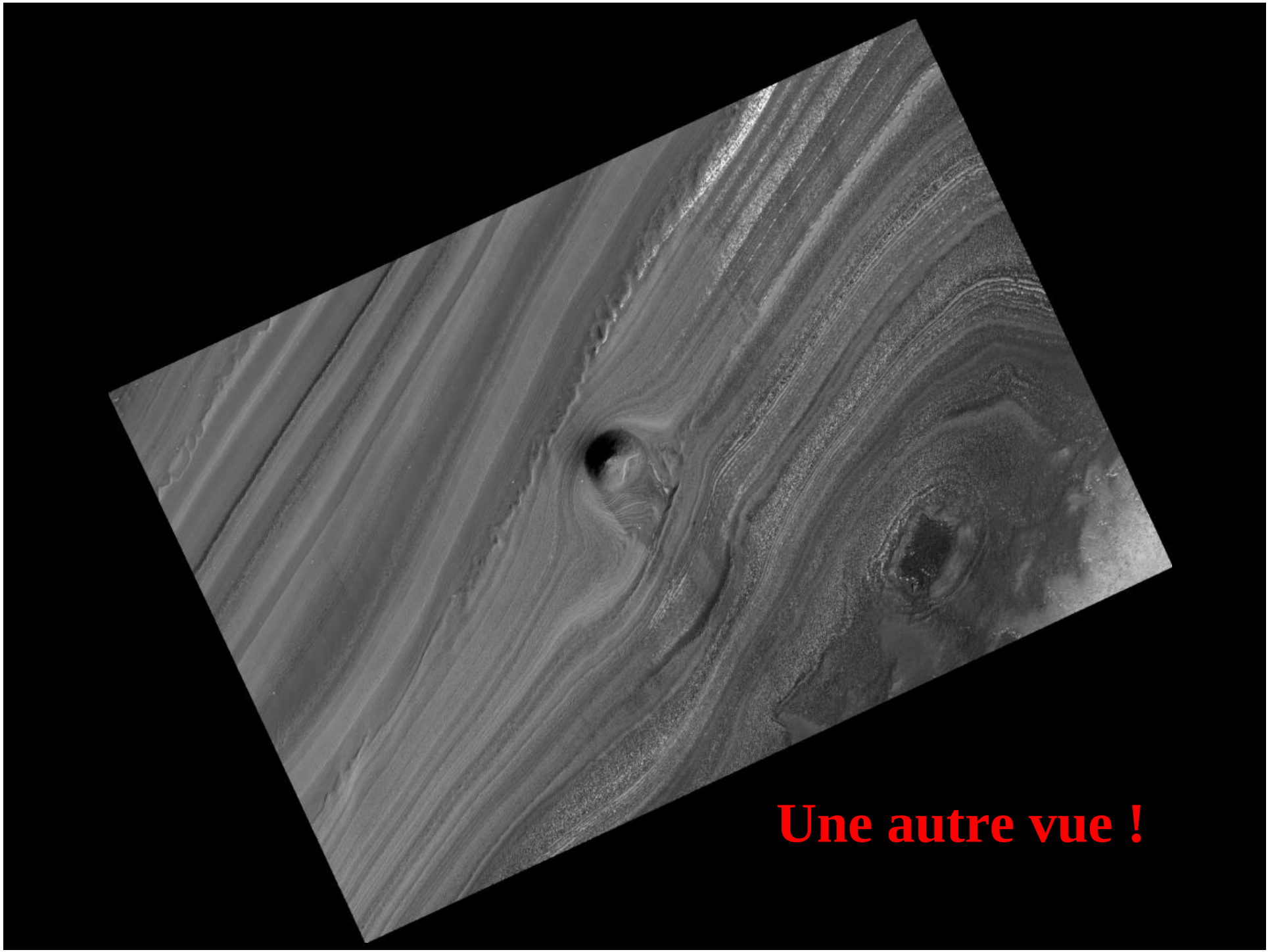
Cela sent les variations climatiques globales, voir Milankovitch



Il y a des « discordances » internes, montrant qu'il existe des phénomènes d'ablations. Dépôts de couches de glace poussiéreuse et ablations alternent.

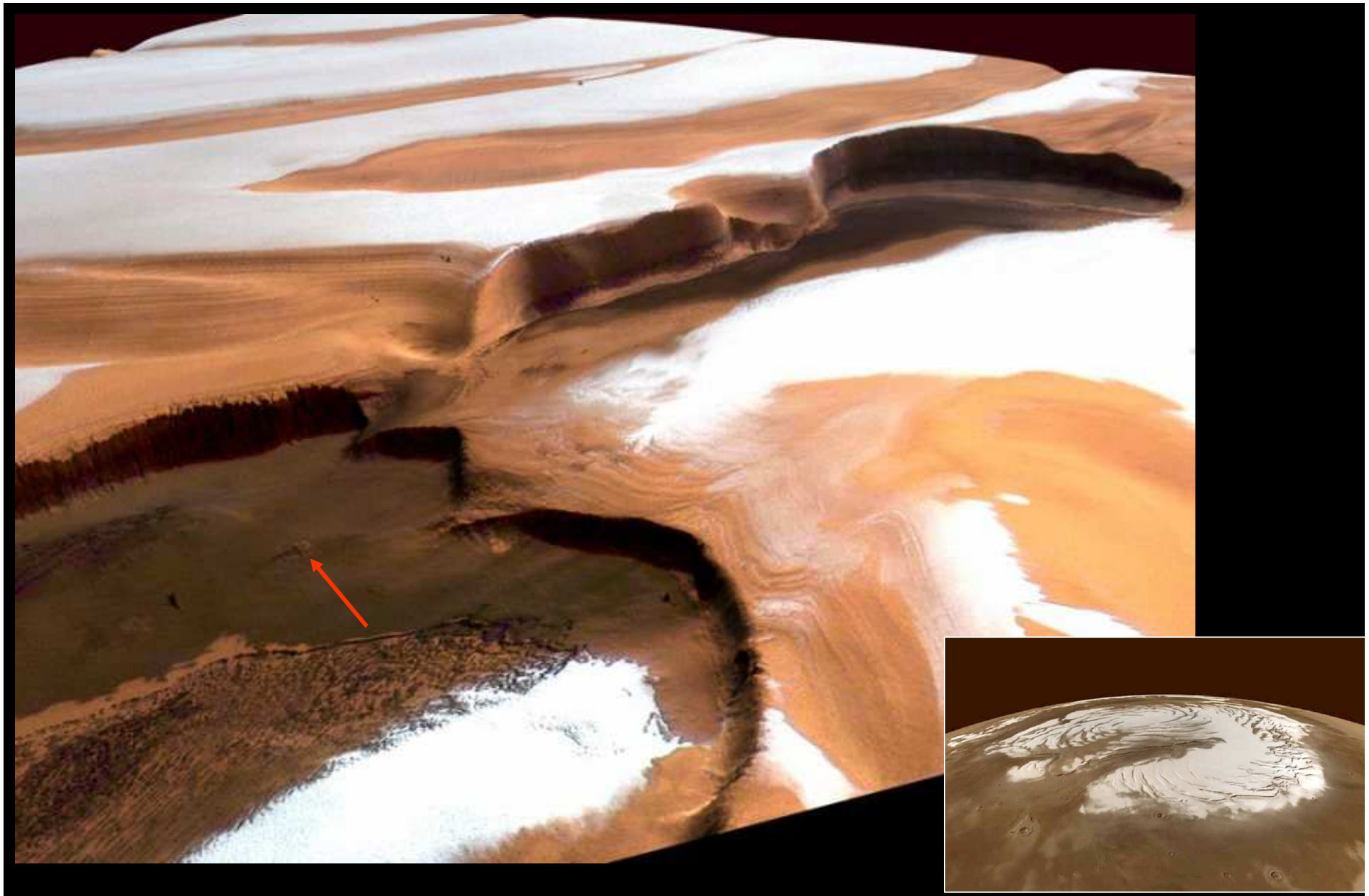


Une belle vue oblique, montrant que la structure interne est complexe

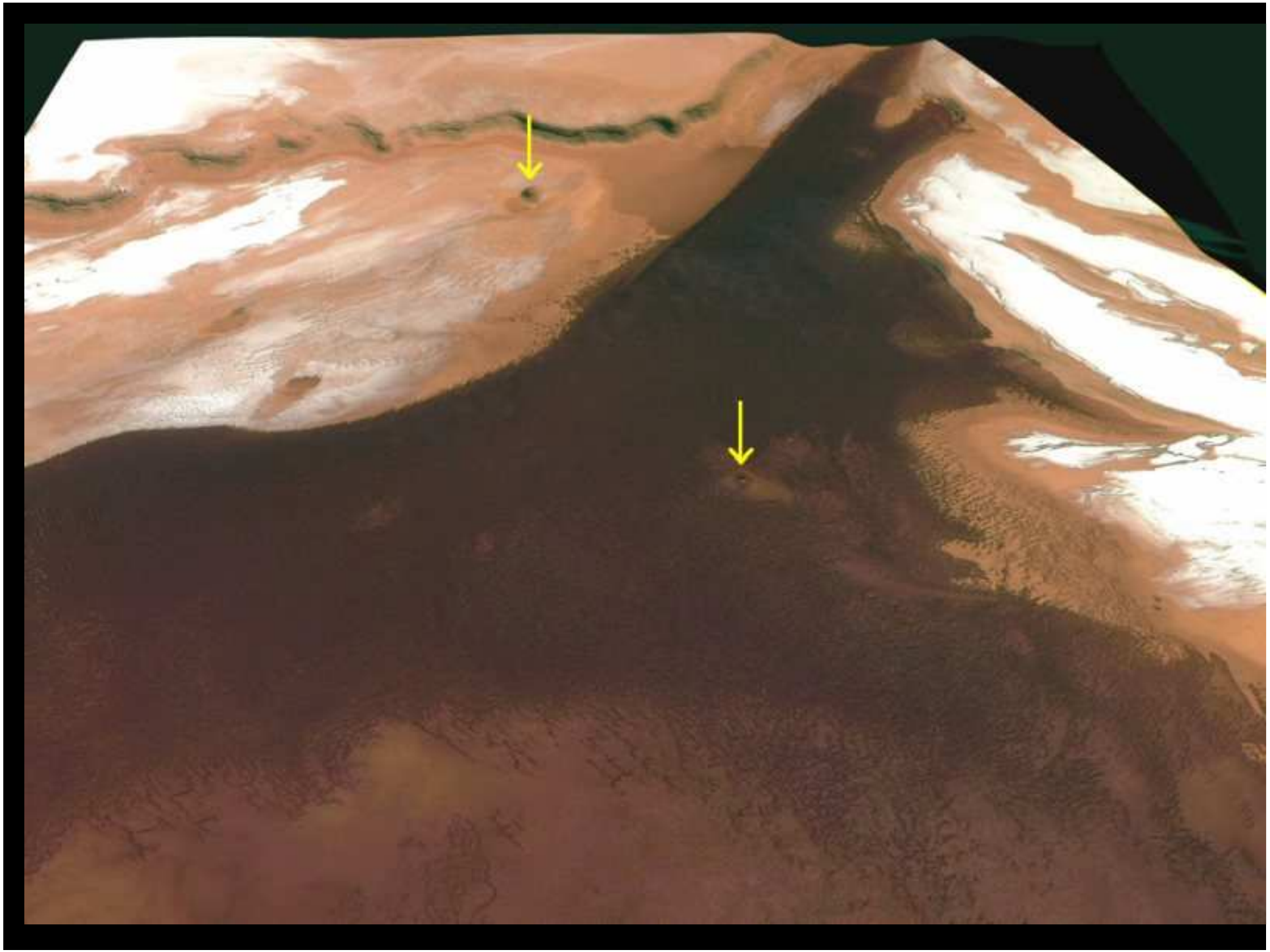

Une autre vue !

La complexité de ces terrains polaires lités !

Un étonnement : on ne voit quasiment pas de manifestation de fluage, d'écoulement, contrairement aux paléo-glaciers des montagnes équatoriales

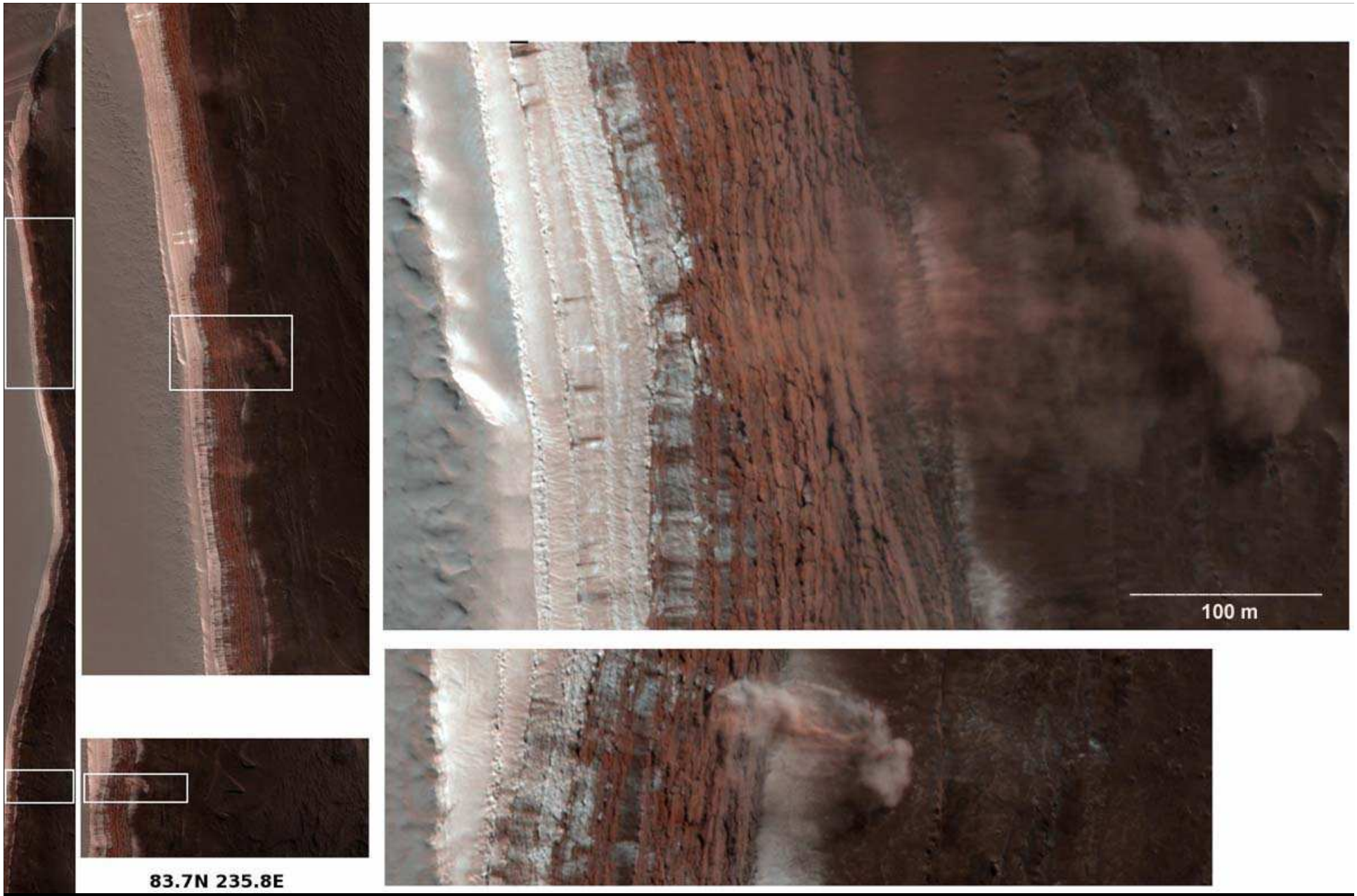


Dans les « chasmas », de drôles de structures



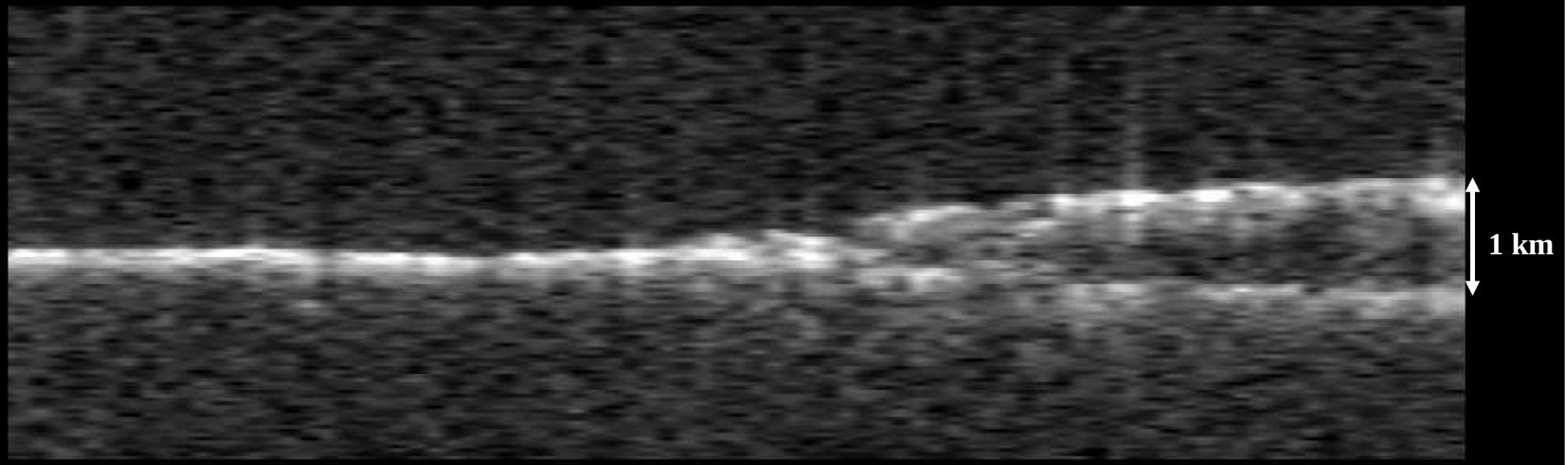
Des volcans ? Ou des ….

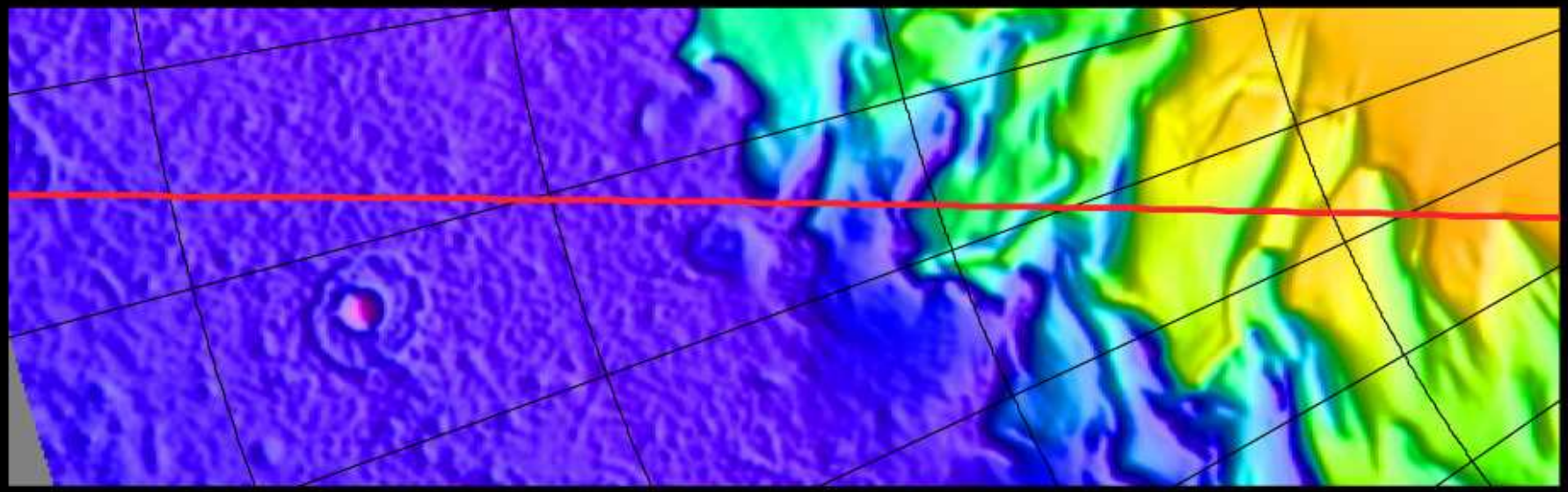
… ou des pingos ?



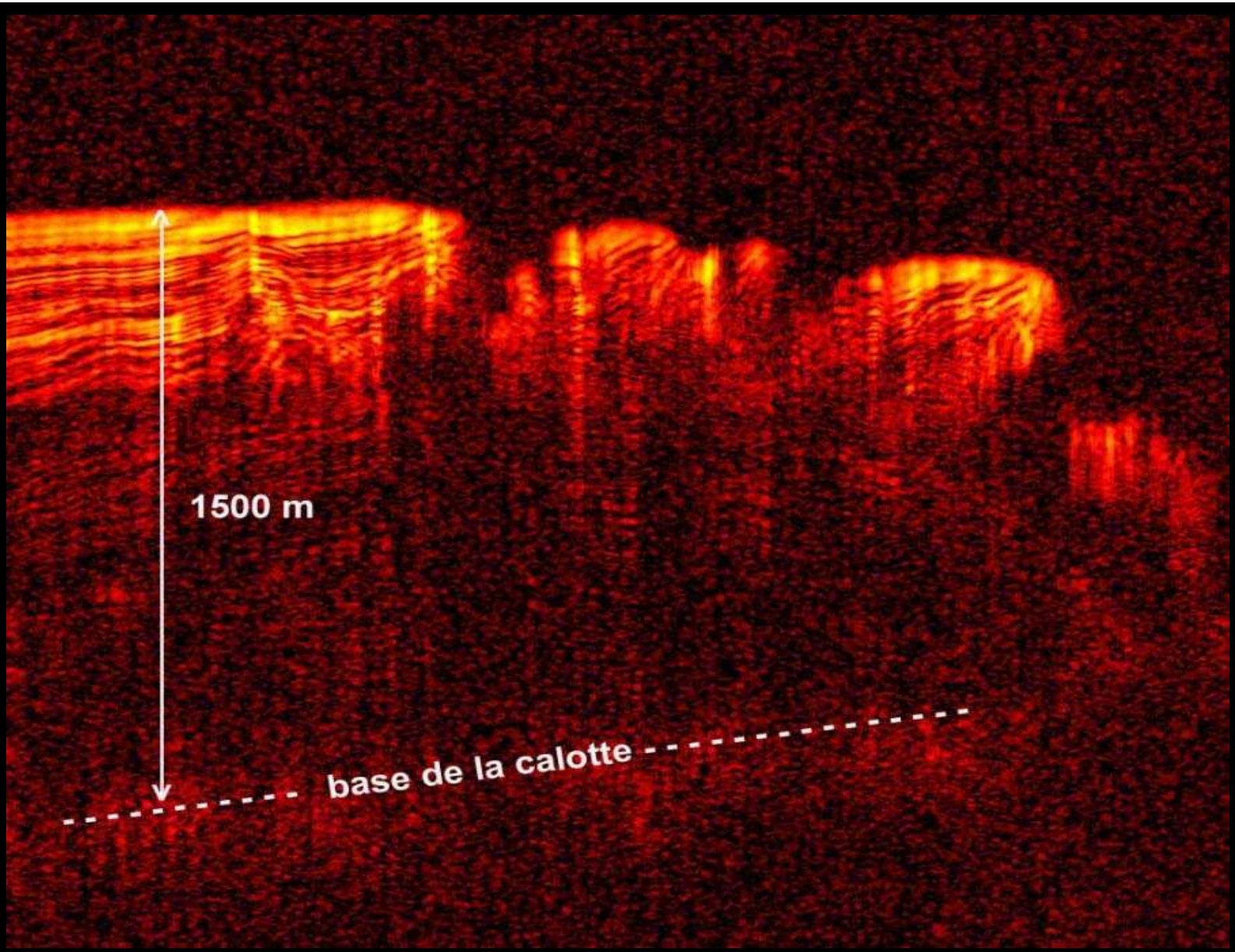
Deux avalanches printanières simultanées, distantes de 8 km et dévalant une pente de 700 m de dénivelé

Gros plan sur la petite 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

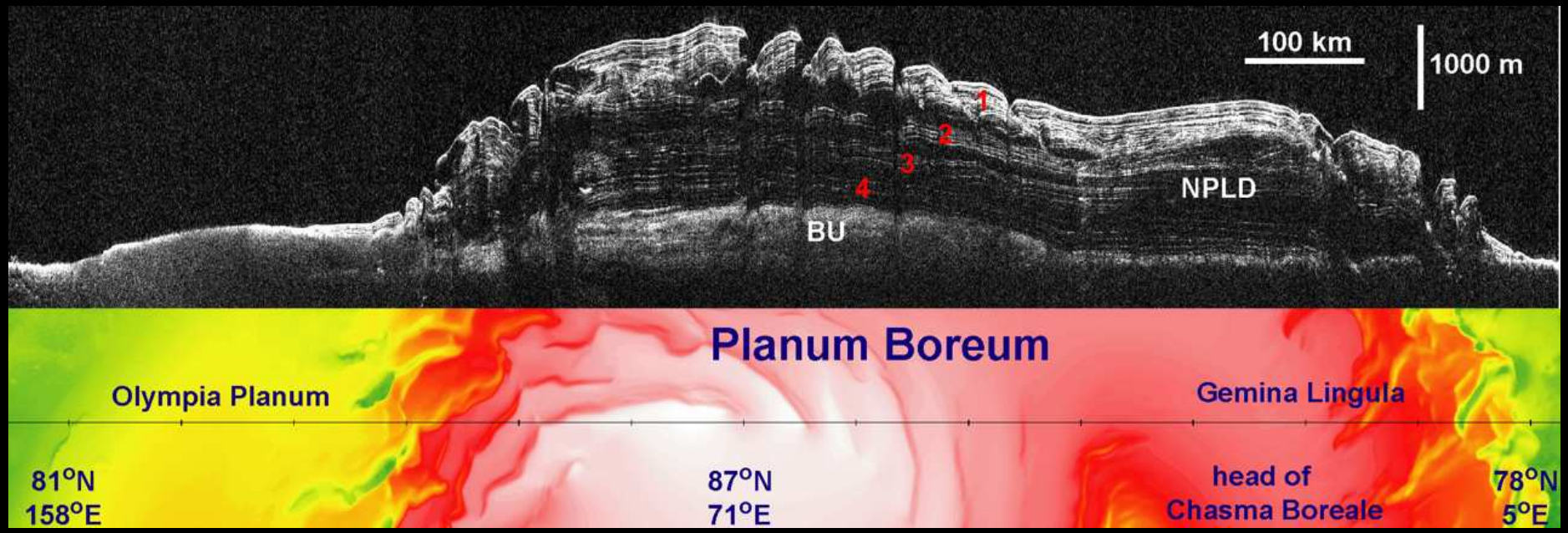




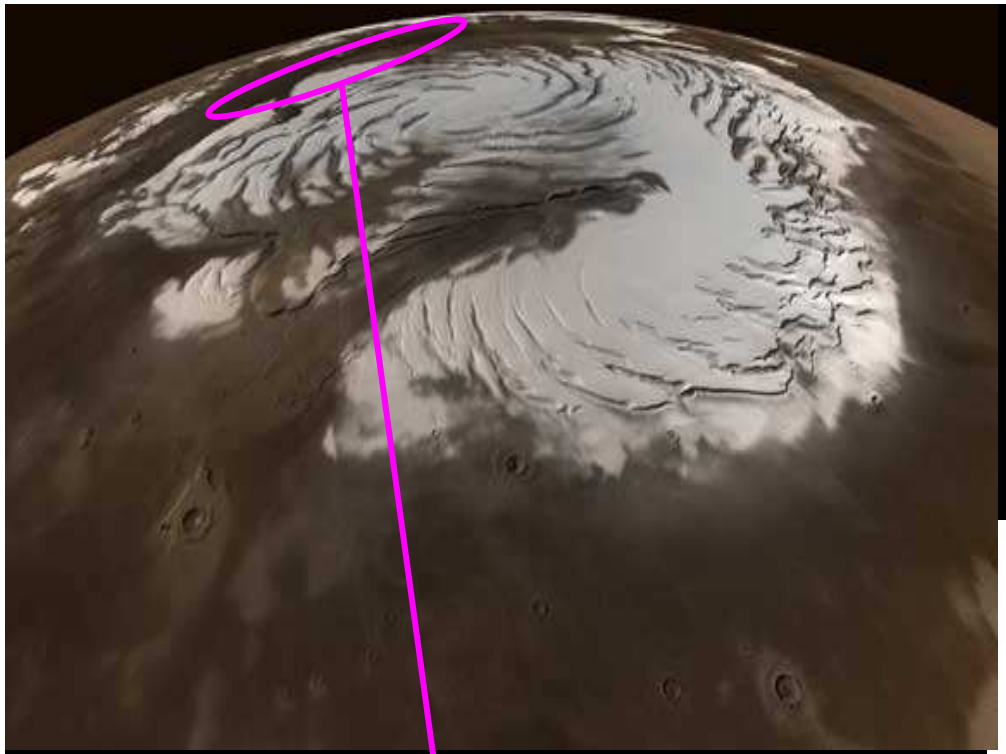
Pour la 1ère fois, le radar de Mars Express mesure l'épaisseur de cette calotte permanente nord, faite de TPL



Une autre vue, prise par le radar de MRO, moins pénétrant mais de meilleure résolution



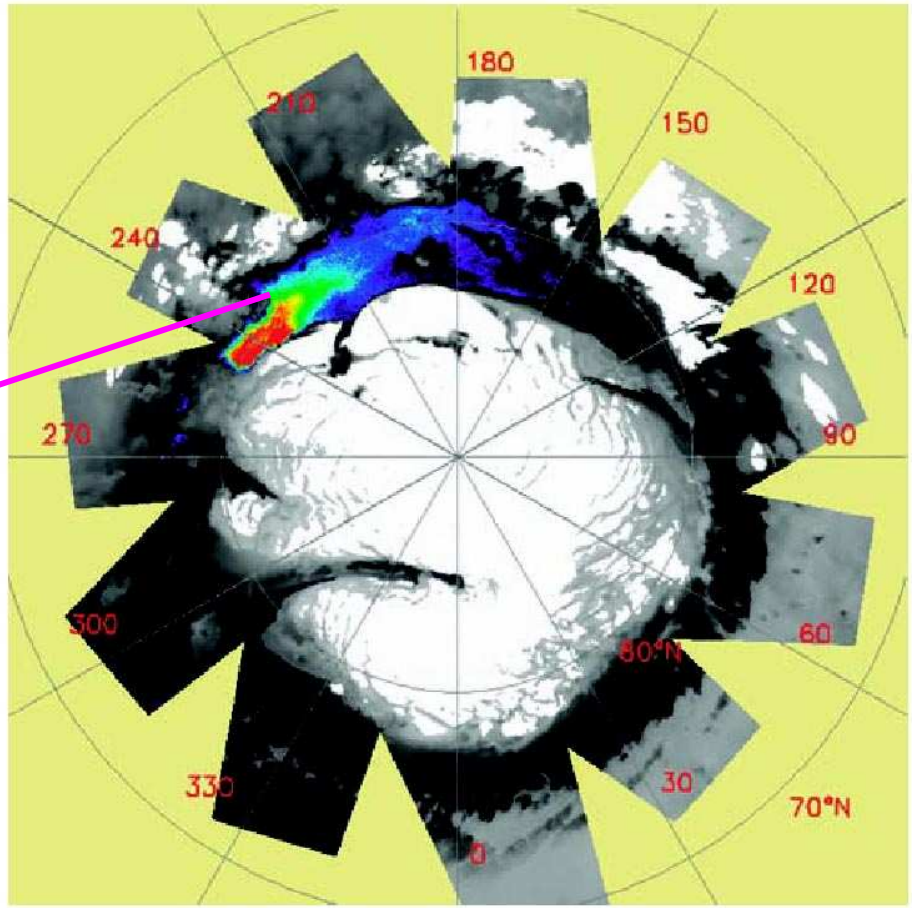
Une coupe radar globale de la calotte permanente nord. On y verrait 4 « cycles ».



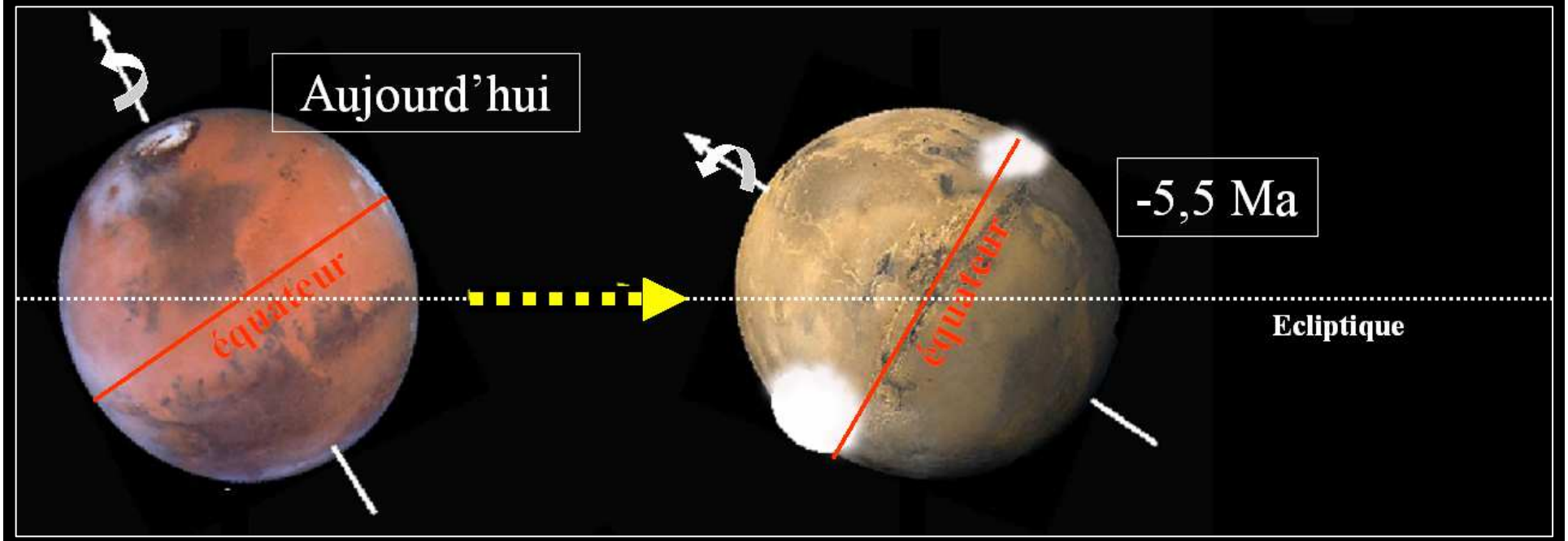
La calotte polaire nord :

← vue oblique

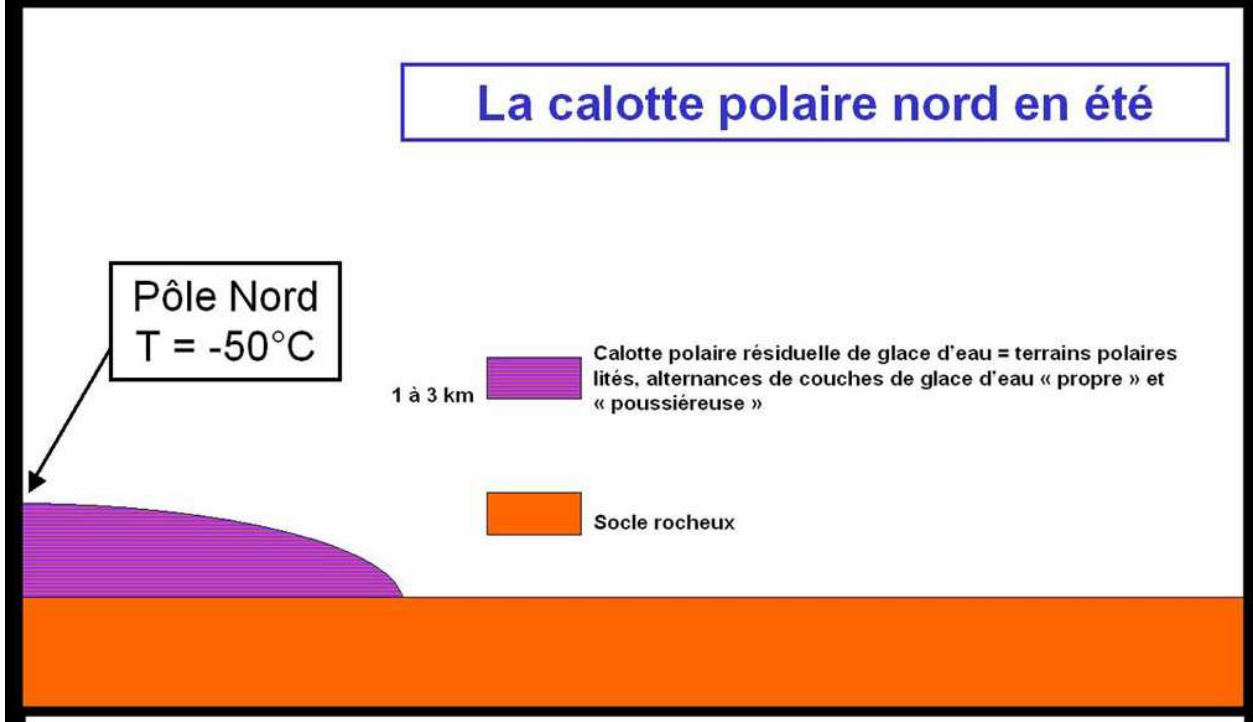
vue verticale

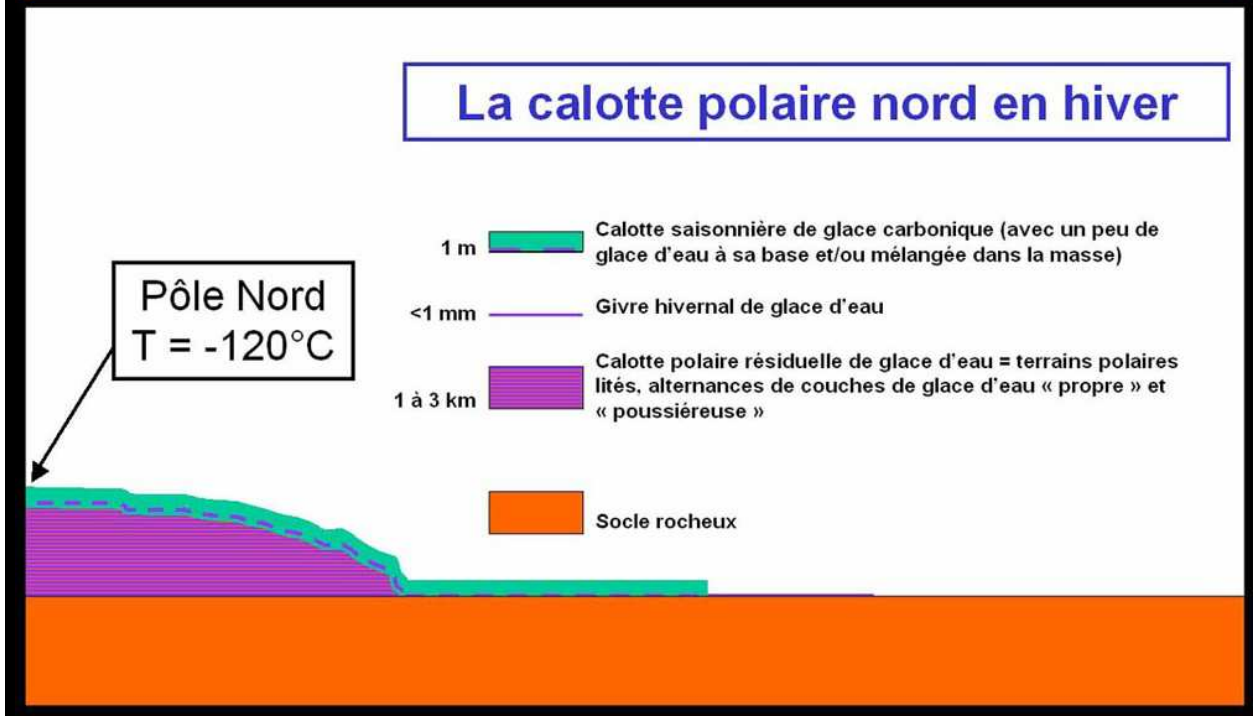


Les zones colorées contiennent entre 6% (bleu foncé) et 25 % (rouge) de sulfates, vraisemblablement du gypse

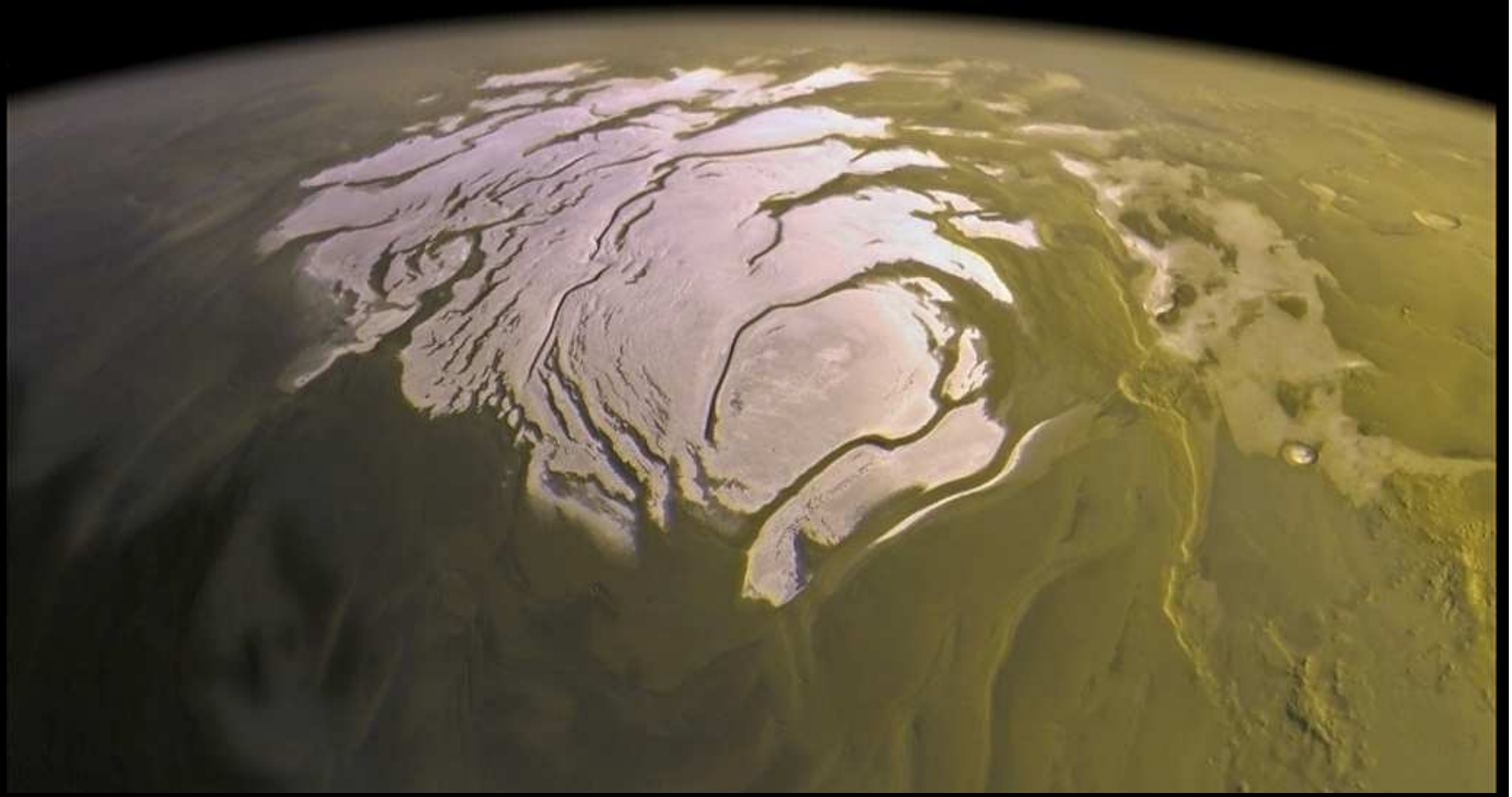


D'où viendraient ces évaporites polaires ?
Peut-être de la sublimation totale de la calotte estivale, ce qui arriverait quand l'axe de rotation de Mars s'incline fortement.
Ce serait arrivé la dernière fois il y a –5,5 Ma



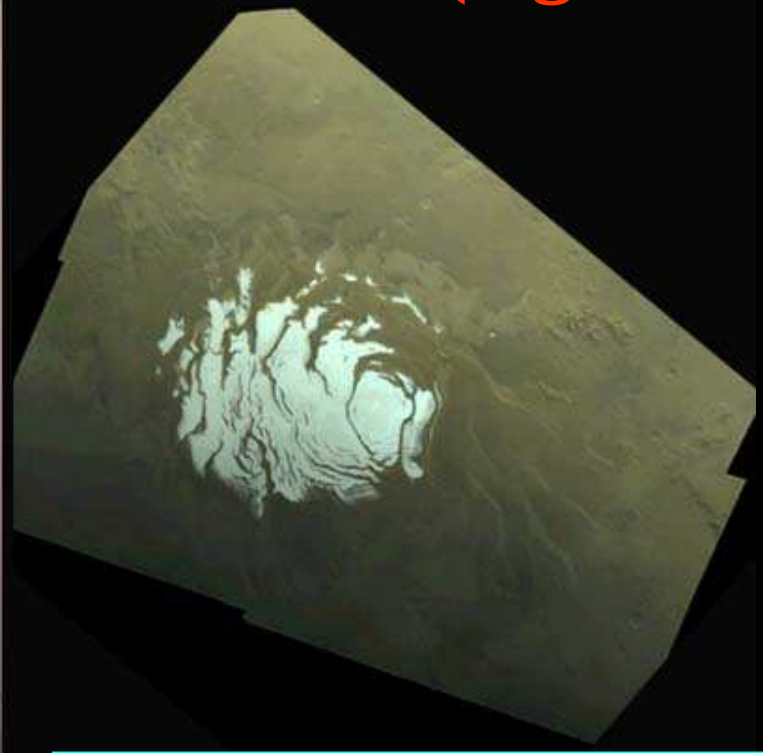


Le modèle « ante Phoenix » de la (des) calotte(s) polaire(s) nord dans la situation actuelle



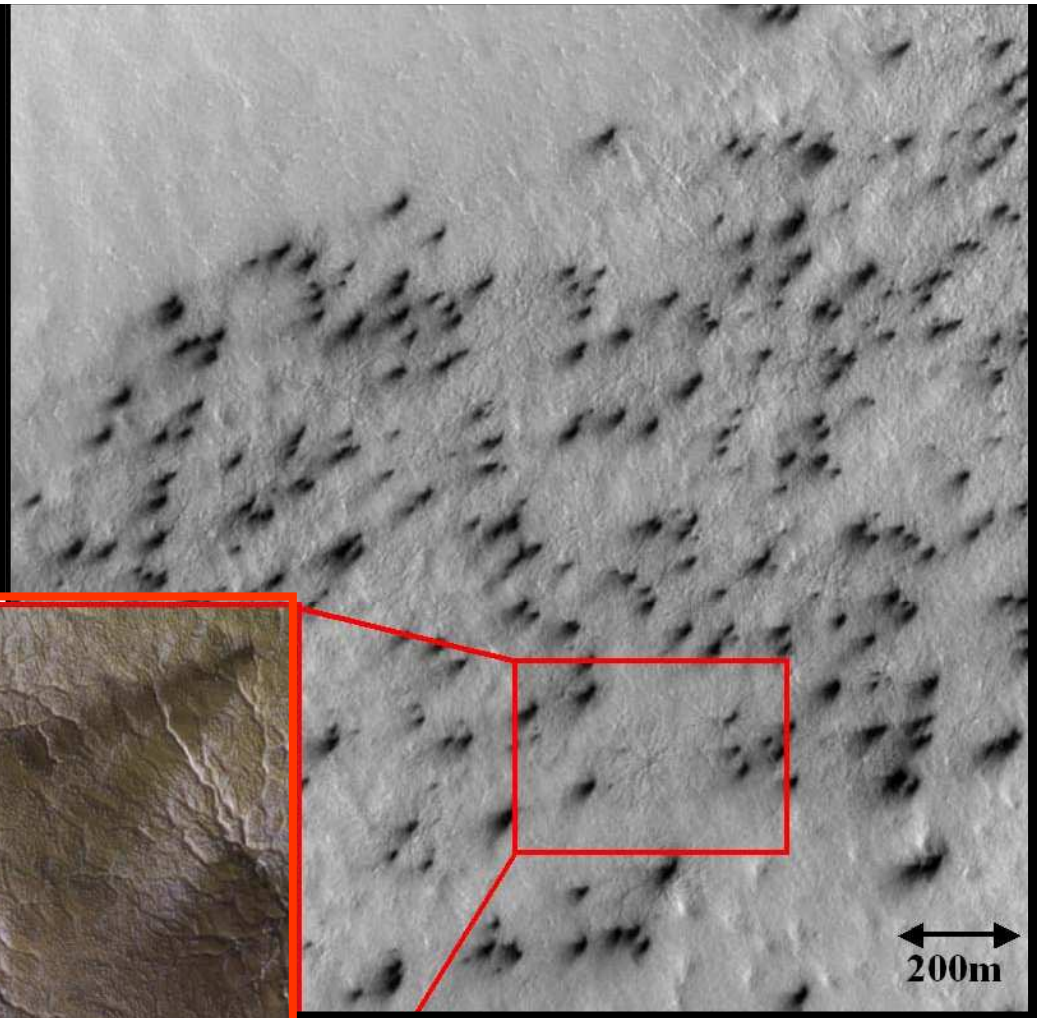
Passons à la calotte sud, en nous occupant d'abord de la calotte transitoire, dont nous n'avons que très parlé pour le nord

La calotte sud, l'été (à droite, D = 300 km) et l'hiver (à gauche)



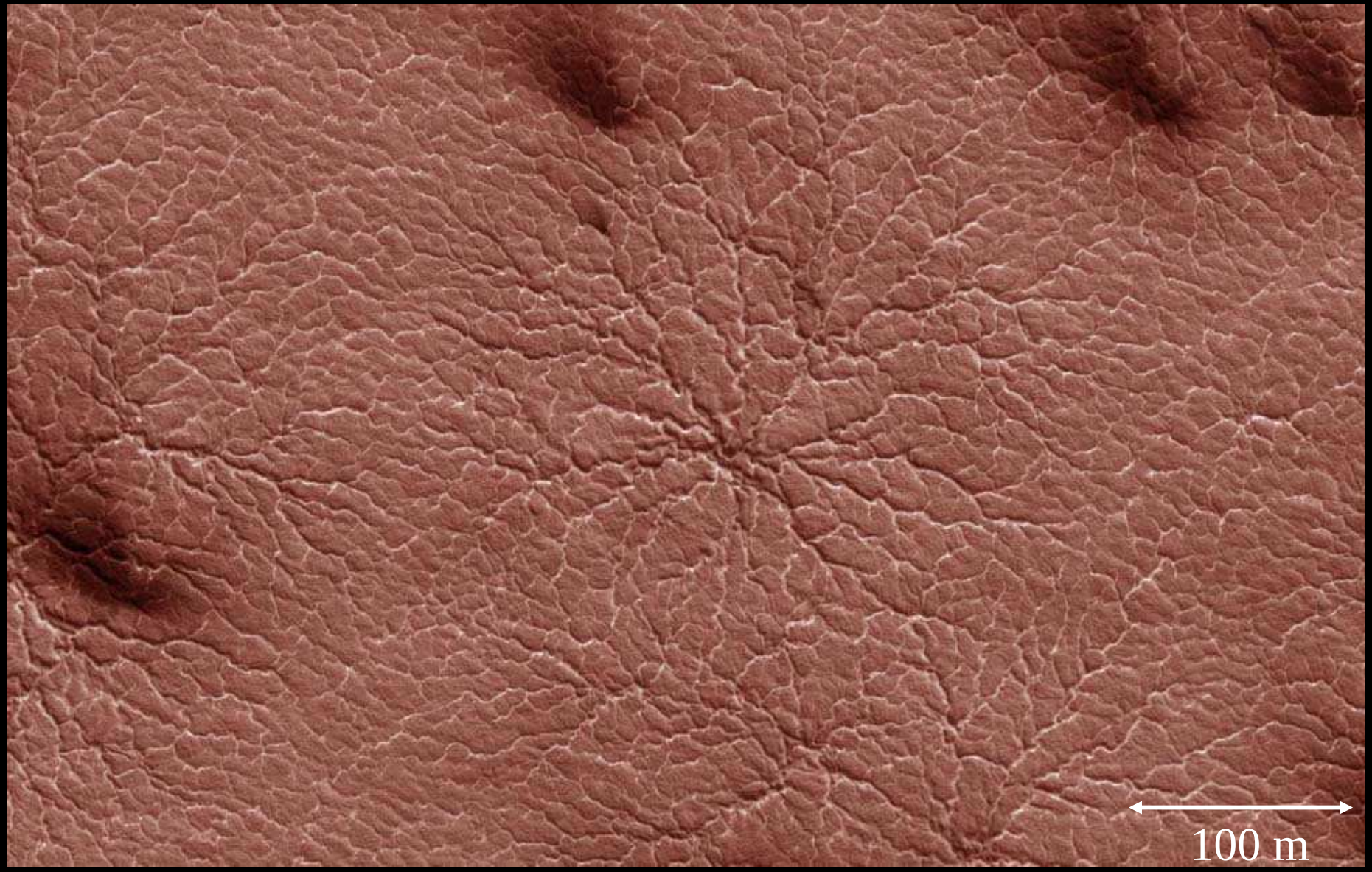
Noter une certaine transparence de la calotte transitoire en fonction de l'angle l'éclairage et de la prise de vue

Gros plan sur la calotte transitoire sud

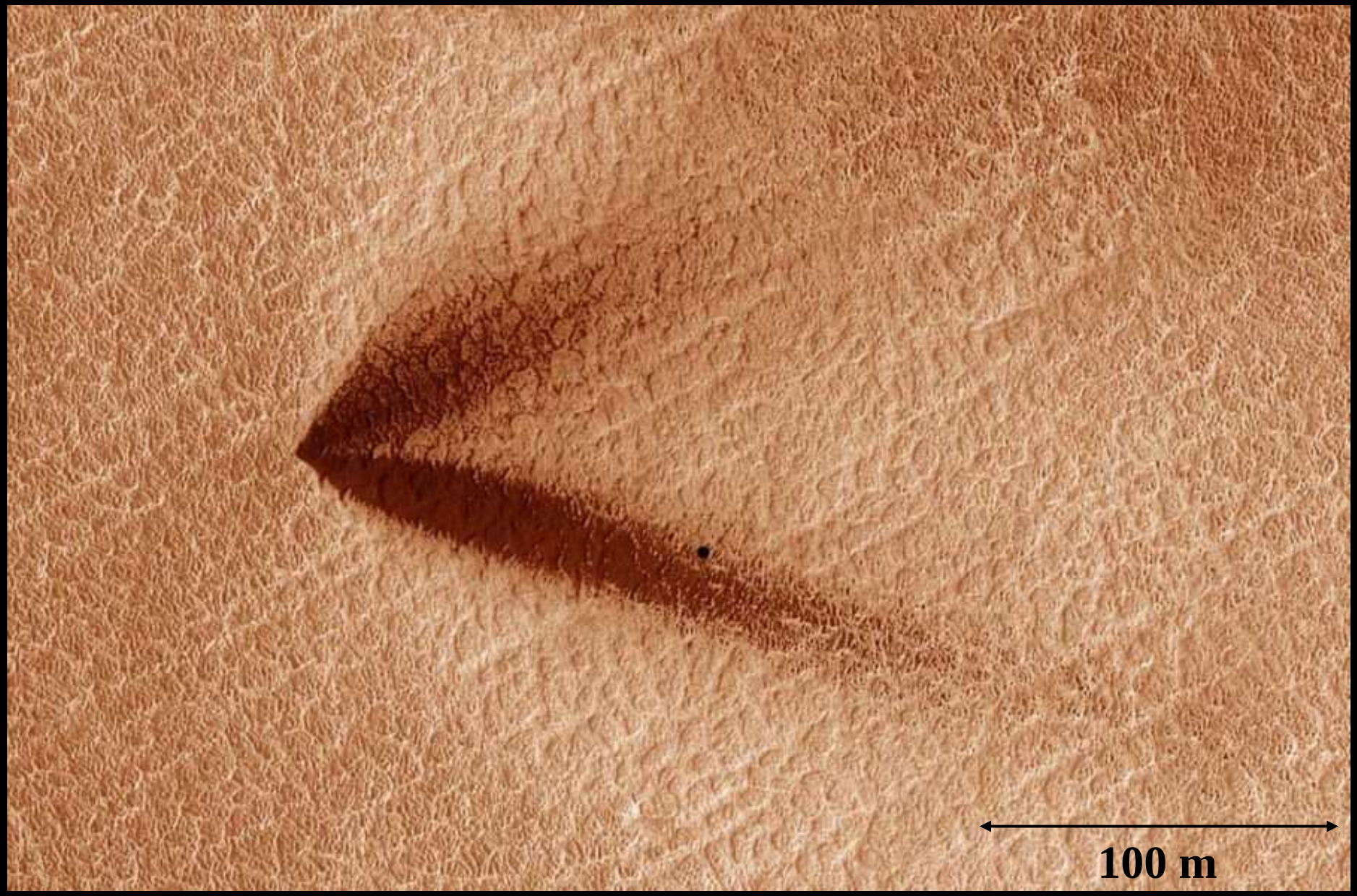


Elle est :

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

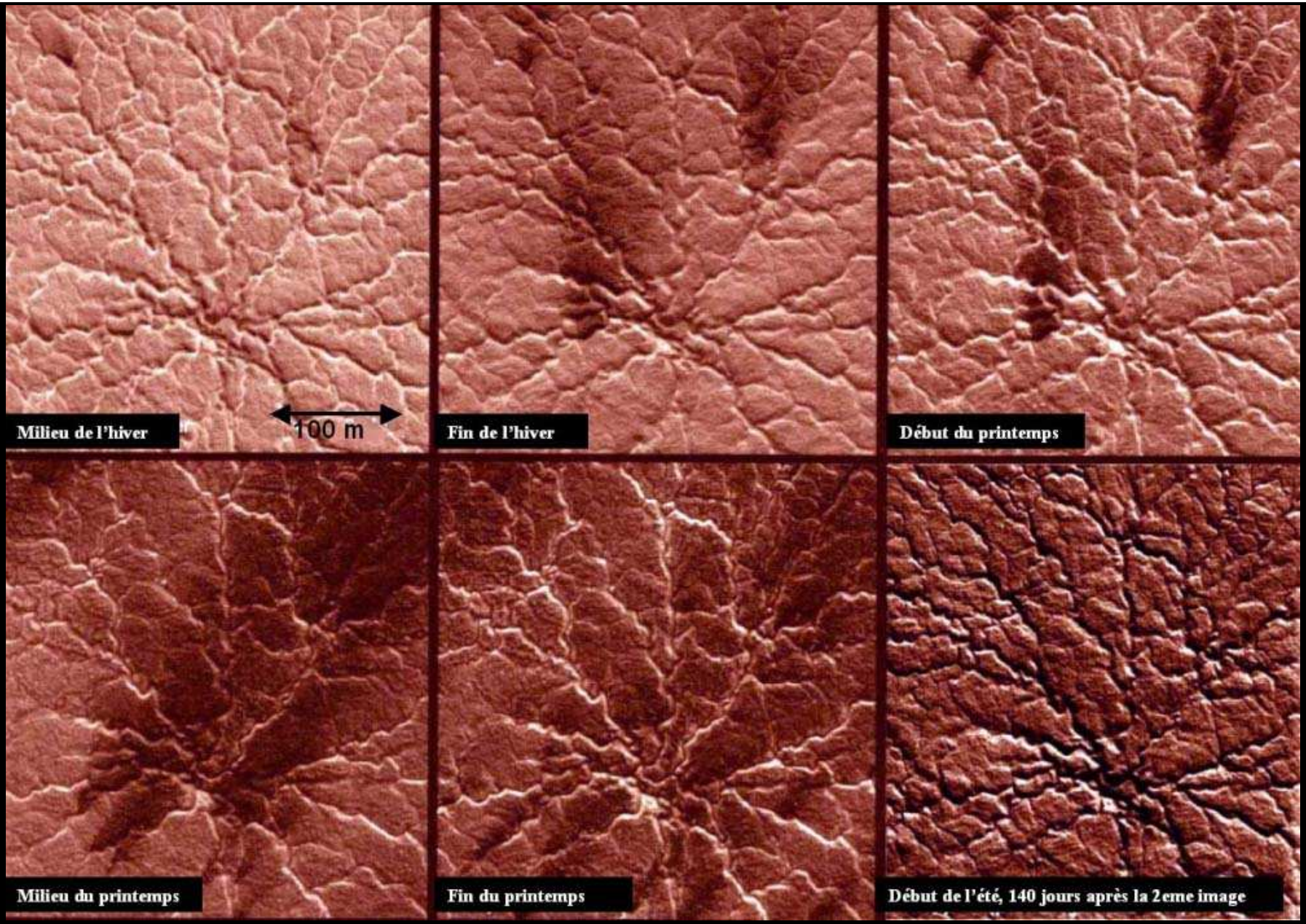


Gros plan sur les fractures, « en araignée »

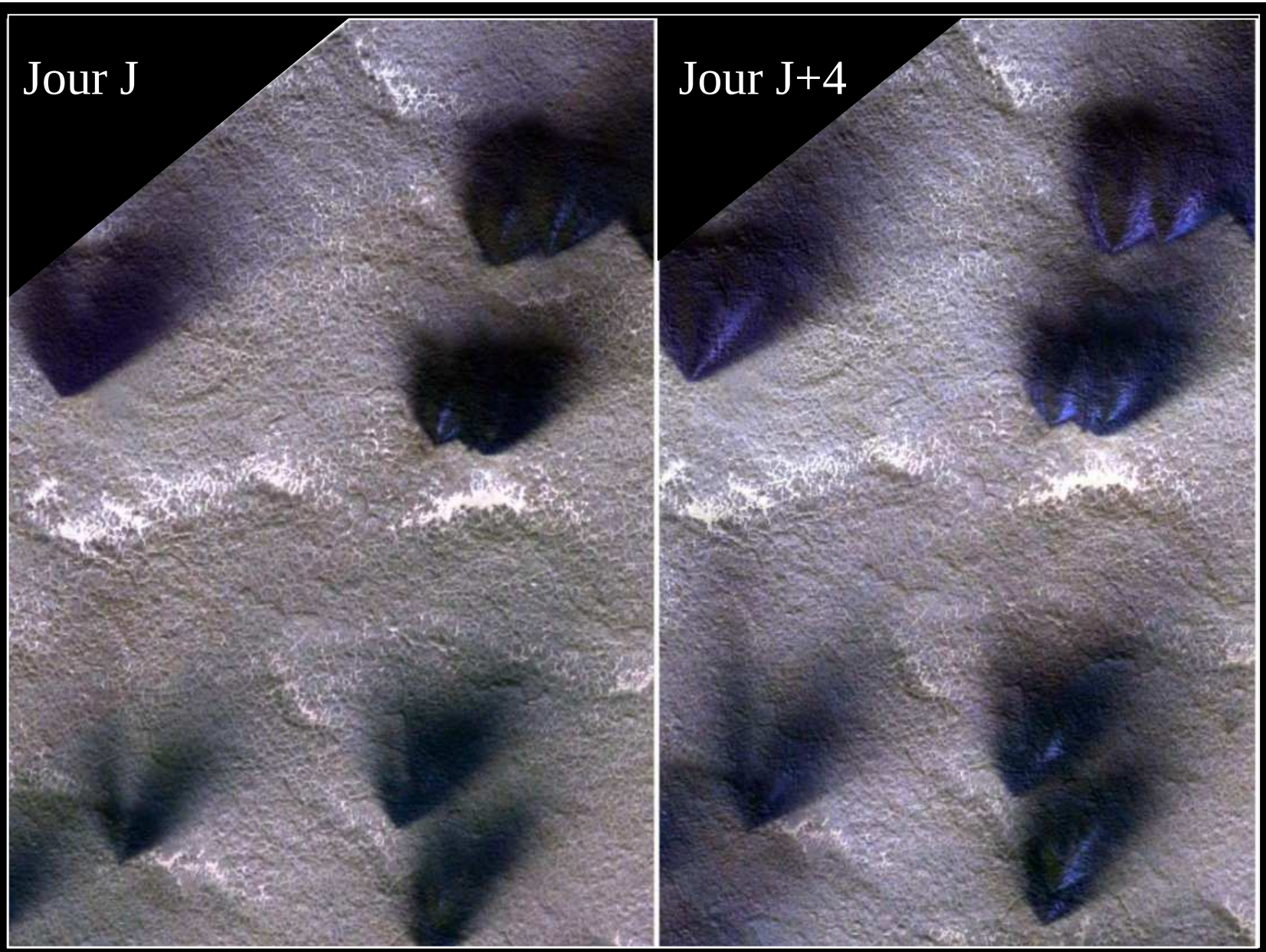


Gros plan sur les traînées sombres, en « éventail »

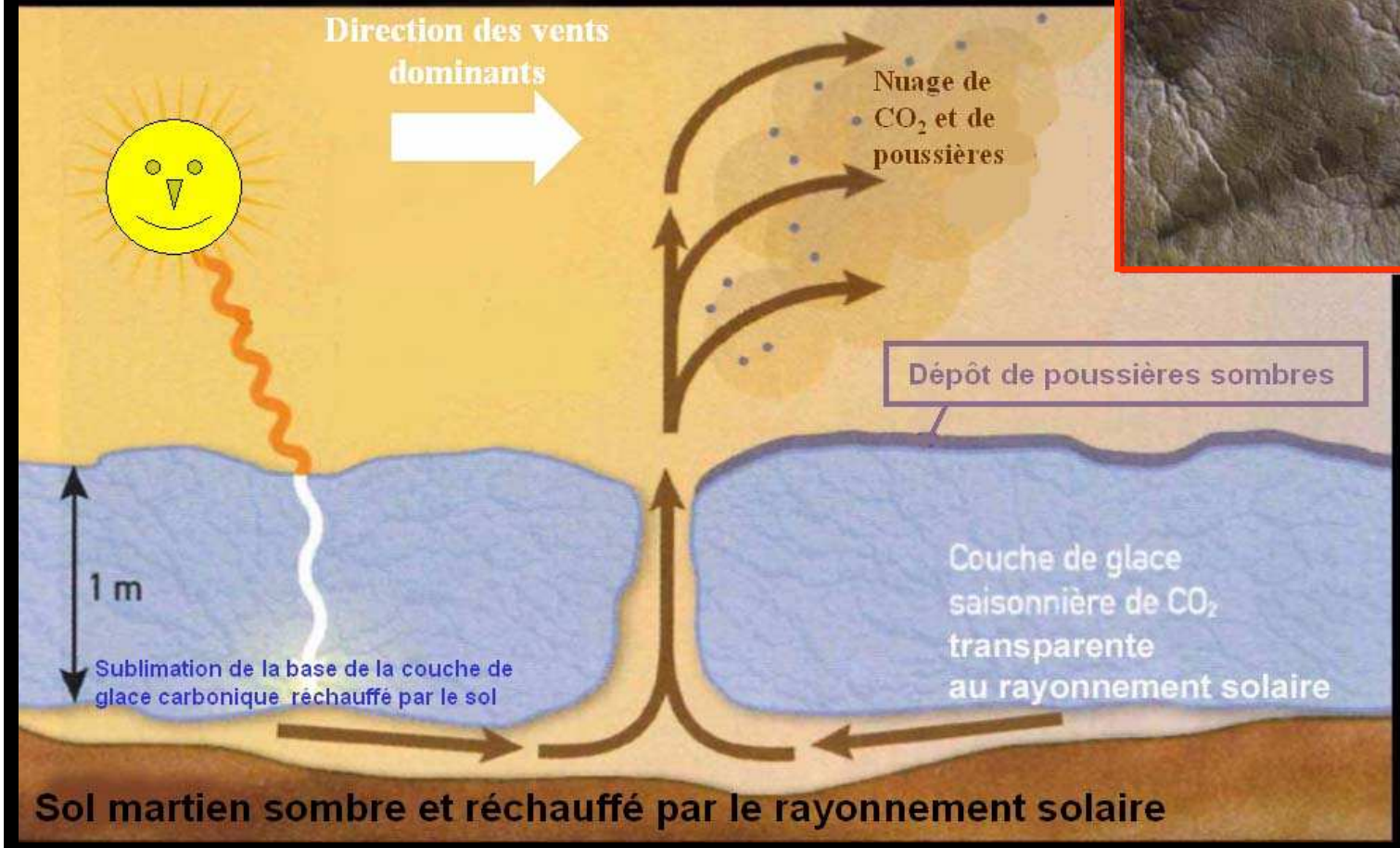
Ces structures en éventail semblent dirigées par des circulations éoliennes



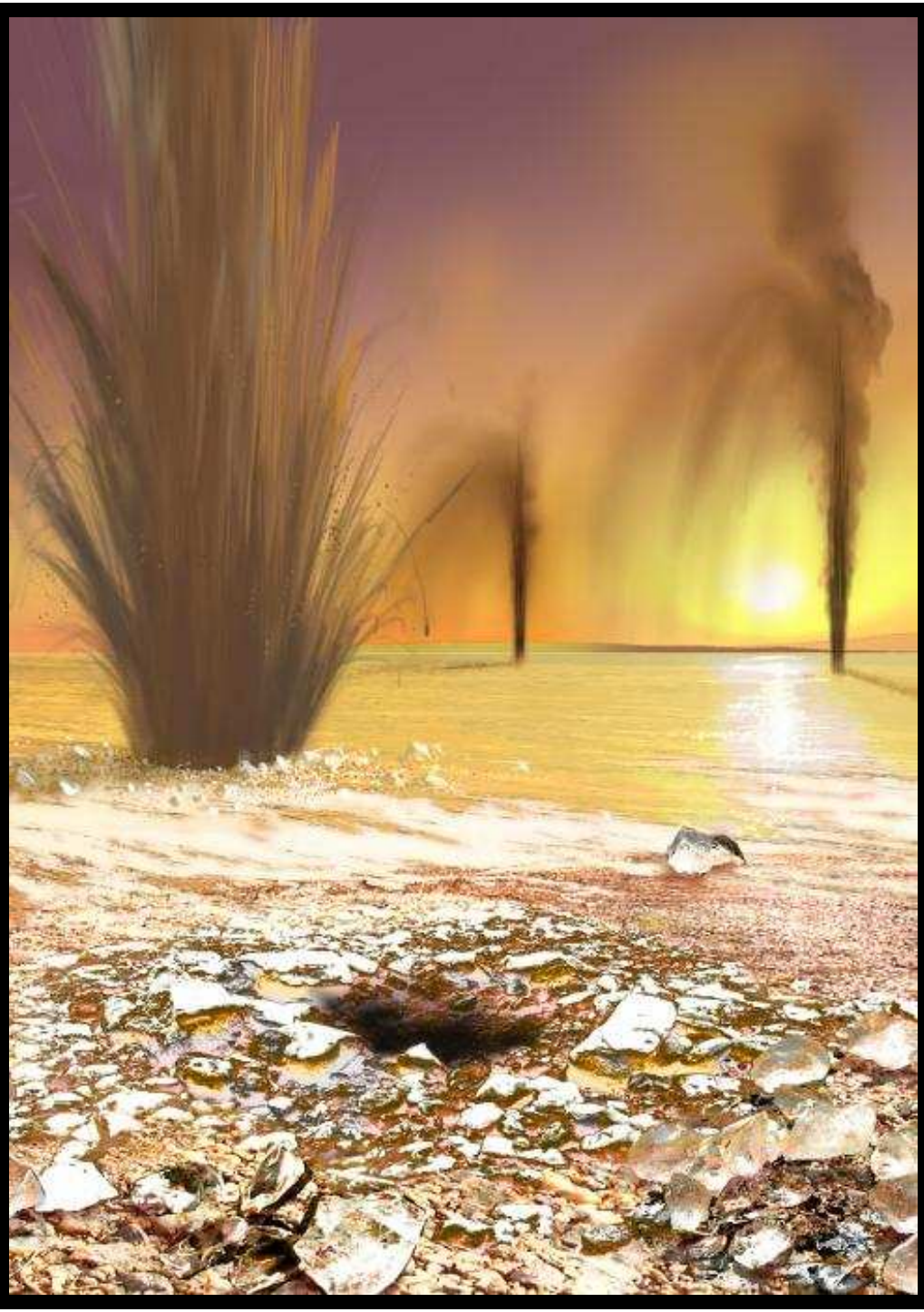
Le paysage évolue au cours de l'année :
les éventails n'existent qu'au printemps



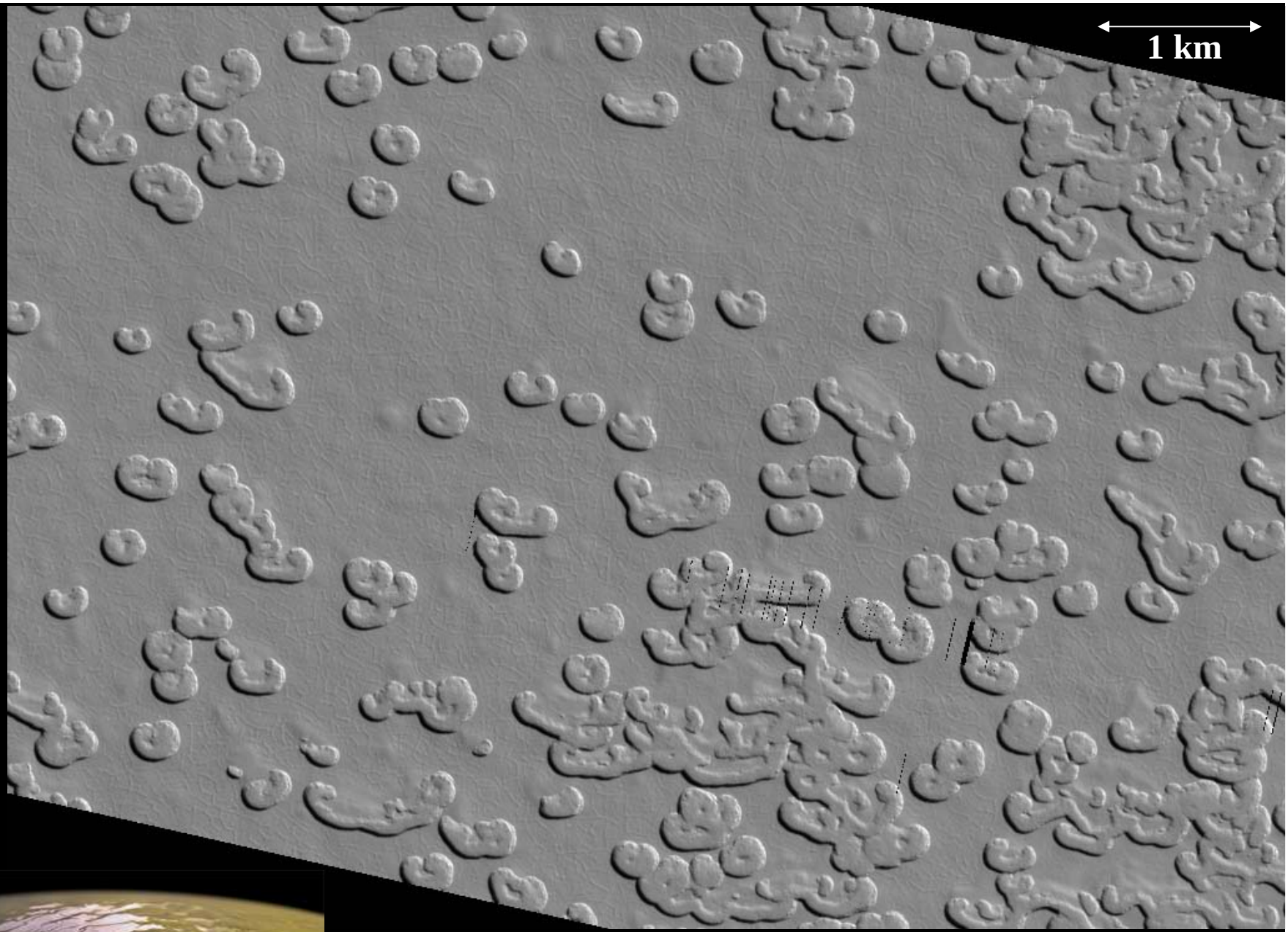
Cela peut même évoluer en quelques jours !



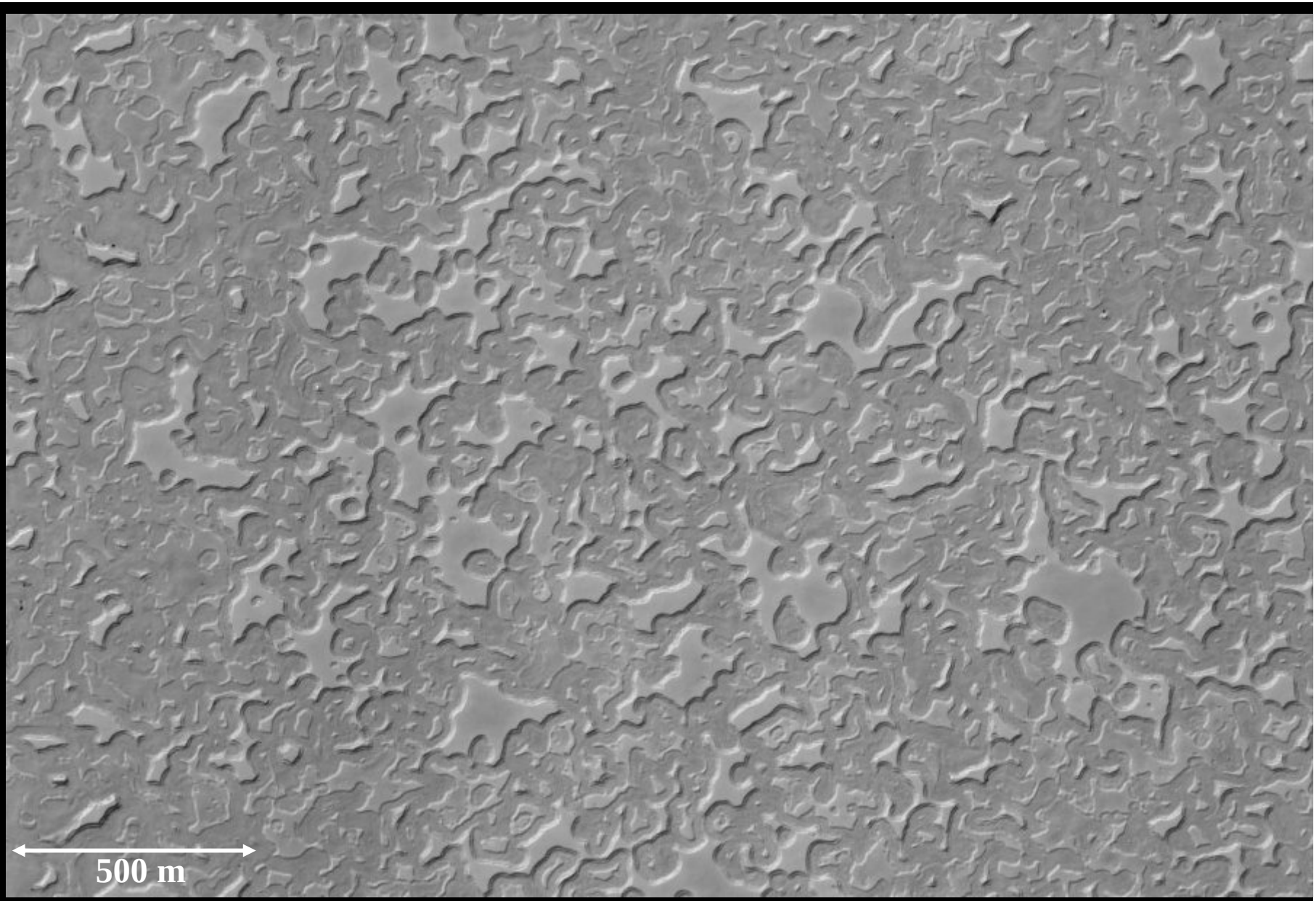
Le modèle explicatif



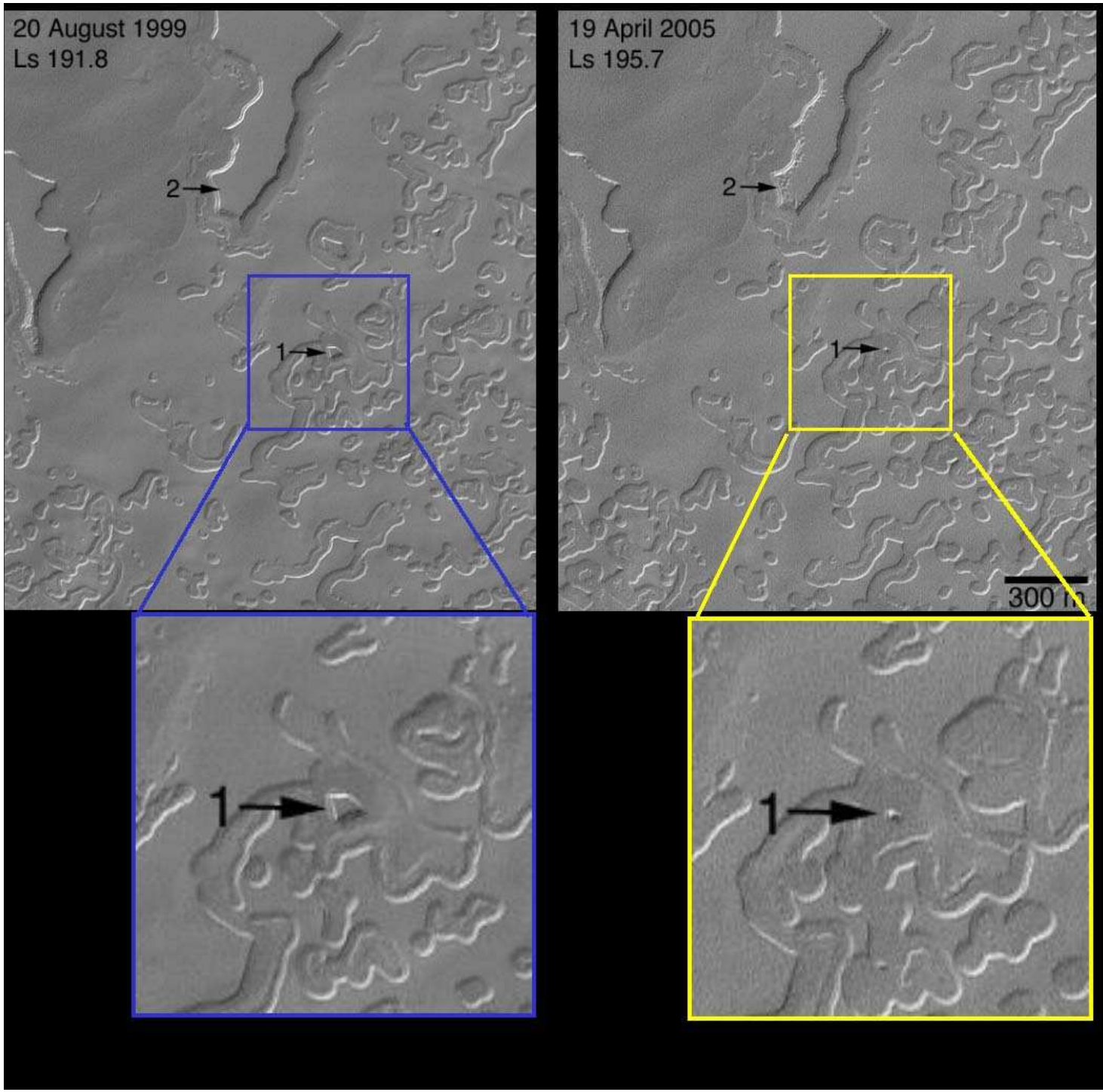
Voilà à quoi doit ressembler une promenade sur la calotte transitoire sud pendant une « chaude » après-midi de printemps.



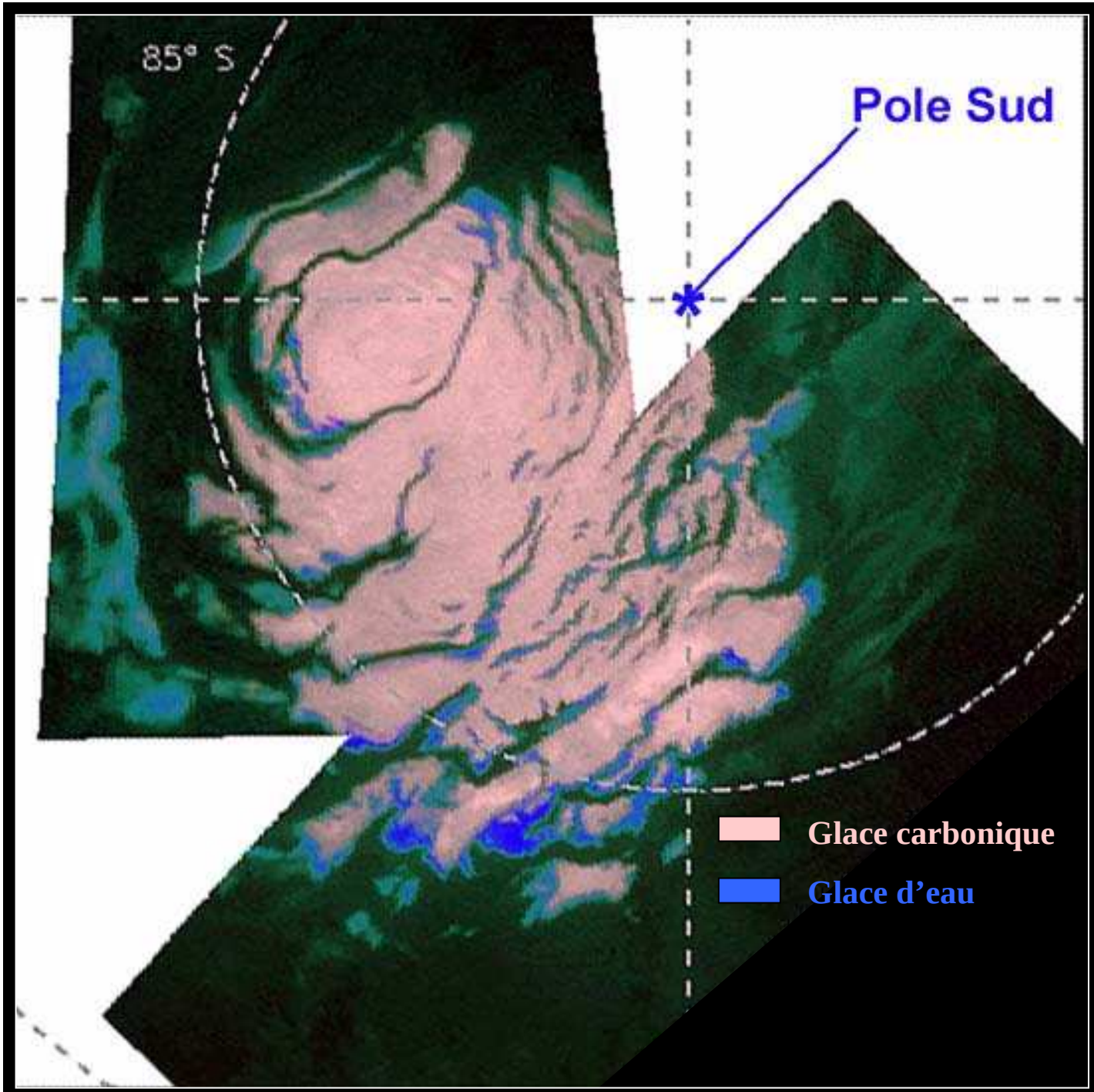
Gros plan sur la calotte permanente sud : une structure en « gruyère »



Ici, plus de trous que de gruyère ! Les trous font une dizaine de mètres de profondeur !



L'hiver, tout ça est recouvert d'1 m de glace carbonique. L'été, la structure en gruyère 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 !

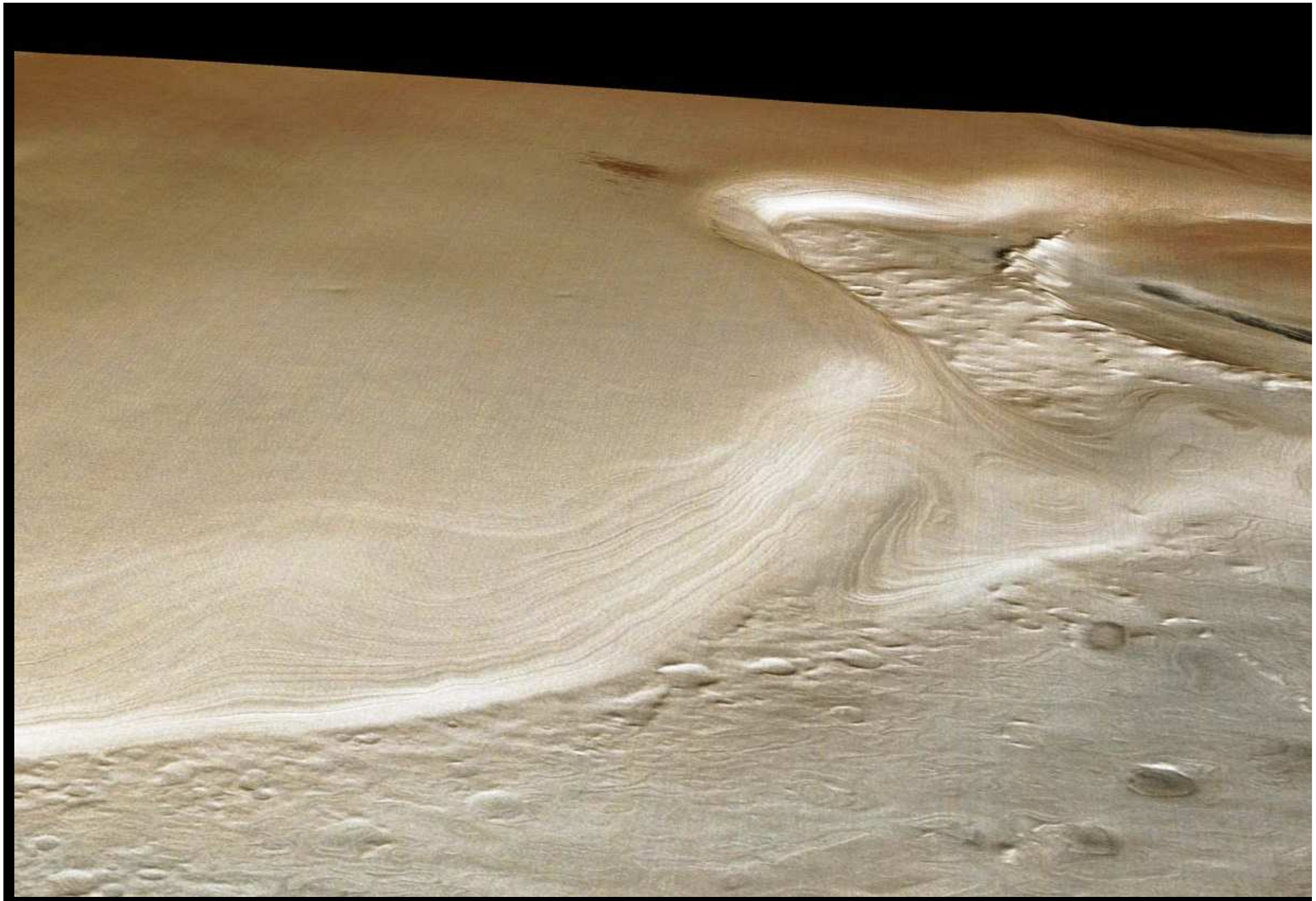


Sous la glace carbonique, les images multi-spectrales hautes résolutions prises par Mars Express révèlent une frange de glace d'eau

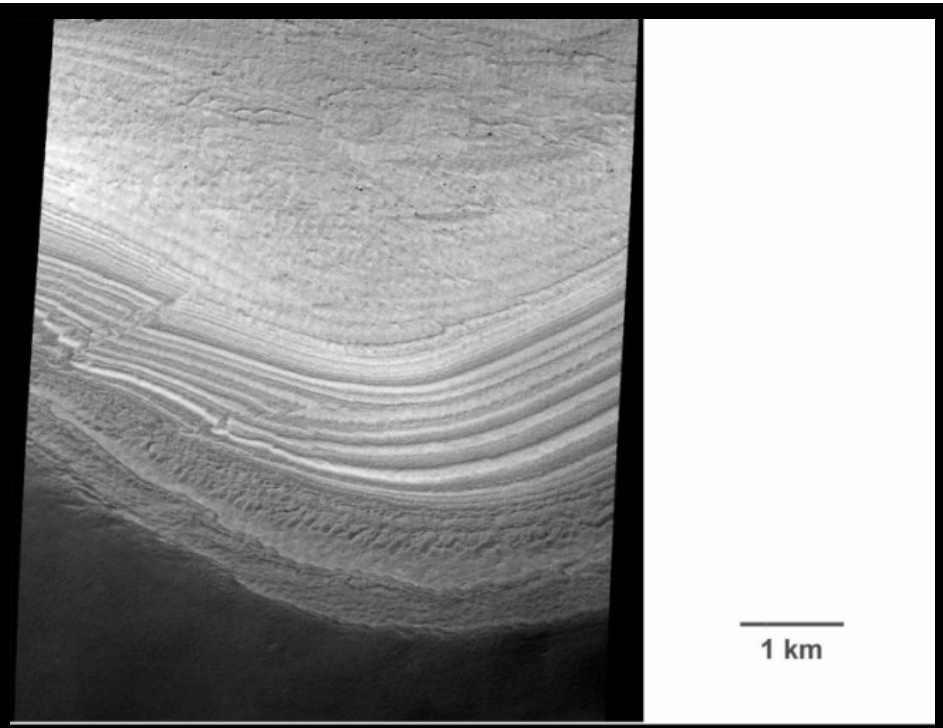
Une calotte polaire de glace d'eau permanente sud, mais masquée car très poussiéreuse

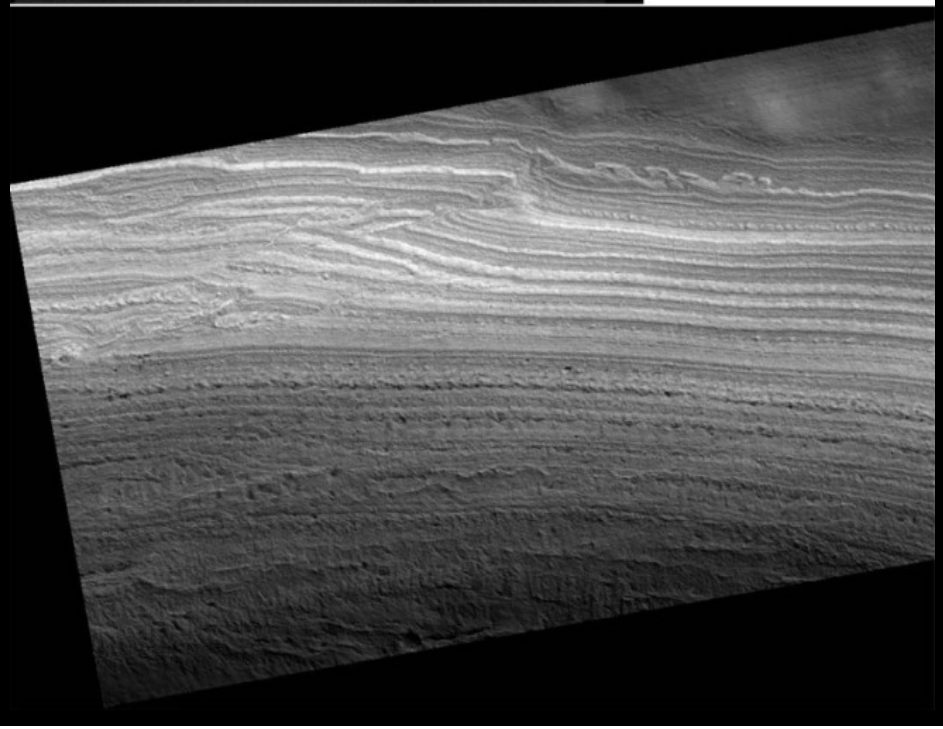
Sous ce « gruyère » (10 mètres de glace carbonique résiduelle), des terrains polaires lités, comme ce qui constitue la calotte résiduelle nord, mais plus sombre, sans les raies spectrales de la glace d'eau (sauf à la limite gruyère / TPL)

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

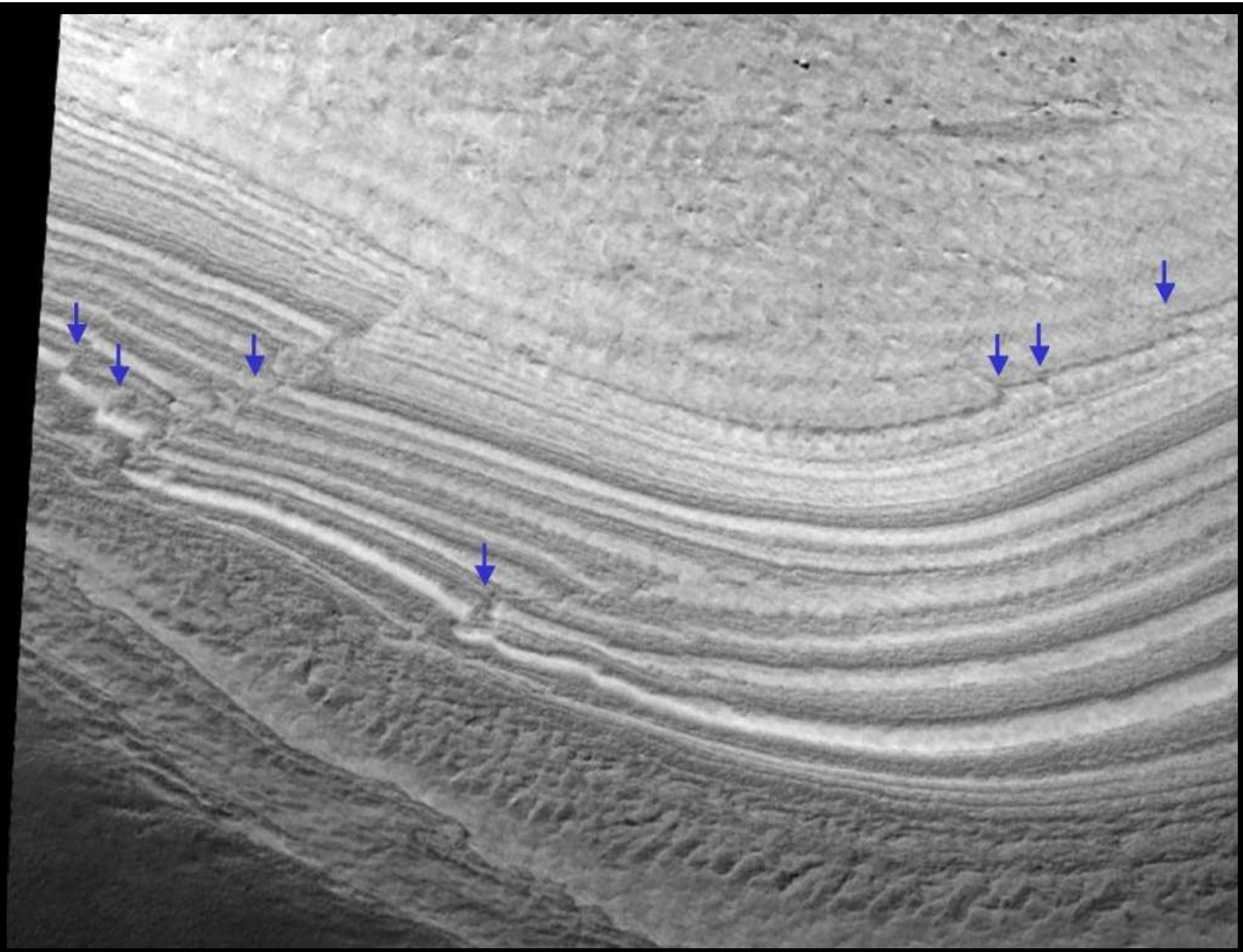


Partout des « terrains polaires lités »

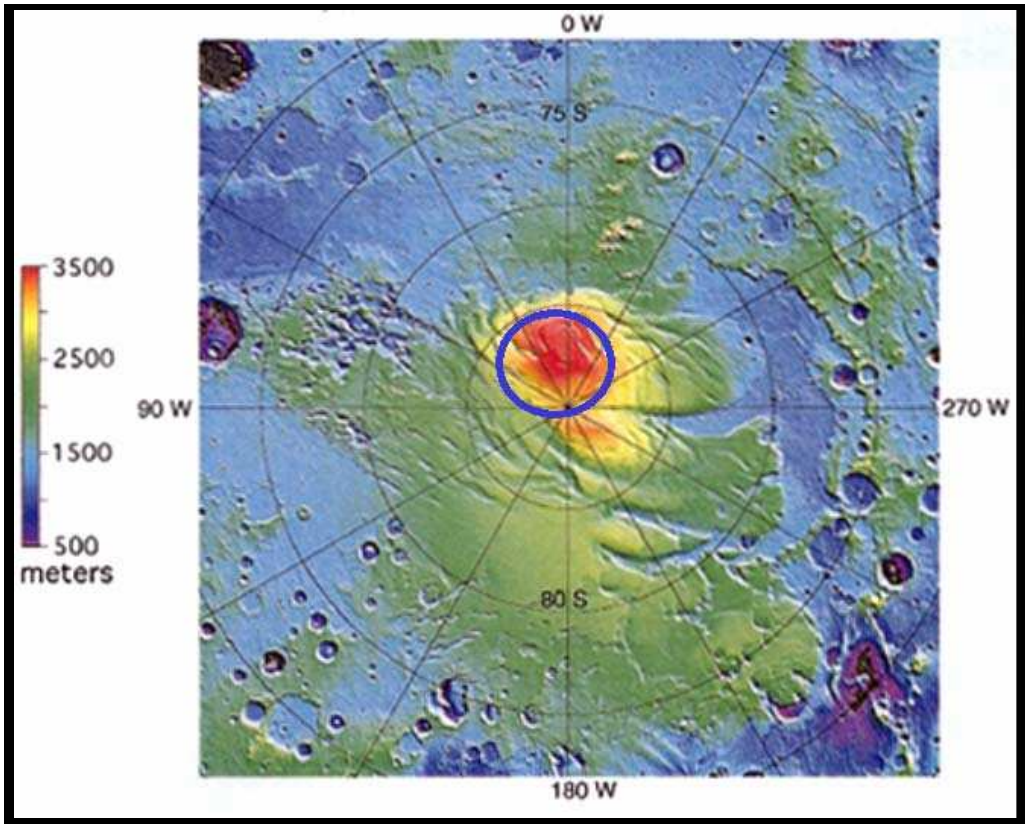


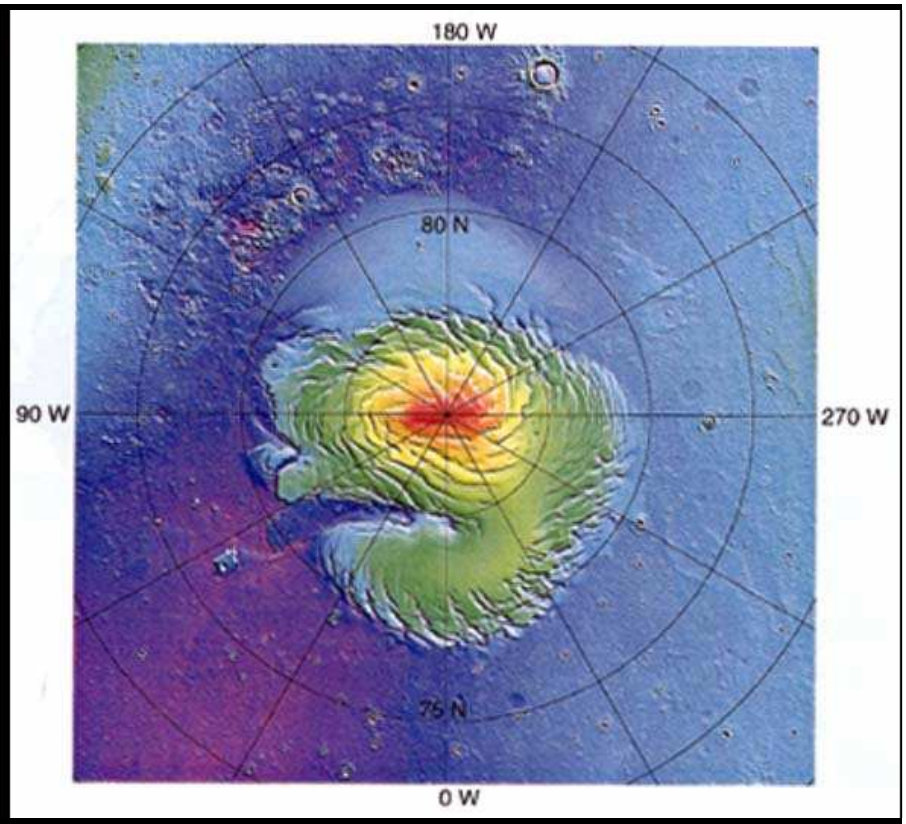


Dans ces terrains polaires lités sud, on a découvert des « failles »

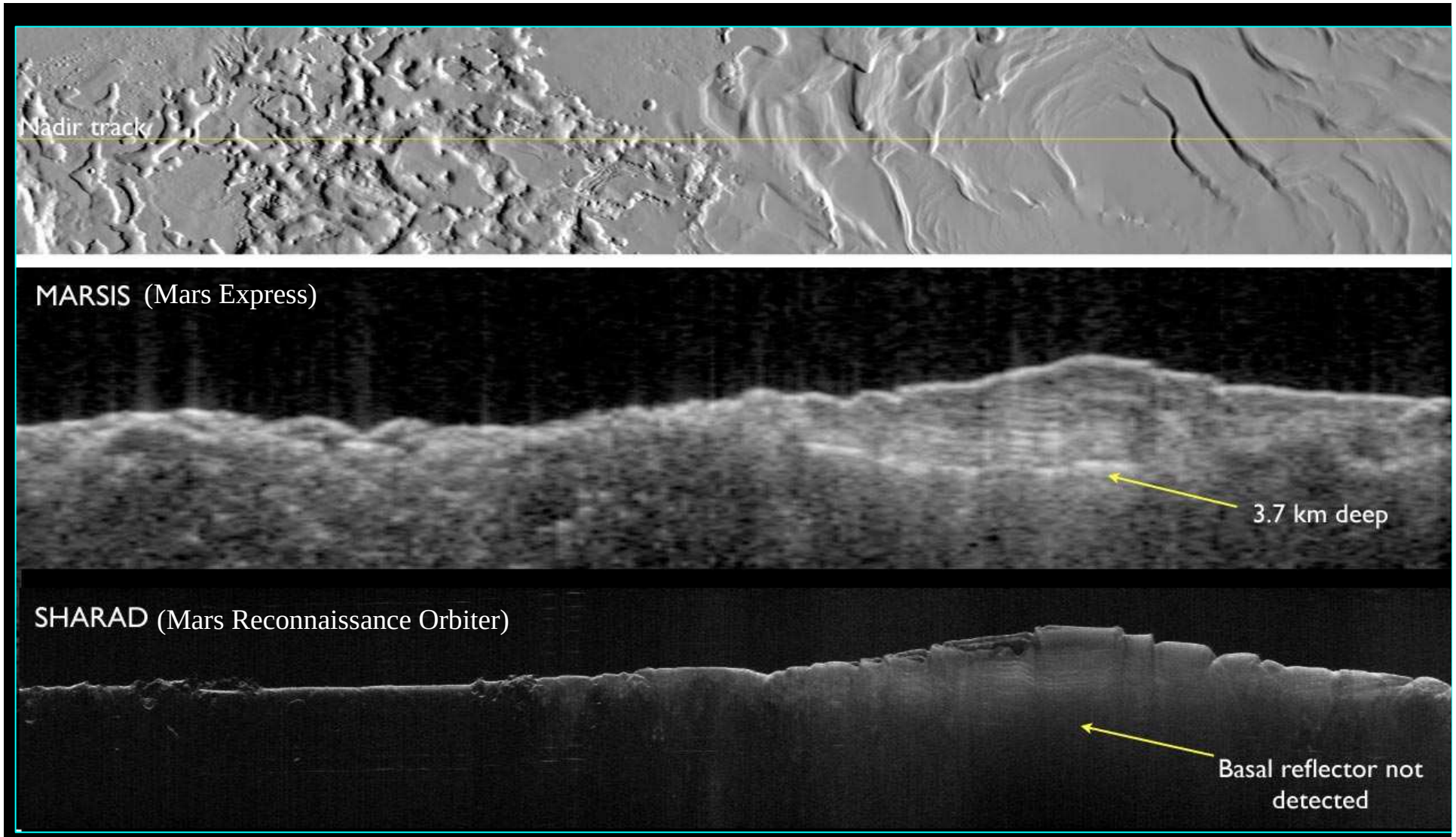


Gros plan sur ces failles

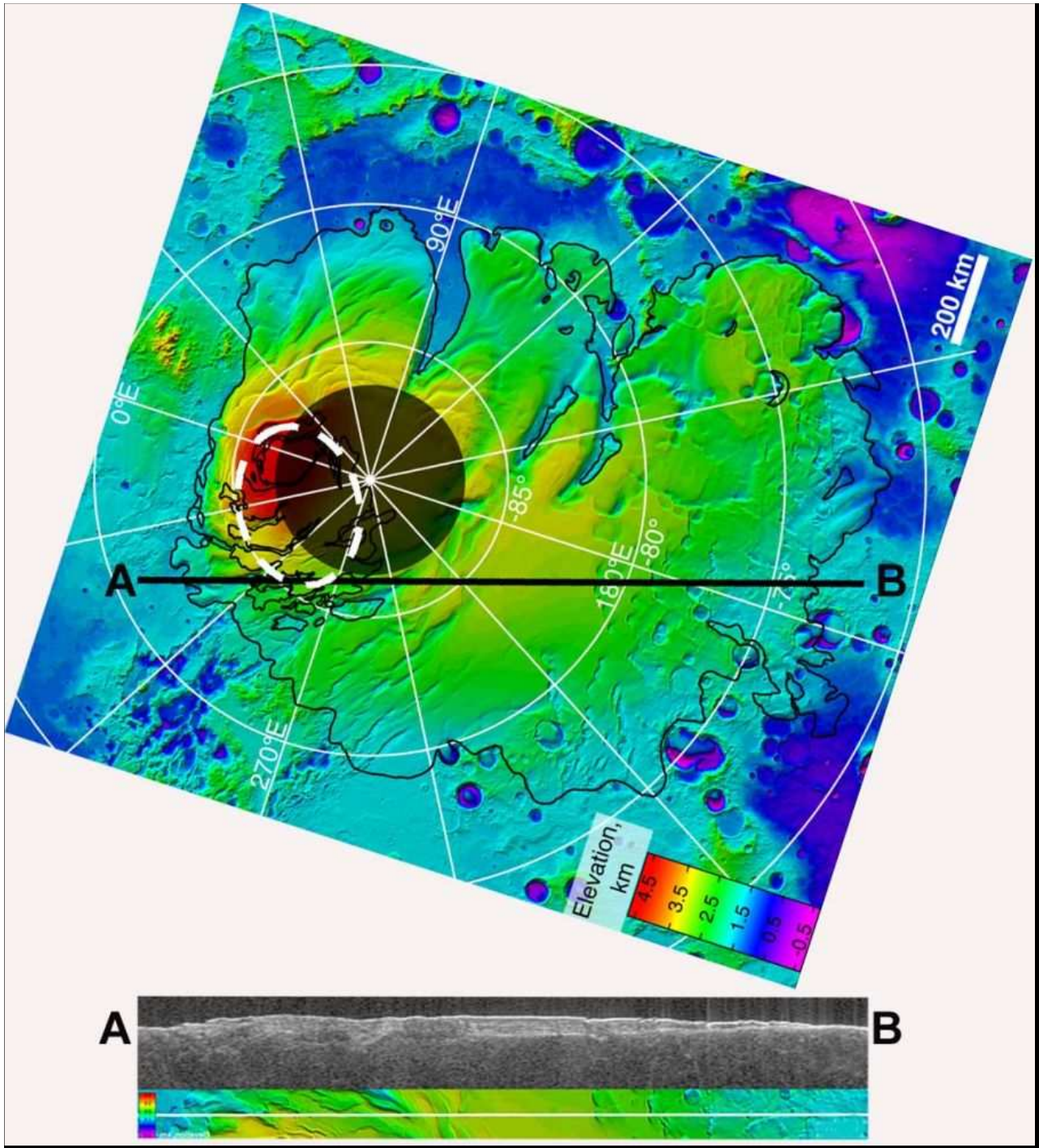




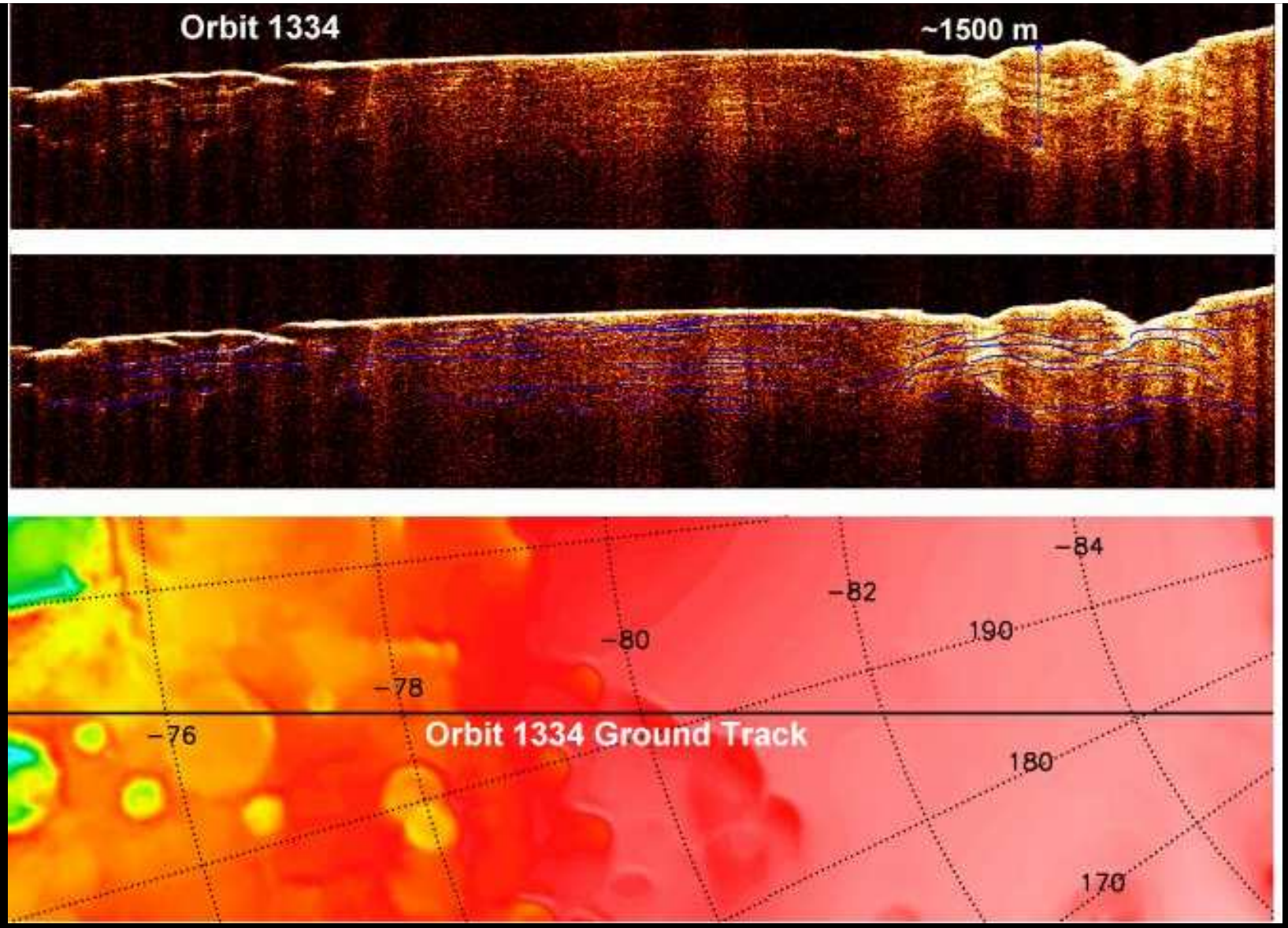
Ces terrains polaires lités sud forment un relief de taille voisine de celle la calotte permanente nord.



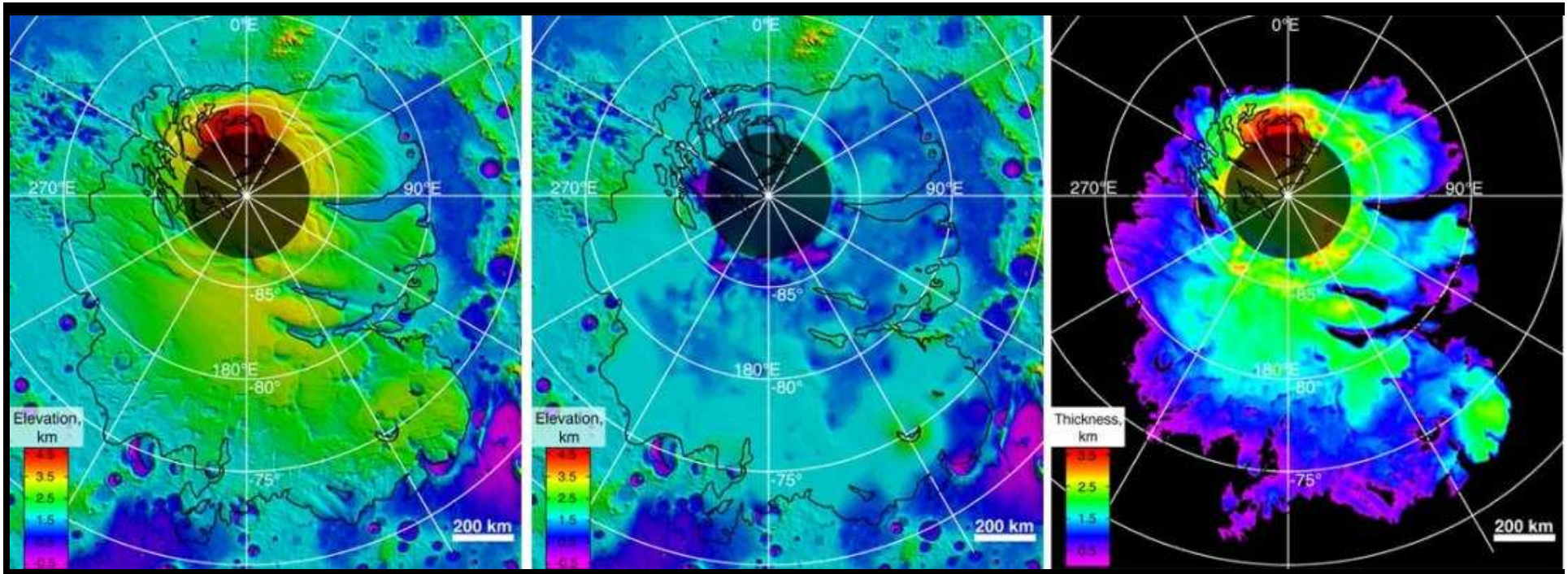
Comparaison des capacités complémentaires des radars européen et américain



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

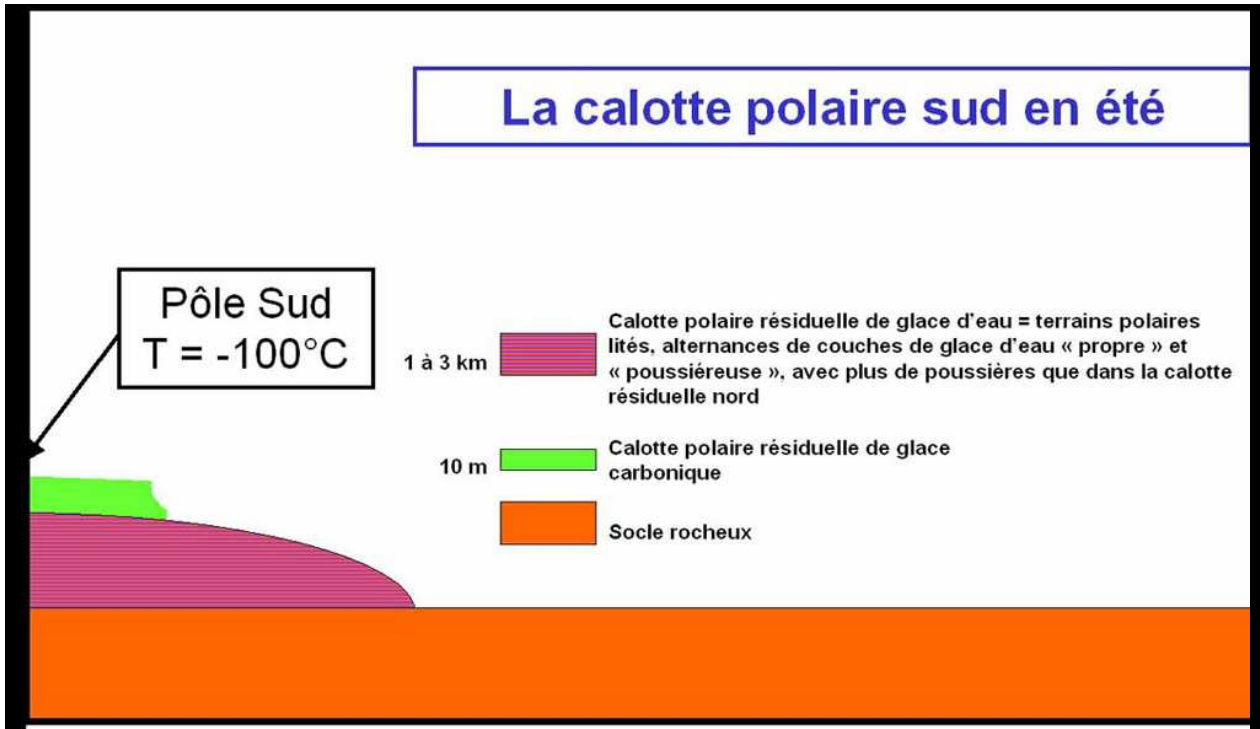


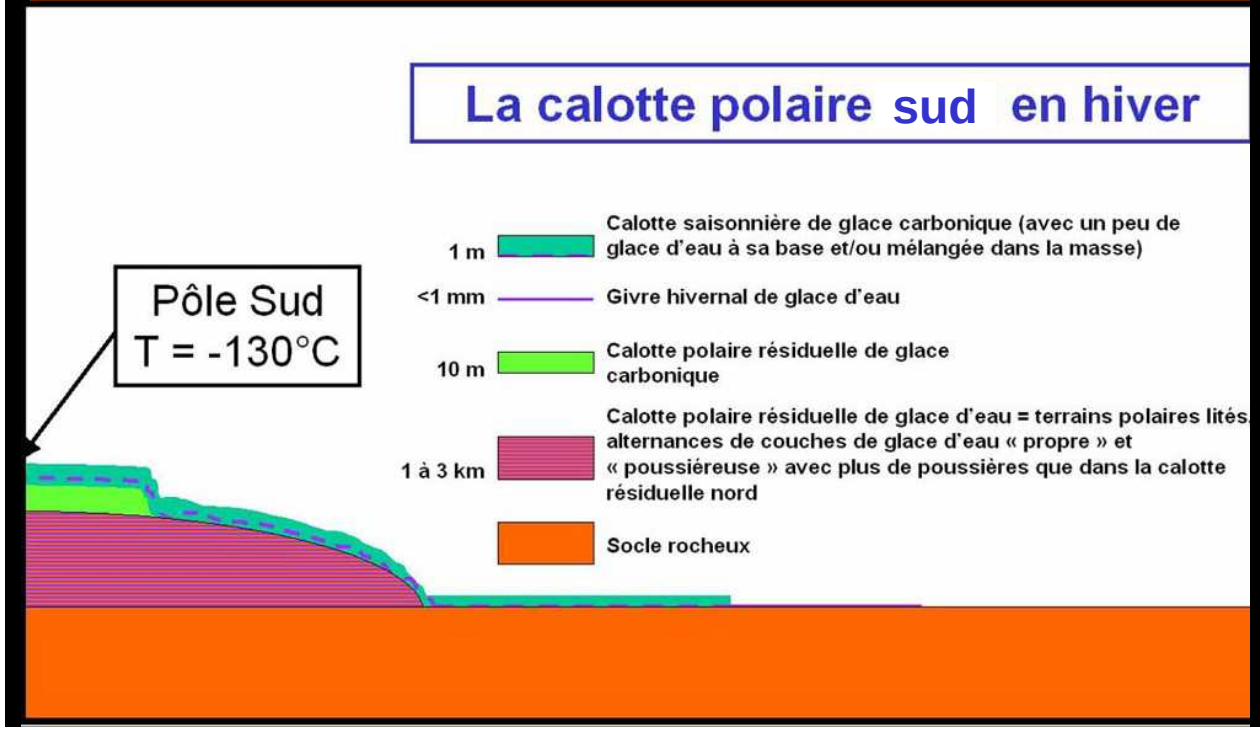
Le radar de Mars Reconnaissance Orbiter leur donne une structure voisine de celle de la calotte nord



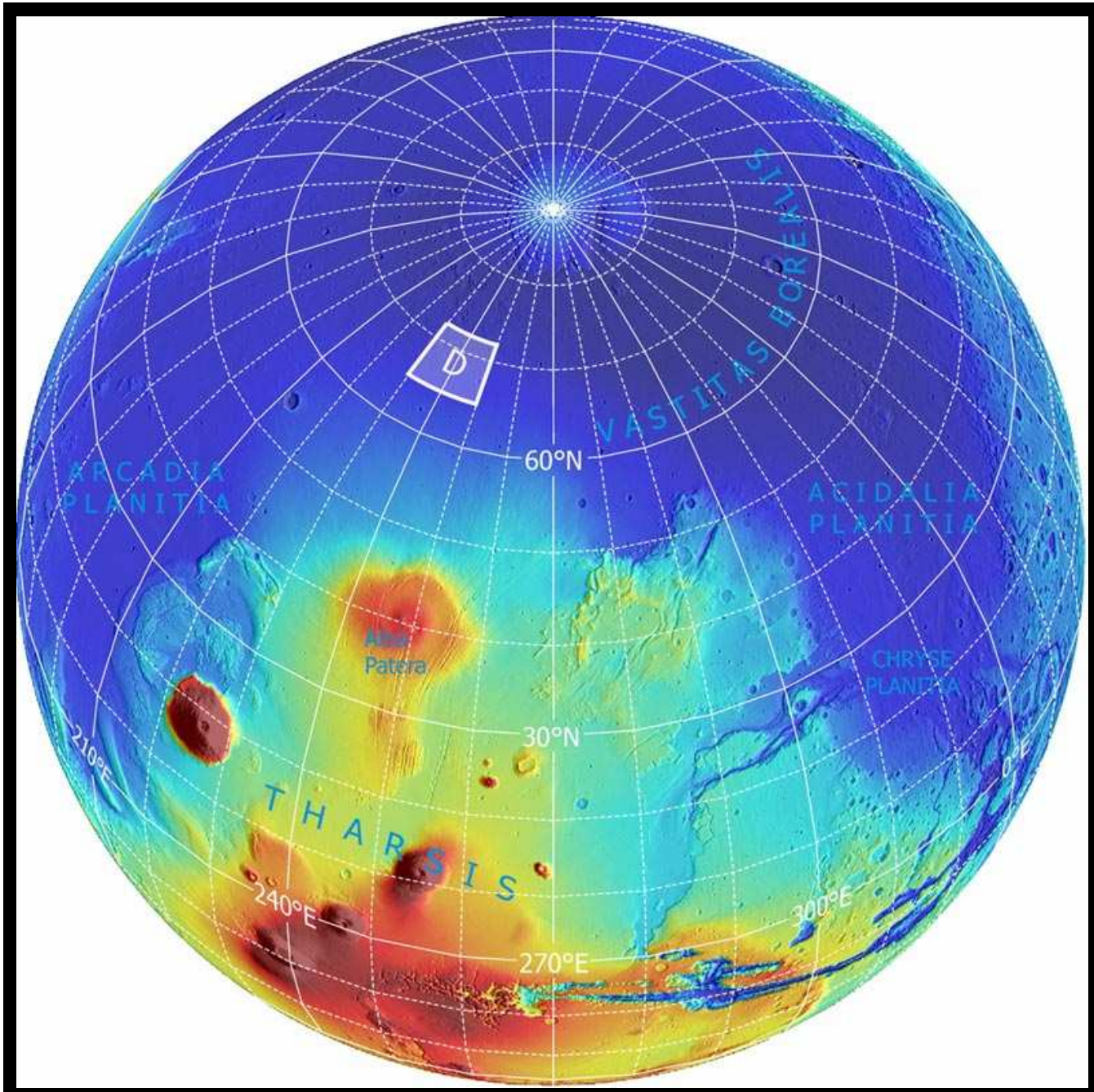
Altitude de la surface **Altitude du sommet du socle** **Epaisseur des TPL**

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 (poussiéreuse). Ce volume est comparable à celui de la calotte permanente nord. Le volume « prouvé » de la glace d'eau superficielle de Mars vient de doubler (même ordre de grandeur que celui de la calotte groenlandais)



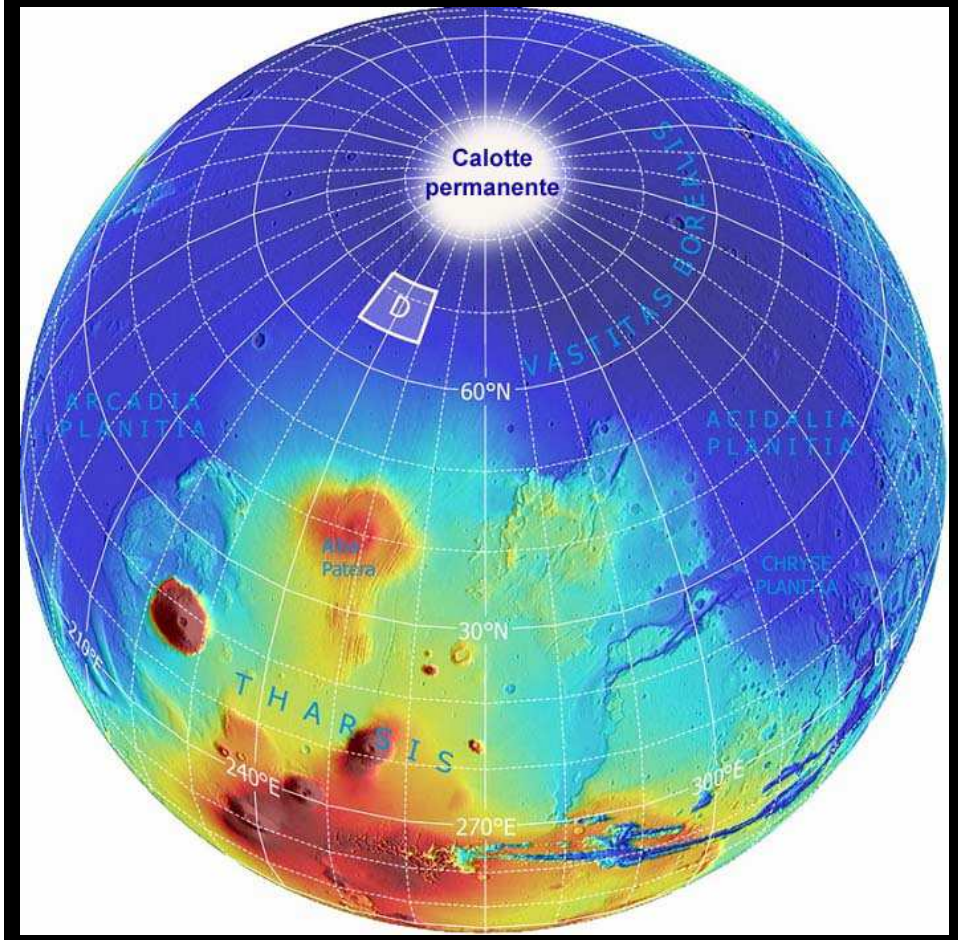


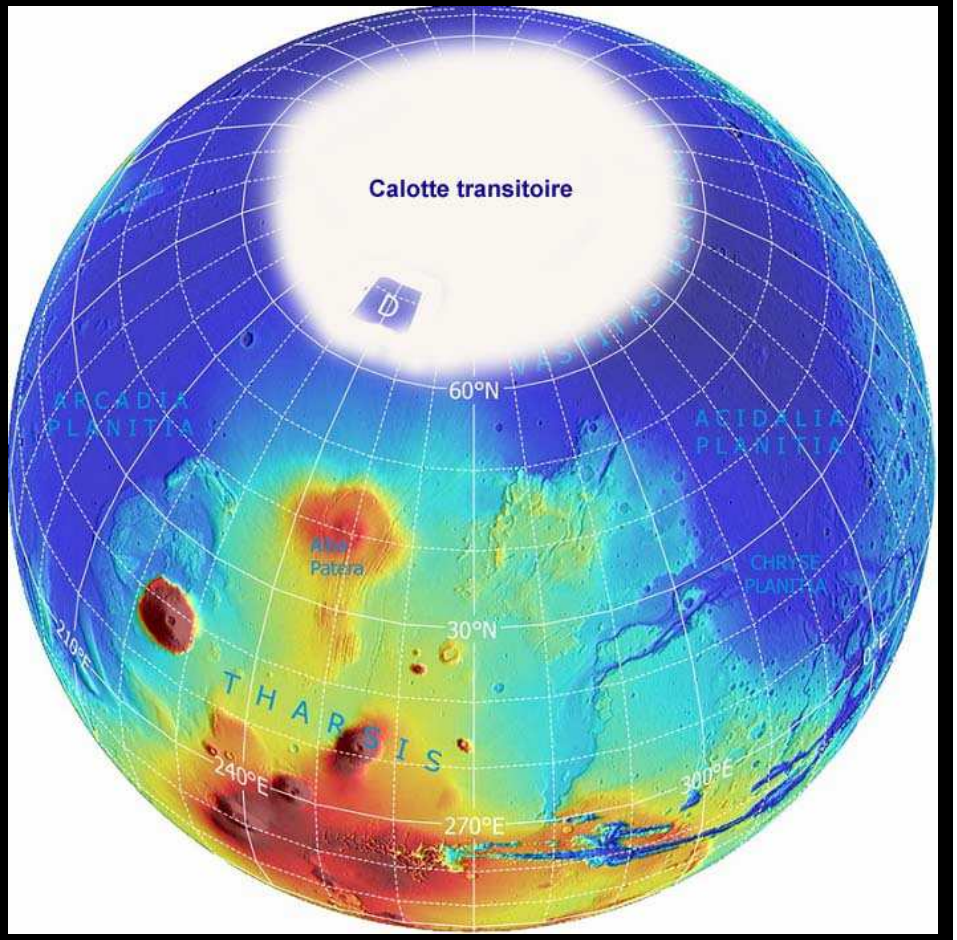
Le modèle « ante Phoenix » de la (des) calotte(s) polaire(s) sud.



Pour comprendre les échanges de CO2 et d'H2O entre l'atmosphère et les glaces polaires et péri-polaires, pour connaître la composition de ces glaces (en volatils et en composés dissous), pour étudier la météo des hautes latitudes, la mission Phoenix s'est posée (fin mai 2008) par 68° latitude Nord

Phoenix
Landing Site





Le site d'atterrissage de Phoenix, en position « stratégique »

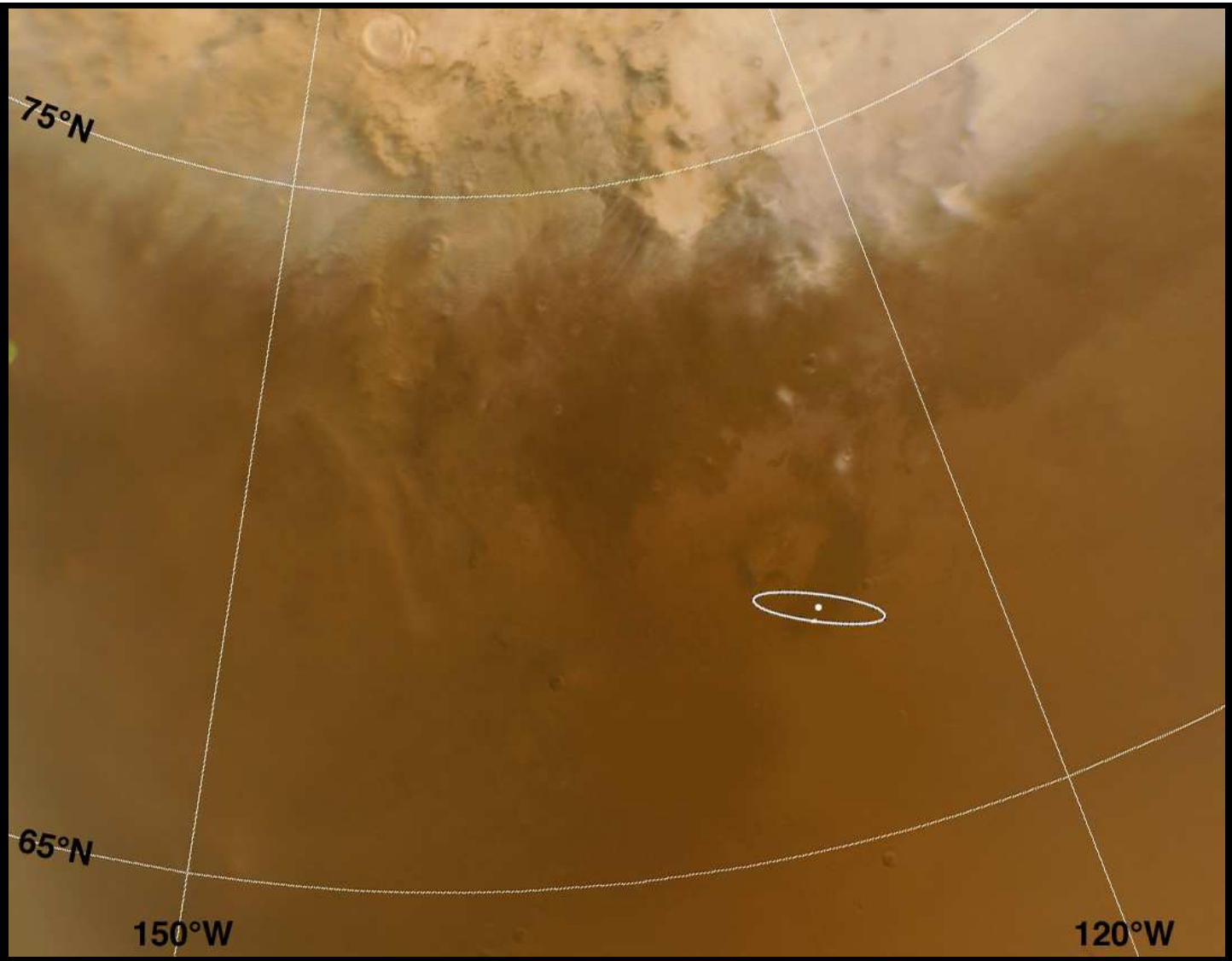
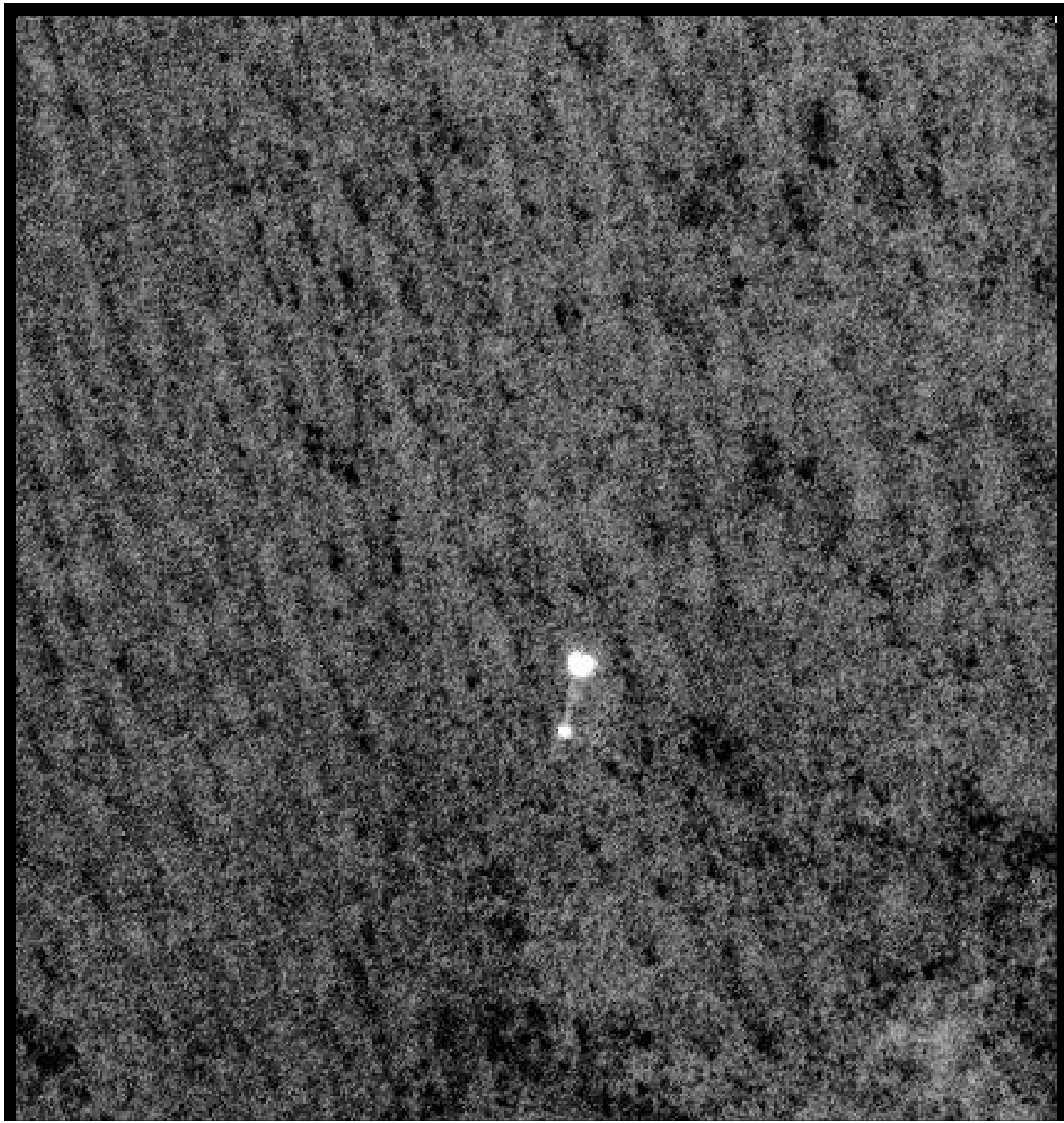
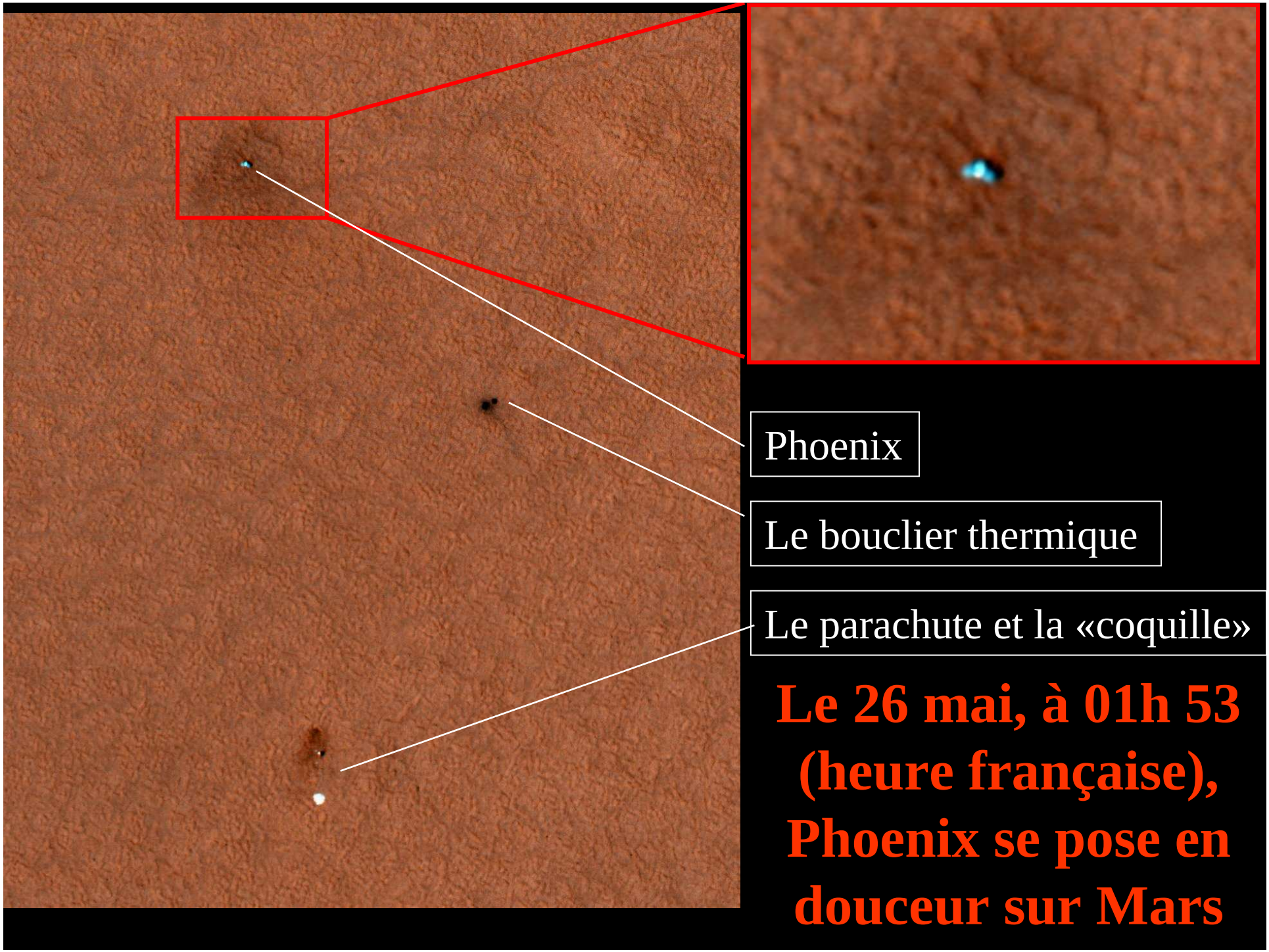


Photo satellite du site, 1 mois avant l'atterrissage. Le site se dégage de sa couche (métrique) de glaces, dont la limite sud recule.

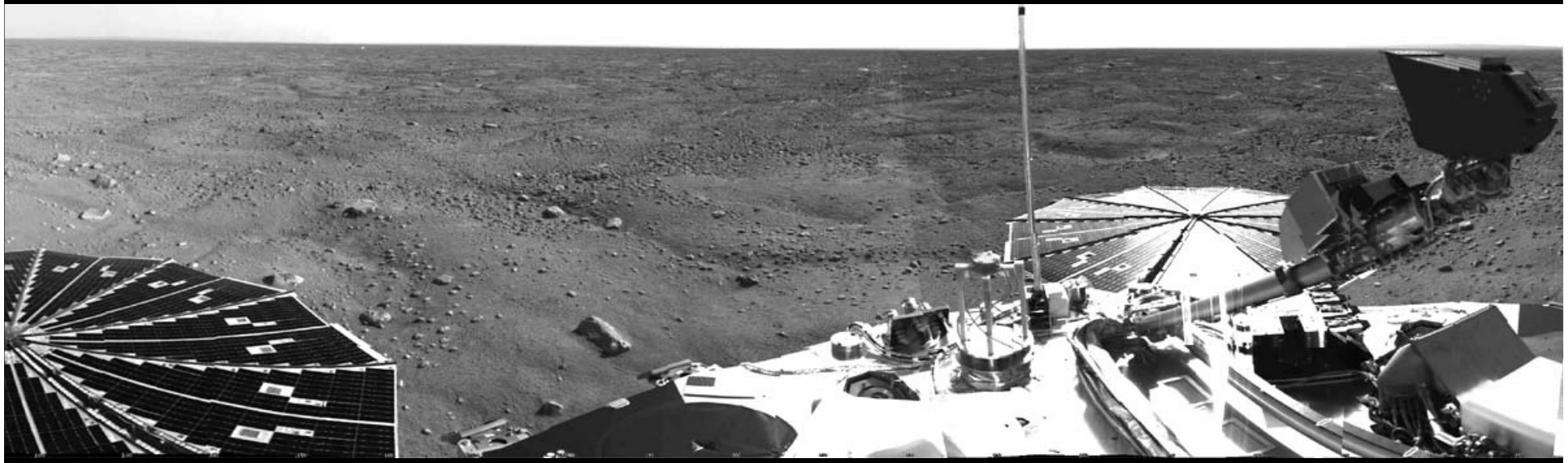


Une « première » : le 26 mai, la caméra Haute Résolution de MRO photographie Phoénix en train de descendre au bout de son parachute

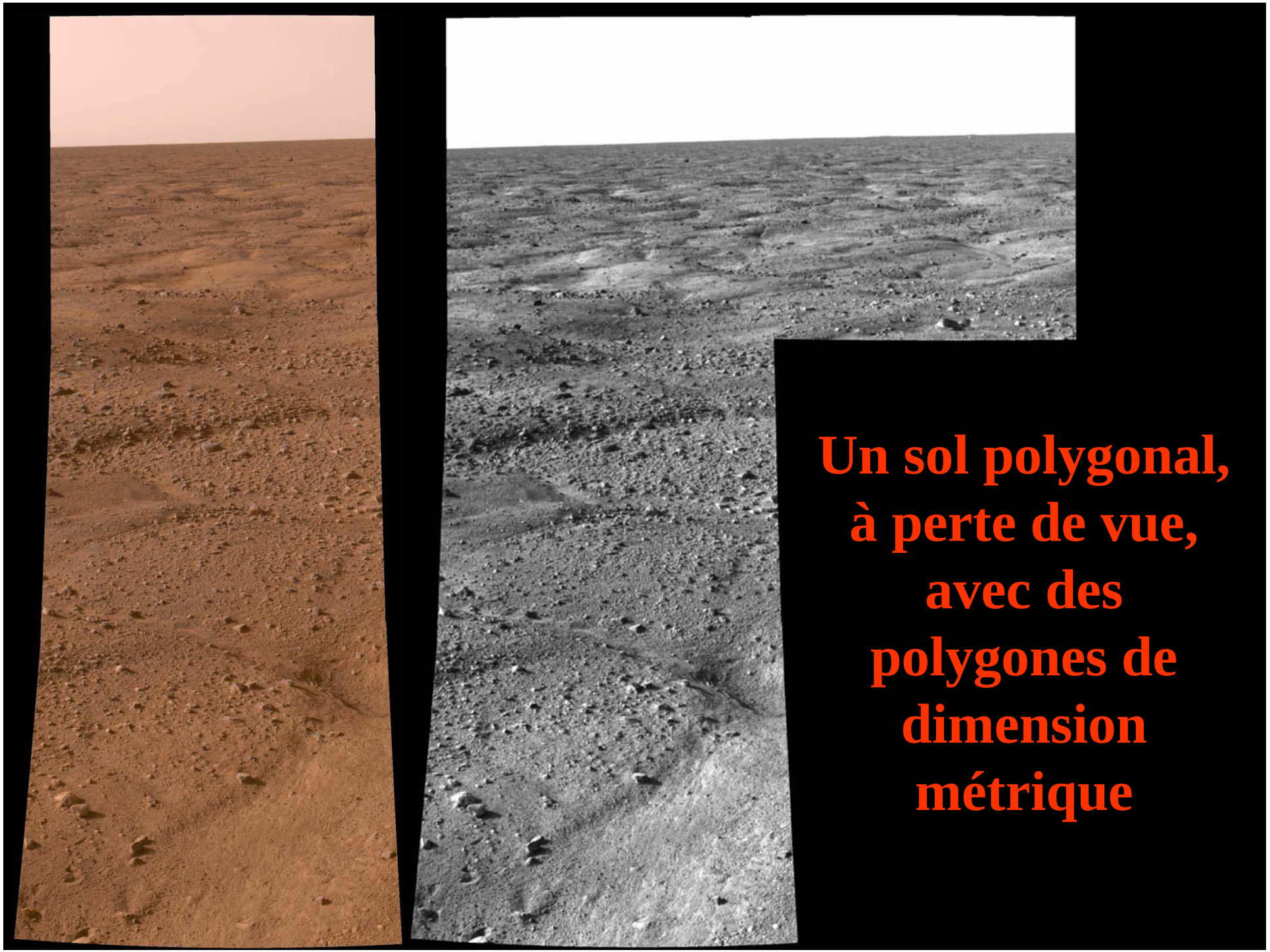
Une autre image, donnant l'impression que Phoenix va se poser dans un cratère de 10 km de diamètre. C'est un effet de perspective, et Phoenix se situe 20 km en avant du cratère

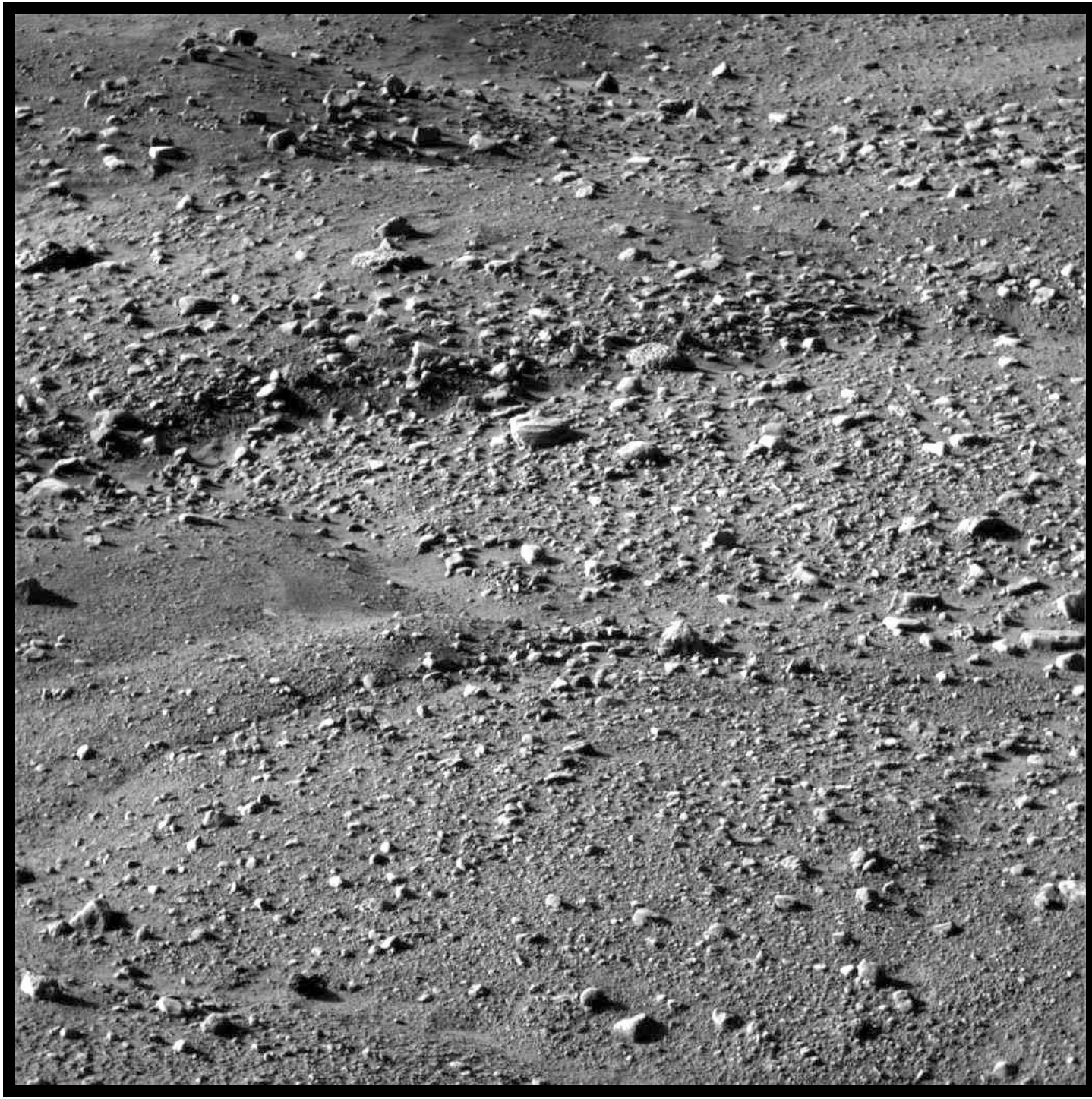


Le 26 mai, à 01h 53 (heure française), Phoenix se pose en douceur sur Mars



Voici, en 2 fois 180°, le paysage qu'il découvre.


Un sol polygonal,
à perte de vue,
avec des
polygones de
dimension
métrique



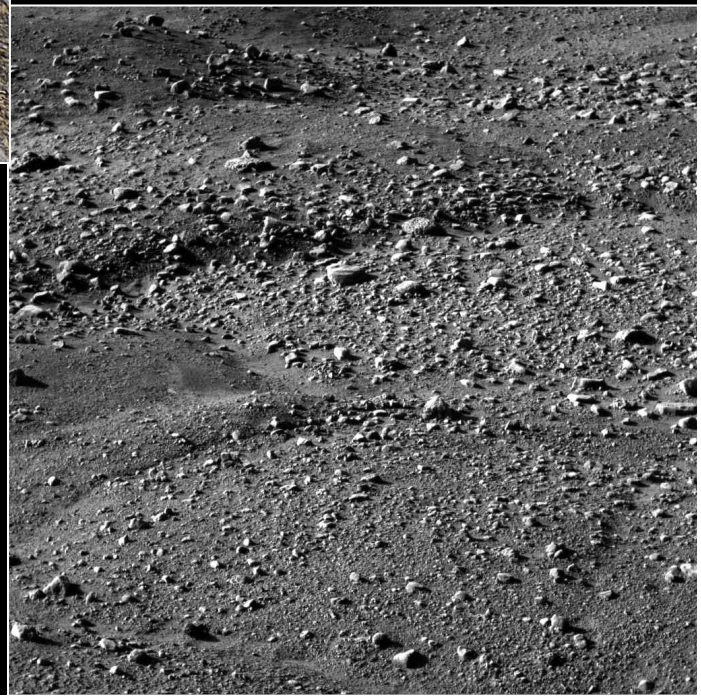
Gros plan sur ces polygones

On connaissait sur Mars et sur Terre des sols polygonaux, de dimensions déca à hectométriques. Sur Terre, ces sols se développent dans les permafrost dégelant superficiellement et temporairement l'été

Google Earth permet d'en voir d'actuels en Sibérie …

… des fossiles quelque part en val de Loire , datant du Wurm (- 20 000 ans)

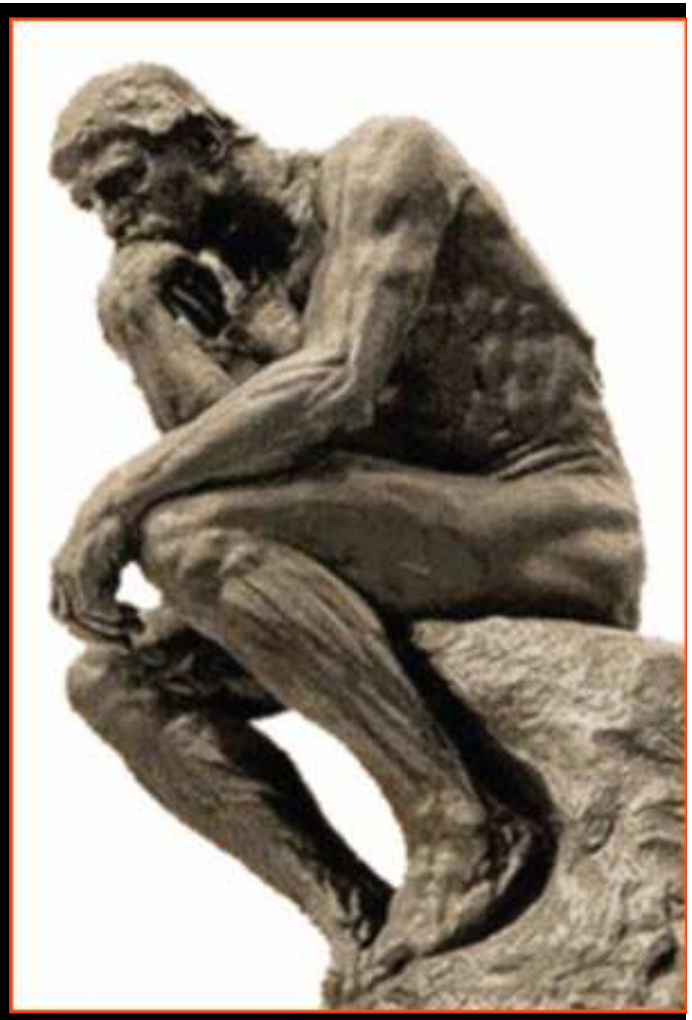
On en connaît aussi sur Terre de taille métrique, comme ceux de Phoenix



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

Il y aurait en fait un double réseau de polygones emboîtés, décamétriques (et connu depuis des années) et métriques (venant d’être découvert)

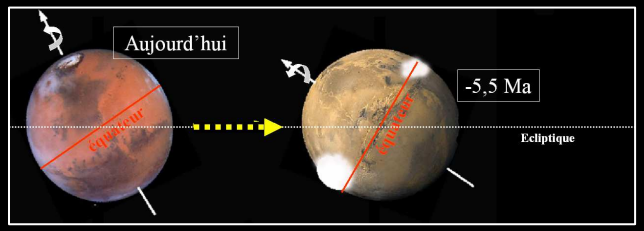
Depuis l'atterrissage, en plein été, la température oscille entre –25°C le jour et –80°C la nuit ! Et ça baisse avec l'arrivée de l'automne.



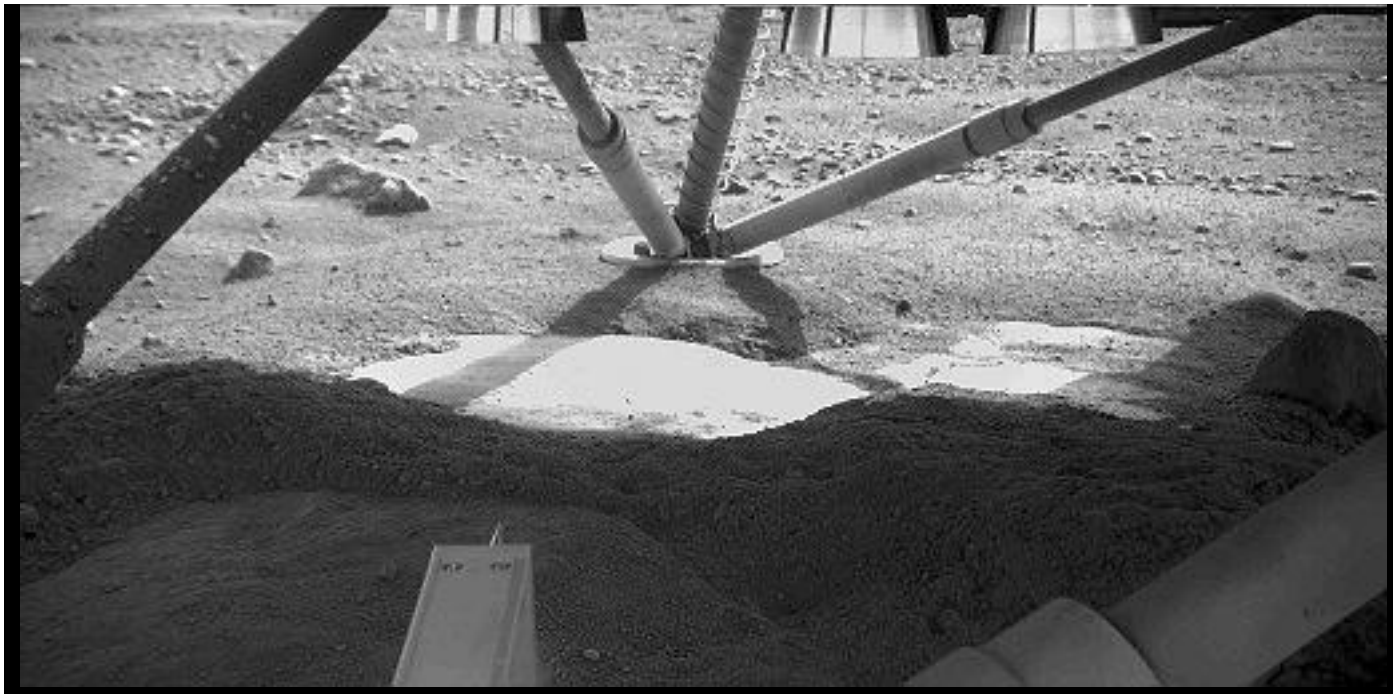
Comment faire des sols polygonaux quand il ne dégèle jamais ?

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

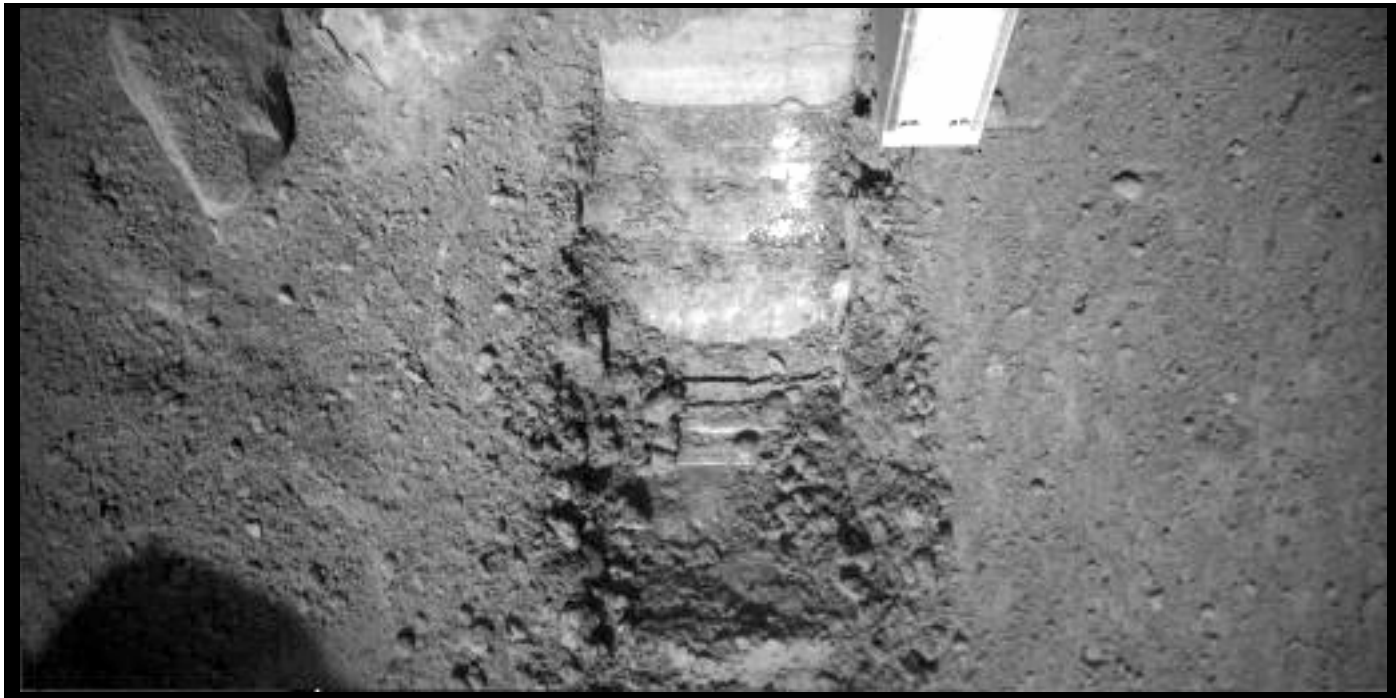
Et si ces polygones étaient fossiles, datant d'il y a –5,5 Ma quand les pôles étaient beaucoup plus chauds l'été ?



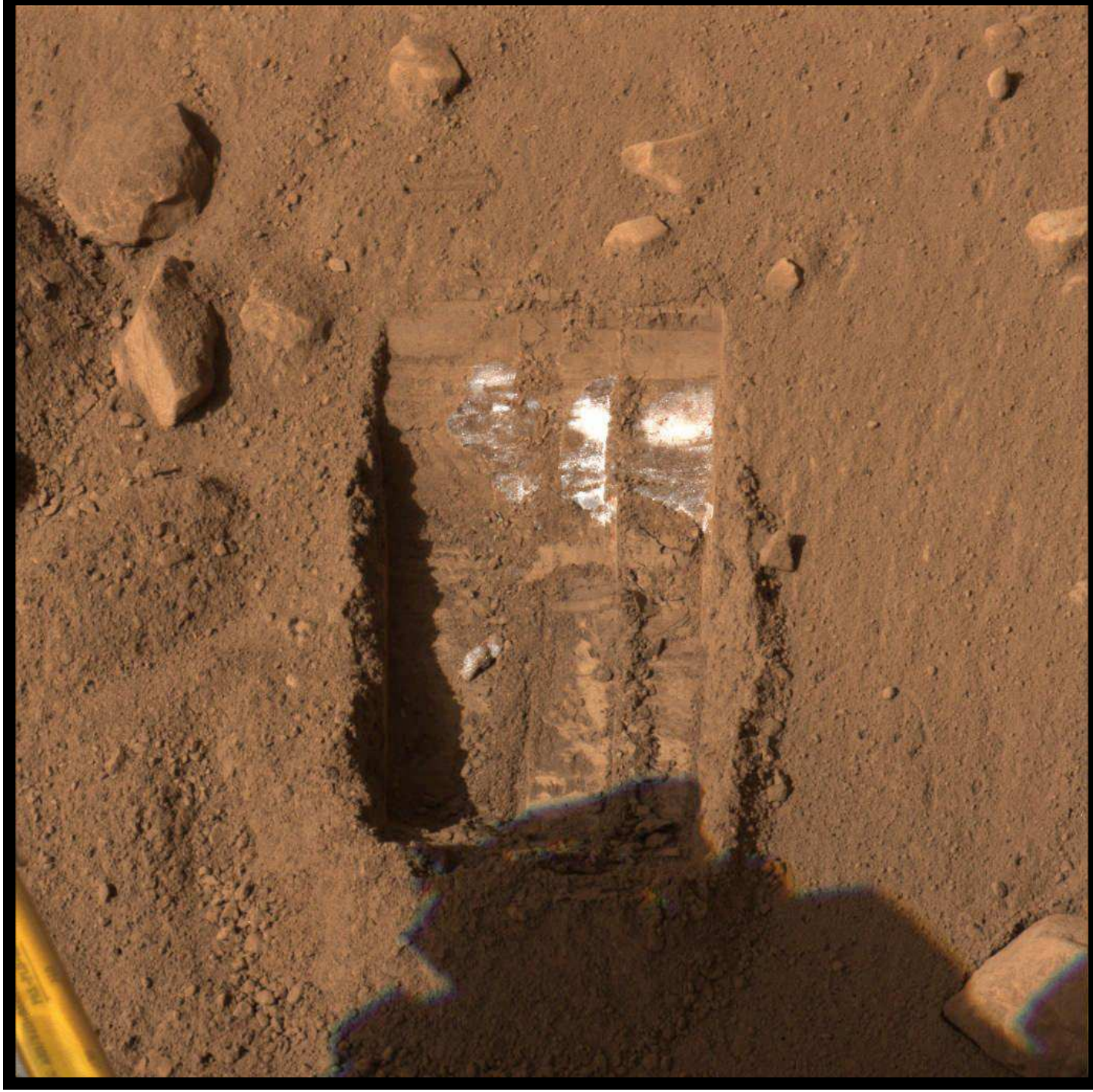
Peut-on conserver des sols polygonaux fossiles pendant si longtemps ??



Le souffle des rétrofusées, en enlevant quelques cm des sols pulvérulent, a dégagé un substrat dur et clair sous le module. Juste à la verticale des tuyères, ce substrat dur est clair contient des cavités.
De la glace ??

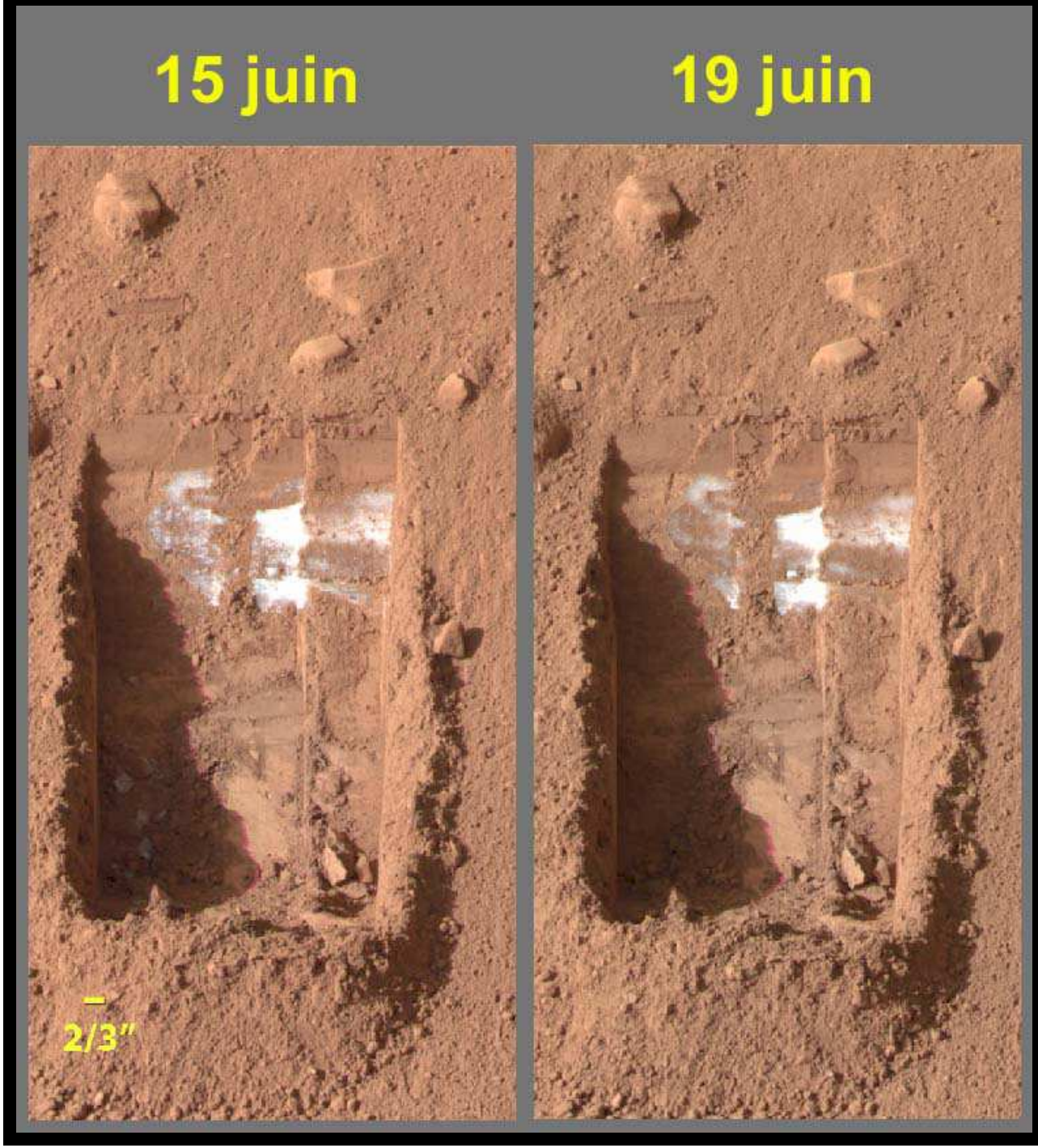


Avec une « pelle » (5 cm de large) au bout d'un bras articulé, Phoenix creuse des petites tranchées. Dans les tranchées comme dans le contenu de la pelle, on voit une substance blanche. Sels ou glace(s) ?



Voici "Dodo-Goldilocks", ensemble de 3 tranchées jointives.

Et toujours cette substance blanche …

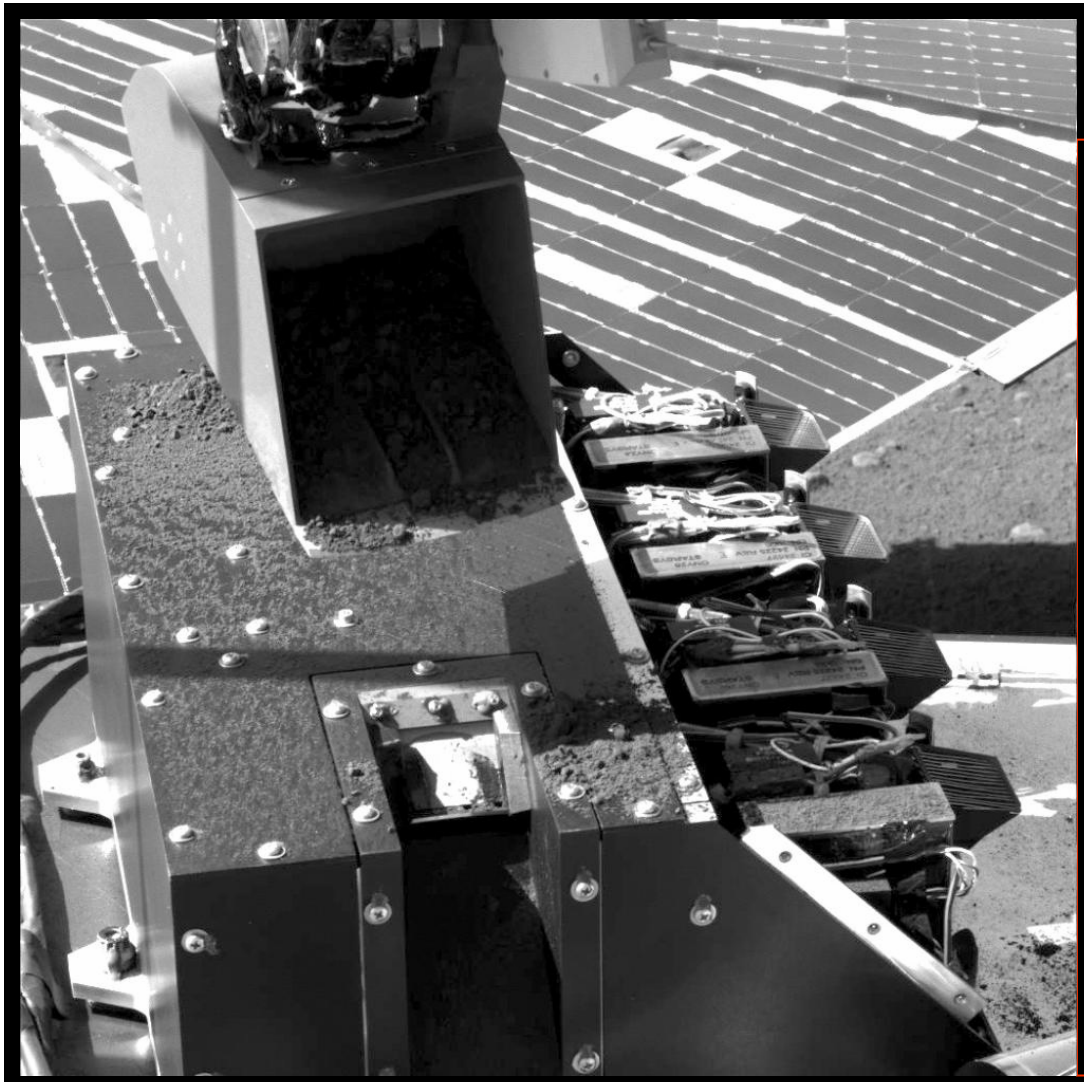


… substance blanche qui se sublime (partiellement) en 4 jours.

De la glace !

Mais est-ce de l'eau pure ? Contient-elle des volatils (CH_4 …) des sels (SO_4^{--} …), autre chose … ?

Avec sa pelle, il remplis ses divers mini-laboratoire d'analyse de sol collecté.



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)

Phoenix has already confirmed the presence of water ice, determined the soil is alkaline (Ph 8 à 9) and identified magnesium, sodium, potassium, chloride and perchlorate in the soil. Chemical analyses continue even as Phoenix's robotic arm reaches out for more samples to sniff and taste. (Nasa news du 29 aout). Attendons la suite !

The evidence for calcium carbonate in soil samples from trenches dug by the Phoenix robotic arm comes from two laboratory instruments called the Thermal and Evolved Gas Analyzer, or TEGA, and the wet chemistry laboratory of the Microscopy, Electrochemistry and Conductivity Analyzer, or MECA.

"We have found carbonate," said William Boynton of the University of Arizona, lead scientist for the TEGA. "This points toward episodes of interaction with water in the past."

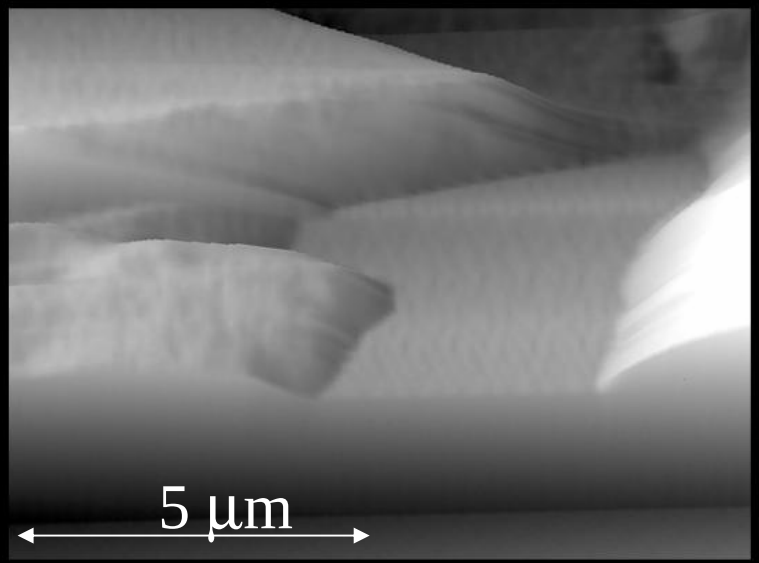
The TEGA evidence for calcium carbonate came from a high-temperature release of carbon dioxide from soil samples. The temperature of the release matches a temperature known to decompose calcium carbonate and release carbon dioxide gas, which was identified by the instrument's mass spectrometer.

The MECA evidence came from a buffering effect characteristic of calcium carbonate assessed in wet chemistry analysis of the soil. The measured concentration of calcium was exactly what would be expected for a solution buffered by calcium carbonate.

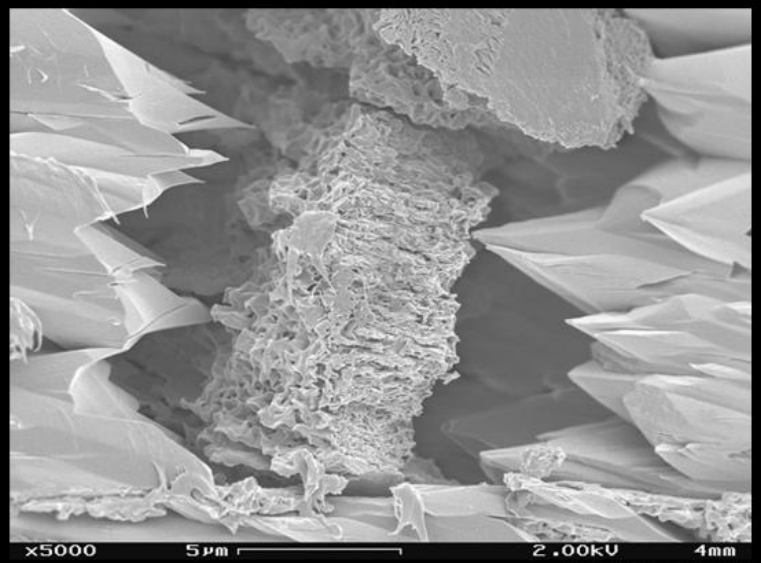
http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=2008-183

Both TEGA, and the microscopy part of MECA, have turned up hints of a clay-like substance. "We are seeing smooth-surfaced, platy particles with the atomic-force microscope, not inconsistent with the appearance of clay particles," said Michael Hecht, MECA lead scientist at NASA's Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, Calif.

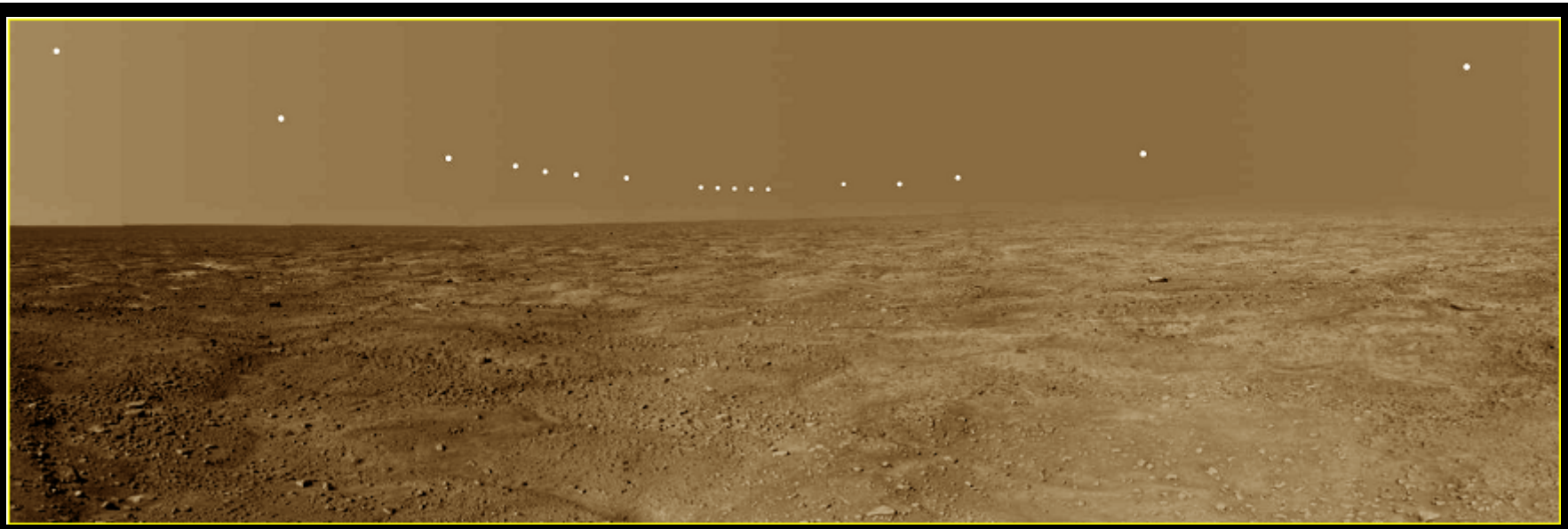
Mars particle

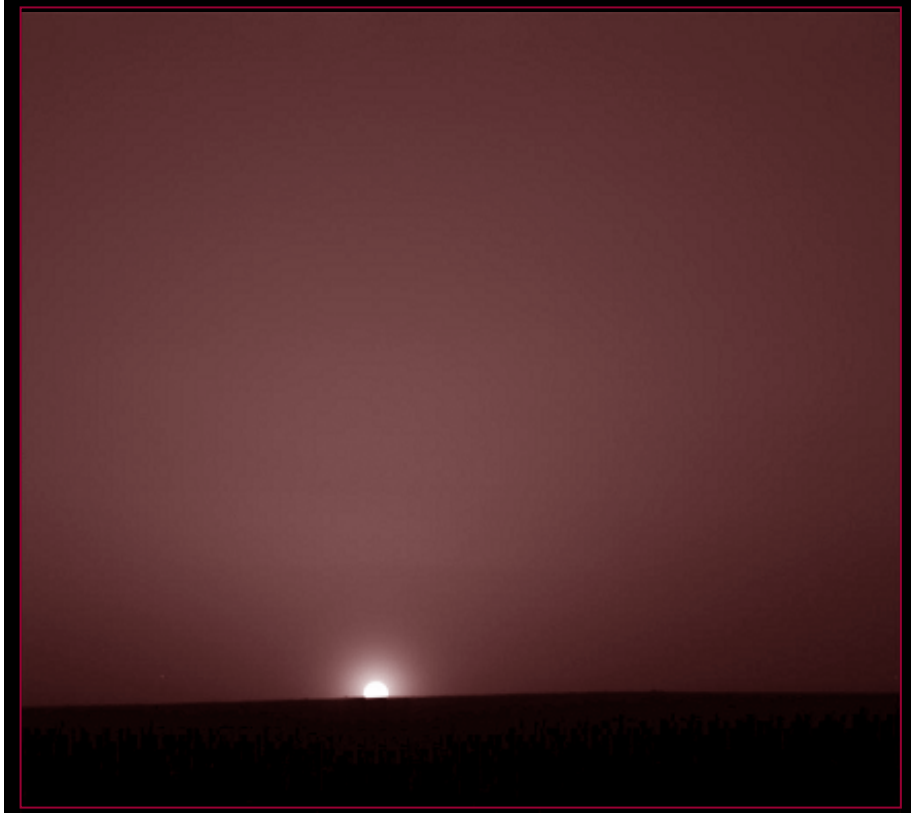


Earth particle



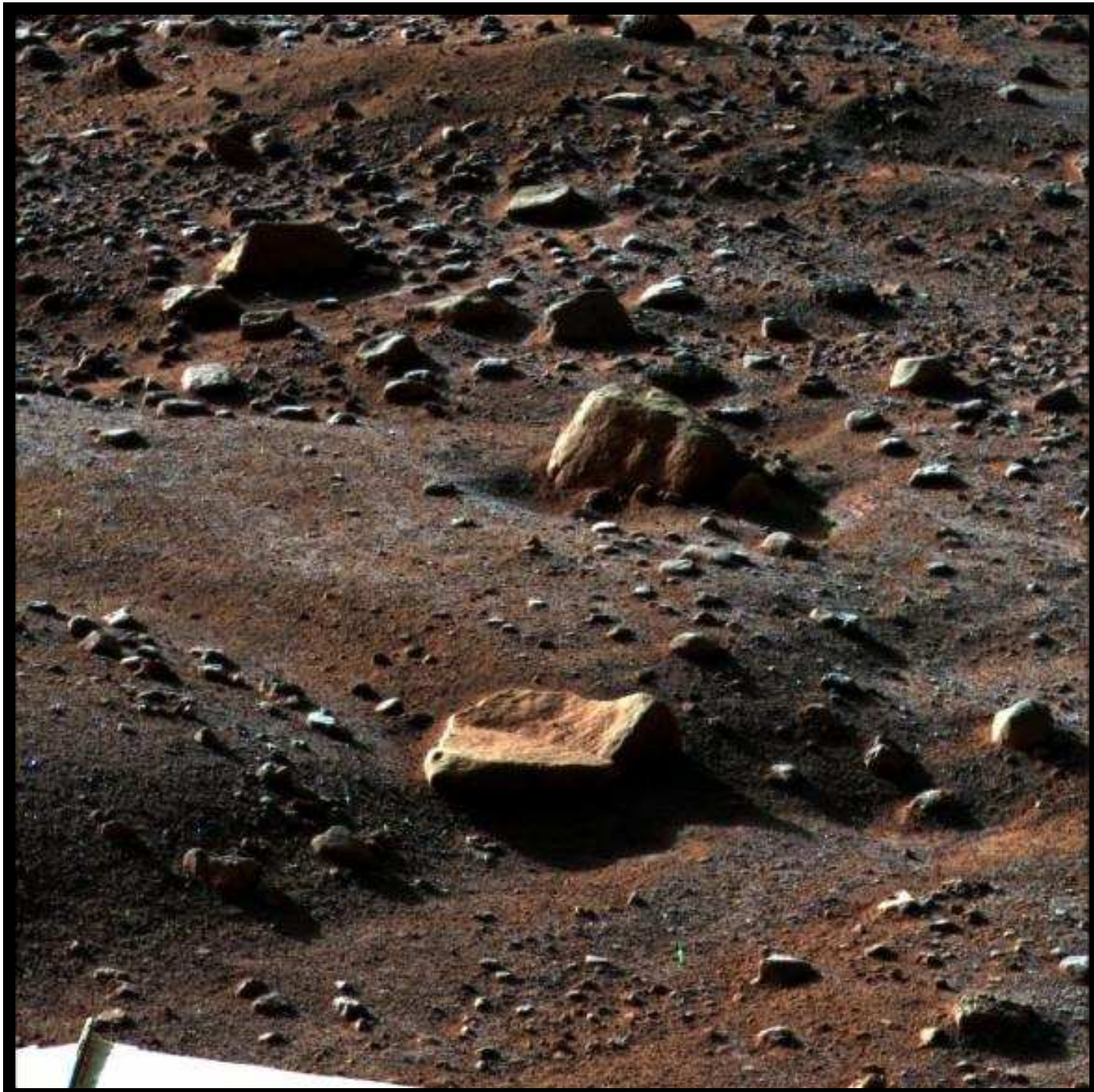
Clay Minerals Society





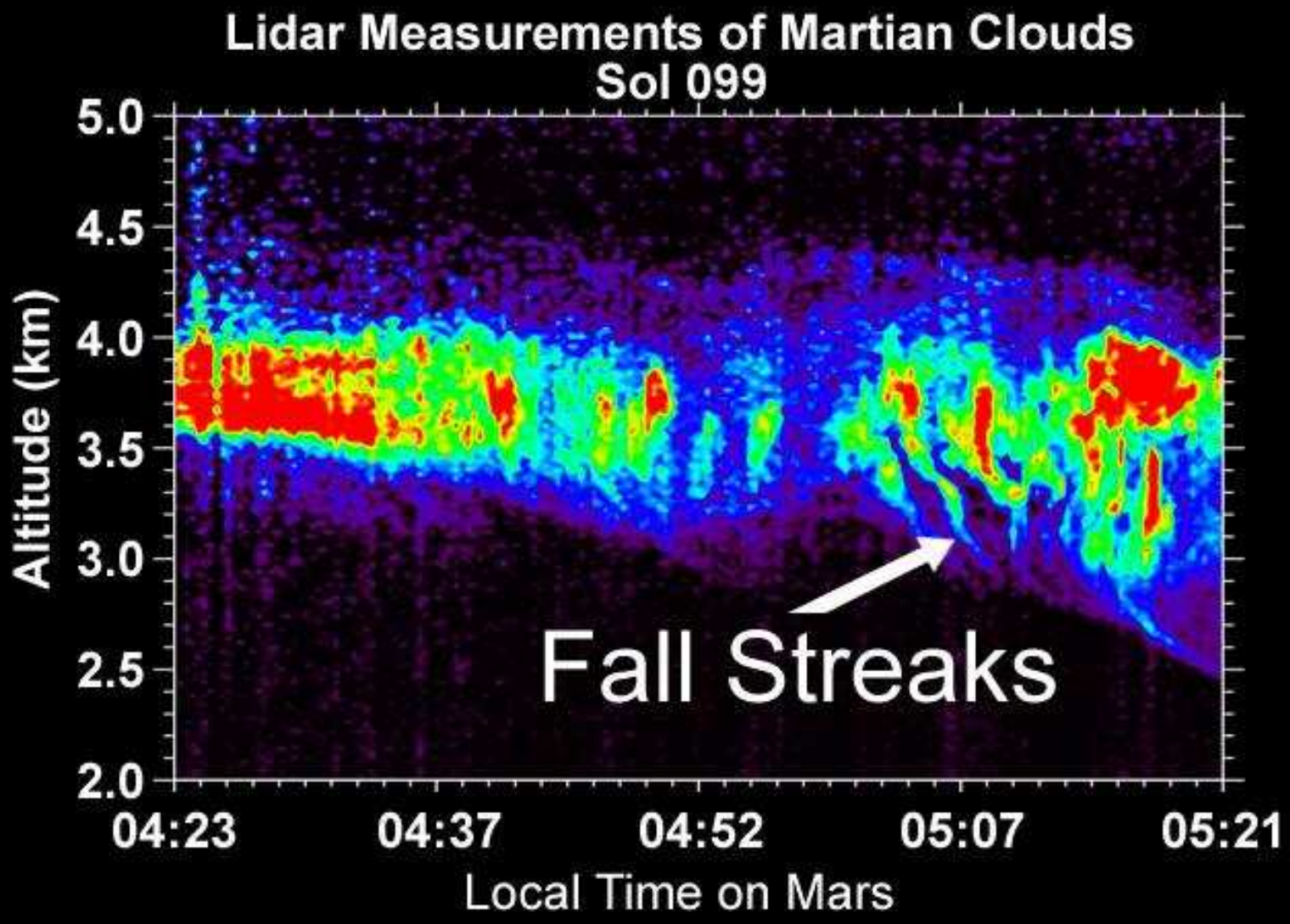
De mai à juillet, c'était l'été martien ; le soleil ne se couchait jamais (soleil de minuit).

Depuis août, le soleil se couche le soir et se relève le matin. Bientôt, il ne se lèvera plus.

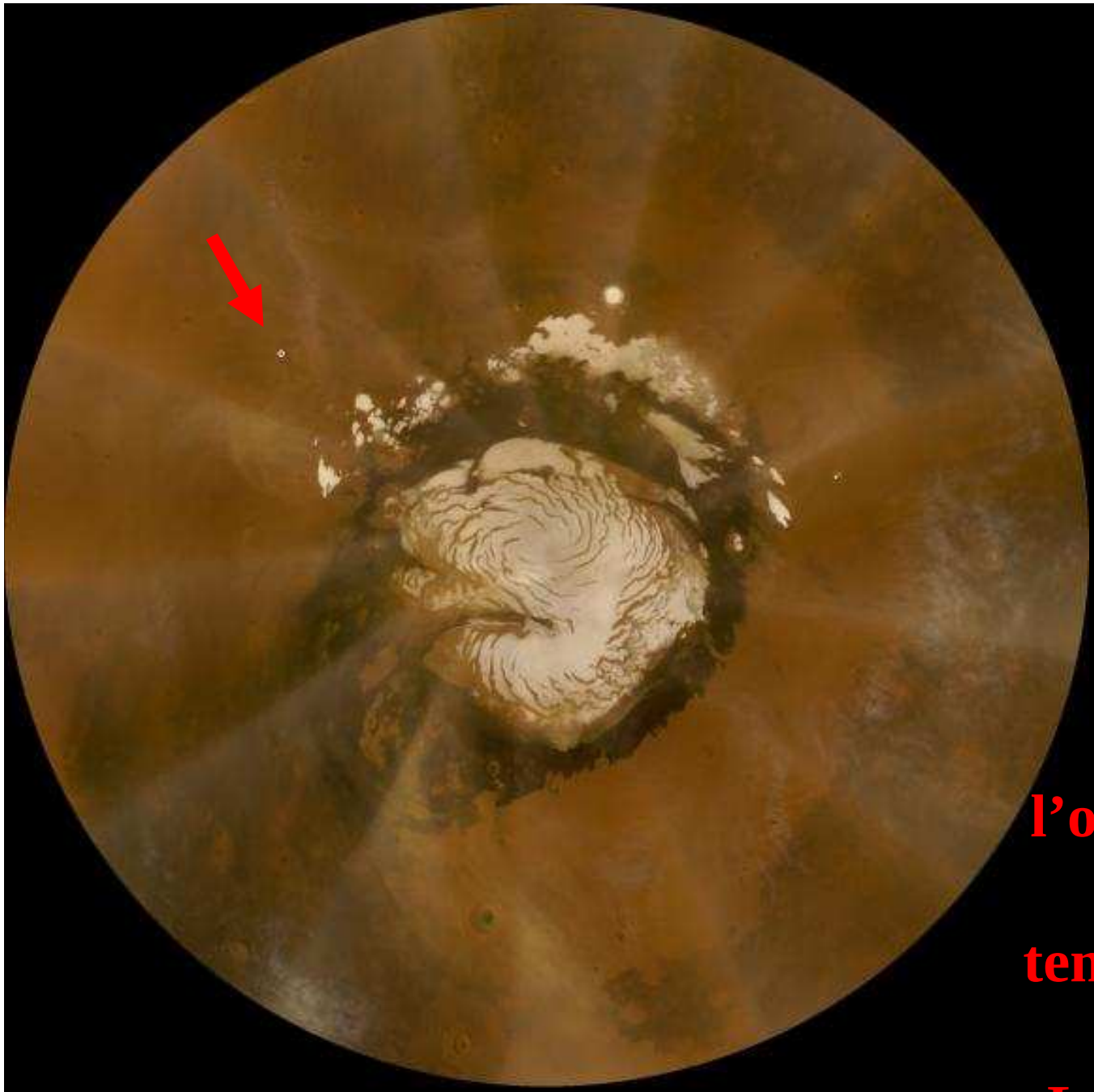


Et depuis qu'il y a des nuits, Phoenix voit du givre chaque petit matin, givre qui se sublime très vite.
(Photo prise le 14 août).

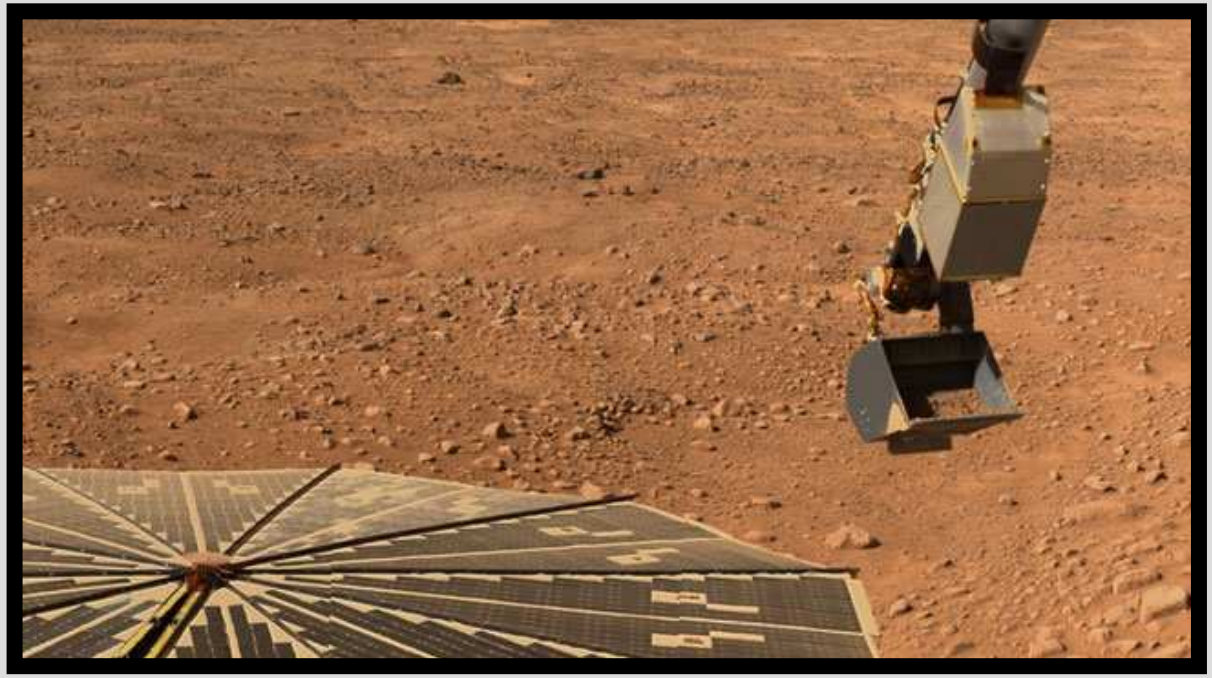
La mission va durer jusqu'à ce que le froid « tue » la sonde.



3 septembre : le radar voit tomber de la neige vers 3-4 km.
Les flocons se subliment avant d'atteindre le sol.



Le 11 octobre, même depuis l'orbite martienne, on voit des tempêtes autour de Phoenix.
La fin est proche !

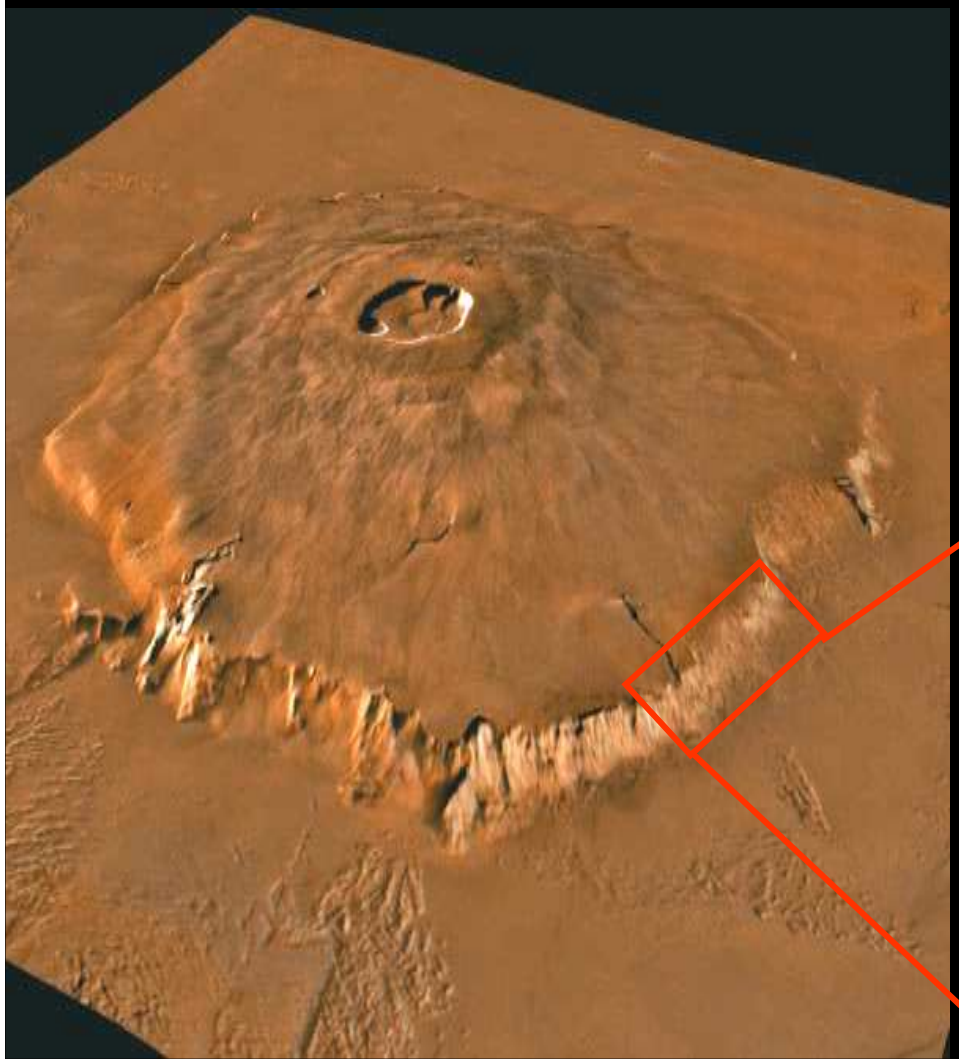


Et le 2 novembre, les communications s'interrompent ! Voici « l'avis de décès » officiel :

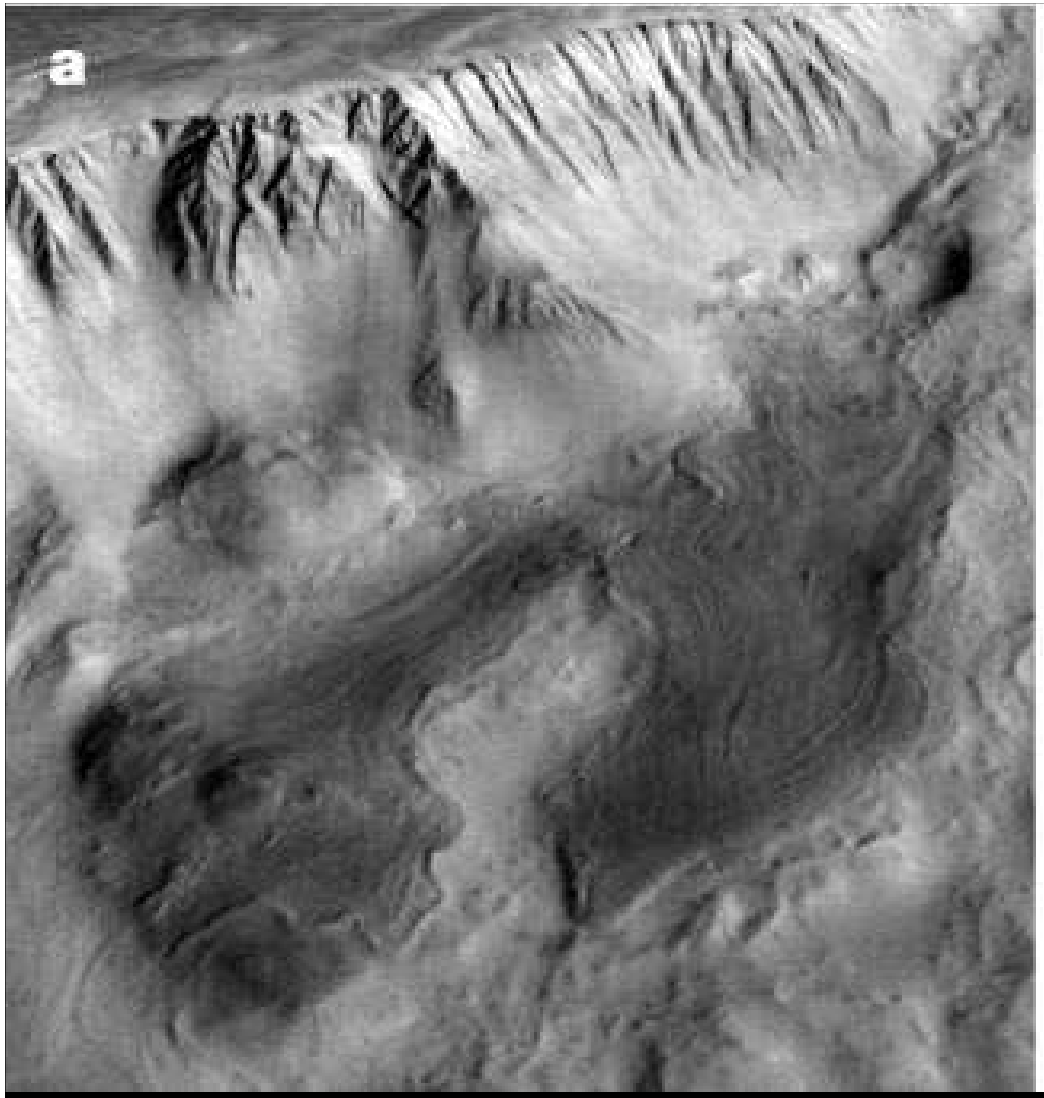
November 10, 2008
PASADENA, Calif. -- NASA's Phoenix Mars Lander has ceased communications after operating for more than five months. As anticipated, seasonal decline in sunshine at the robot's arctic landing site is not providing enough sunlight for the solar arrays to collect the power necessary to charge batteries that operate the lander's instruments.

Attendons maintenant les publications !

Et les calottes passées ?



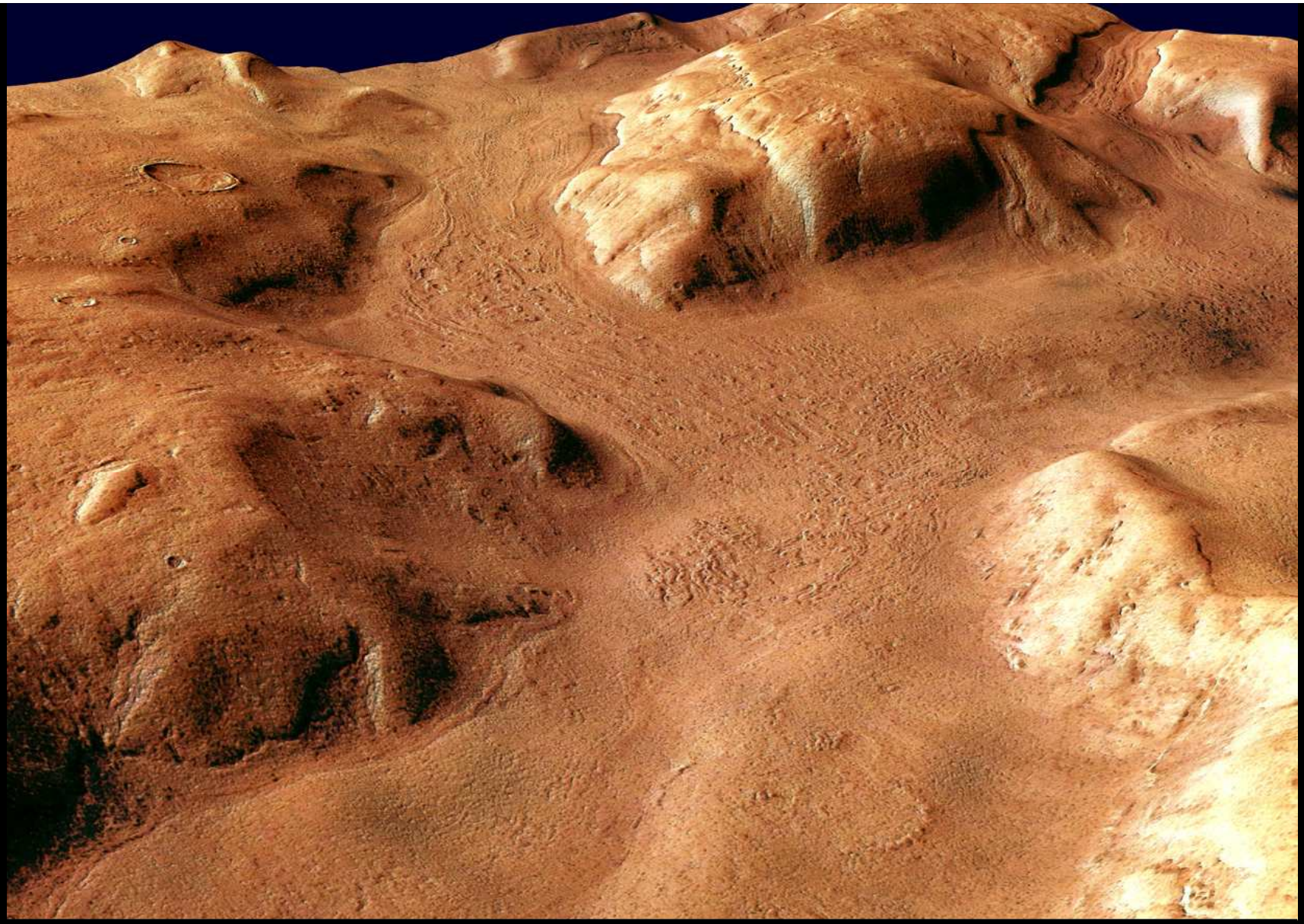
Premier exemple : sur les flancs d'Olympus Mons, le plus grand volcan martien (d = 600 km, h = 26 km), situé à l'équateur



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.

Une possible analogie terrestre. Mais pourquoi des glaciers récents sur les 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

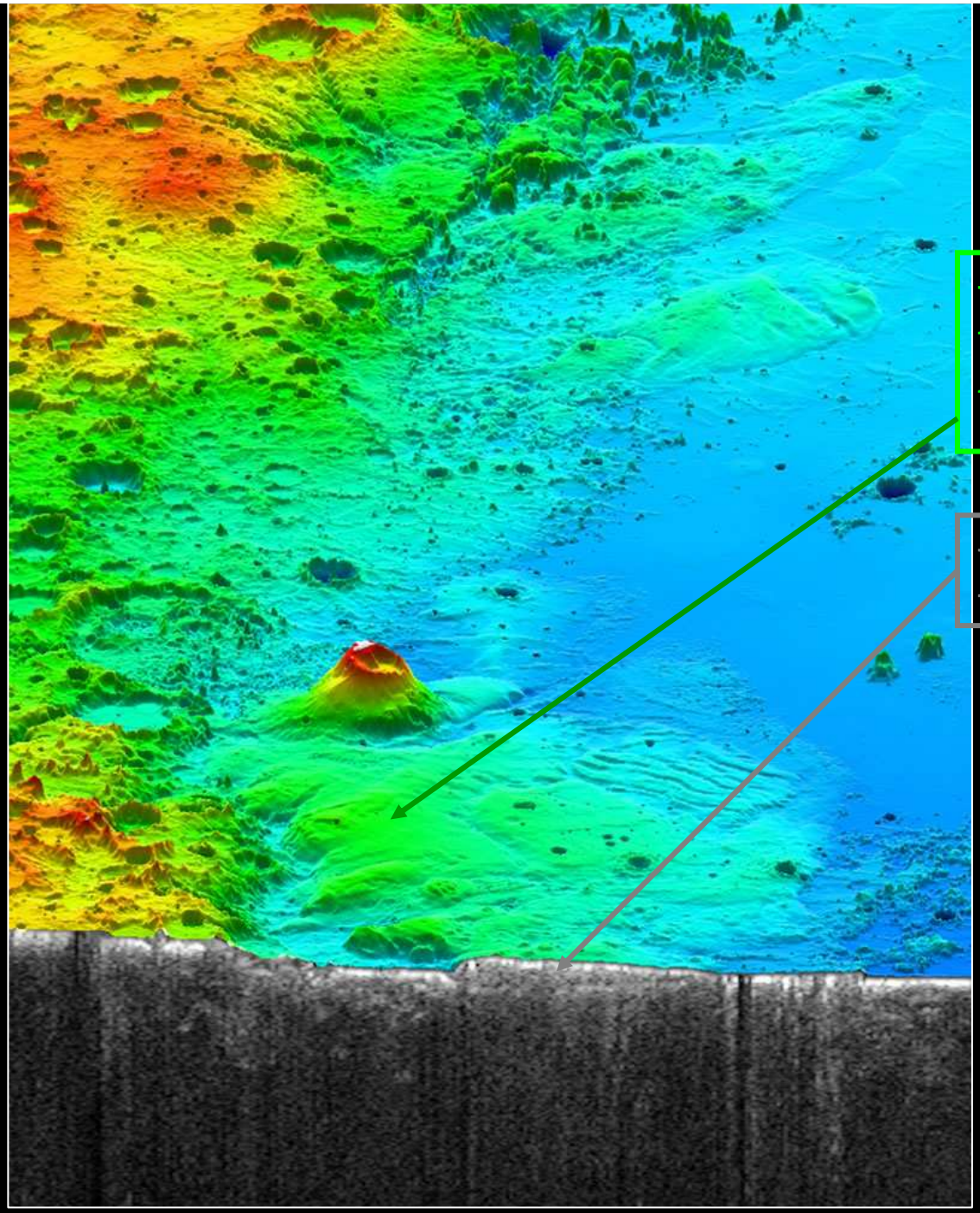
The radar system on the European Space Agency's Mars Express orbiter has uncovered new details about some of the most mysterious deposits on Mars: the Medusae Fossae Formation. It has provided the first direct measurement of the depth and electrical properties of these materials, providing new clues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

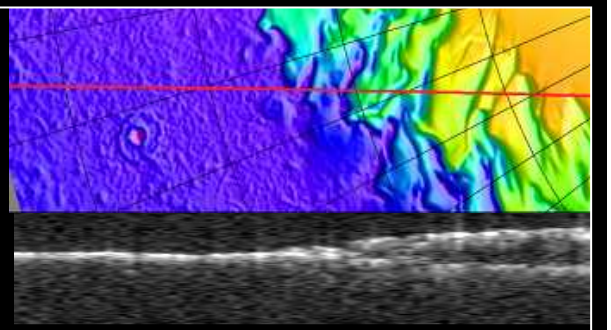
This image combining a topographic map viewed obliquely (color portion of image) with a radargram of the subsurface

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.

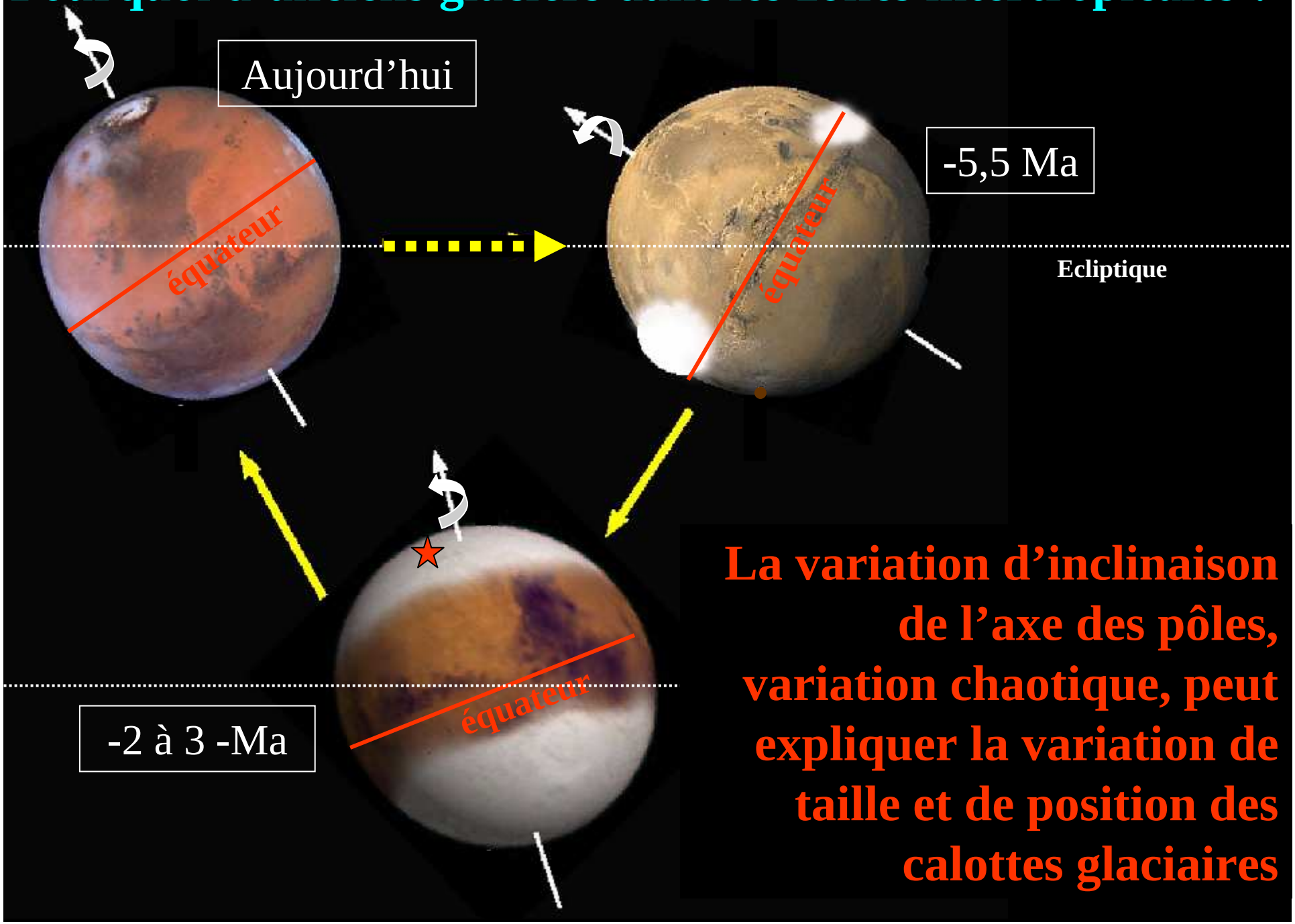
The Medusae Fossae Formation consists of enigmatic deposits. Found near the Martian equator along a divide between highlands and lowlands, they may represent some of the youngest deposits on the surface of the planet. This is implied because there is a marked lack of impact craters dotting these deposits.

+ Larger image

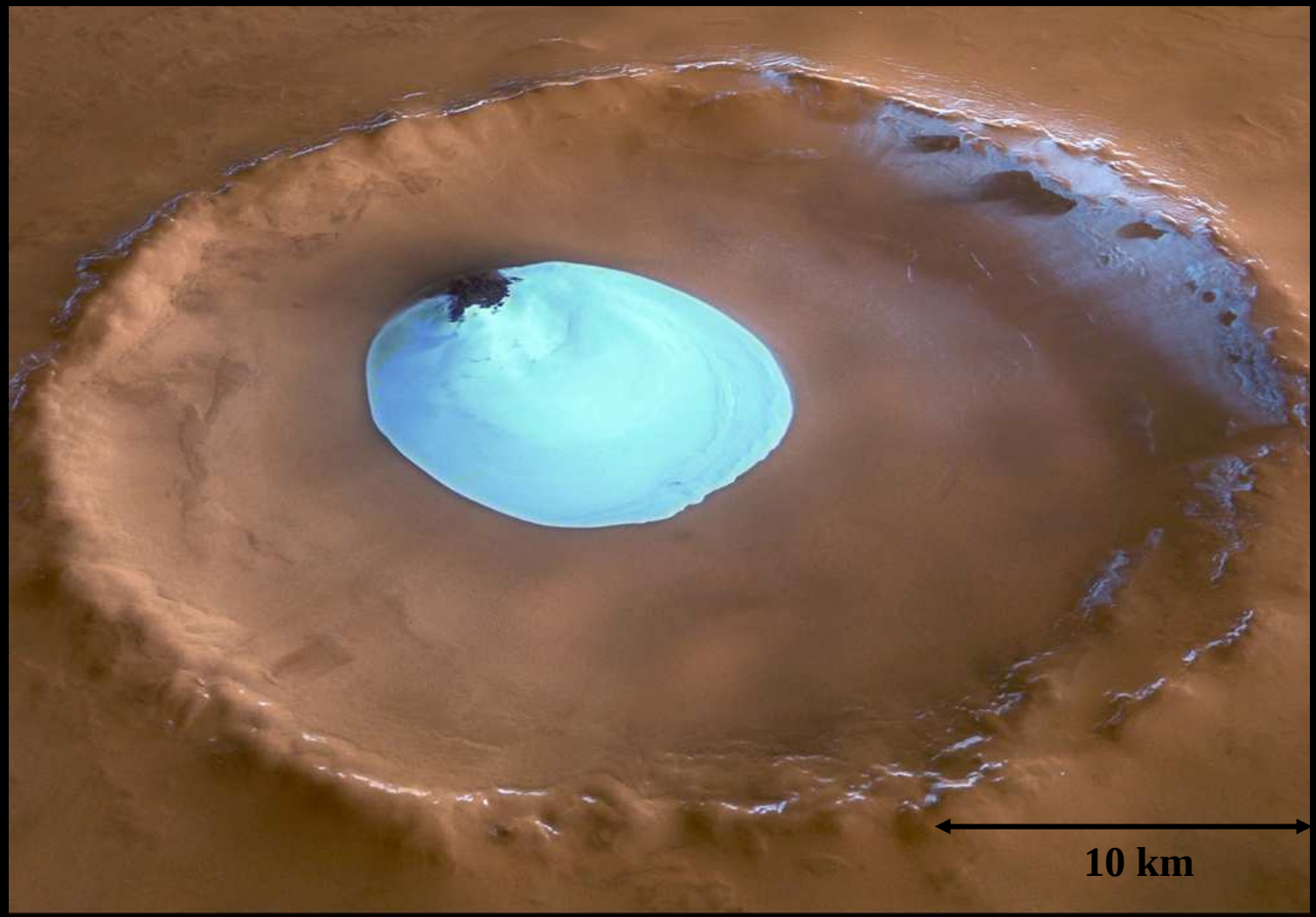
This image combining a topographic map viewed obliquely (color portion of image) with a radargram of the subsurface

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 regio colder.

Pourquoi d'anciens glaciers dans les zones intertropicales ?



La variation d'inclinaison de l'axe des pôles, variation chaotique, peut expliquer la variation de taille et de position des calottes glaciaires



Et voici, au fond d'un cratère (70° 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.

Voilà 100 diapos , c’est fini pour aujourd’hui !
Mais à force de parler d’eau et de glace, il fait soif, et soif d’autre chose que d’eau.
Merci !