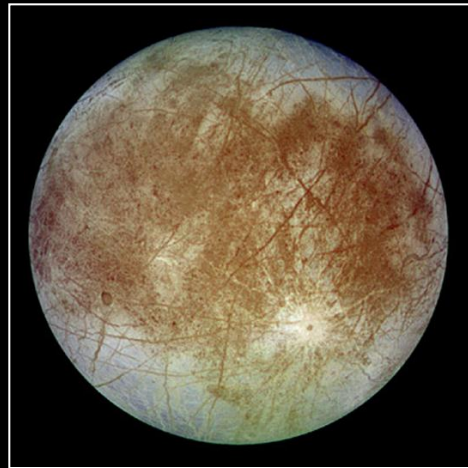
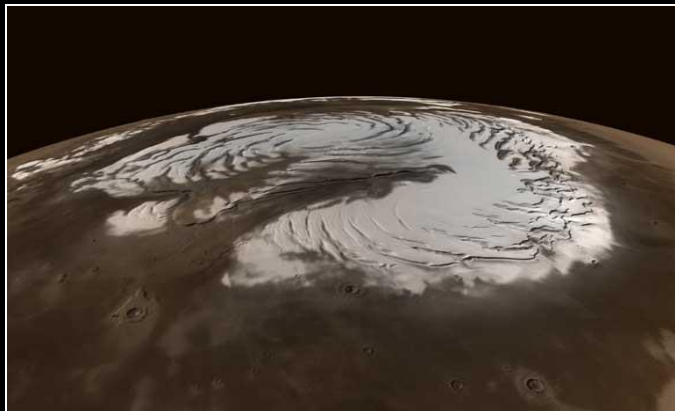
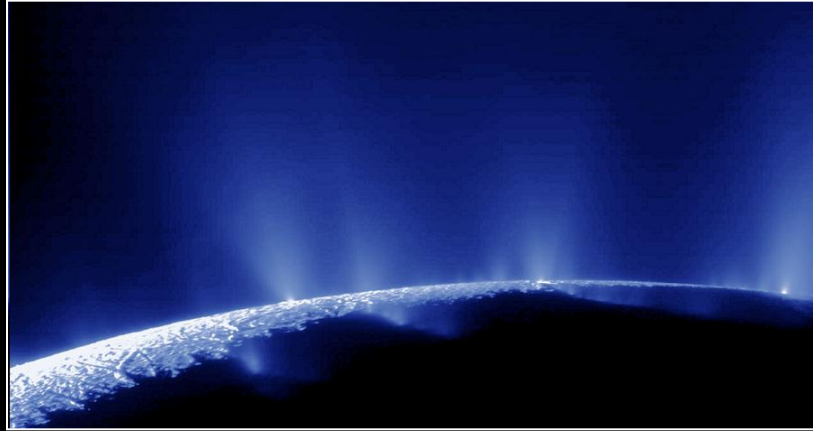
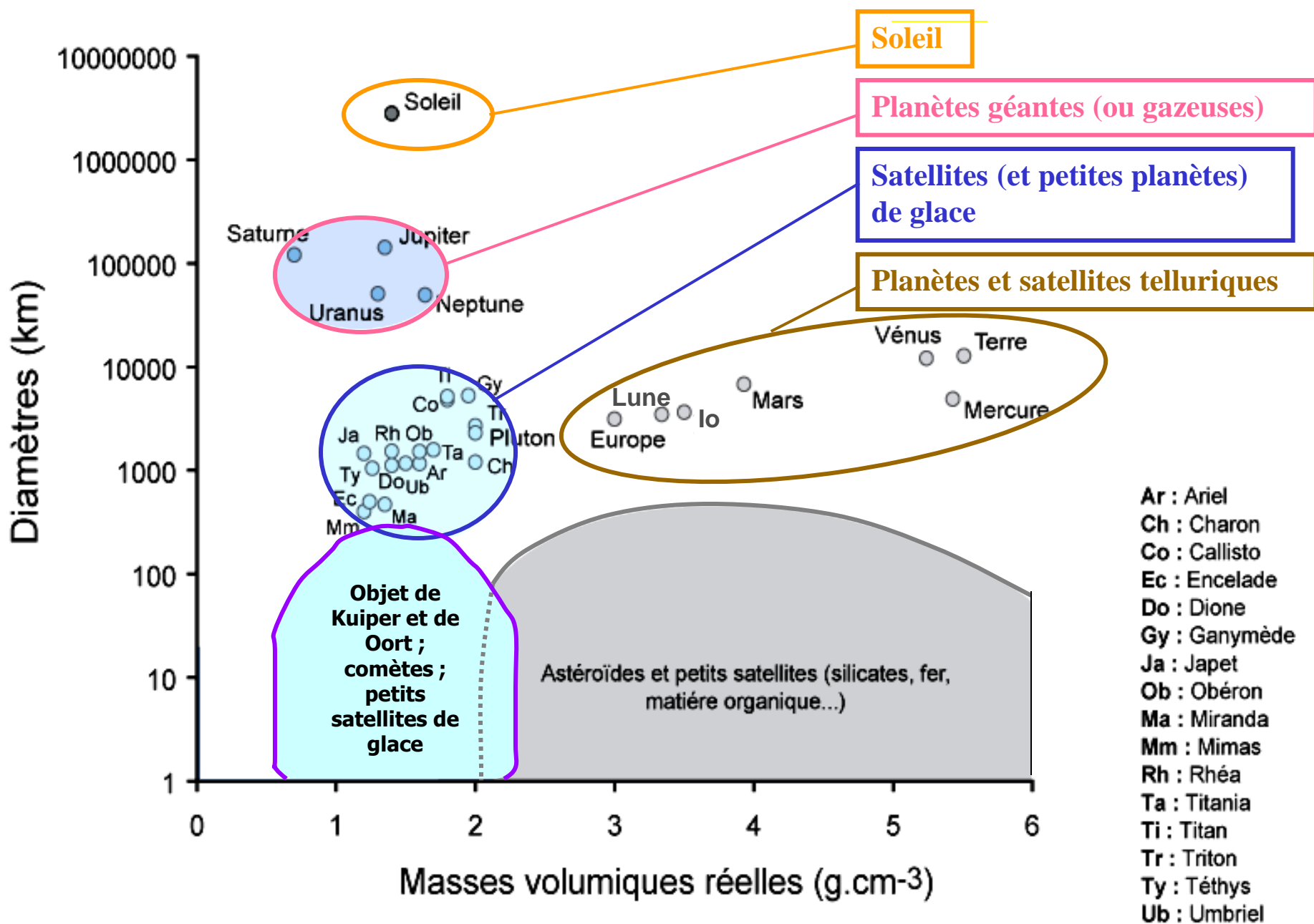


L'eau le système solaire





Le système solaire des astronomes, avec le soleil, 8 planètes, leurs satellites, des astéroïdes (CA) et des objets trans-neptuniens (CK), des comètes



La classification géologique du système solaire

L'eau sur Terre : 3 sites principaux :

$\sim 10^{21}$ kg

= 1 000 000 000 000 000 000 000 kg

= 1/1000 de la Terre



**Je n'en
dirais pas
plus !**



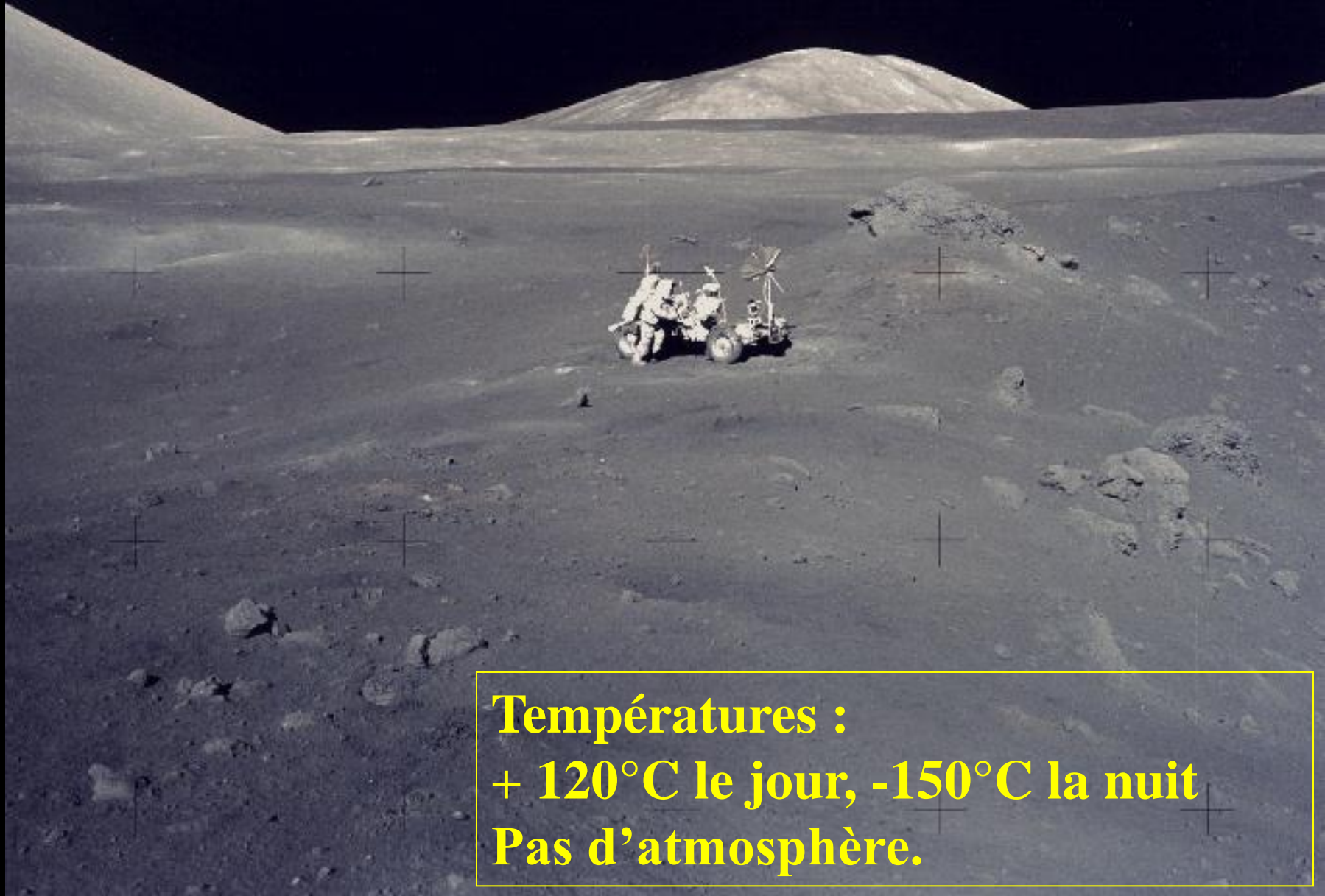
$\sim 10^{21}$ kg

$\sim 10^{19}$ kg

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



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



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

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





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

Des météorites riches en eau et des comètes qui tombent sur la Lune pendant la nuit. Une partie de cette eau, vaporisée par

l'impact, se condenserait en givre qui se sublimerait dès le lever du soleil, sauf au niveau des cratères polaires.

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

Super Novae

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

Rayons cosmiques

ATMOSPHERE

Surface de la Terre

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

Super Novae

Rayons cosmiques

Neutrons

Réactions
nucléaires

Surface de la Lune



Sur la Lune, pas d'atmosphère ni de champs magnétique. Les rayons cosmiques frappent le sol, ce qui produit des neutrons « rapides ». Or, l'Hydrogène (en particulier son isotope nommé Deutérium) ralentit les neutrons d'une façon « particulière ». Et il y a de l'Hydrogène dans H₂O.

Neutrons
lents

Super Novae

Neutrons
rapides

Surface de la Lune avec glace

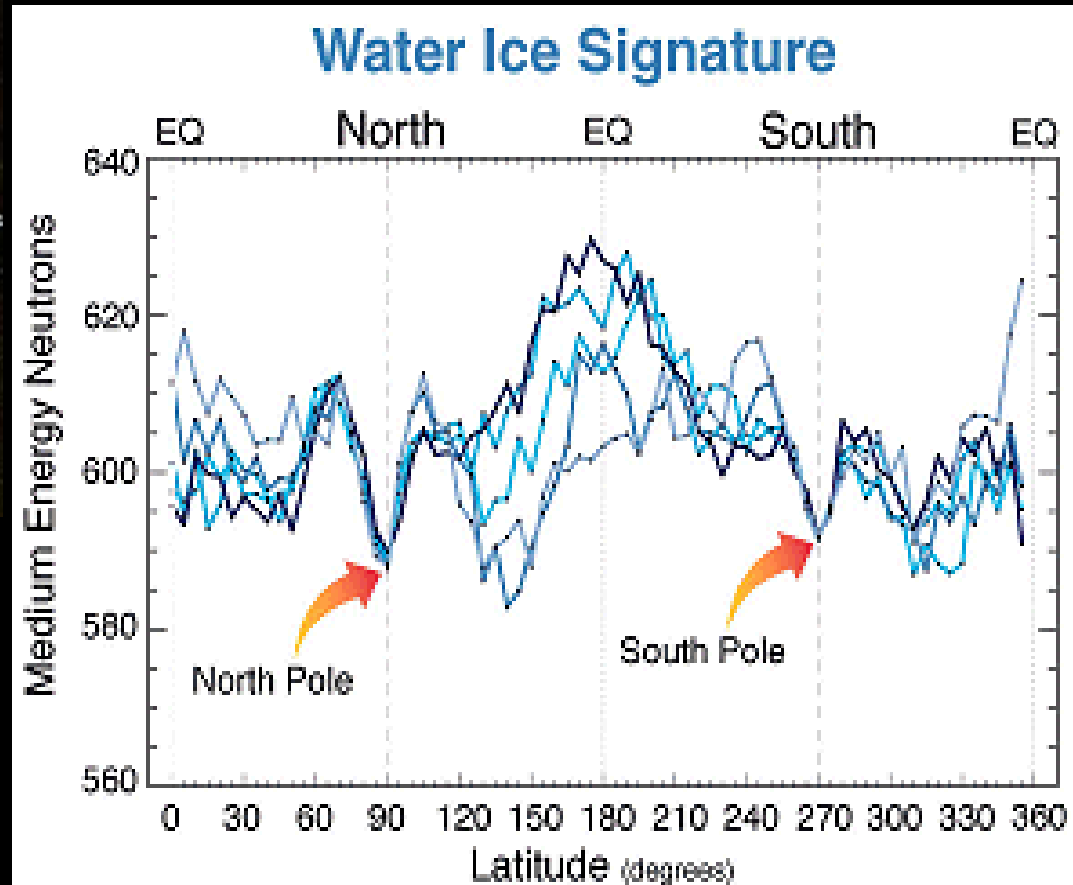
Surface de la Lune sèche

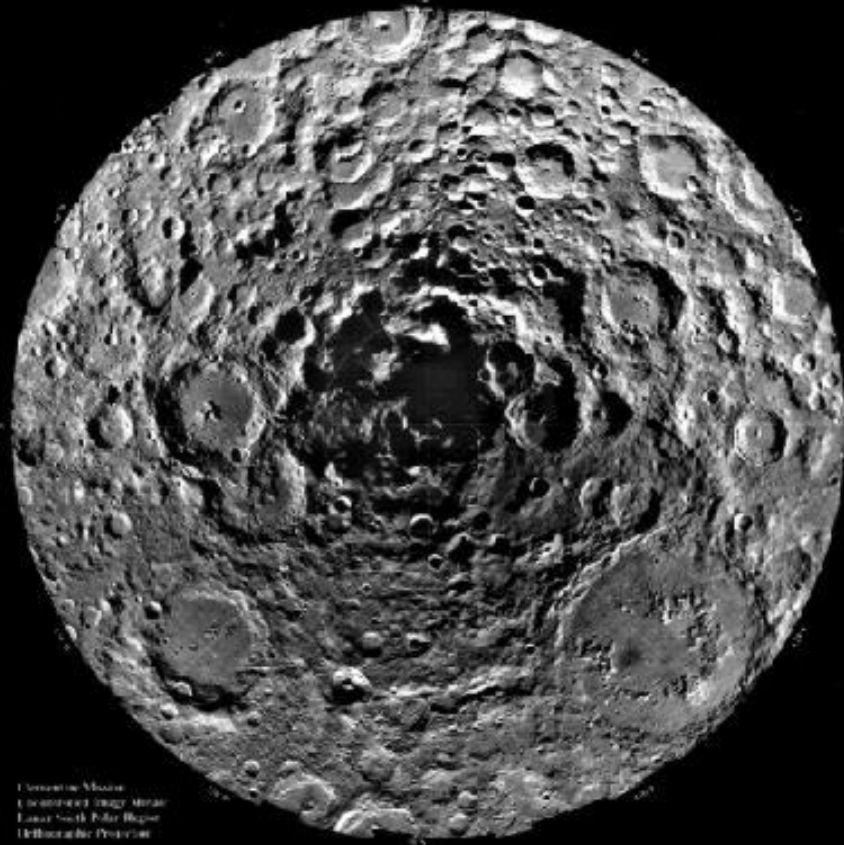
Si il y a des quantités significatives de glace dans certaines zones de la Lune, donc de deutérium, les neutrons seront ralentis. Le sont-ils au dessus des cratères polaires ?



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

Au niveau des pôles, les neutrons sont effectivement ralentis

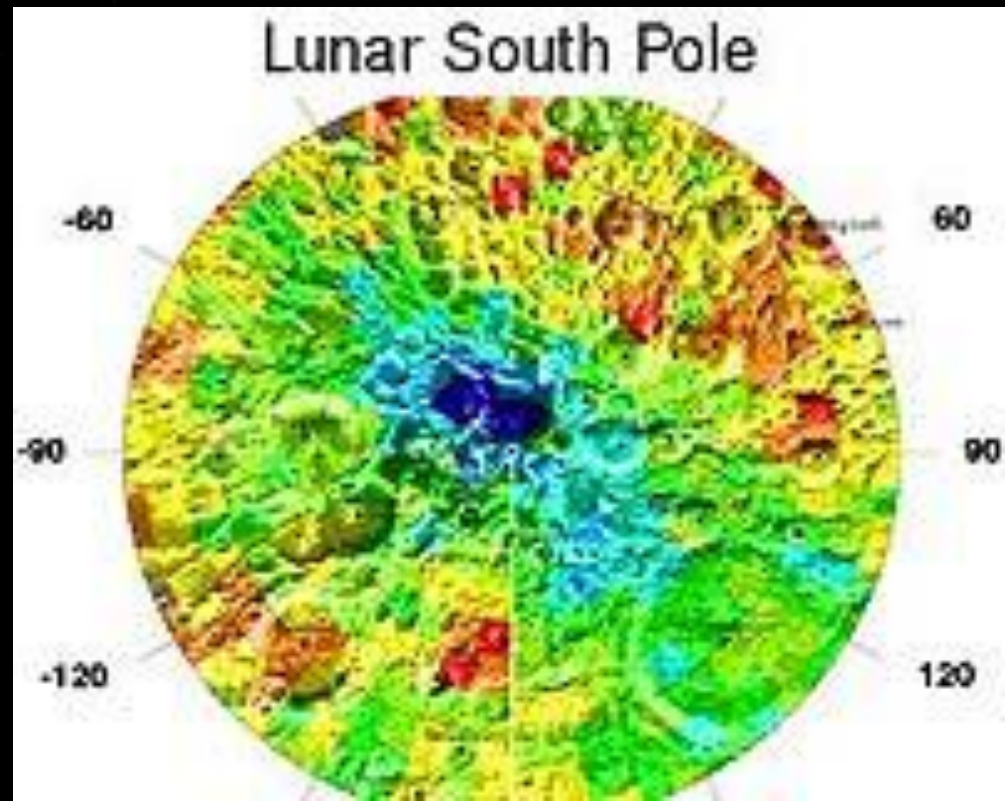




© NASA/JPL
Lunar Reconnaissance Orbiter
Lunar South Pole Region
LRO/Diviner

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

Et c'est à l'emplacement de ces cratères que les neutrons sont ralentis. Ces cratères contiendraient de la glace d'H₂O !





NATIONAL AERONAUTICS
AND SPACE ADMINISTRATION

+ NASA Quest
+ Search Quest

FIND IT @ NASA :

+ GO

Home

Mission

About the Moon

Impact!

Exploration of the Moon Continues!

LCROSS Lunar CRater Observation and Sensing Satellite

Tech Info

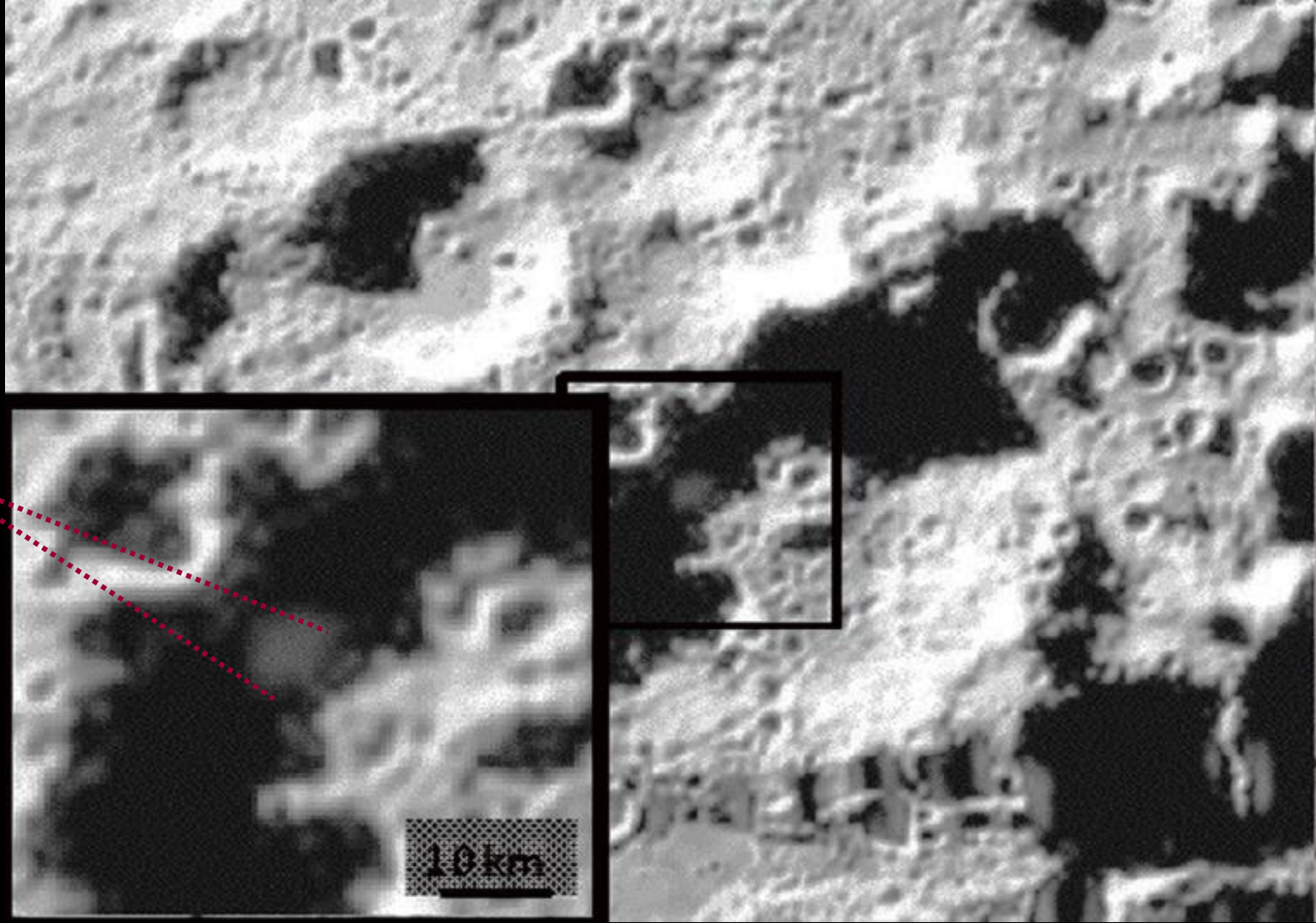
Observations

Education

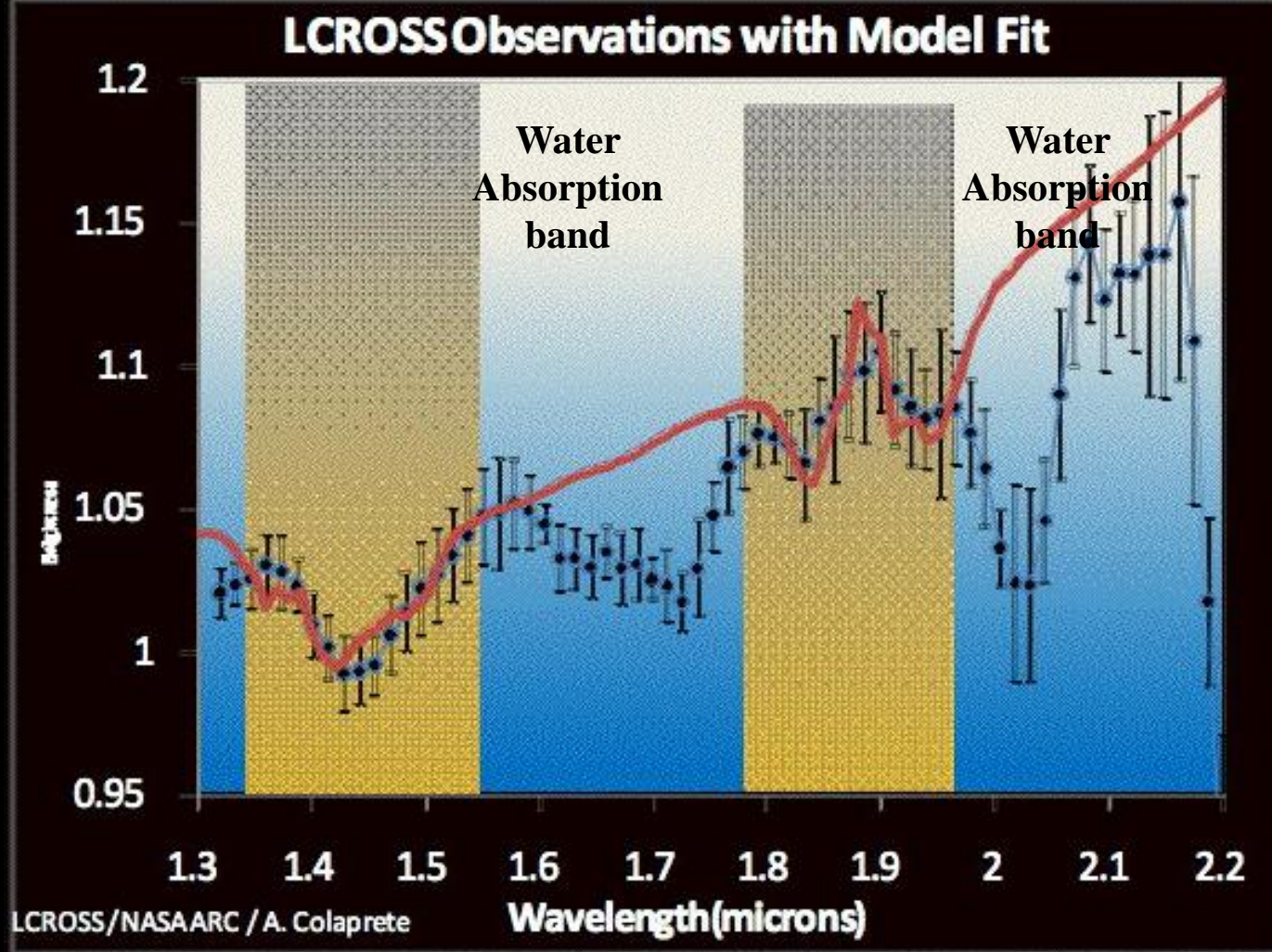
News / Events



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

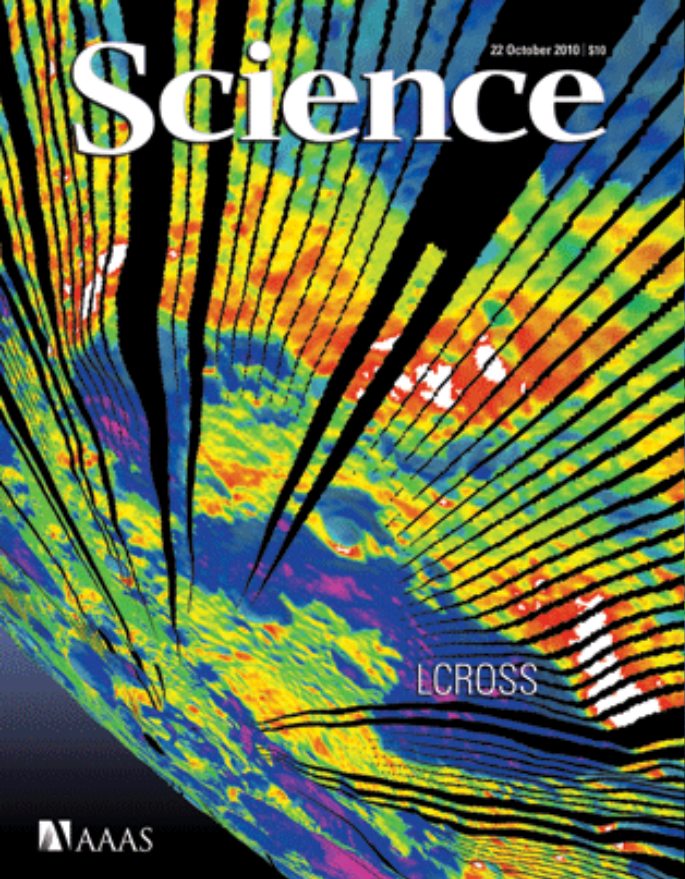


Le panache créé par le 1er impact et vu par LCROSS, 20 secondes après ce 1er impact. Vu la masse et la vitesse de l'impact, il a dû se faire un cratère de 20 m de diamètre pour 3 m de profondeur. Le panache visible ici correspond au plus fins débris issus du cratère



Données Nasa
News,
novembre 2009

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

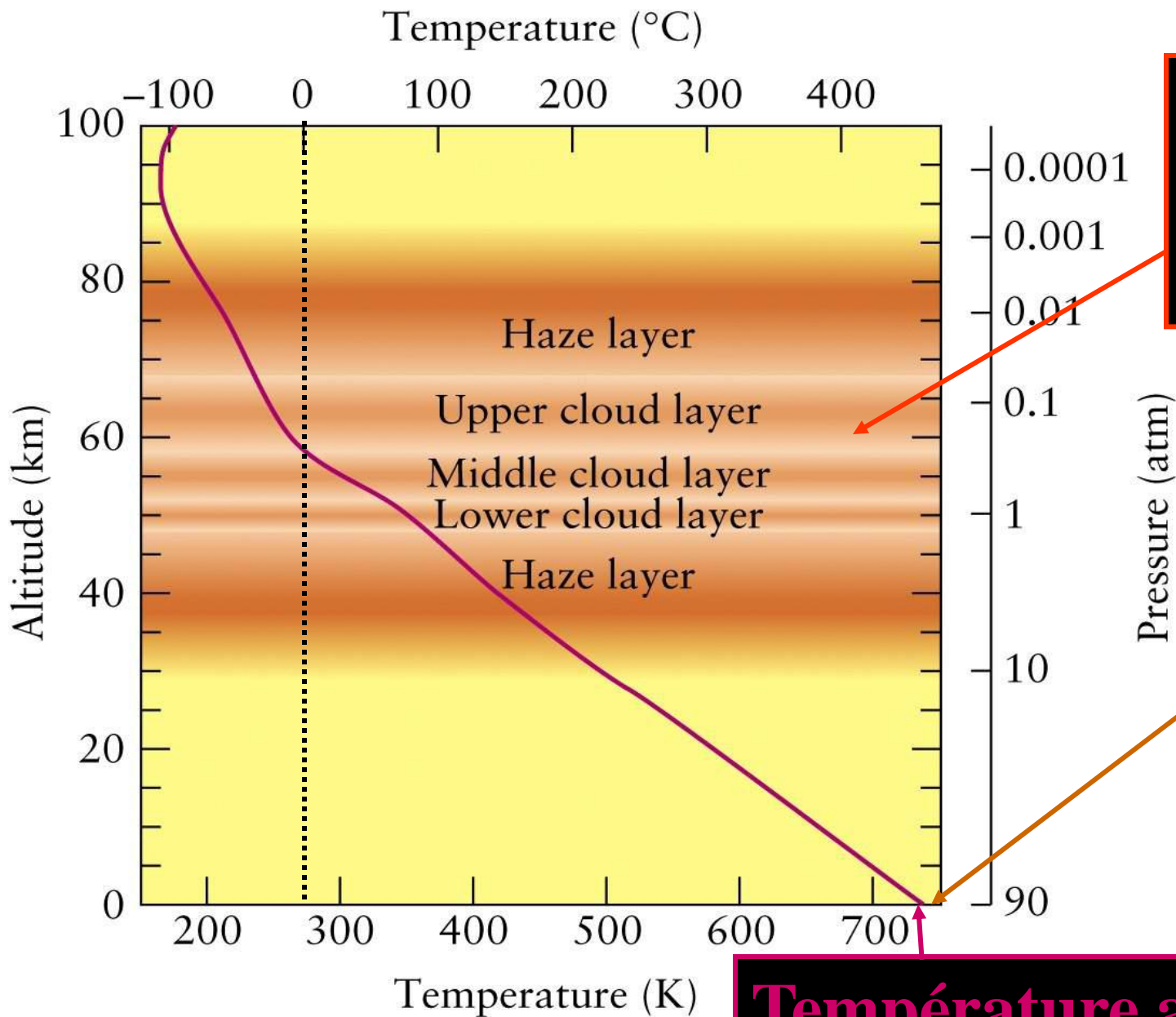


The maximum total water vapor and water ice within the instrument field of view was 155 ± 12 kilograms. Given the estimated total excavated mass of regolith that reached sunlight, and hence was observable, the concentration of water ice in the regolith at the LCROSS impact site is estimated to be $5.6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

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



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

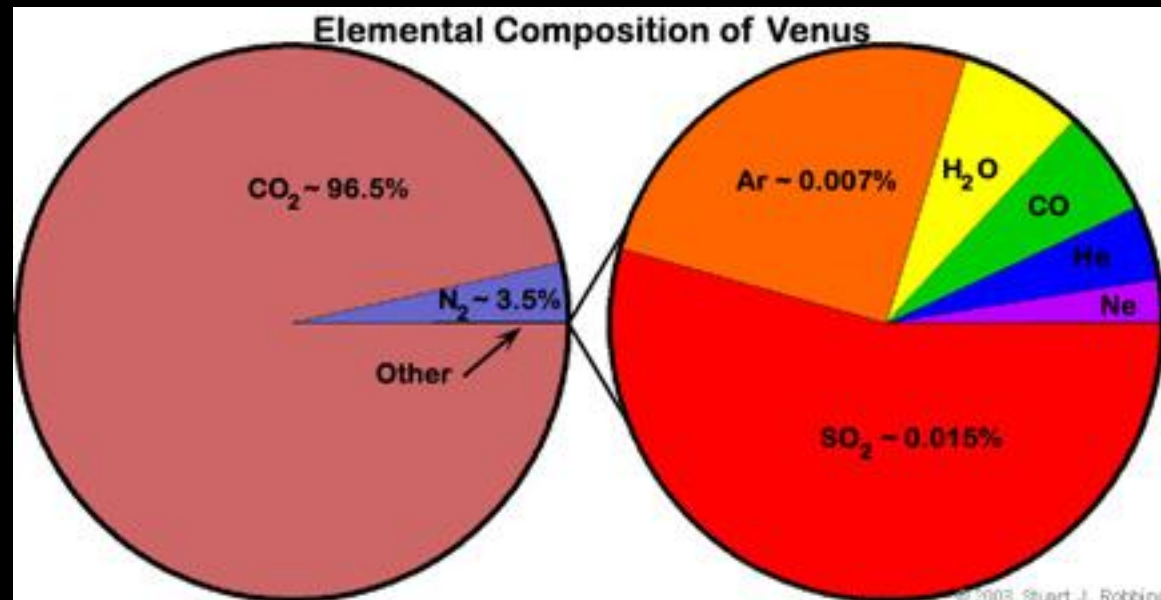


**Nuages
d'acide
sulfurique**

**Pression
de
90 atm.**

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

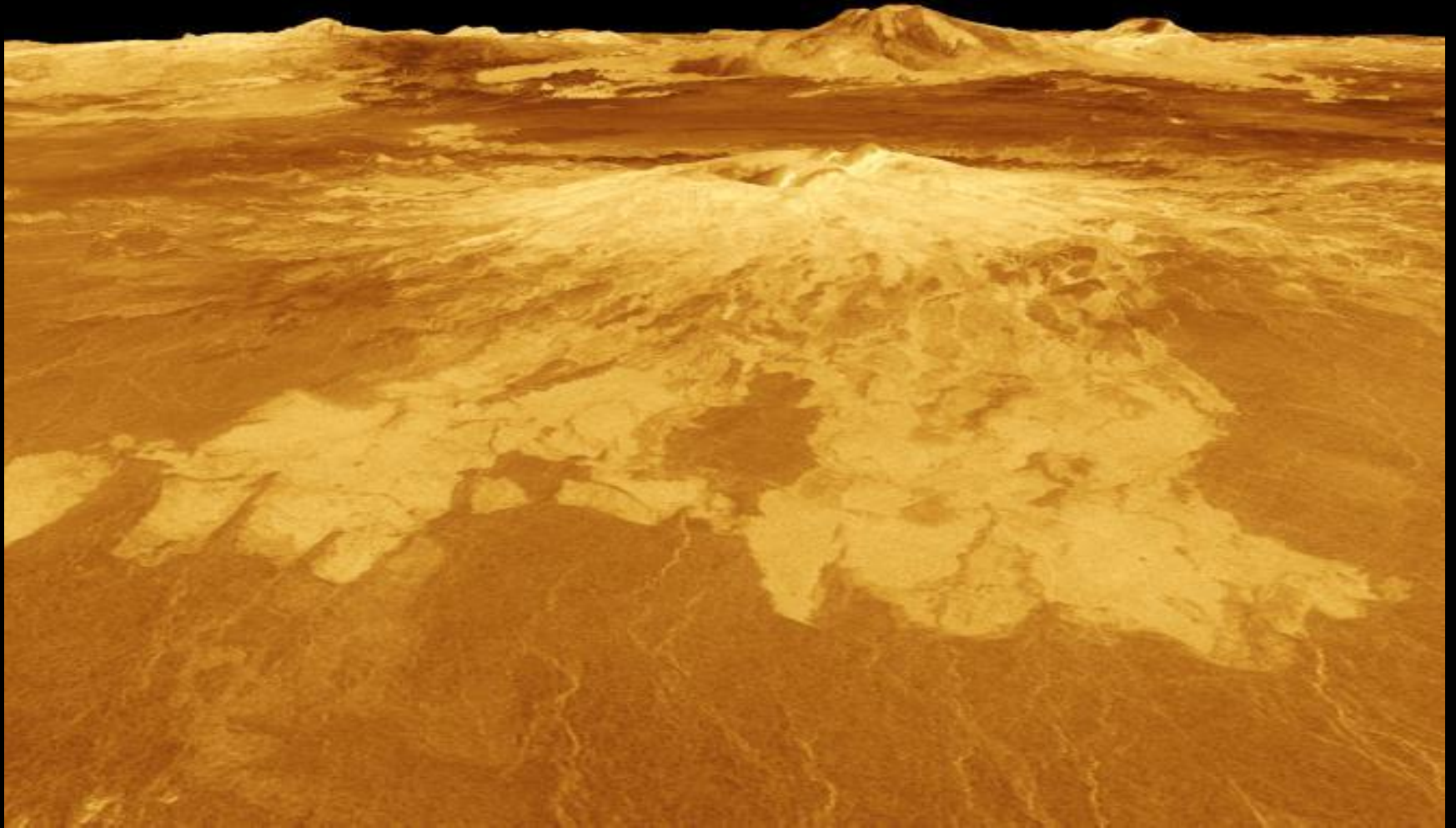
CO₂ : 96.5%
N₂ : 3.5%
SO₂ : 0.015%
Ar : 0.007%
H₂O: 0.002%
CO : 0.0017%
He : 0.0012%
Ne : 0.0007%

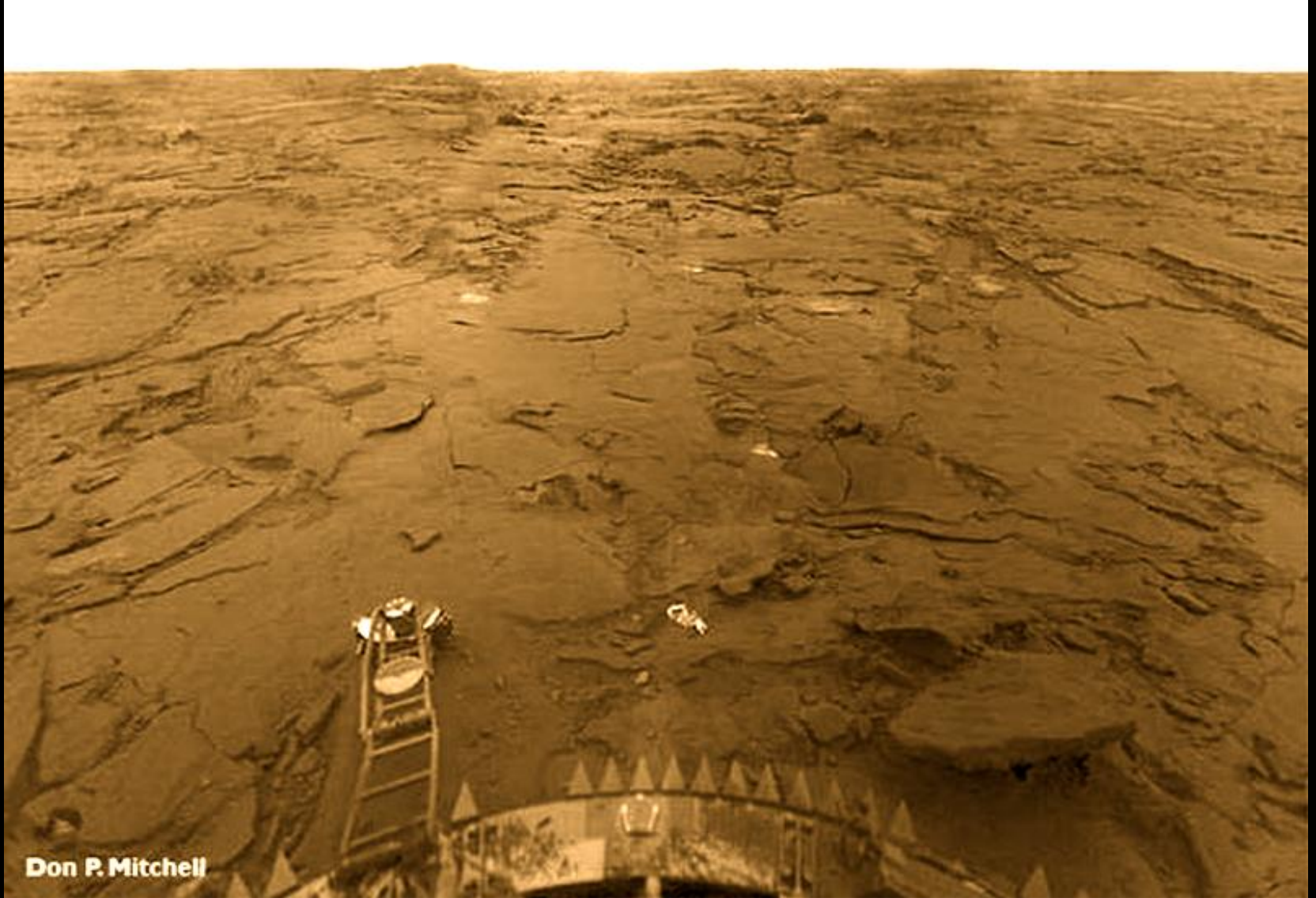


**La composition de l'atmosphère vénérienne :
0,002% de vapeur d'eau ($2 \cdot 10^{-5}$).**

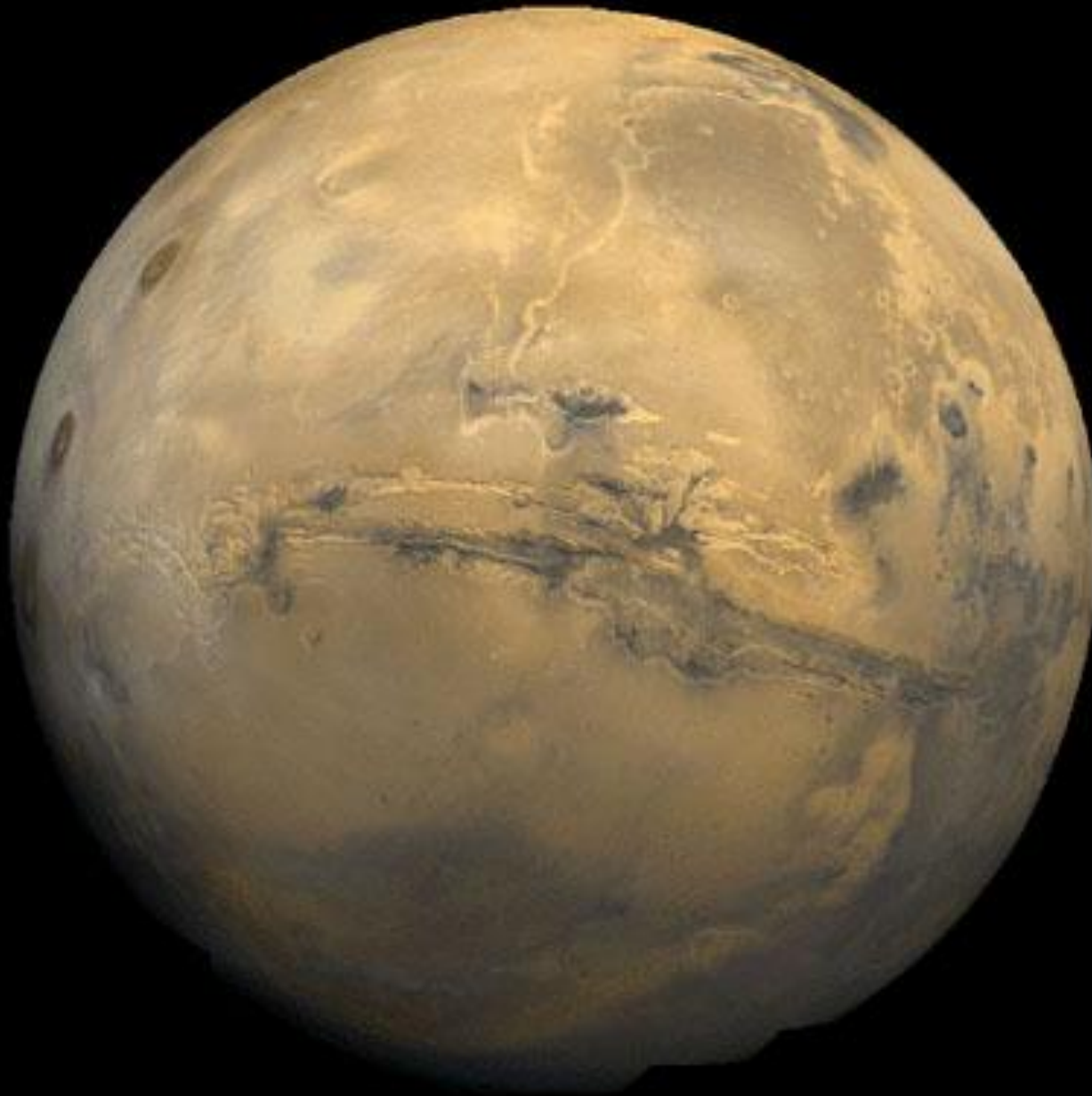
**Si toute cette eau atmosphérique recouvrait la
surface de Vénus, cela ferait une couche d'eau
liquide de quelques cm d'épaisseur
(eau précipitable).**

**Où est partie cette eau vénérienne ? Sans doute
photolysée par les abondants UV solaires, avec
échappement de l'H₂**





Les sols de Vénus, photographiés par des sondes soviétiques, sont rougeâtres, sans doute riches en Fe_2O_3 . L' O_2 libéré par la photolyse de l'eau y serait piégée.



Mars.

Rappel : la température moyenne est de -50°C , la pression de 0,6% de celle de la Terre (ce qui règnerait sur Terre à 50 km d'altitude)



CASSINI 16GG

Doc. Pierre Thomas

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

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

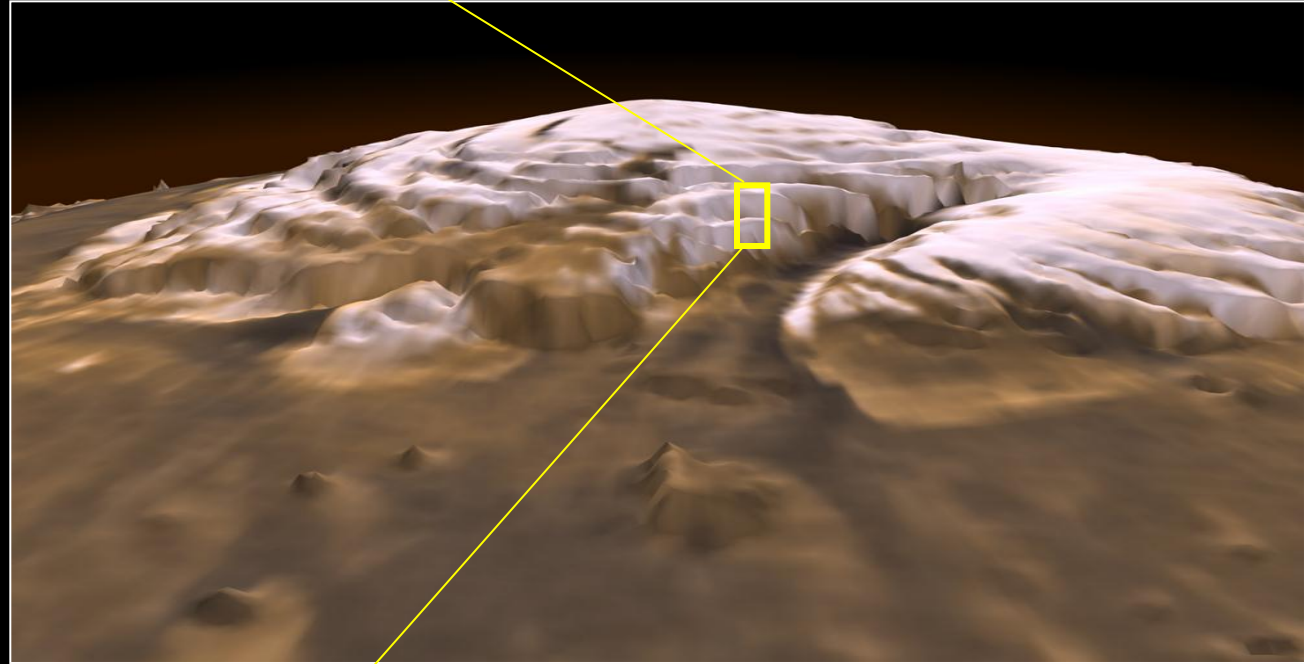
**La détermination
spectrale de la
glace d'H₂O a lieu
pour la 1^{ère} fois
en 1964**

Etudions ces calottes polaires !

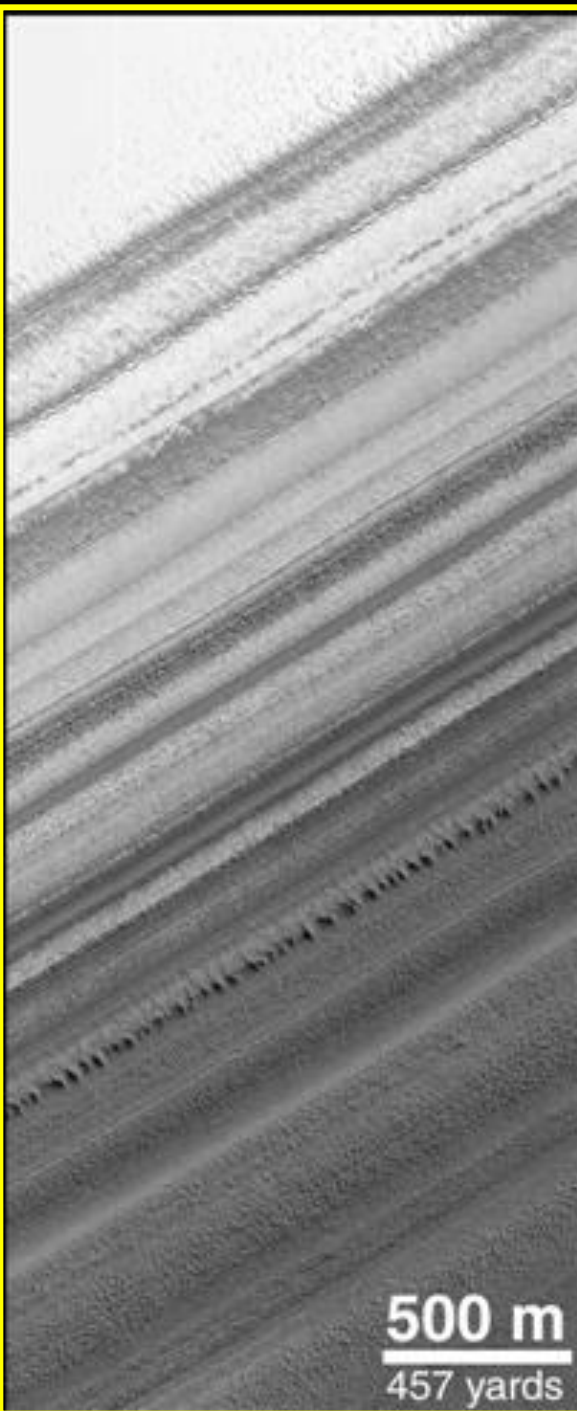
**Voici la calotte polaire nord d'été.
(cette calotte à la taille de celle du Groenland).**



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



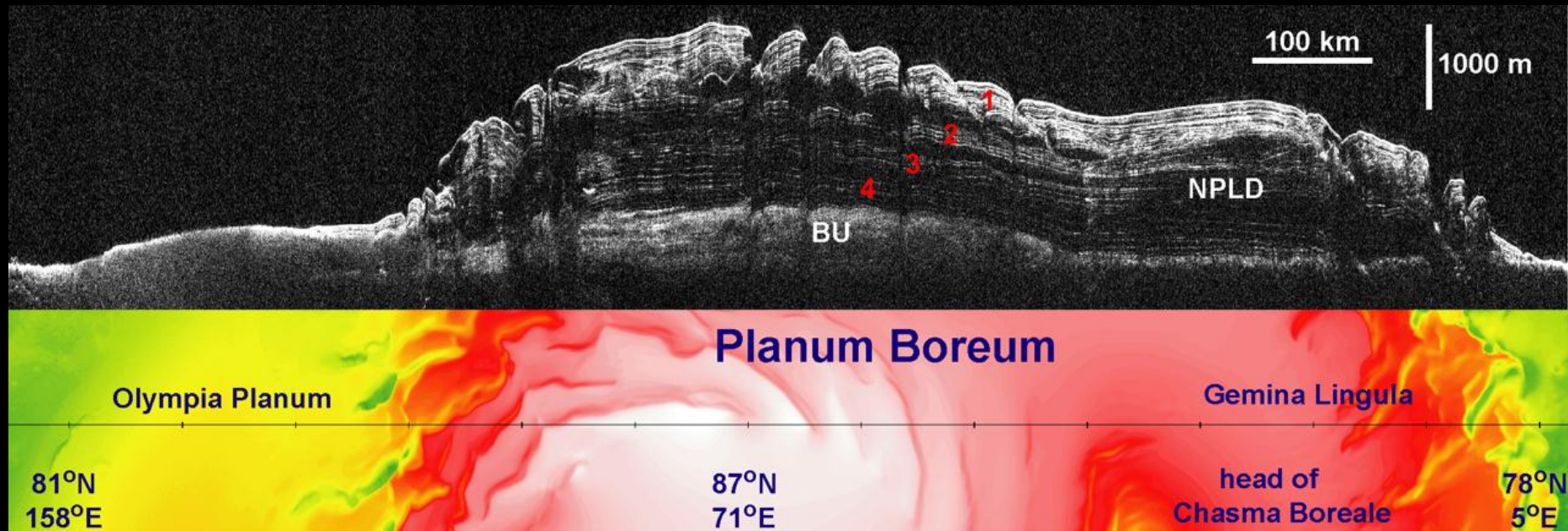
Les falaises bordières montrent des falaises (ici 1000m) qui permettent de voir que la calotte est constituée d'une succession de couches de glace d'H₂O plus ou moins riche en poussières



500 m
457 yards

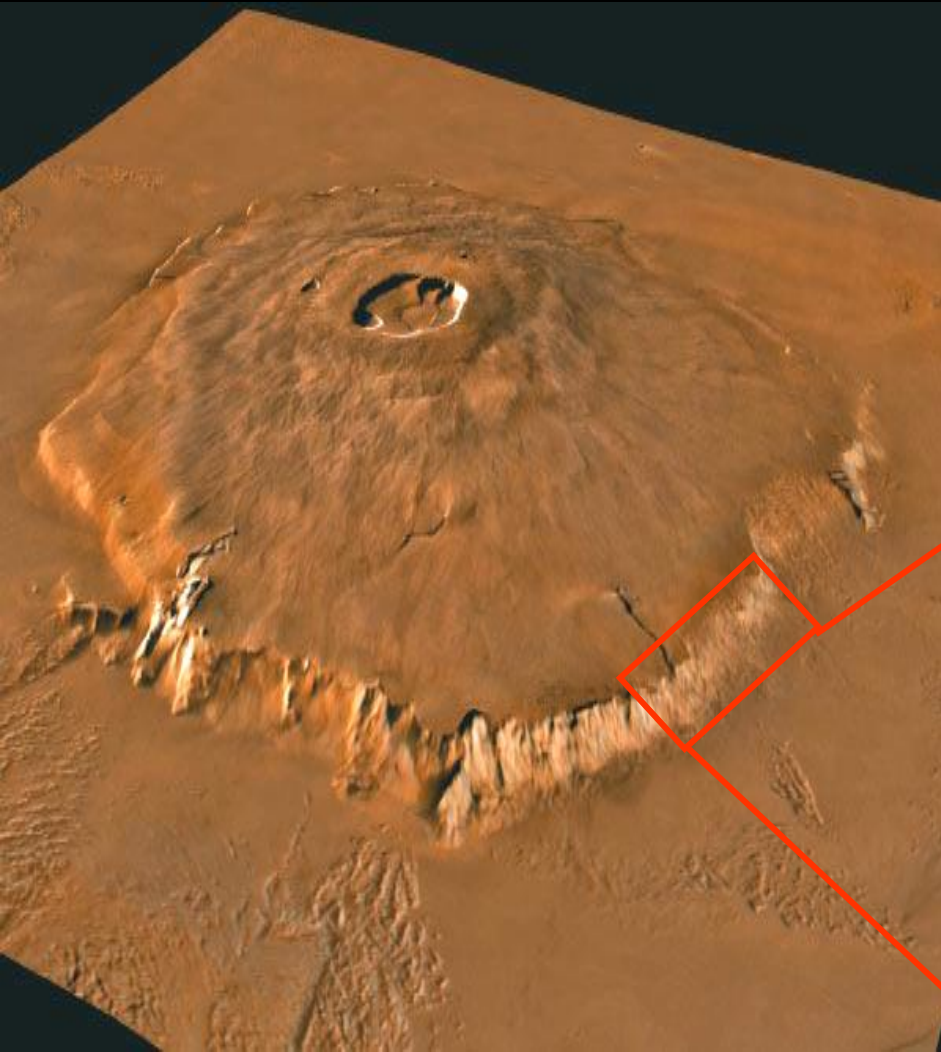
**le 19 février 2008, à 13h 05,
heure locale martienne, une
sonde en orbite surprend une
avalanche, sans doute
déclenchée par la sublimation
de la couche d'1 m de glace
carbonique qui commence en
bas des reliefs mais perdure
provisoirement en haut, ce qui
déstabilise les couches de glaces**



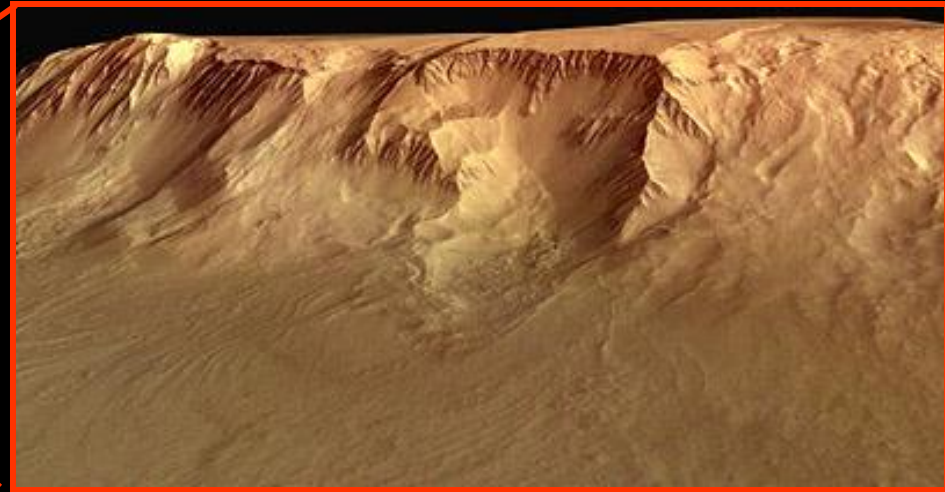


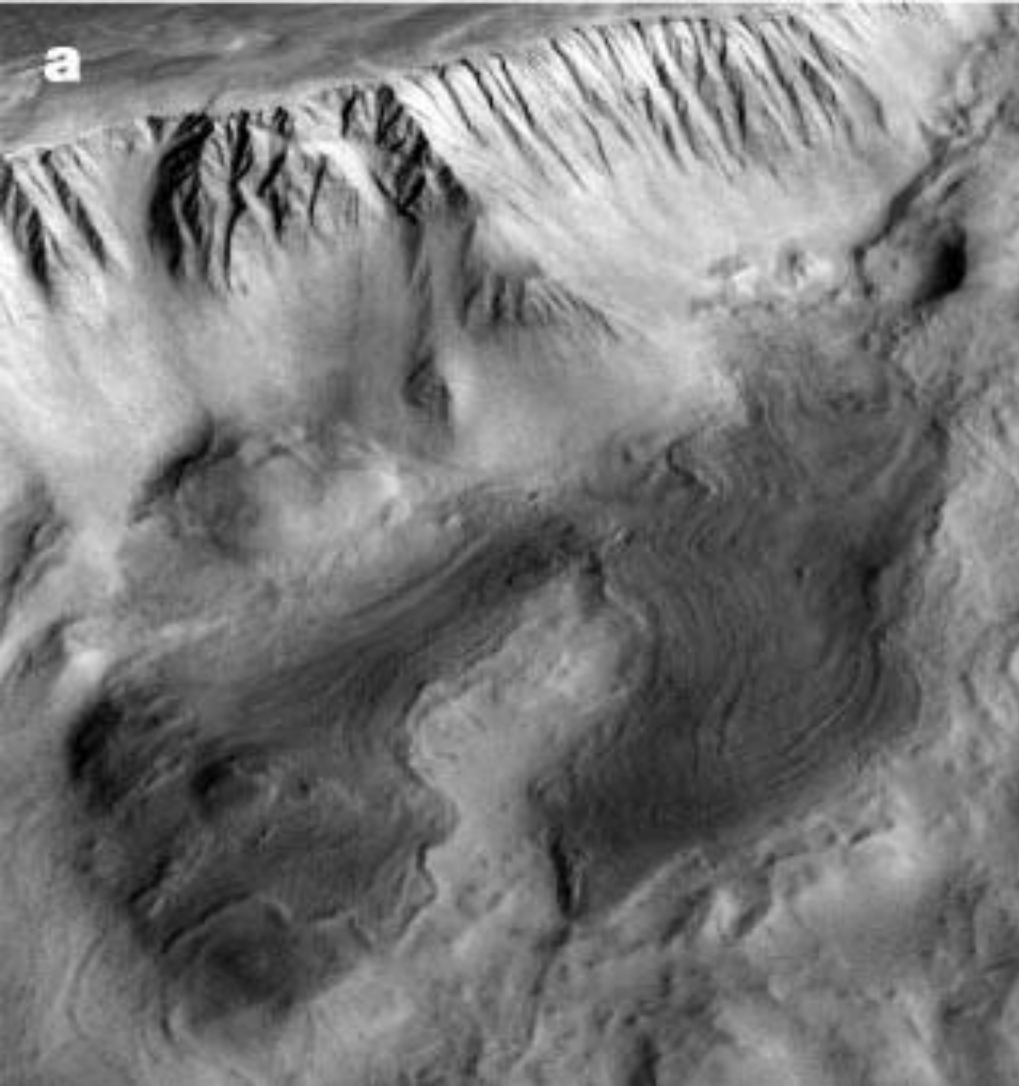
Deux sondes martiennes en orbite disposent d'un radar. Voici une coupe radar globale de la calotte permanente nord. On y verrait 4 « cycles ».

Y a-t-il eu des calottes anciennes ?



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



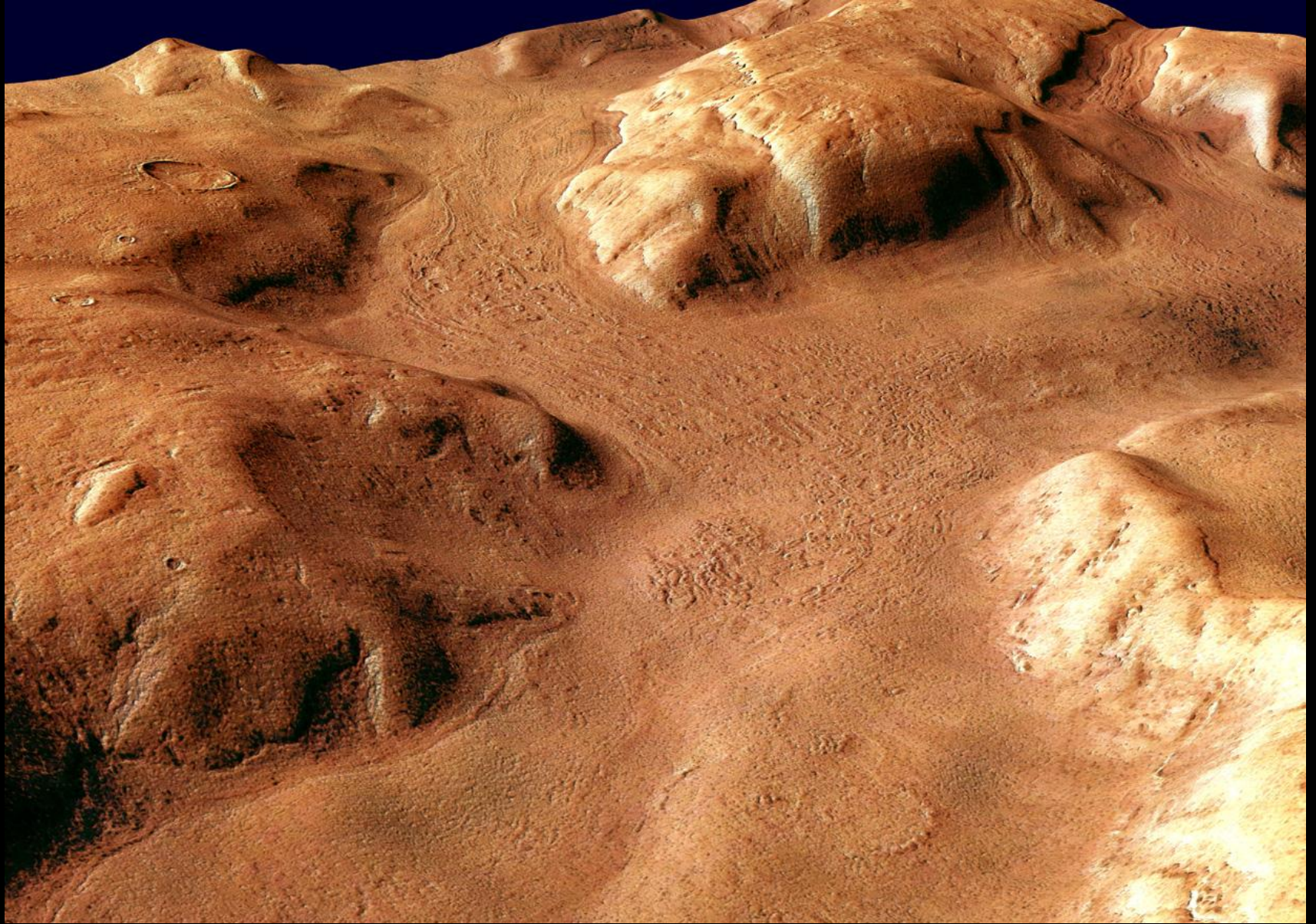


Flancs d'Olympus Mons



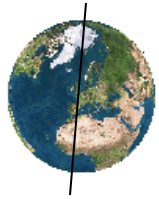
Flancs d'une
montagne antarctique

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



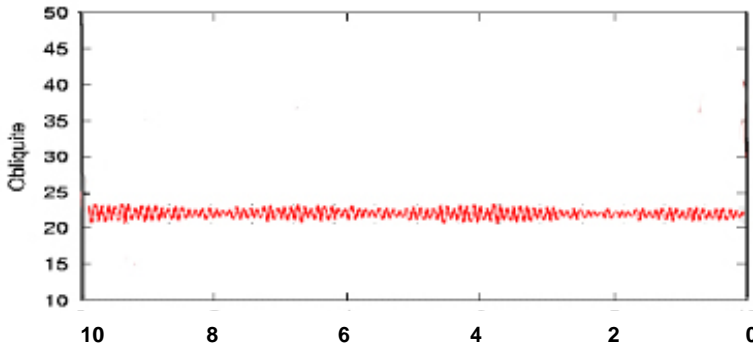
**Autre glacier de la région de Reuil Vallis,
autres montagnes équatoriales.**

Obliquité (II)



Terre

Dynamique régulière

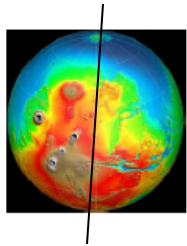


Périodes dominantes:

~41 000 ans

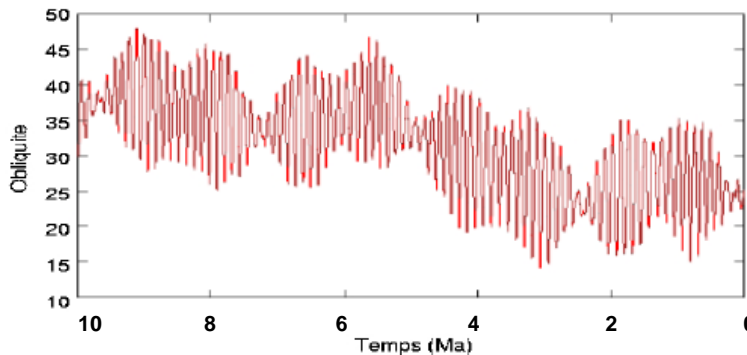
~39 600 ans

Modulation: ~ 1.2 Ma



Mars

Dynamique chaotique



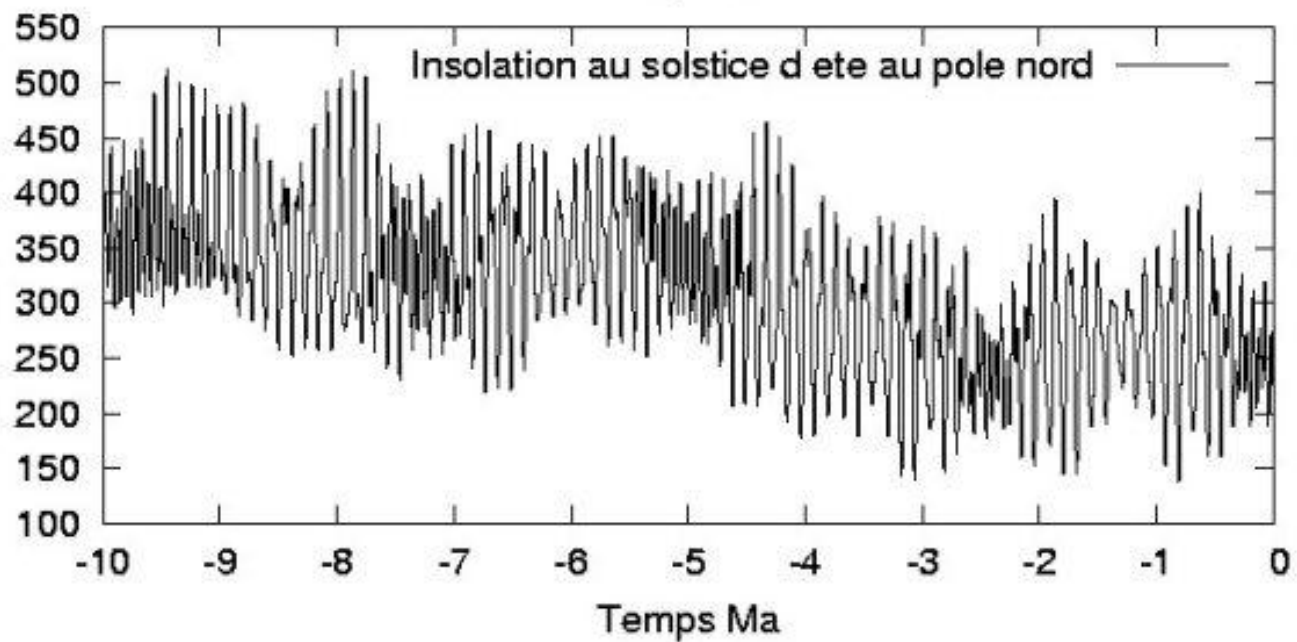
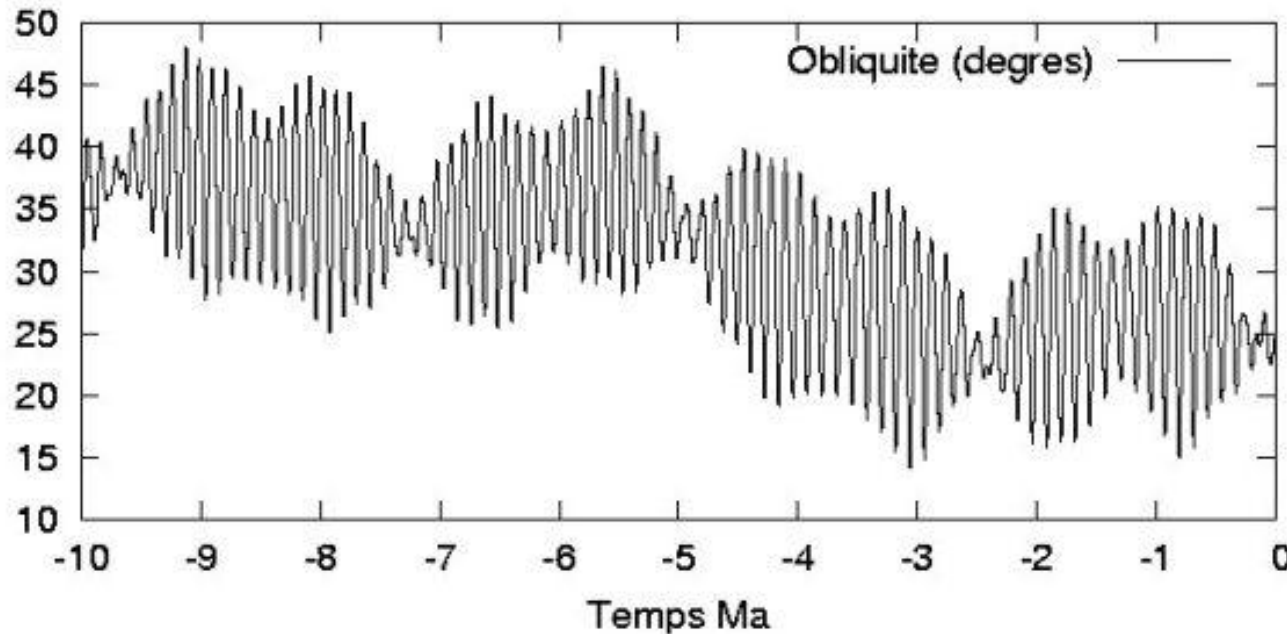
Mouvement chaotique entre 0 et 80°
(Laskar et Robutel, 1993)

Période dominante
~ 120 000 ans

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

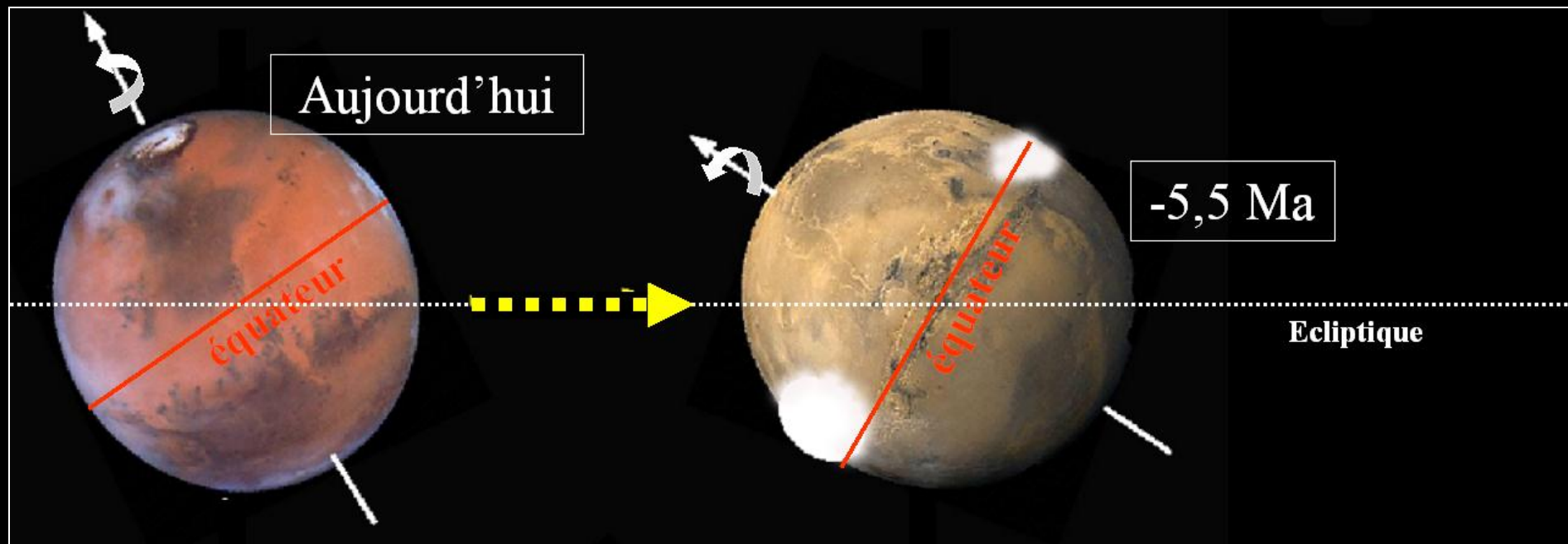
Sur Mars,
cette
inclinaison
est
chaotique et
non bornée

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

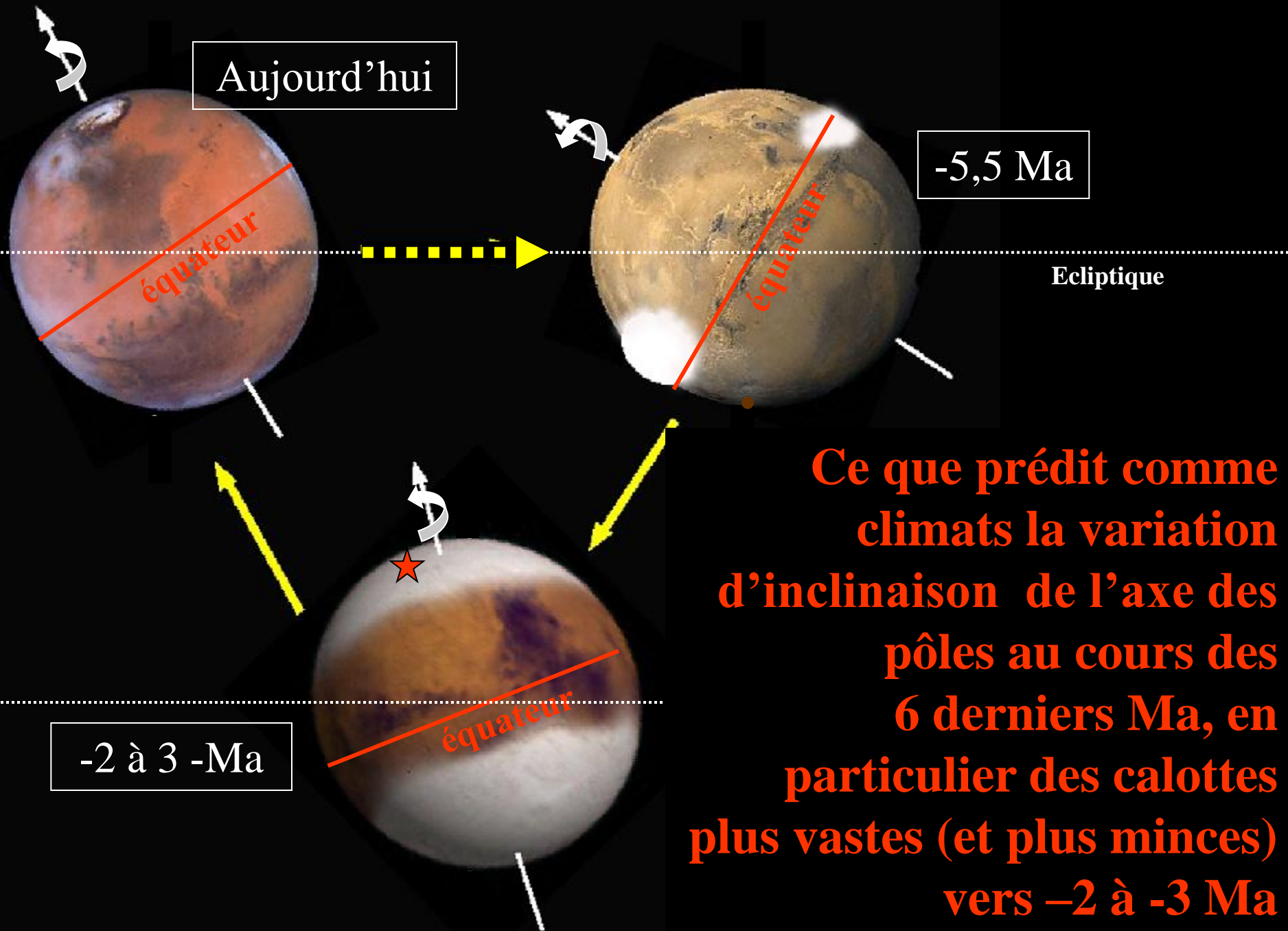


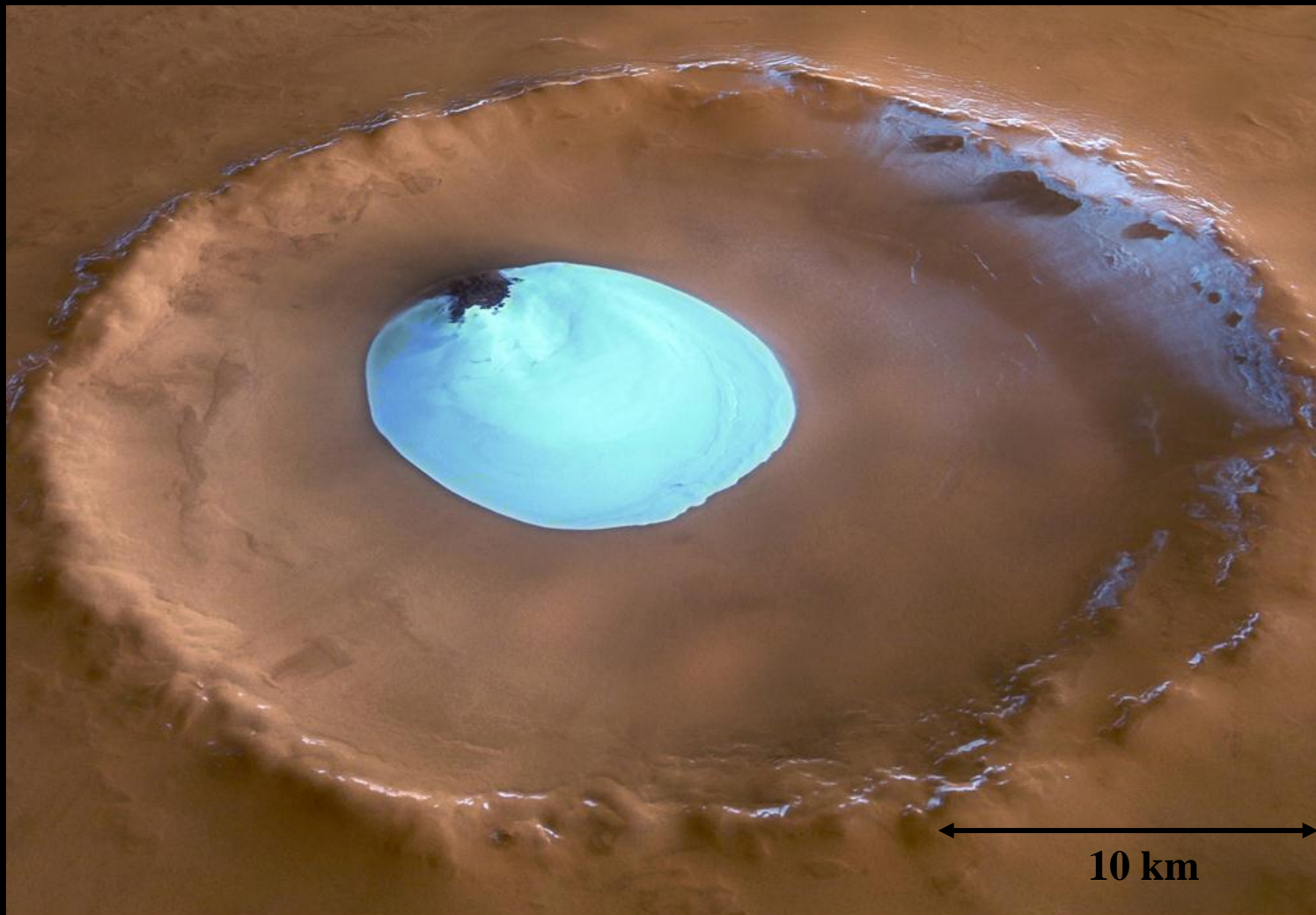
Sur les 10 derniers millions d'années, les calculs montrent l'inclinaison de Mars a varié entre 15° et 45°. Avant, c'est « incalculable » (basculement chaotique)

Cela a entrainé une variation d'insolation polaire l'été de 150 à 500 W/m²



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





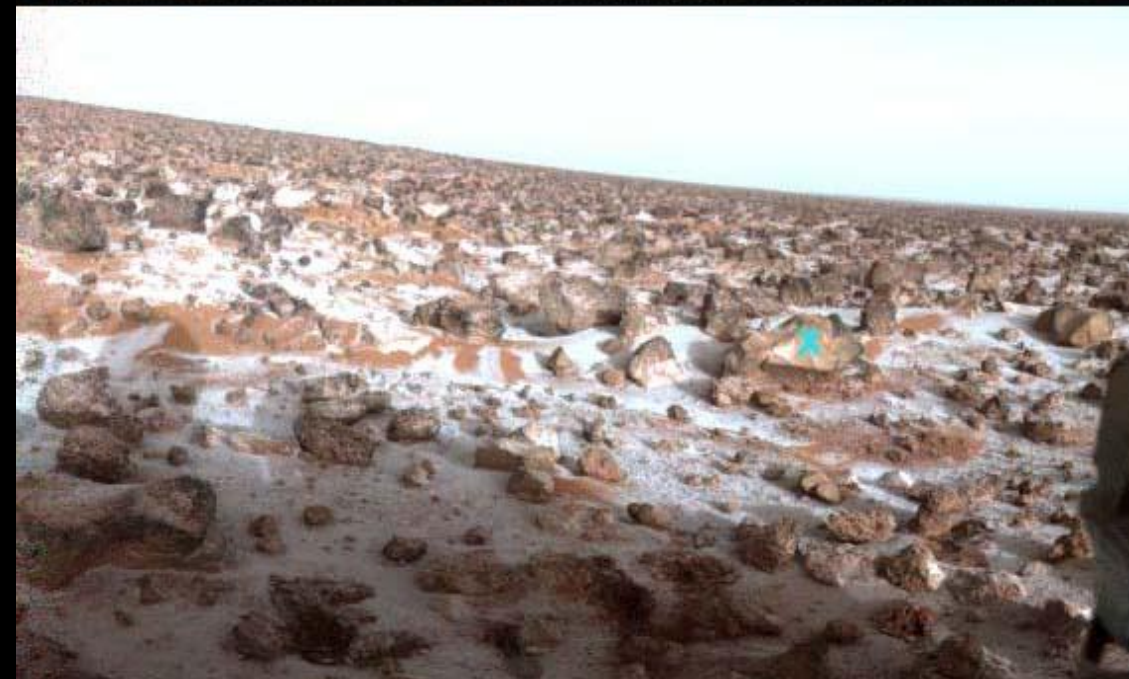
Et voici, au fond d'un cratère (70° N) ce qu'on pourrait un reste « permanent » de cette « calotte transitoire ». Noter que comme tous les versants « à l'ombre » au petit matin, ses flancs nord sont recouverts de givre ou de neige.



Dans l'atmosphère

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

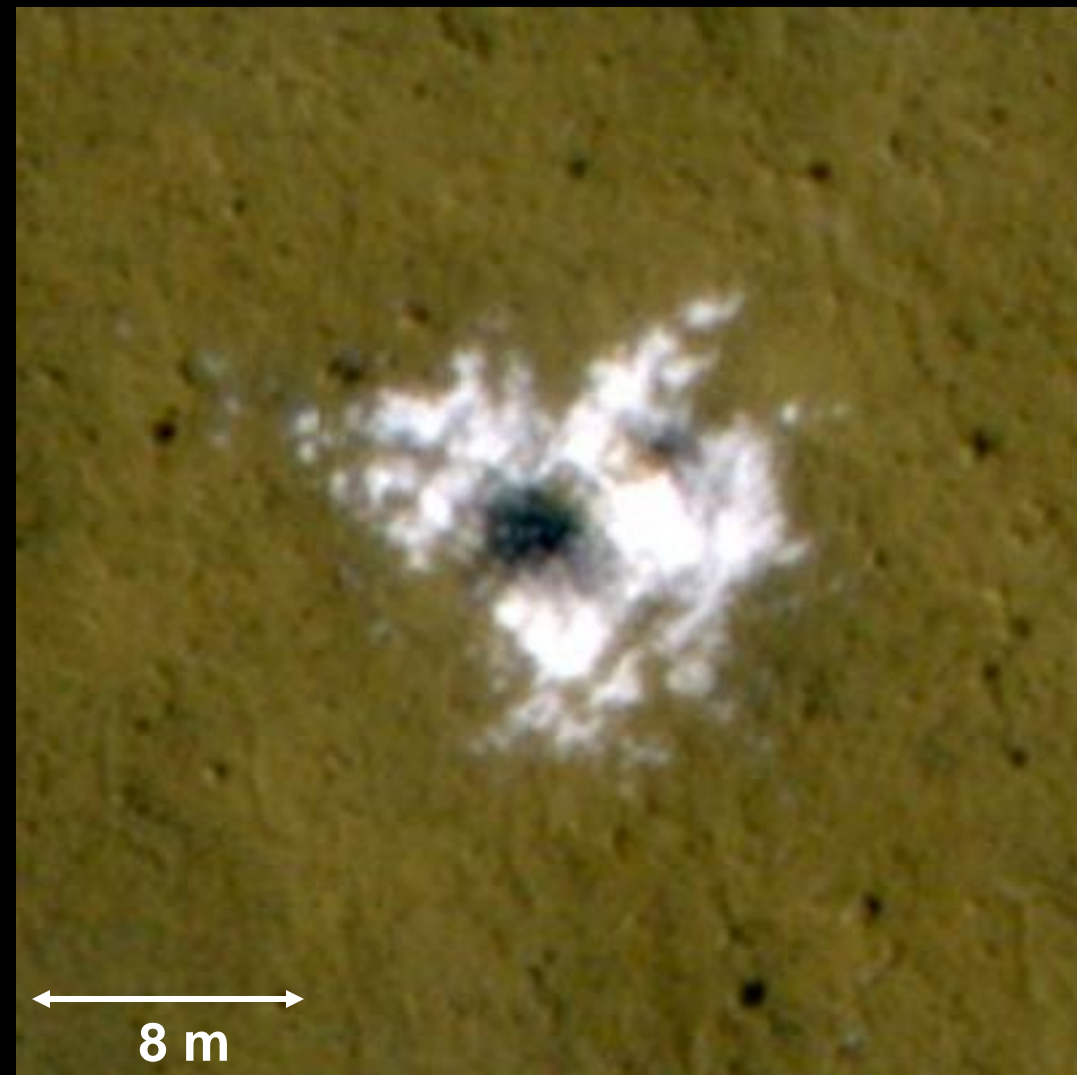
**Ce passage
glace \leftrightarrow vapeur d' H_2O
se voit très bien pour les
latitudes supérieures à
 45° , où le paysage se
recouvre de givre toutes
les nuits d'hivers, givre
qui se sublime en début
de matinée. La
température lorsqu'il y a
ce givre montre qu'il ne
s'agit pas de glace
carbonique, donc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

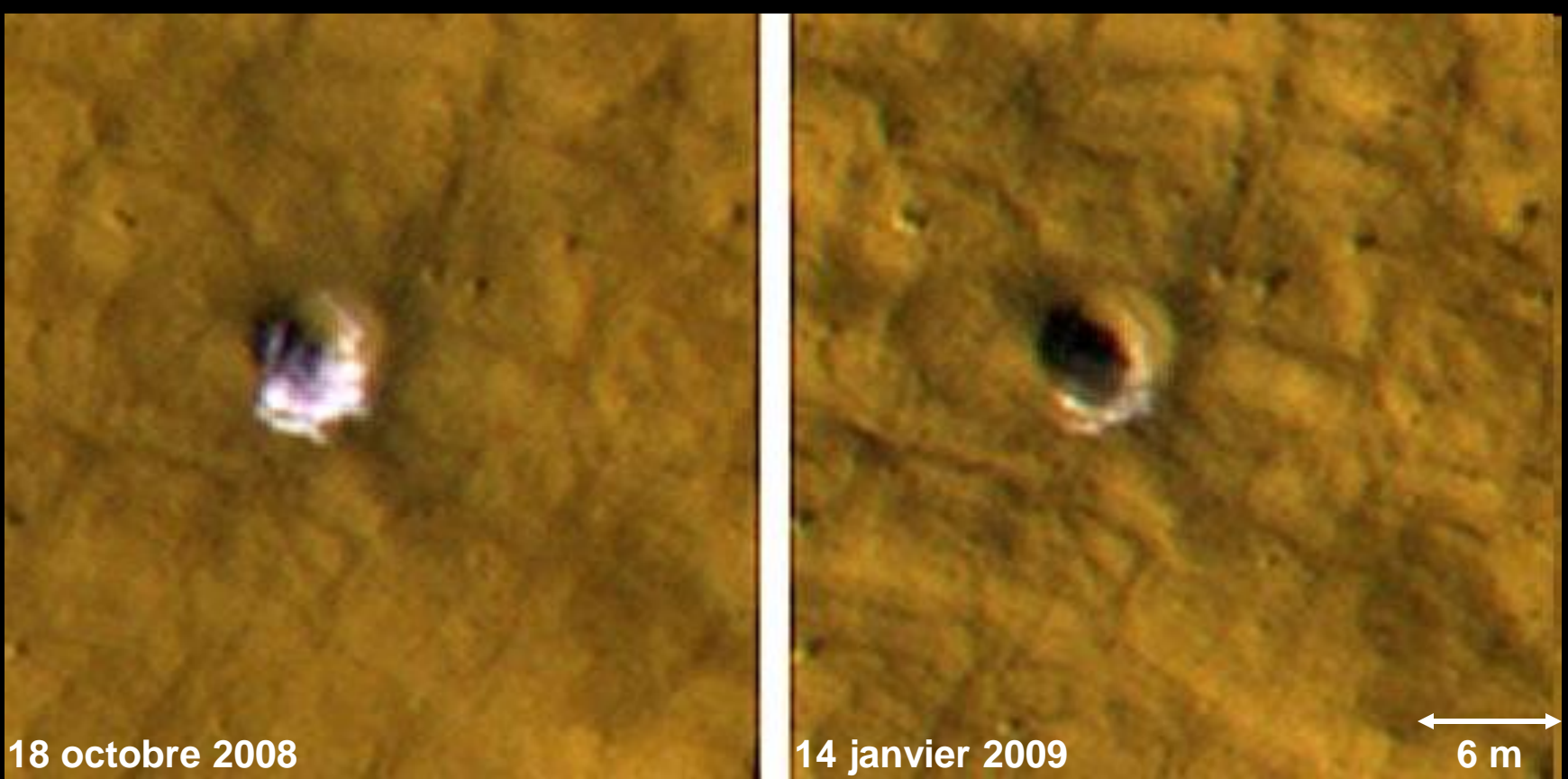




**Sur Mars, il tombe parfois des « petites »
météorites, laissant des traces qu'on voit
« apparaître » entre deux survols**

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

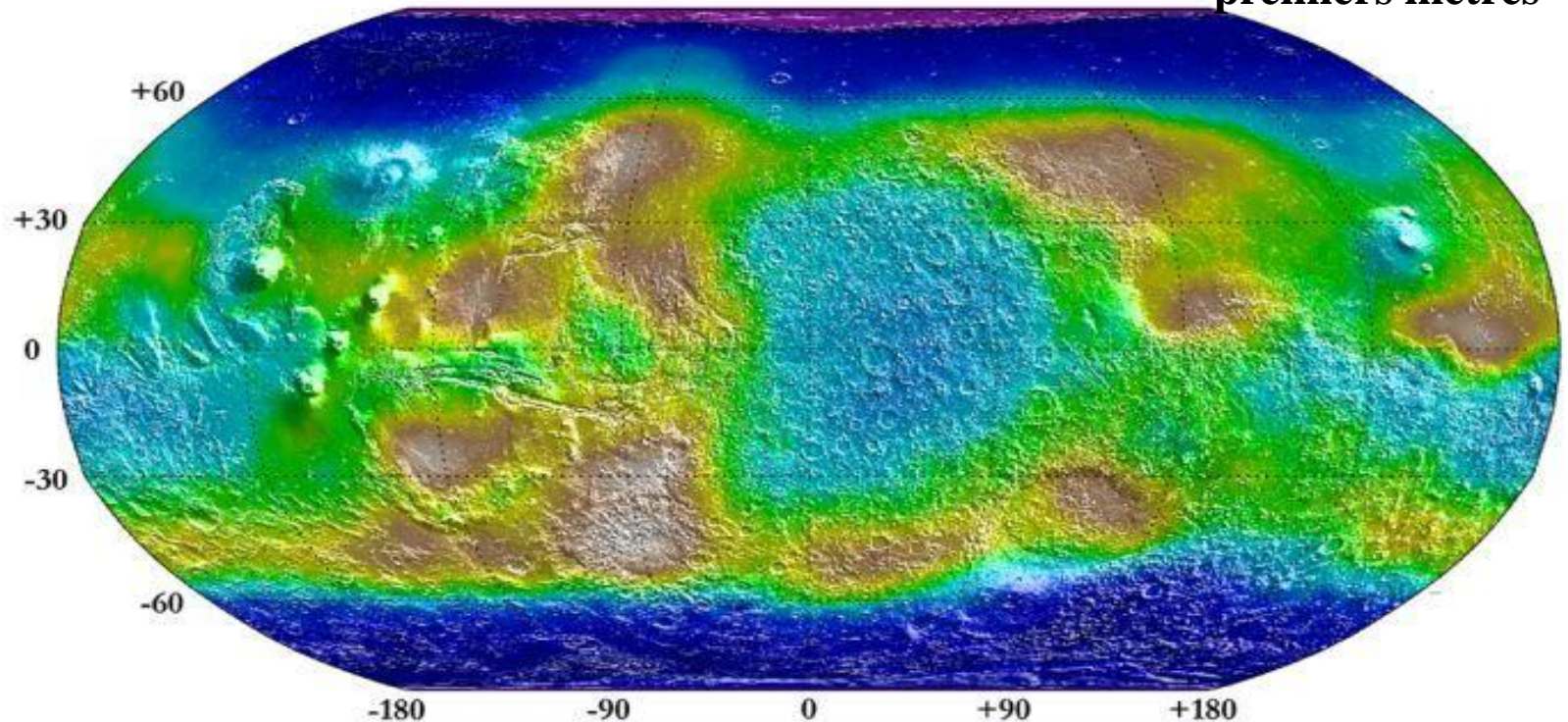
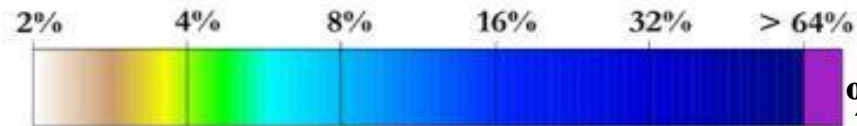
14 janvier 2009

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° lat. N.

Comment quantifier cette glace de la sub-surface ?

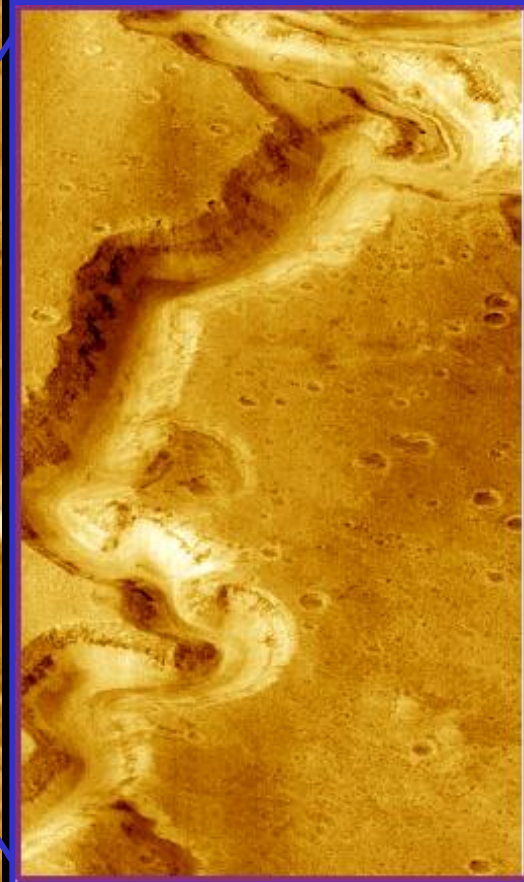
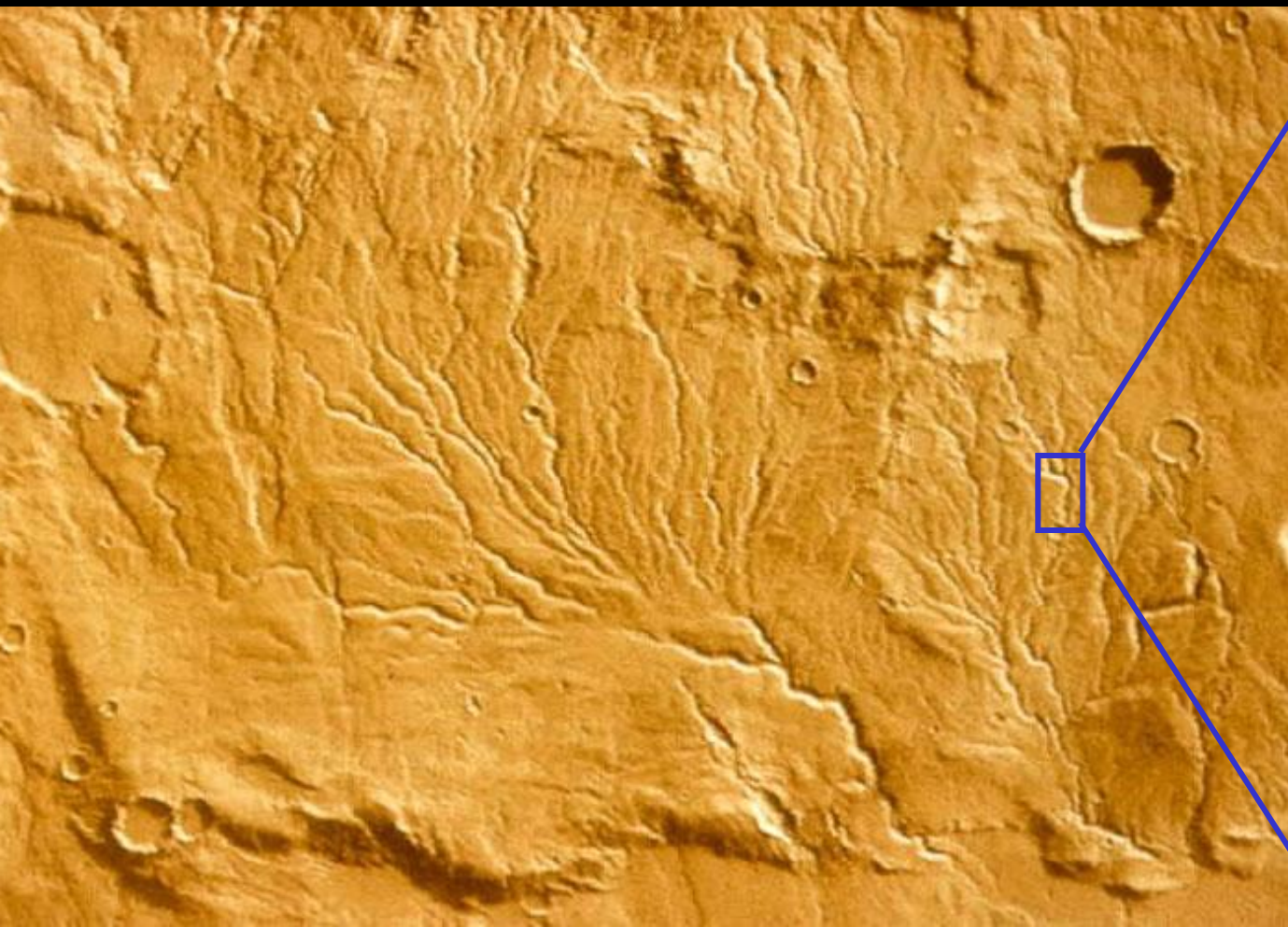
Lower-Limit of Water Mass Fraction on Mars



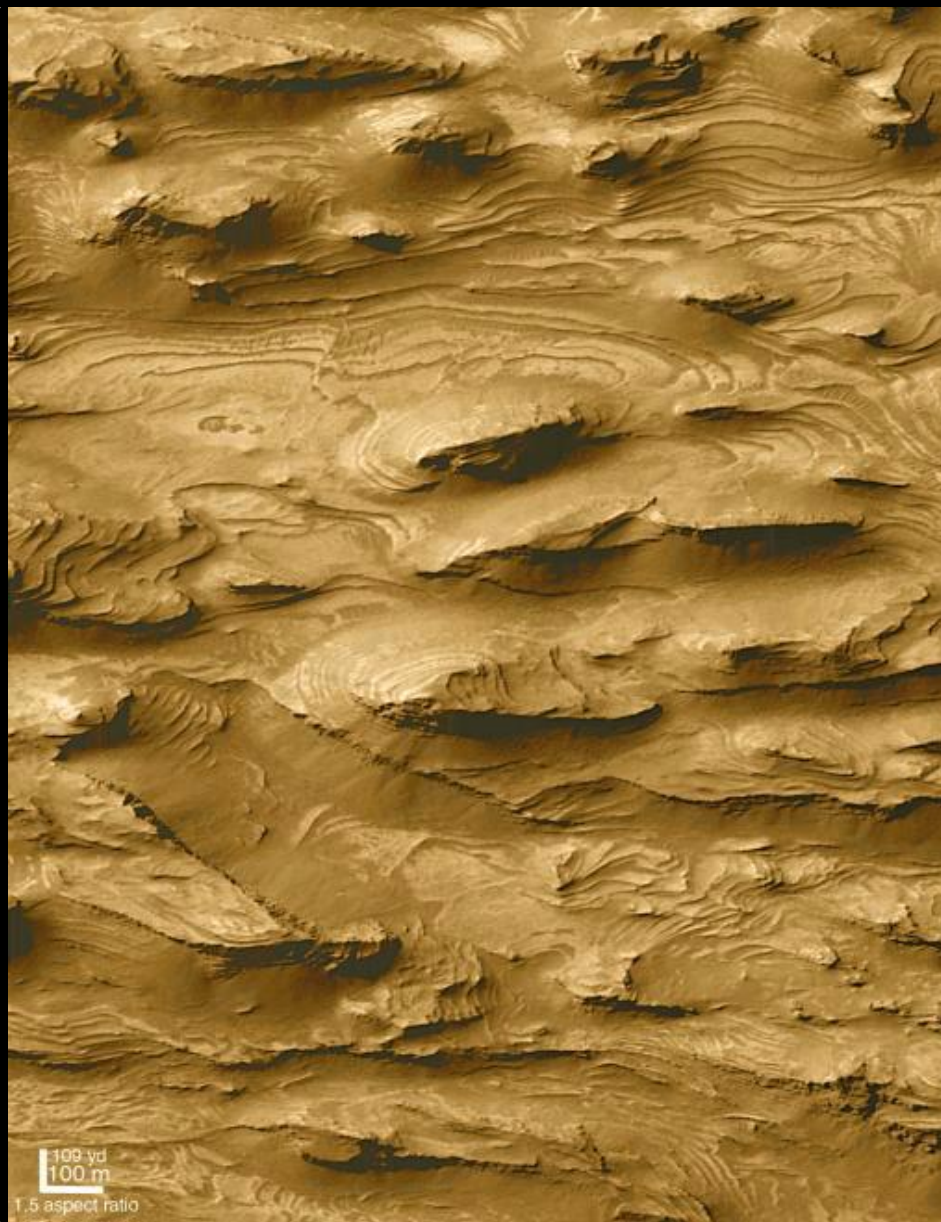
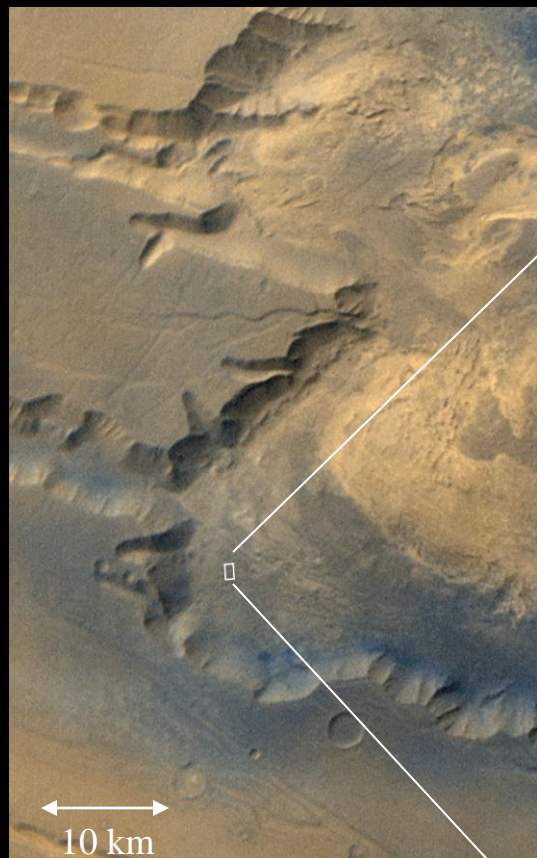
Avec les neutrons émis par le sol sous l'action du rayonnement cosmique, on voit qu'il y a beaucoup d'H₂O (de glace vu la température) dans le sous-sol superficiel, ou du moins beaucoup de Deutérium, et en particulier au-delà de 60° lat. N et S



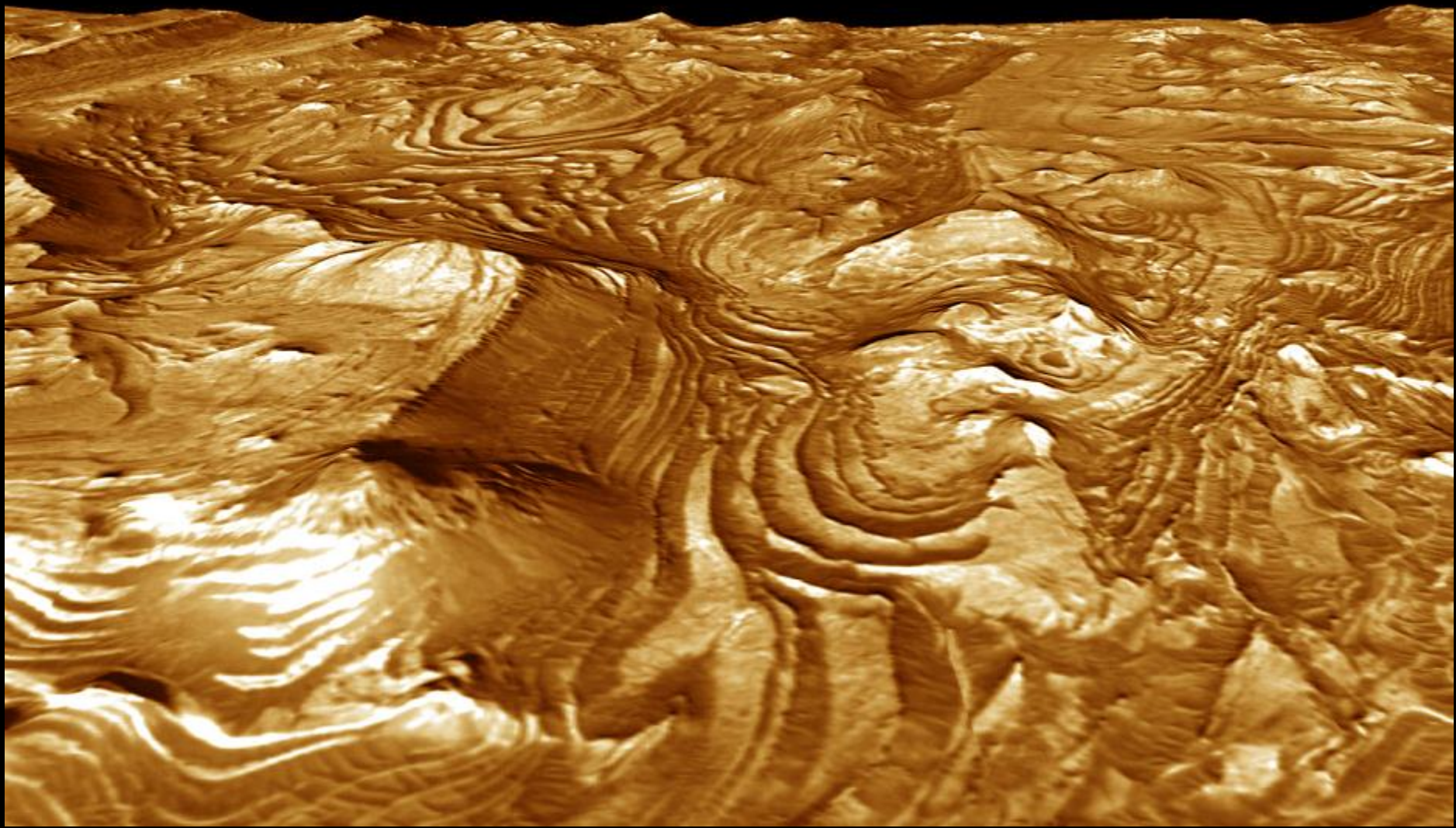
**Il y en a
dans le
sous-sol
profond.
Les
cratères y
font
« sploch »**



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



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



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

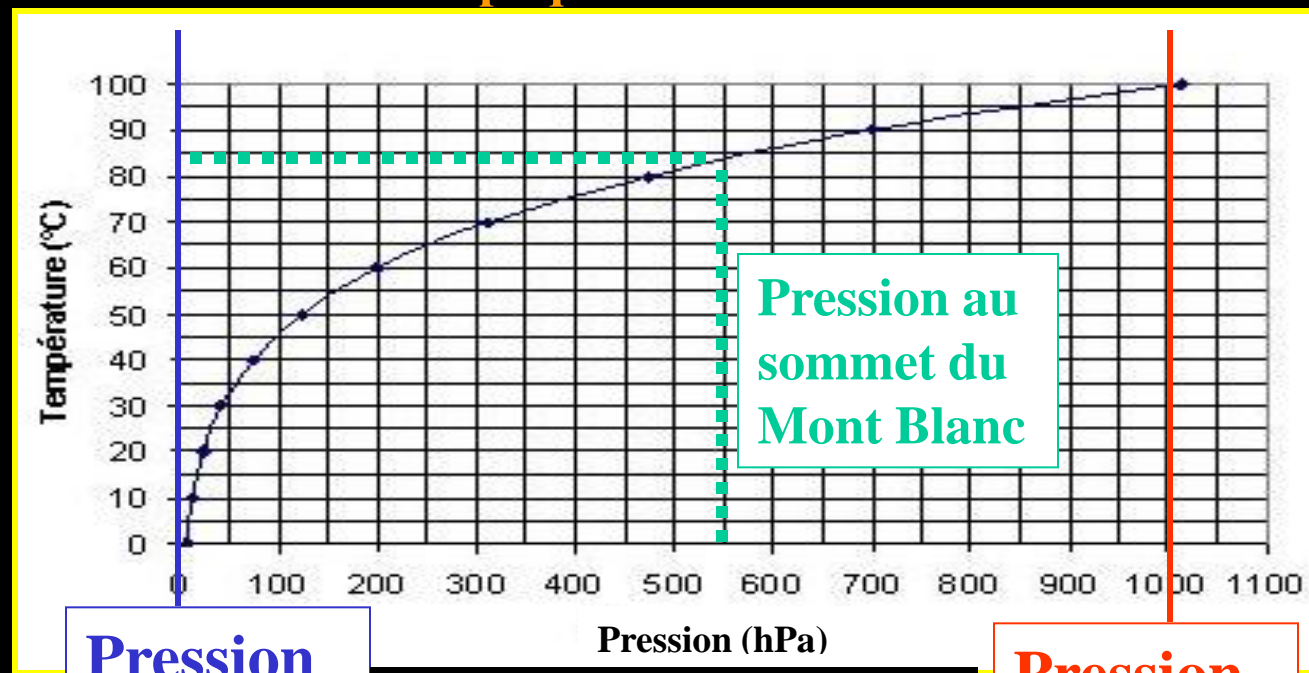
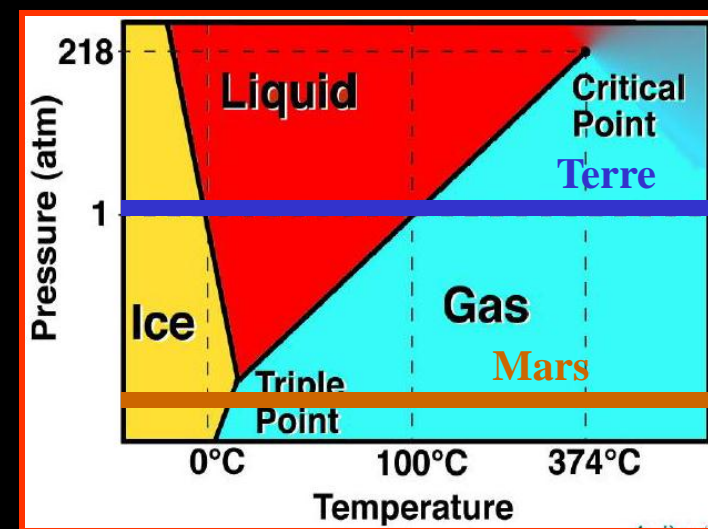
Sur Mars, la pression actuelle de de 6 hPa.

A cette pression, l'eau ne peut pas être liquide.

Elle est en glace et/ou en vapeur. Et comme il fait en moyenne -50° , elle est surtout en glace, avec une très faible proportion de vapeur.

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

Les traces d'H₂O liquide doivent dater d'une époque où P et T étaient plus élevées.



Pression sur Mars

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

Pression sur Terre

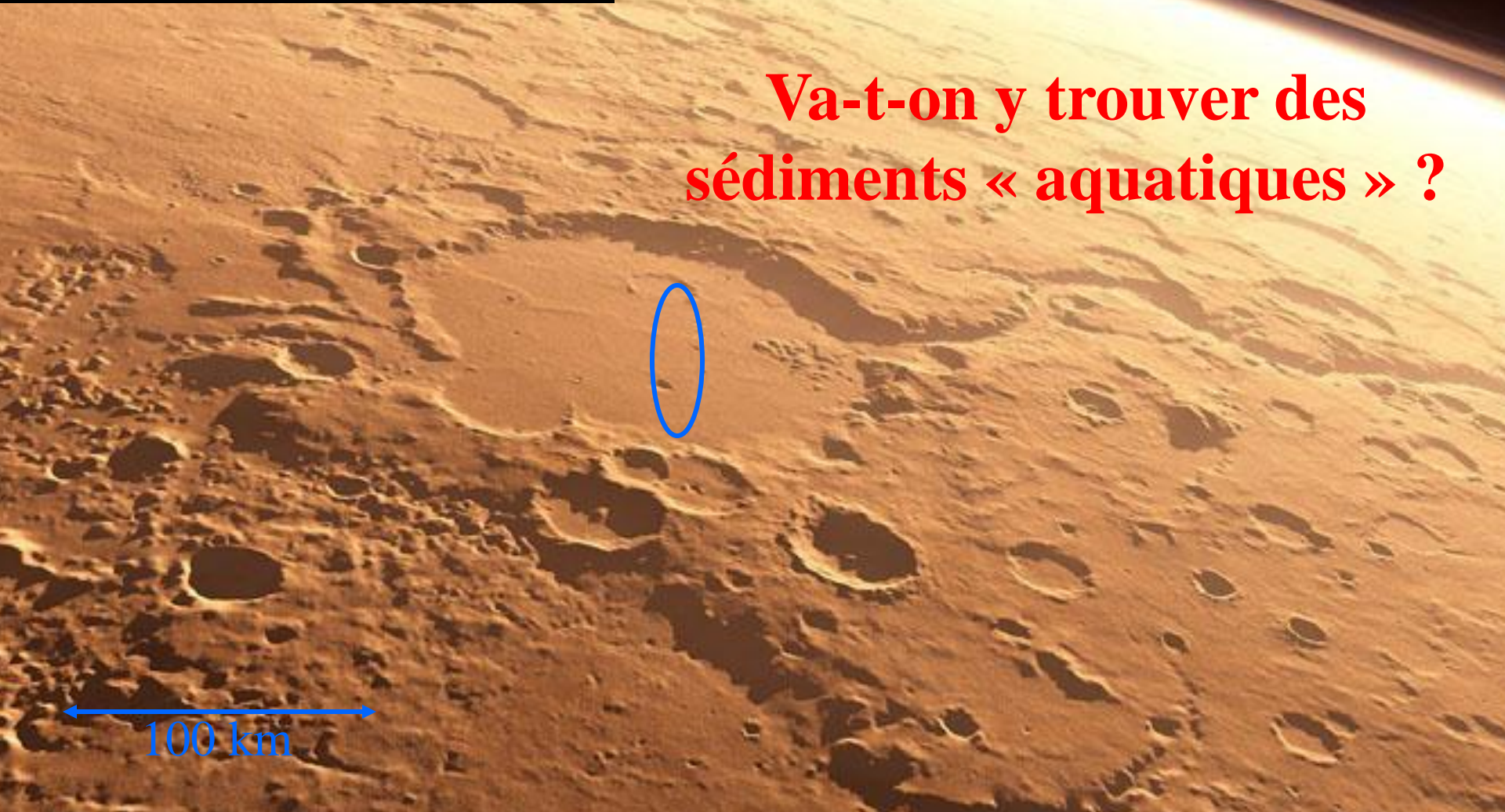


**Les résultats des 3 robots Nasa
(ceux concernant l'eau)**

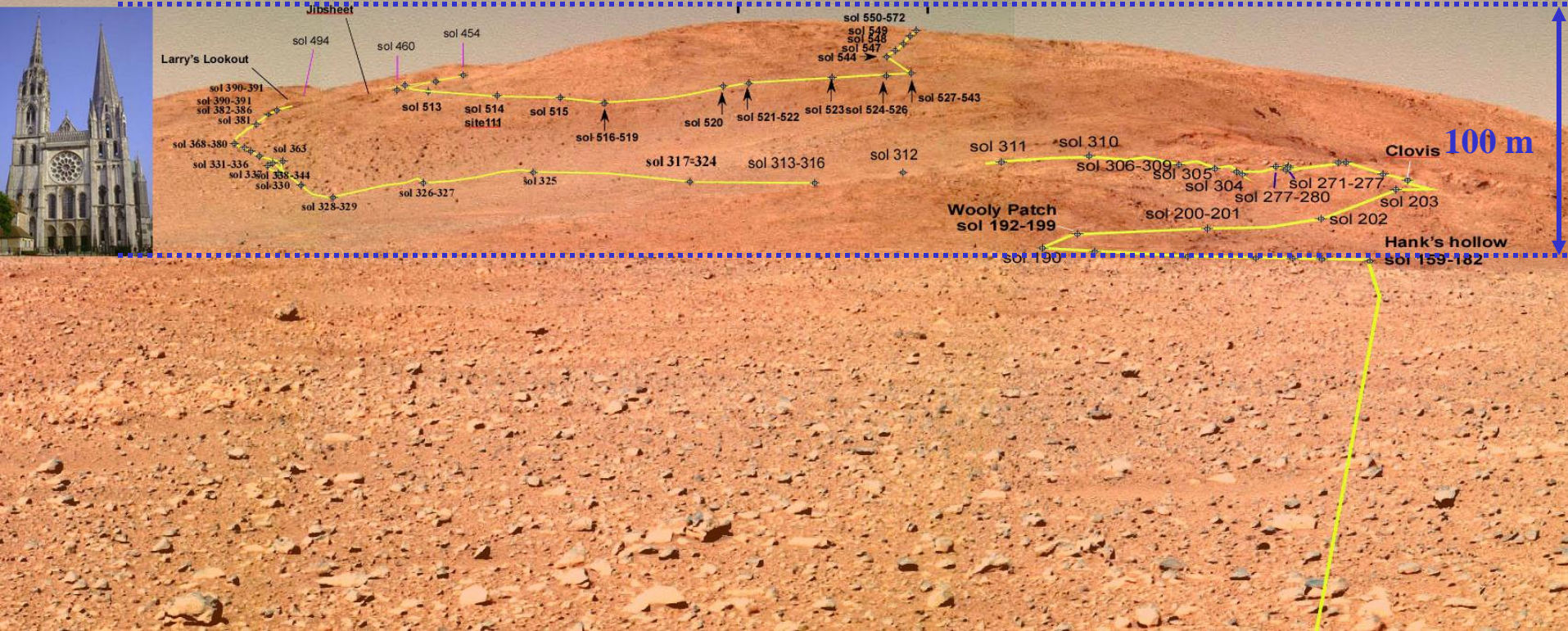


Voilà où s'est posé le 1er robot mobile, Spirit, au fond du cratère Gusev, probable ancien lac.

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



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

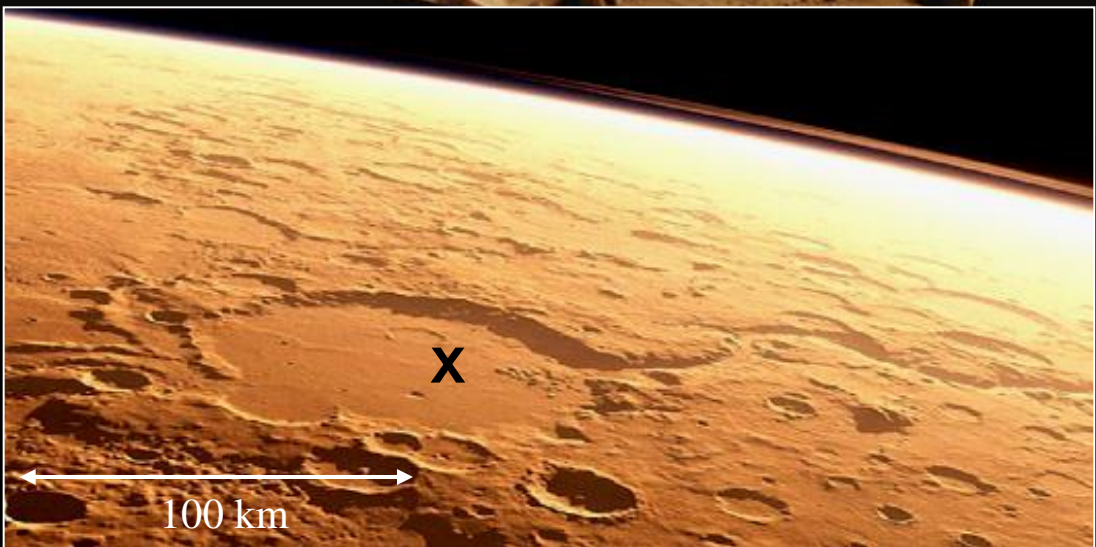


Il analyse au voisinage du point d'atterrissage, va au pied des collines, y monte, redescend derrière et est maintenant de l'autre côté de ces collines, enlisé, après avoir parcouru au total plus de 10 km

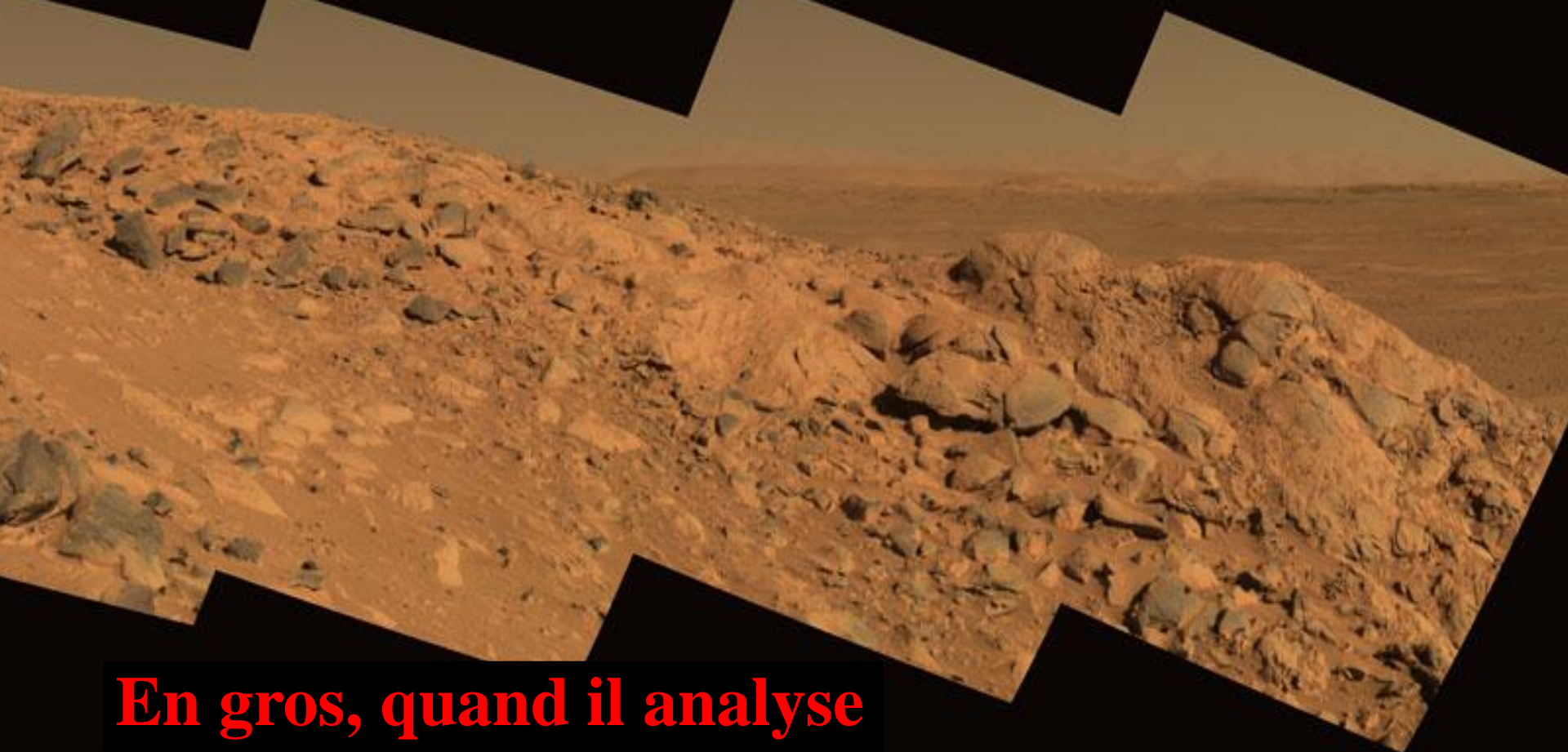


Sol 519

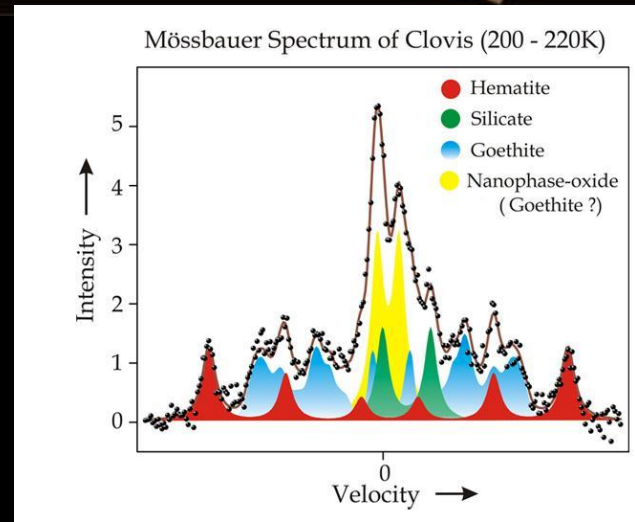
**Avant de parler d'eau,
un paysage : quand il
fait clair, on découvre
les bords du cratère
Gusev, à 50 km de là.**



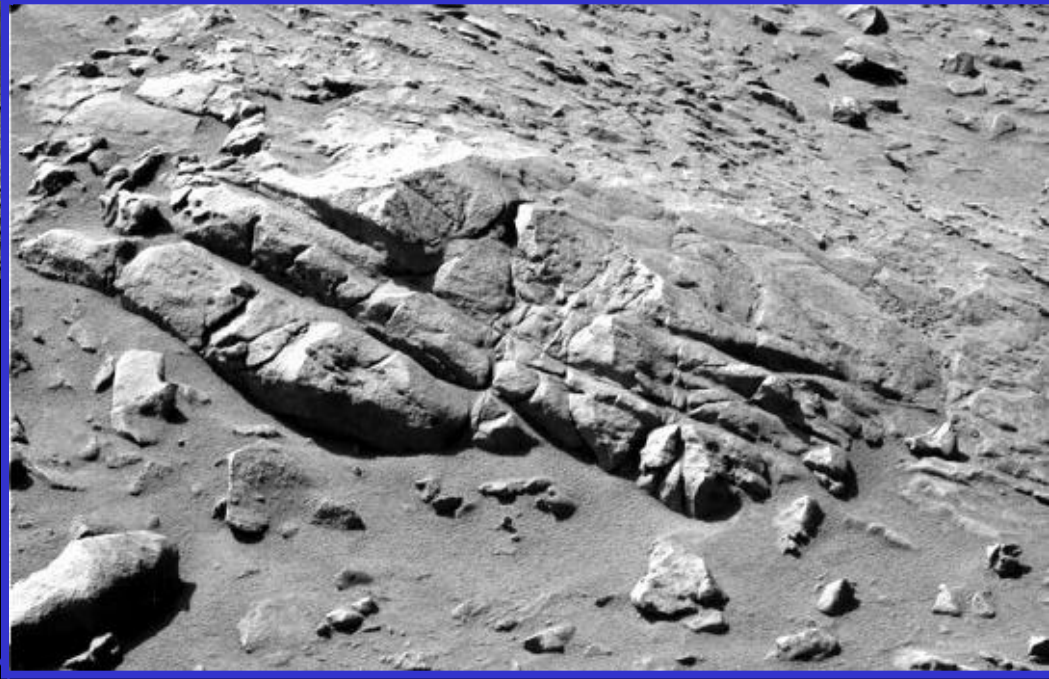
100 km

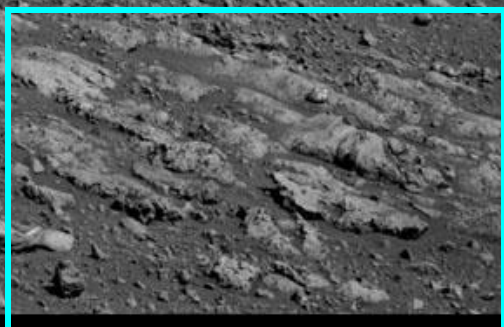
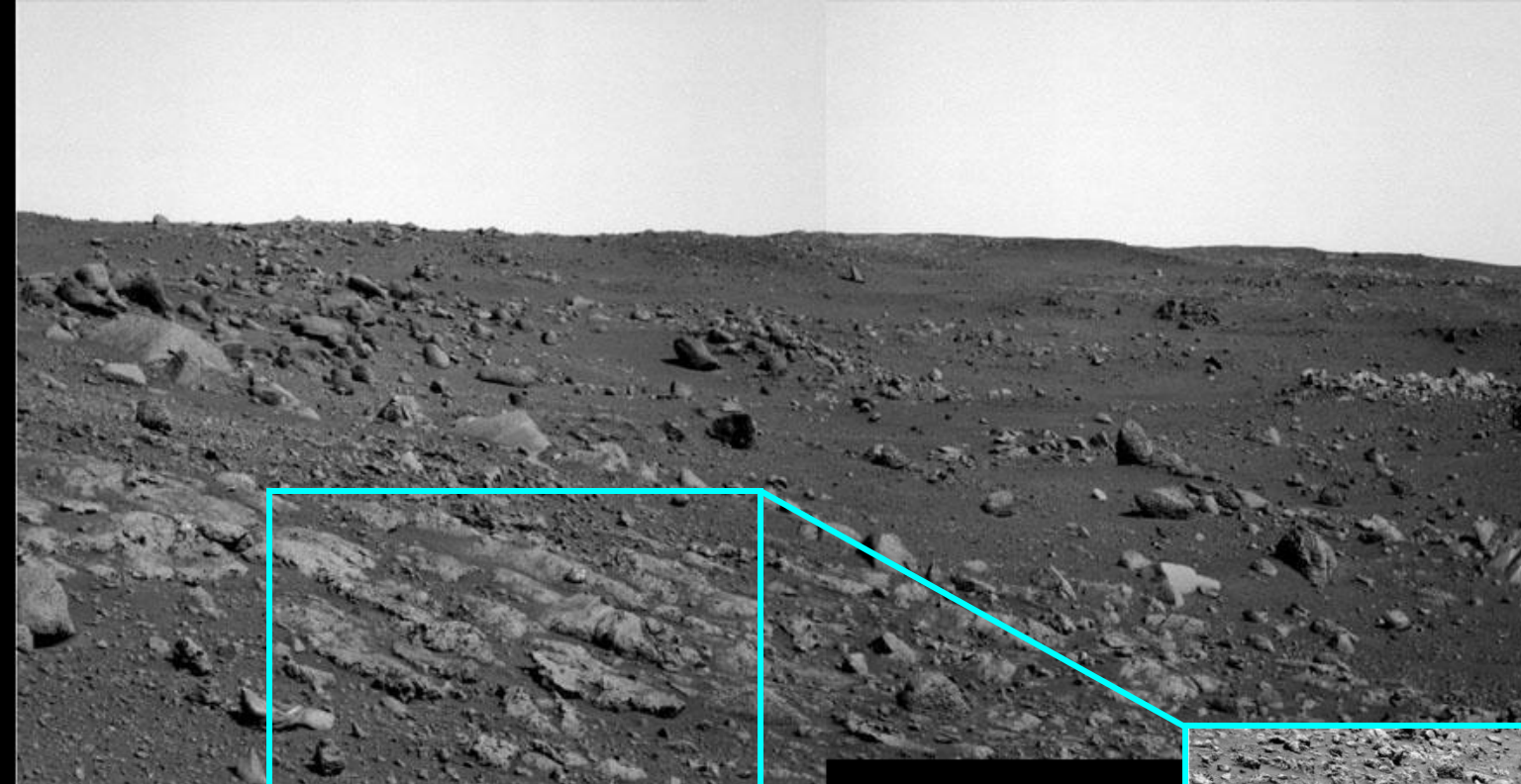


**En gros, quand il analyse
(plaine ou colline), il trouve du
basalte. Quelle déception !
Parfois, il y a des preuves que
ce basalte a été altéré par de
l'eau, maigre consolation.**



**Il trouve aussi des
roches stratifiées,
avec une chimie de
cendres basaltiques.**

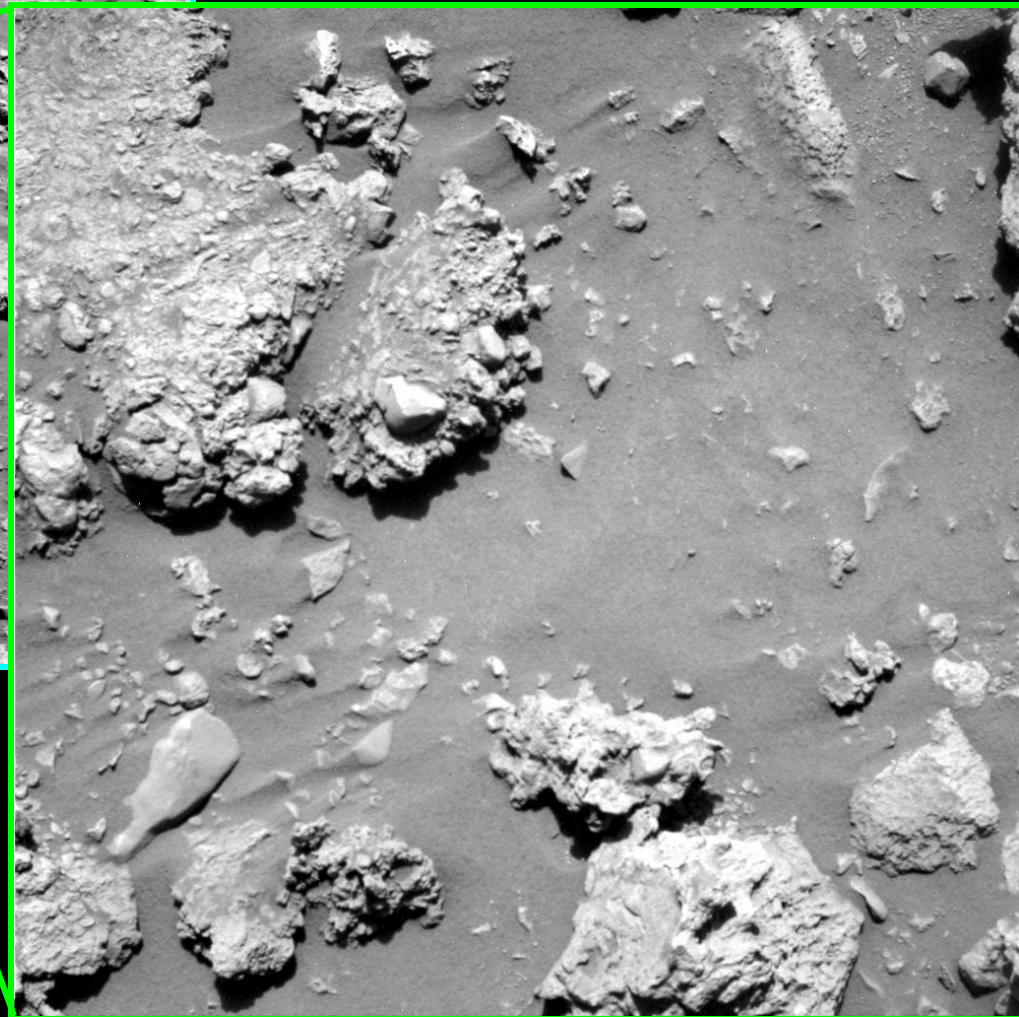
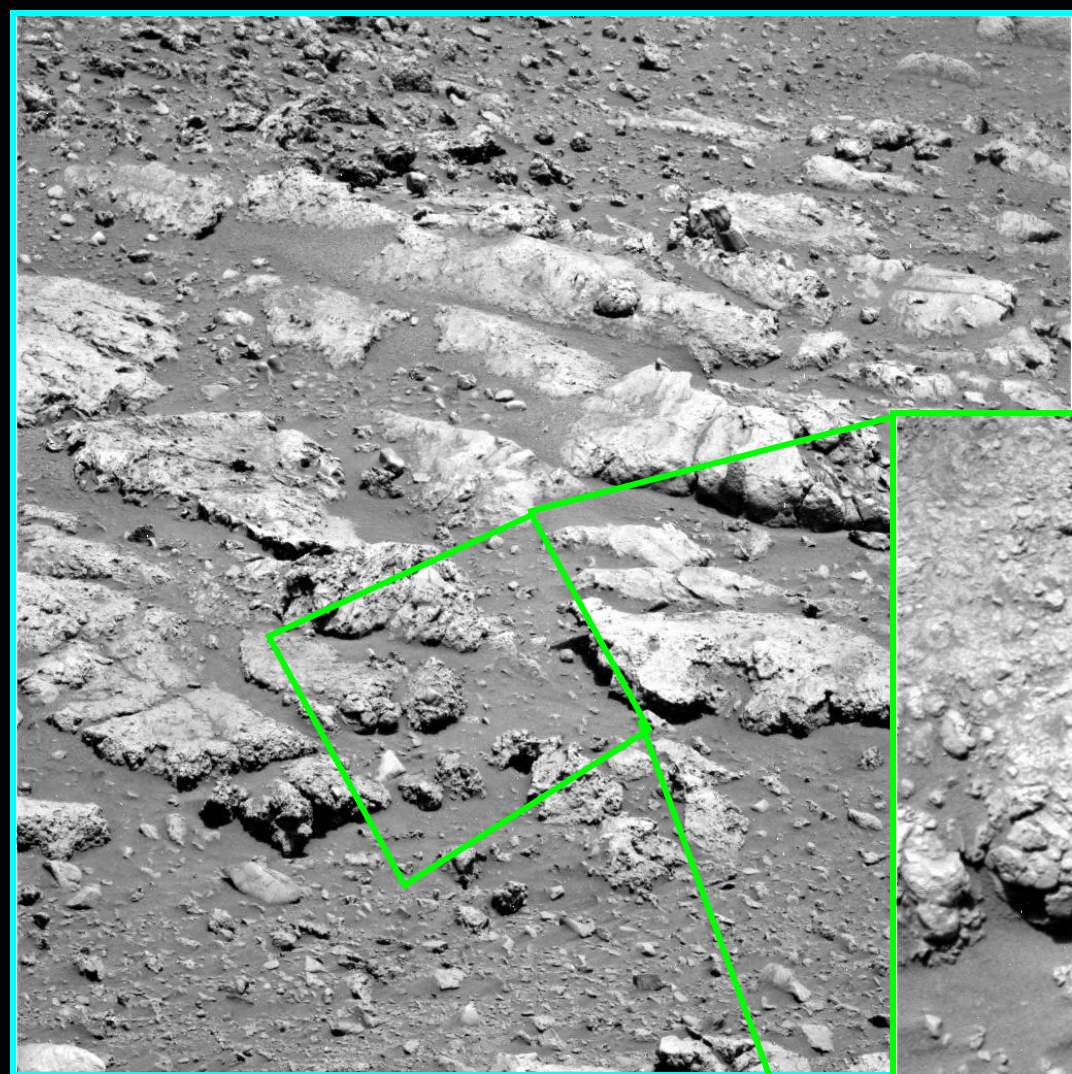




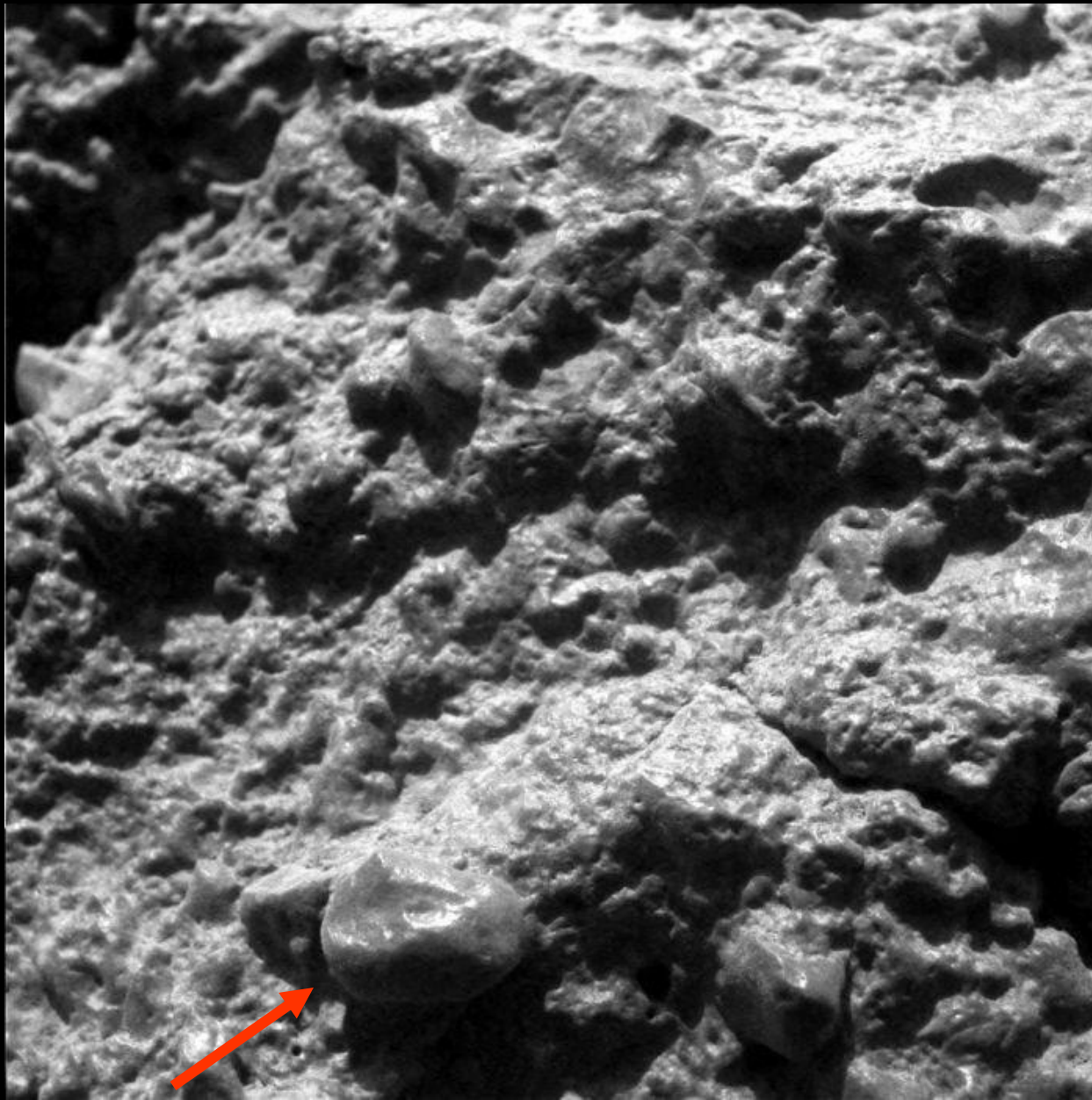
**Près du sommet, de
nouveaux affleurements**

**Détaillons cet
affleurement vaguement
stratifié**

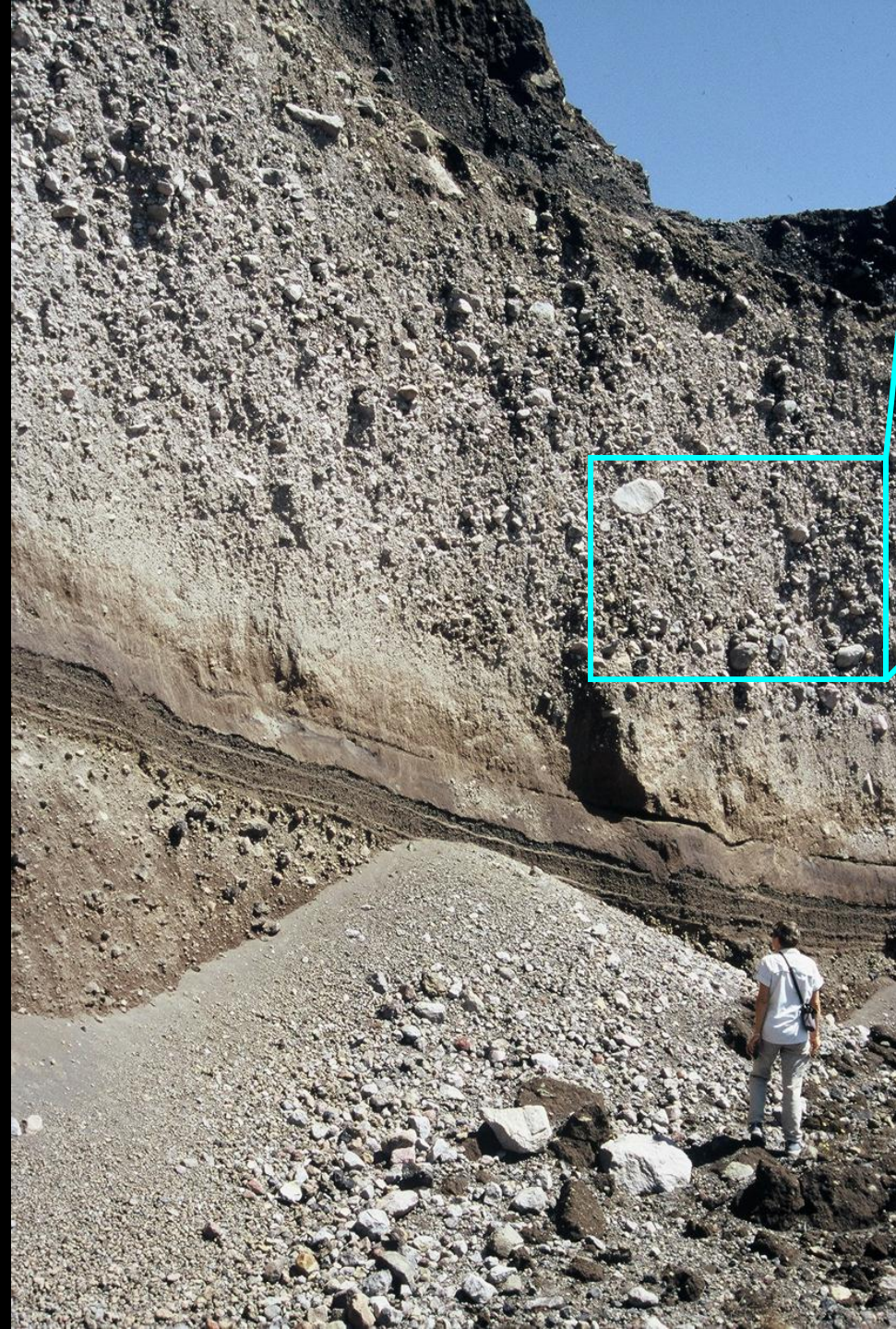
**Approchons nous !
Les strates sont
faites de brèches !**



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

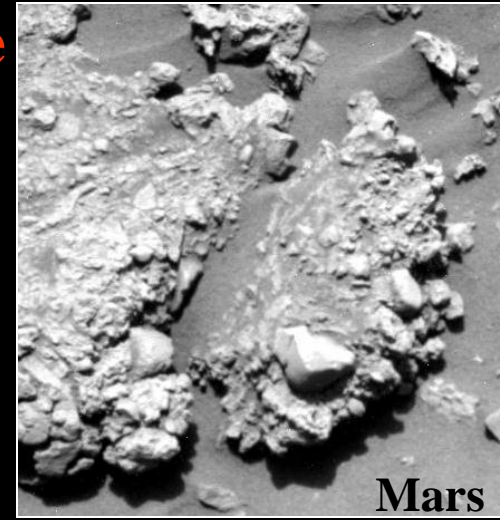


**Certains
« galets » de
la brèche
sont
arrondis. Ils
ont été
« roulés » par
de l'eau ou
dans du
matériel
« boueux »**

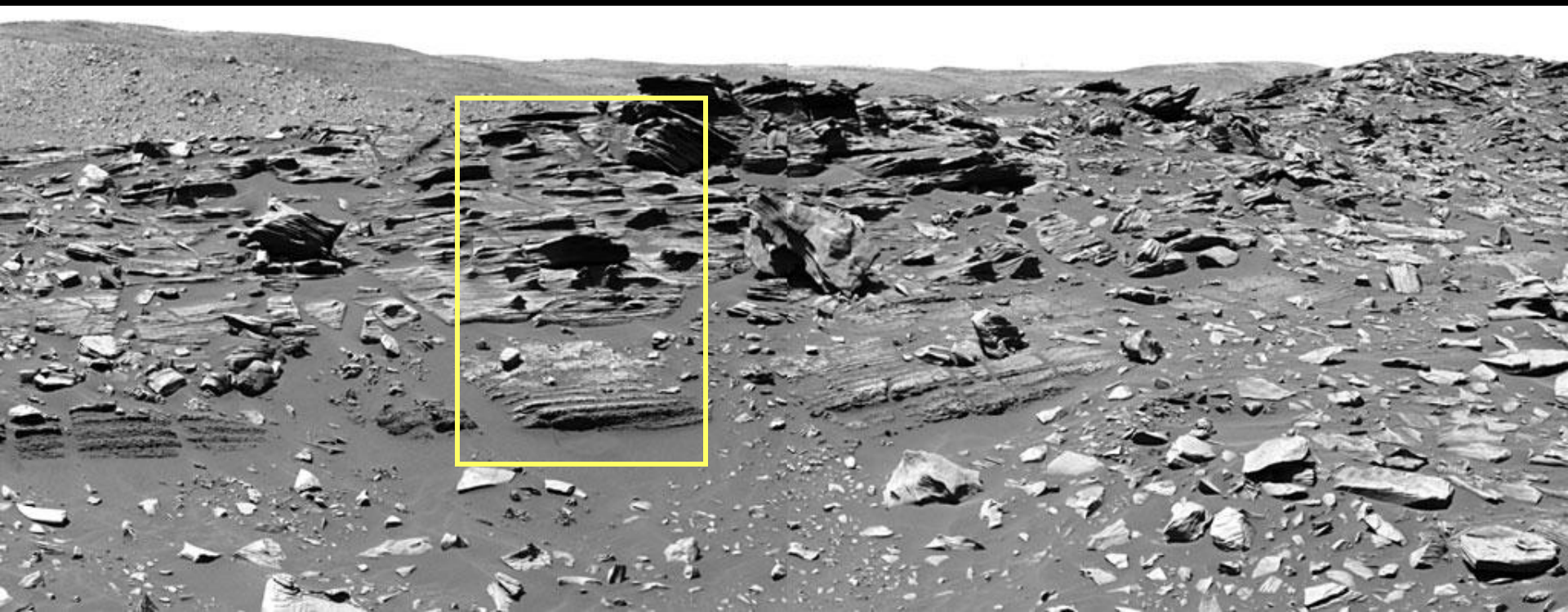


Terre

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



Mars



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

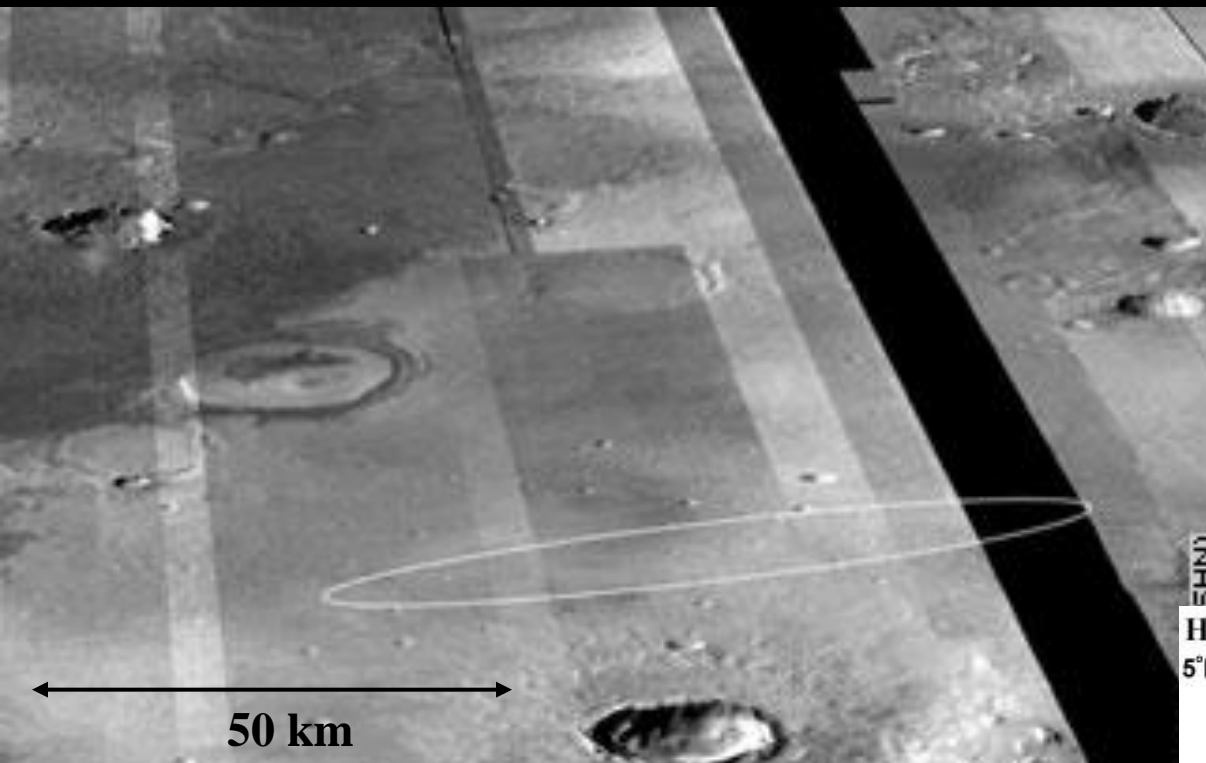


Ca vous fait penser à quoi, cette disposition ?

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

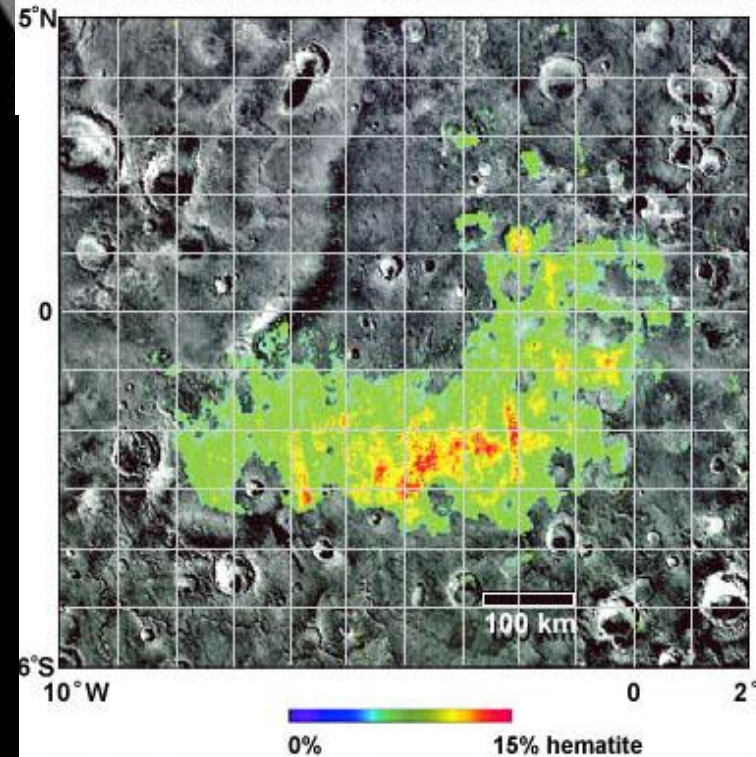
**Et qui dit volcanisme explosif dit gaz, donc très
probablement vapeur d'H₂O**

Opportunity

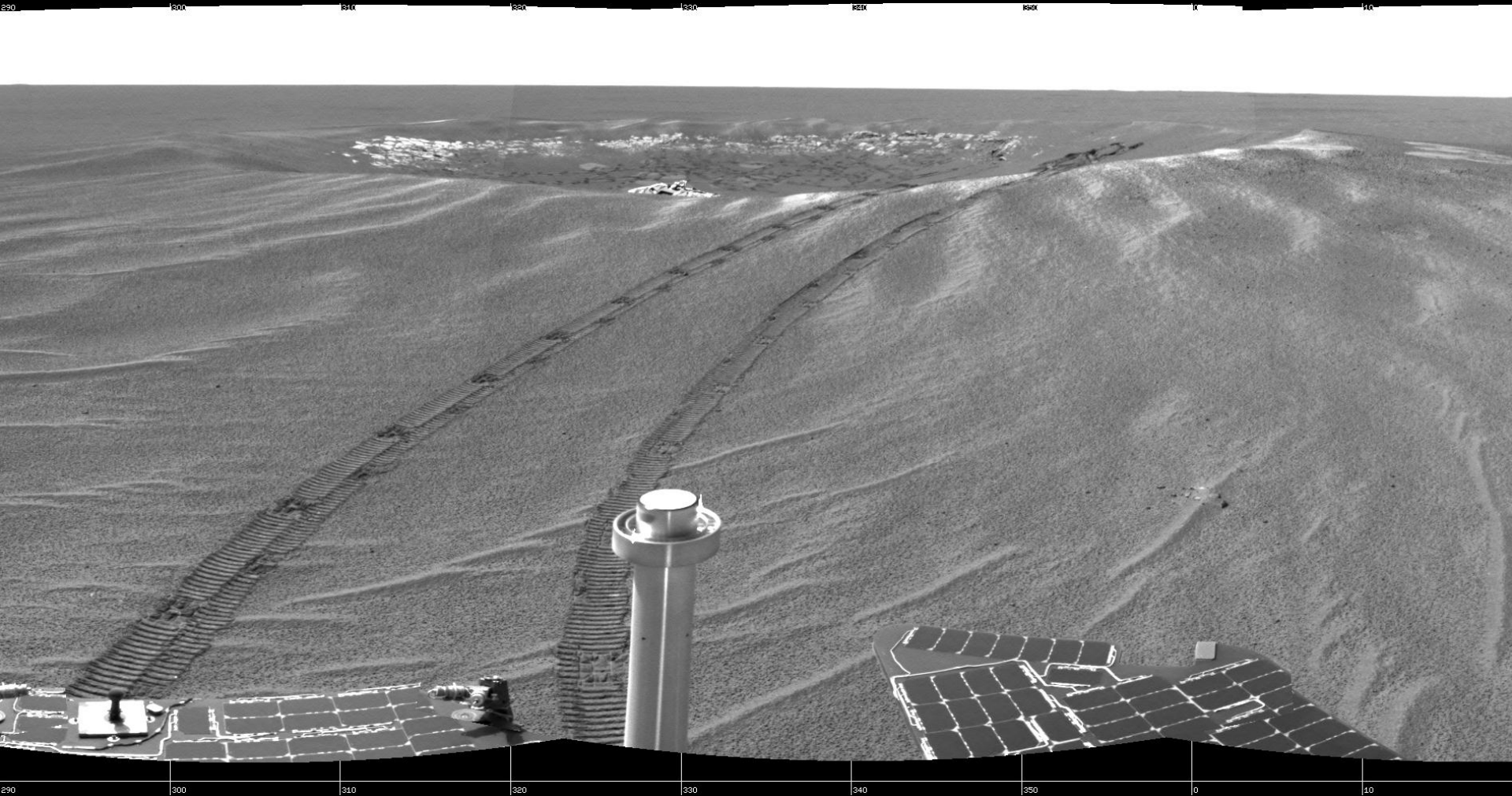


Opportunity, le 2eme robot mobile, s'est posé dans une plaine, Meridiani Planum, que des études orbitales montraient très riche en hématite (Fe_2O_3 = « rouille »), minéral suggérant la présence d'eau liquide passée.

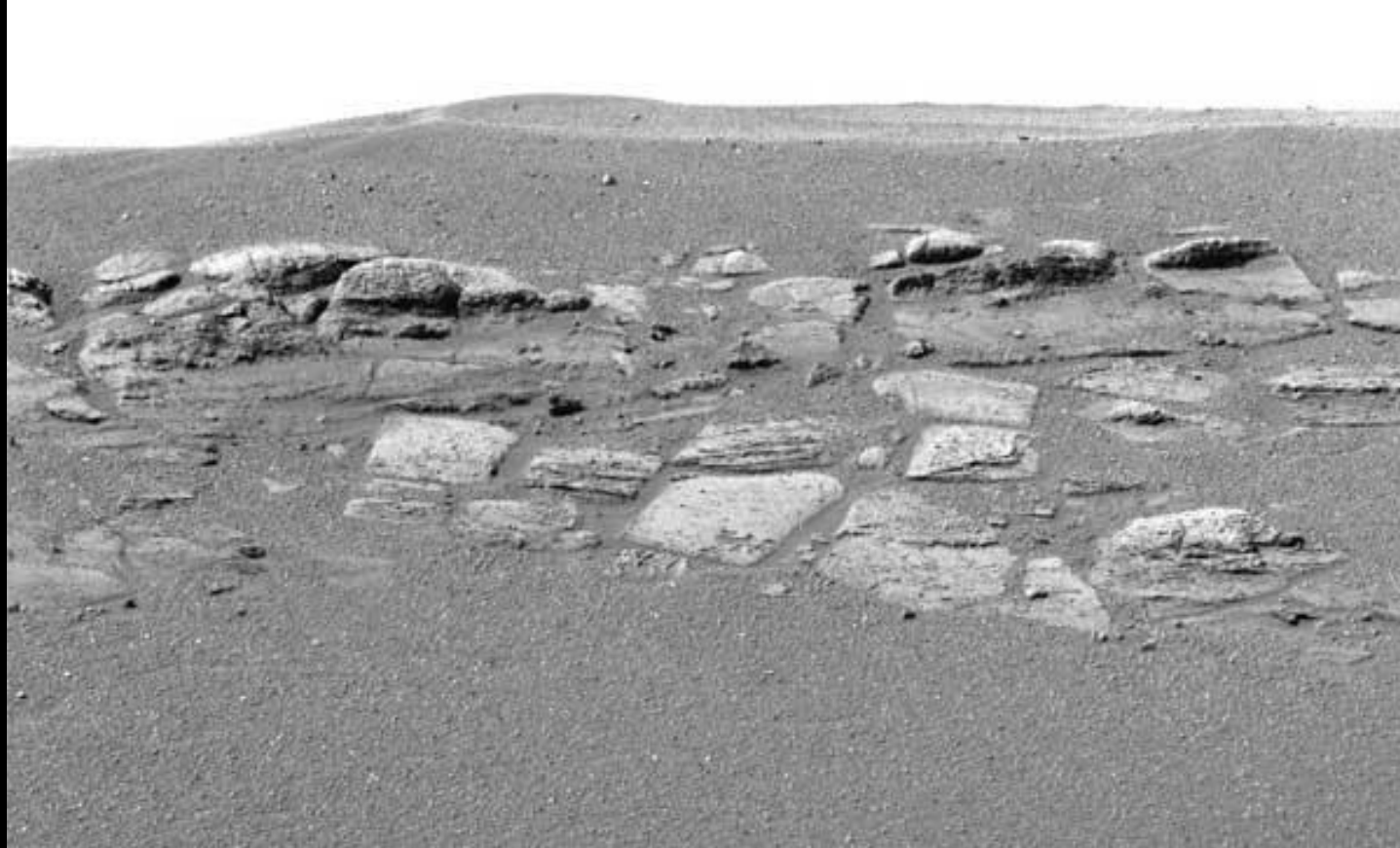
HEMATITE DISTRIBUTION MAP FROM TES DATA



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



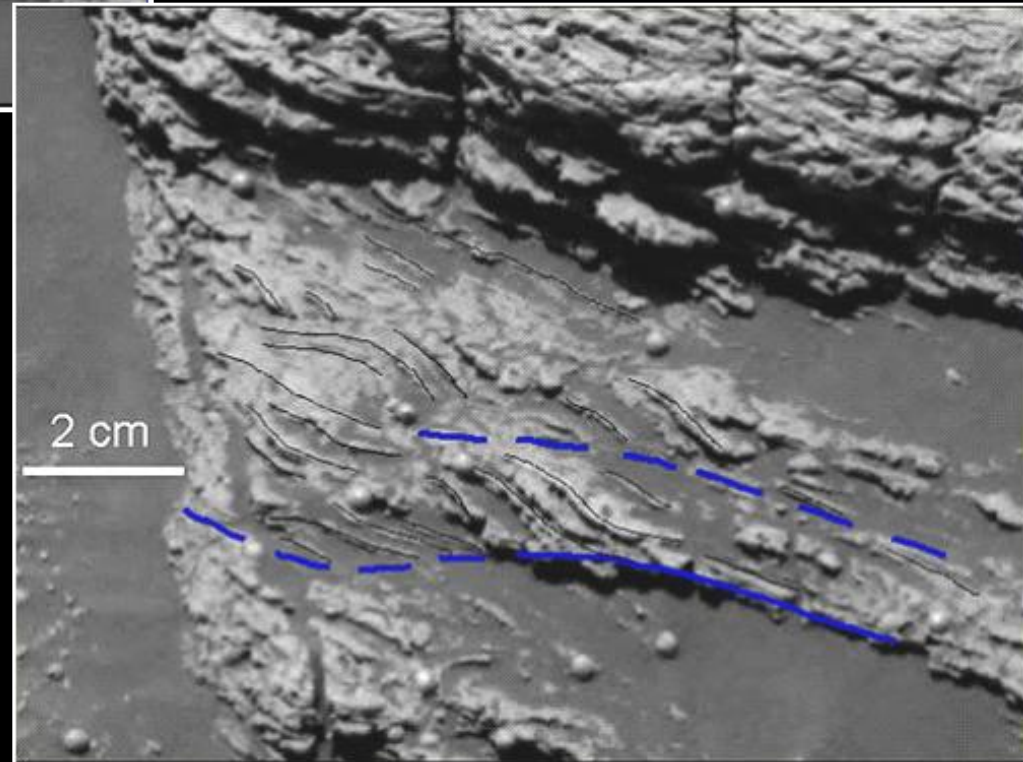
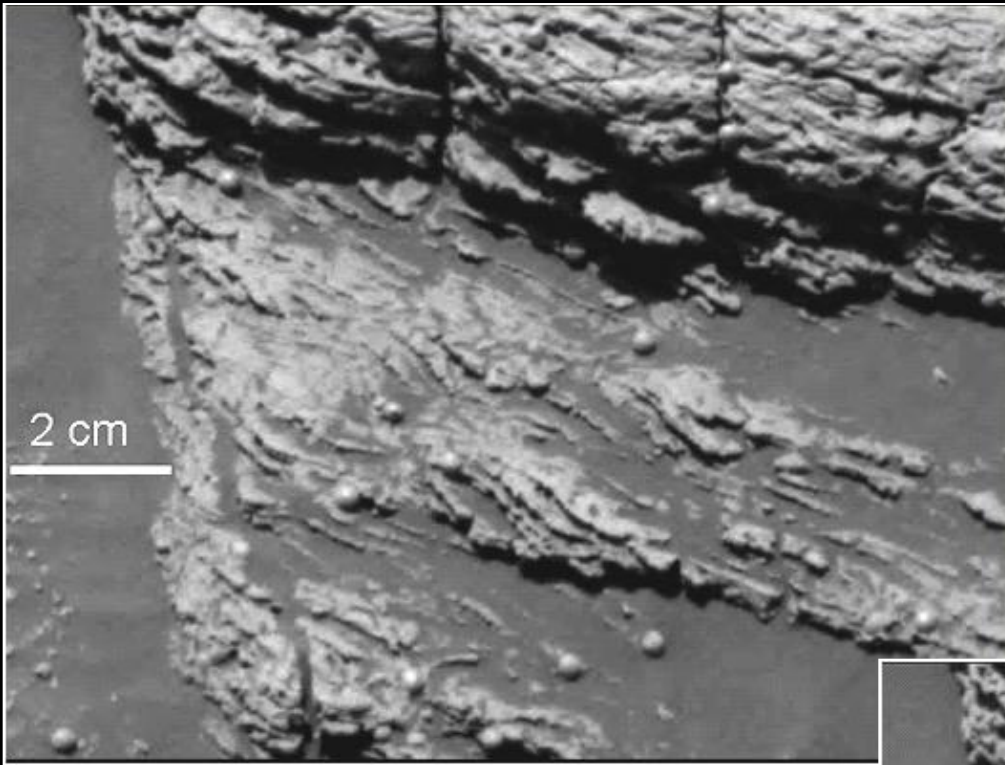
La plaine « Méridiani », le petit cratère Eagle (d = 20m, profondeur de 2 m) dans lequel s'est posé Opportunity, et les traces qu'il a fait pour en sortir au bout de 2 mois.



«Falaise»
de 75 cm
de haut

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

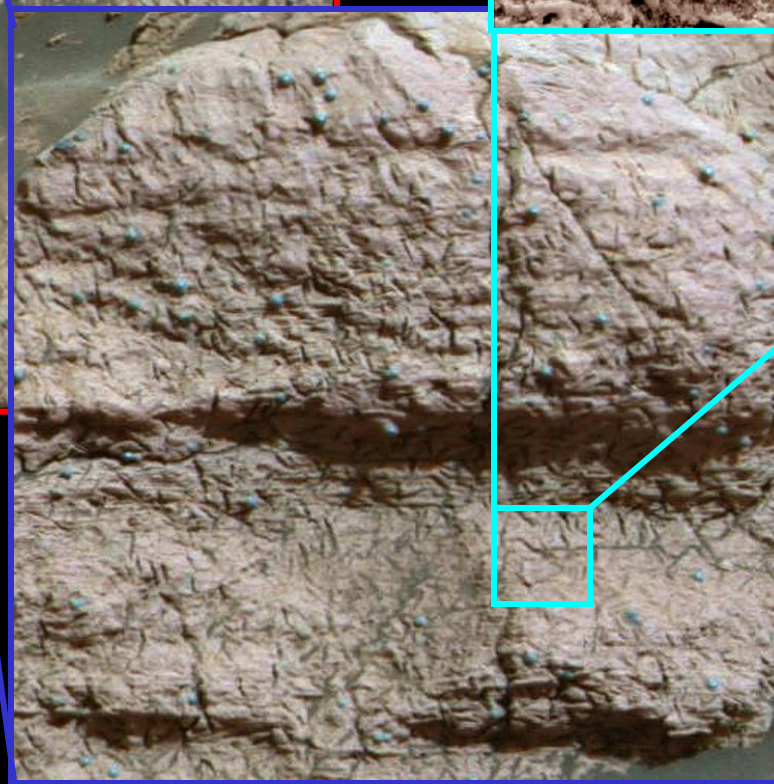
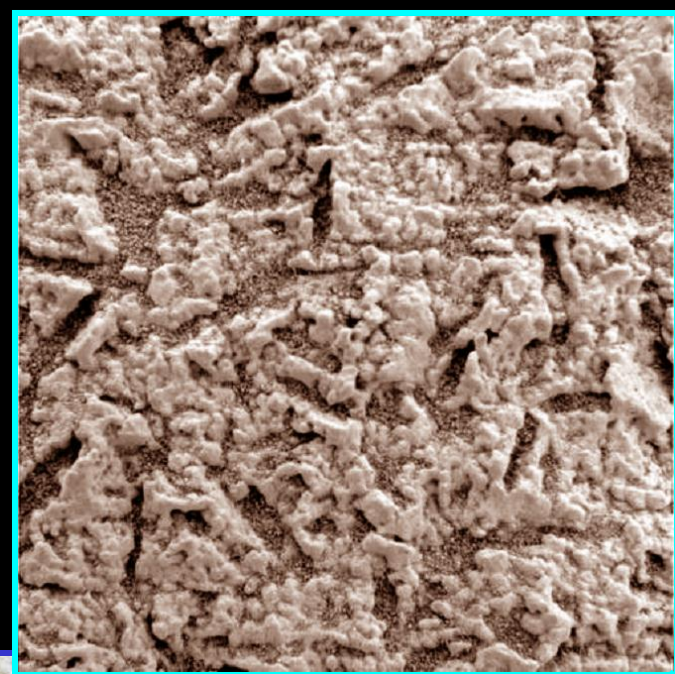
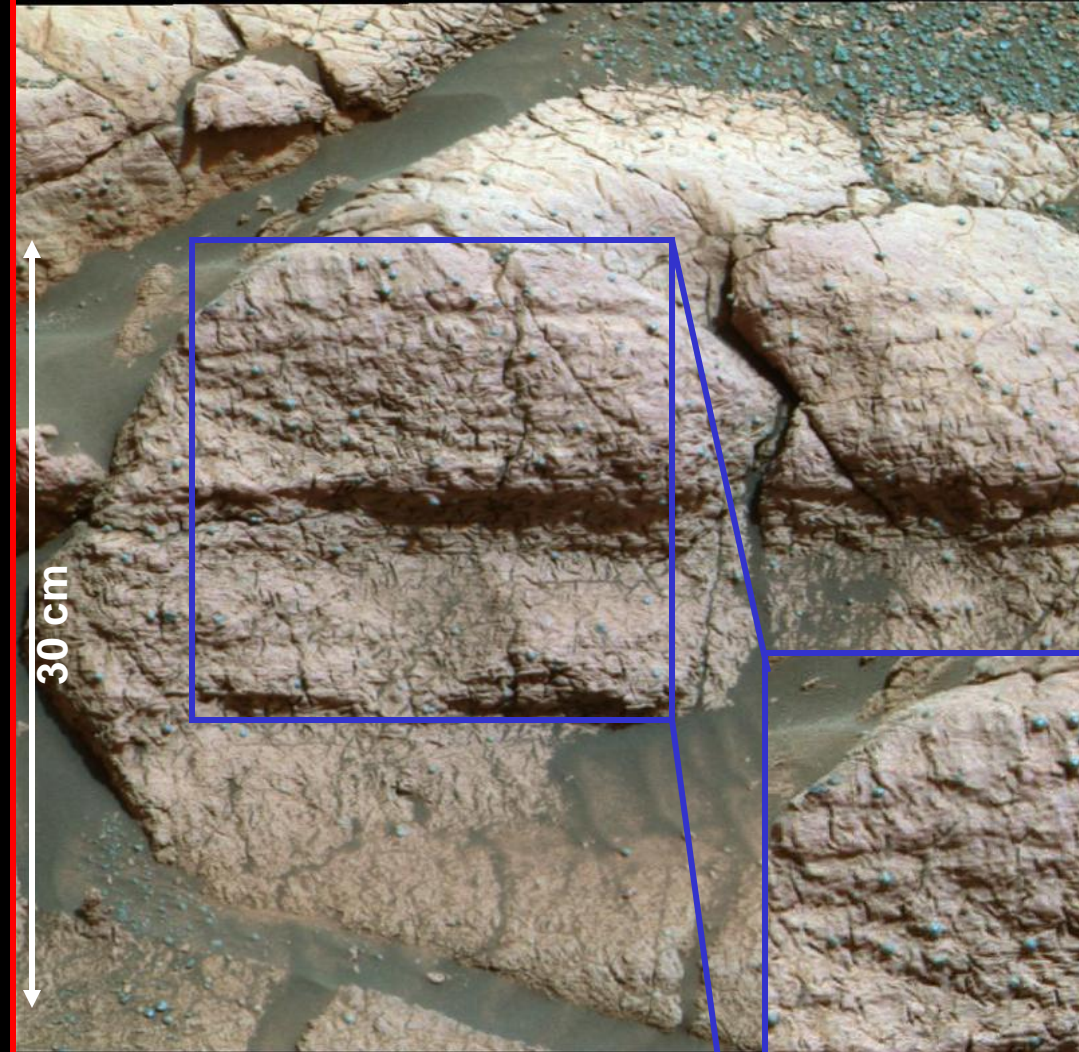
Et en regardant le détail des stratifications, Opportunity découvre des stratifications obliques !



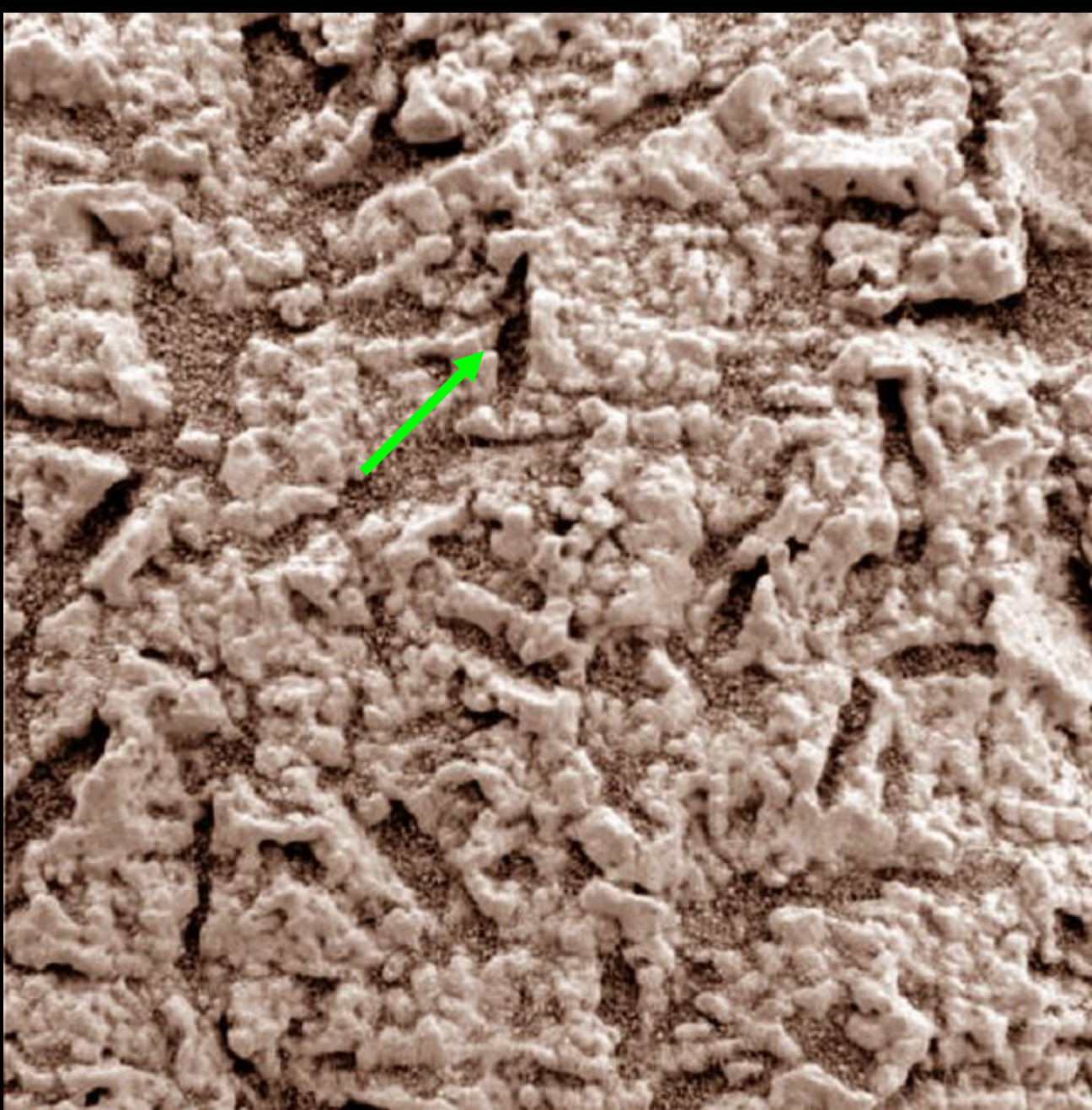
Et des sédimentologues patentés nous affirment que se sont des stratifications faites sous un courant d'eau



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



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



Les « vugs » ?

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

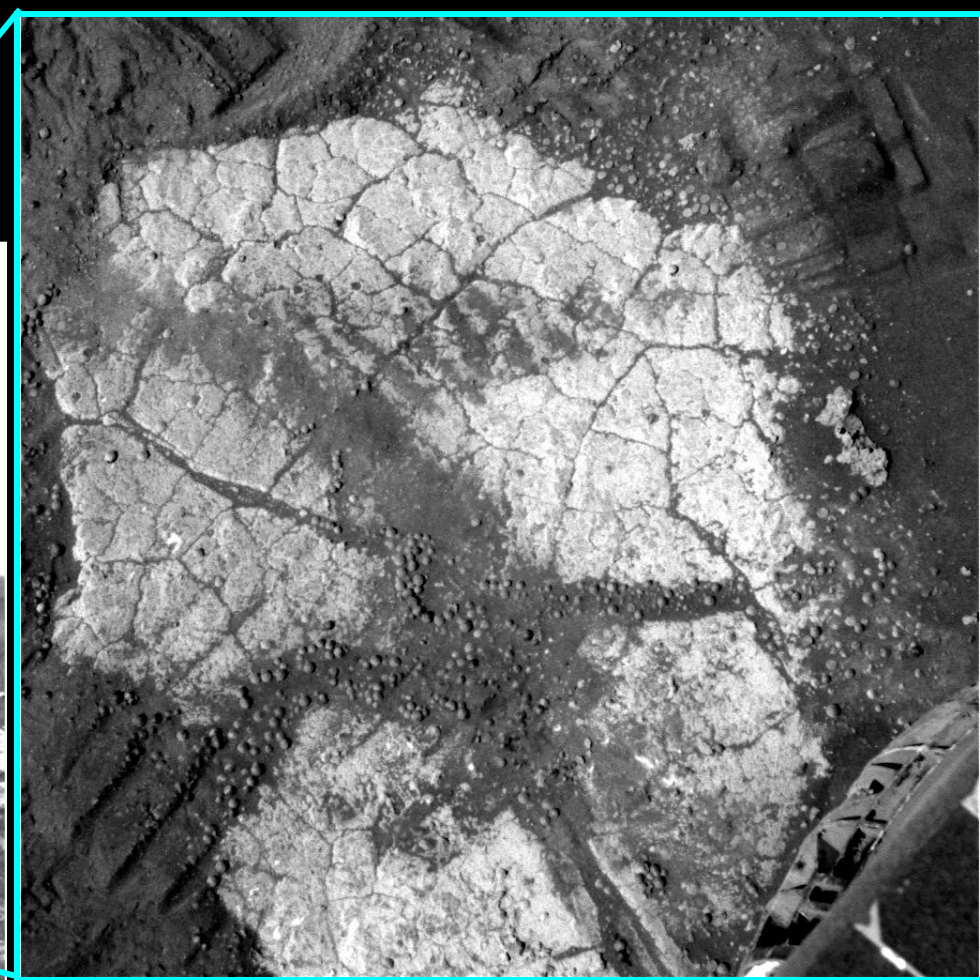
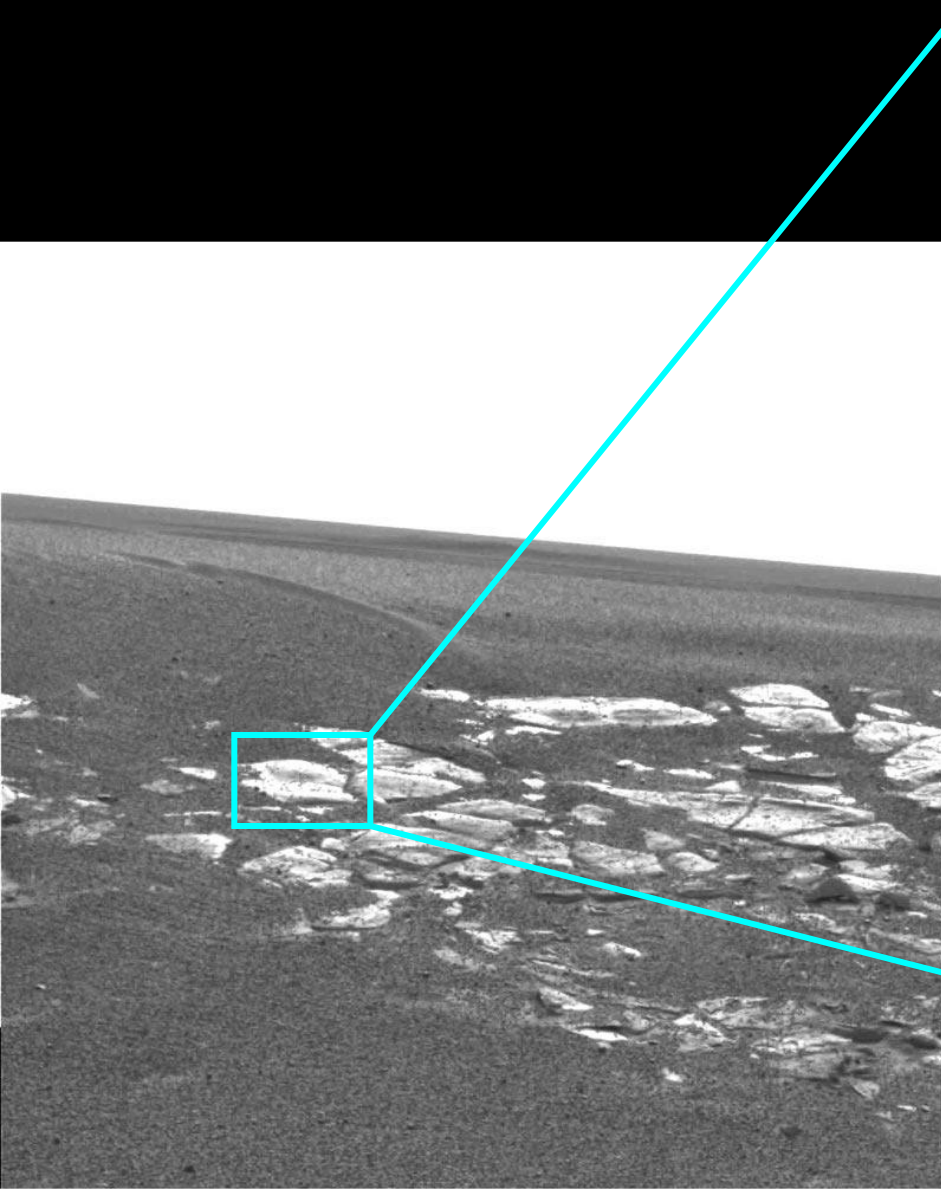
Les « vugs » ressemblent à des pseudomorphoses de gypse et autres sels



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

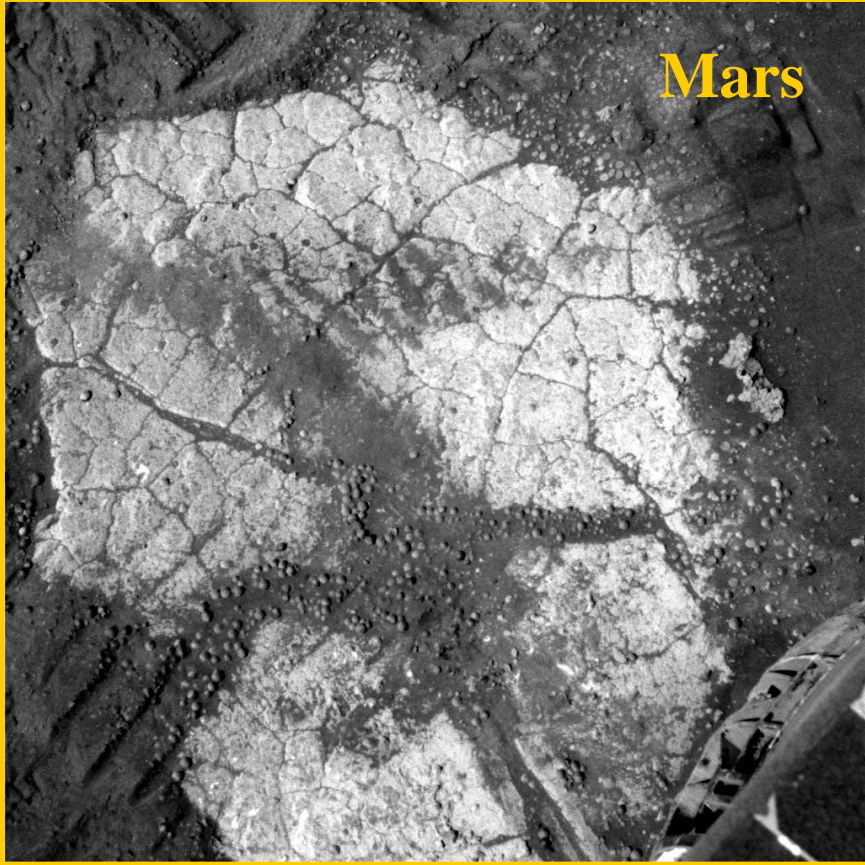


**Gypse, et autres sels,
ça se dépose dans des
lacs salés, des lagunes
en bord de mer ...**



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

Mars



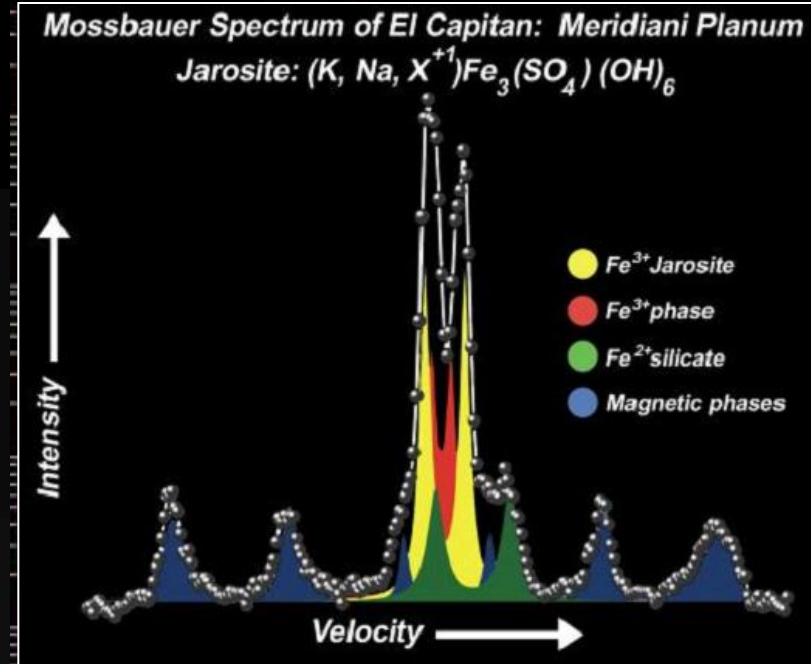
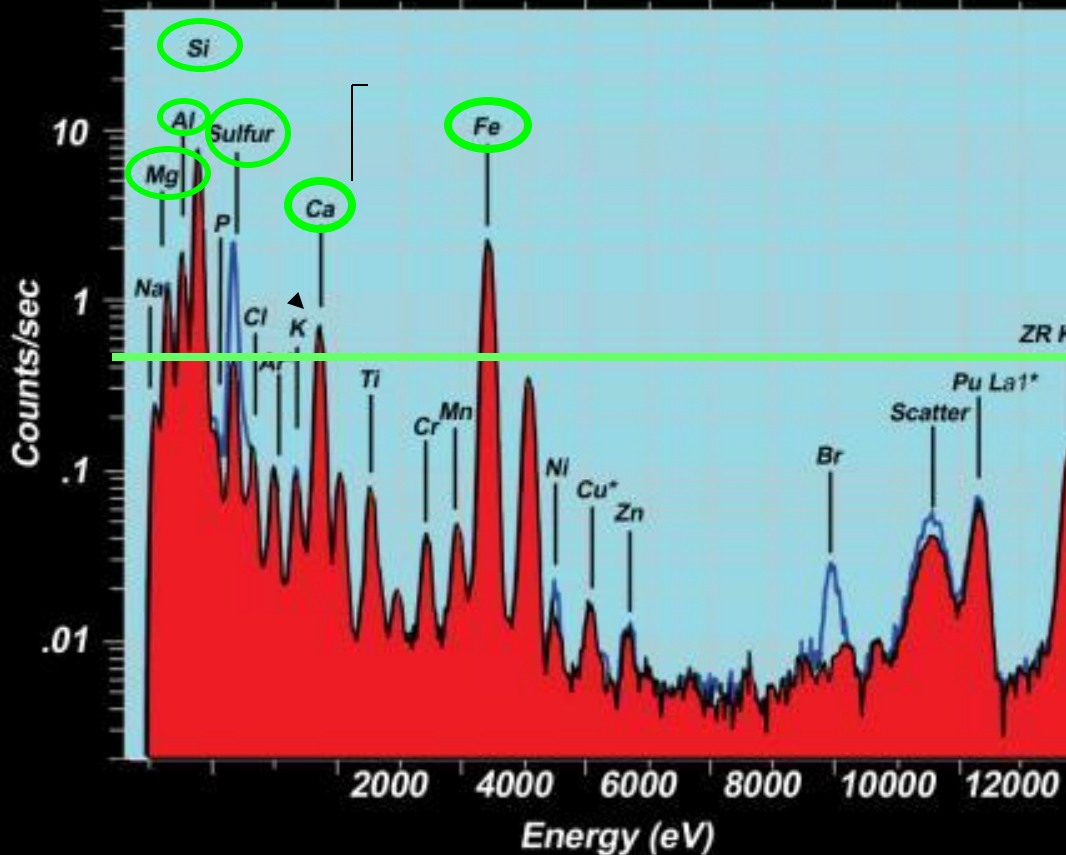
Terre



Photo Pierre Thomas

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

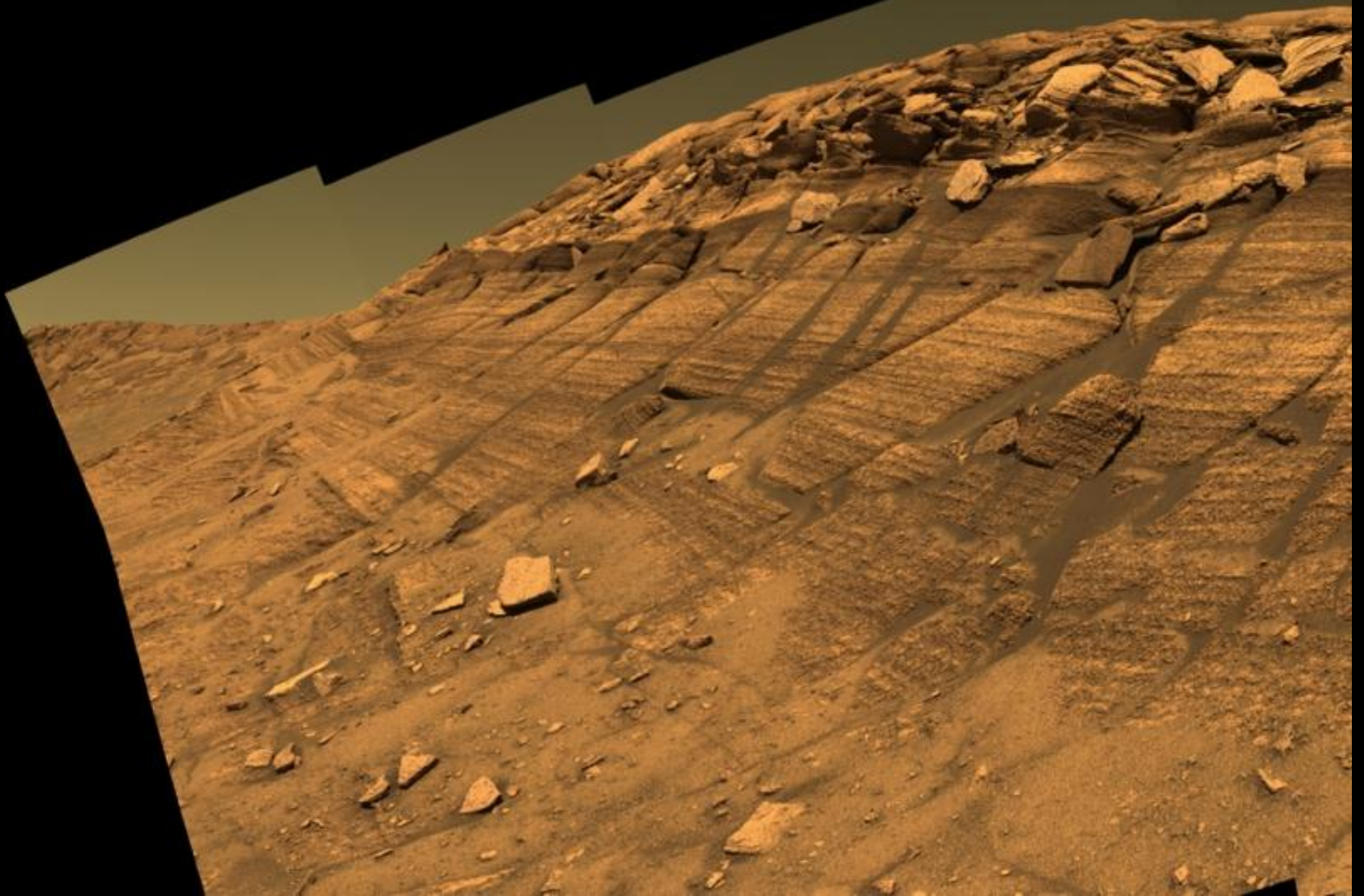
APXS Rock and Soil X-ray Spectra at Meridiani



Analyse chimique globale : des aluminosilicates hydratés (chimie d'argile) riches en Fe, Mg, Ca et S. Analyse minéralogique : la roche « globale » contient de l'hématite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \pm$ hydraté), un sulfate potasse-ferrique hydraté ...

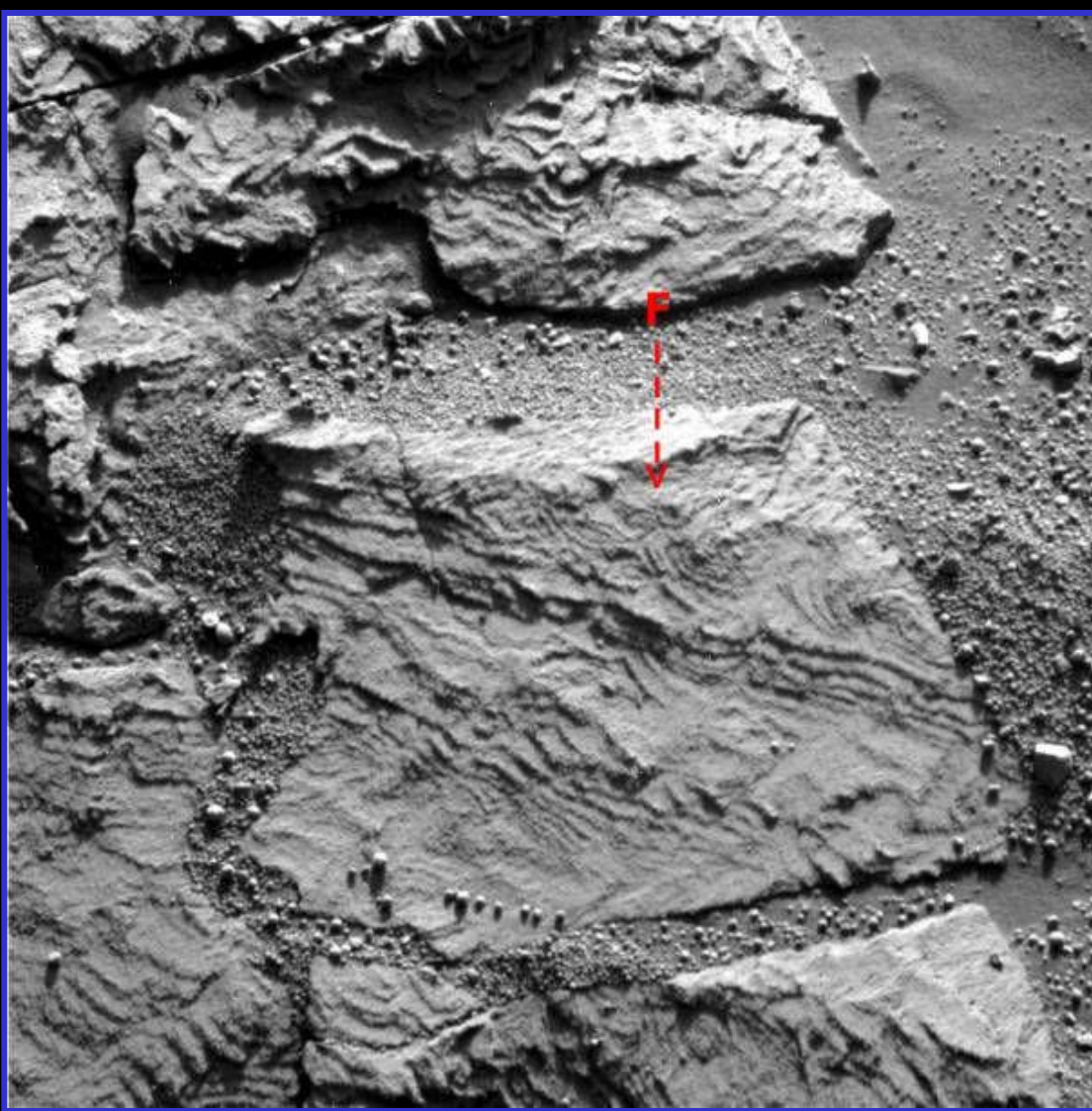
Après avoir quitté le cratère, Opportunity roule dans une plaine où les fentes de retrait (dessiccation ?) semblent être la règle.





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

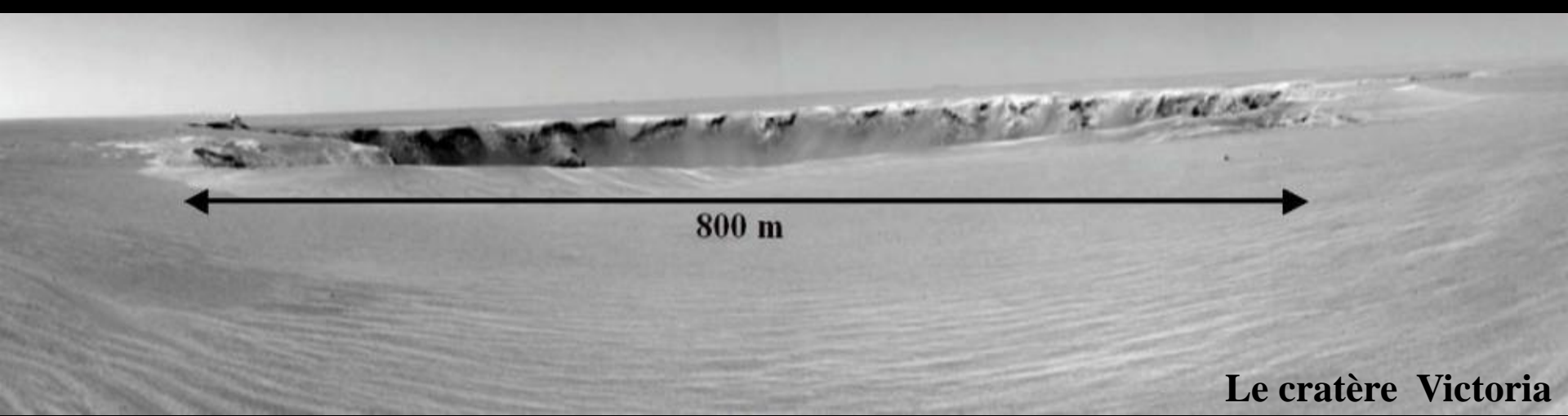
Dans ce secteur, vues en section, les strates sont parfois « festonnées ». Sur Terre, on connaît de telles strates festonnées



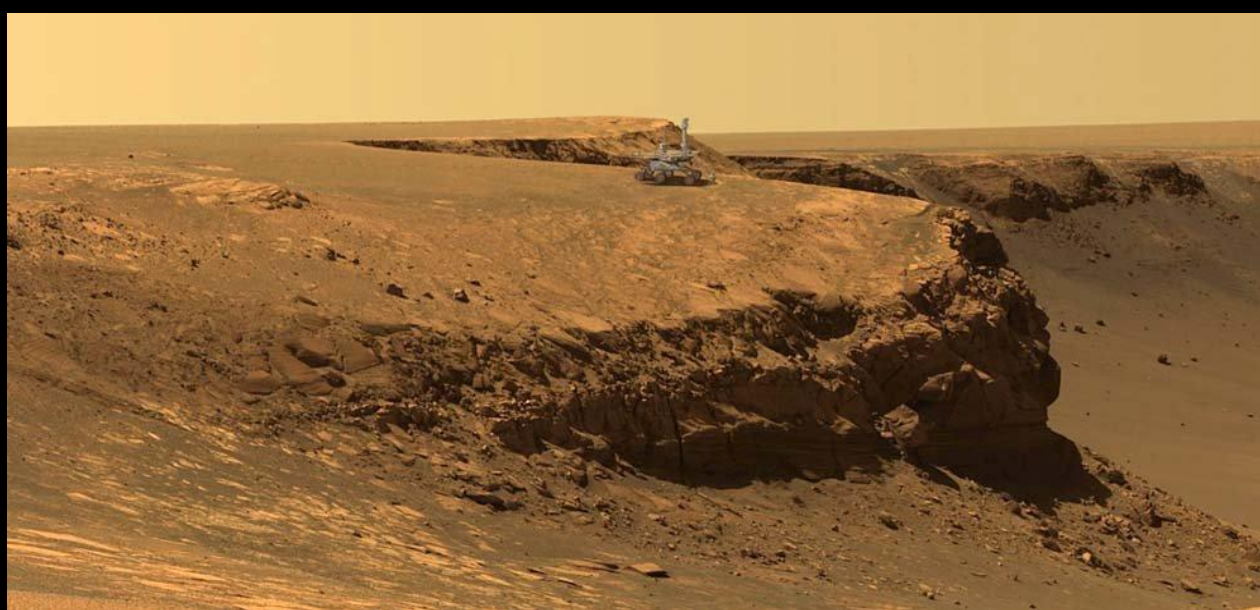


**Sur Terre, de tels festons,
symétriques, indiquent que la
boue s'est déposée dans de l'eau
clapotante, sous une profondeur
d'eau de quelques cm.**





Le cratère Victoria



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

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

... 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 !



**Cratère de
2 m de
profondeur**

**Cratère de
80 m de
profondeur**

**Au moins 12
mois de
trajet futur
si aucune
panne
n'intervient
d'ici là**

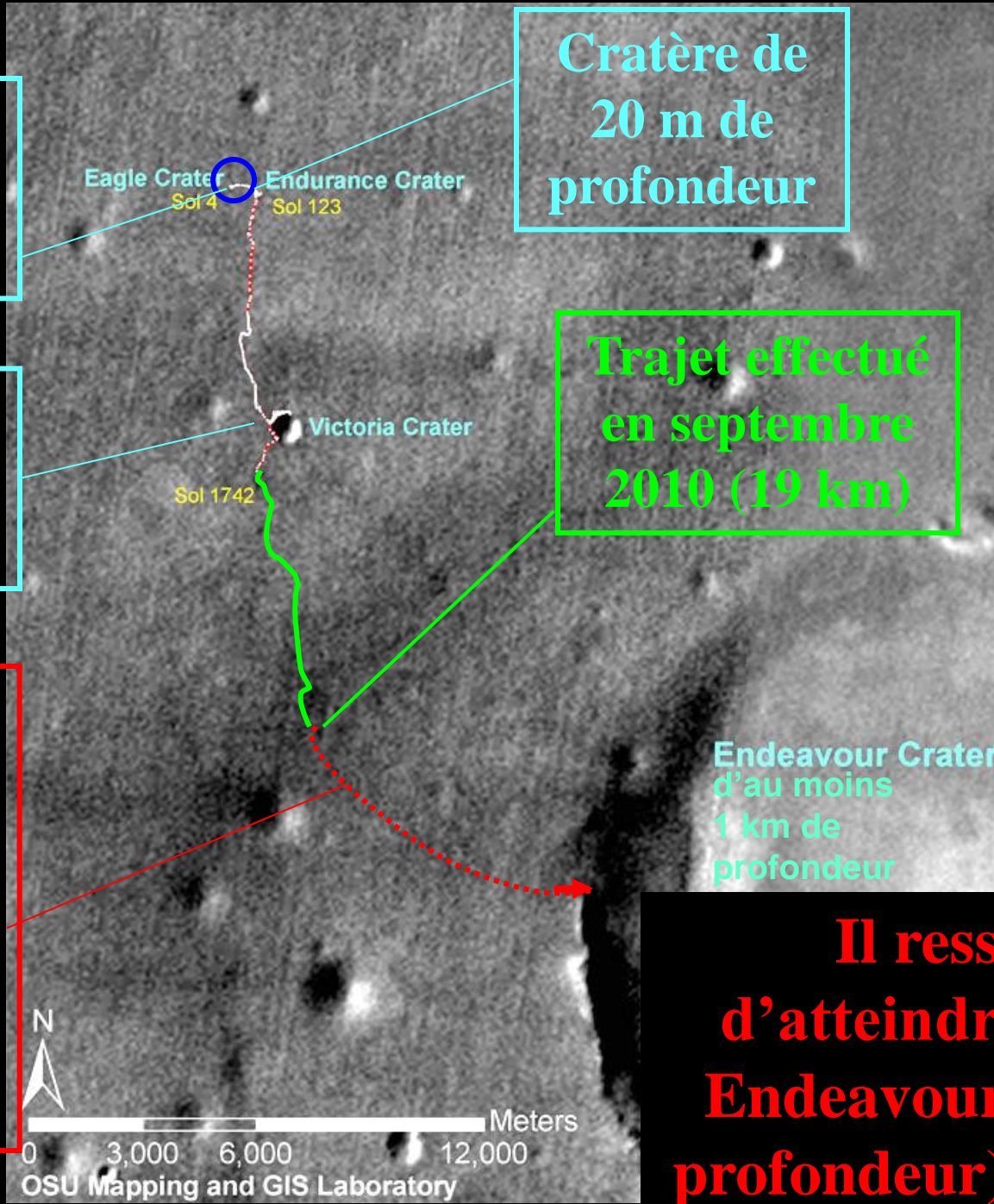
**Cratère de
20 m de
profondeur**

**Trajet effectué
en septembre
2010 (19 km)**

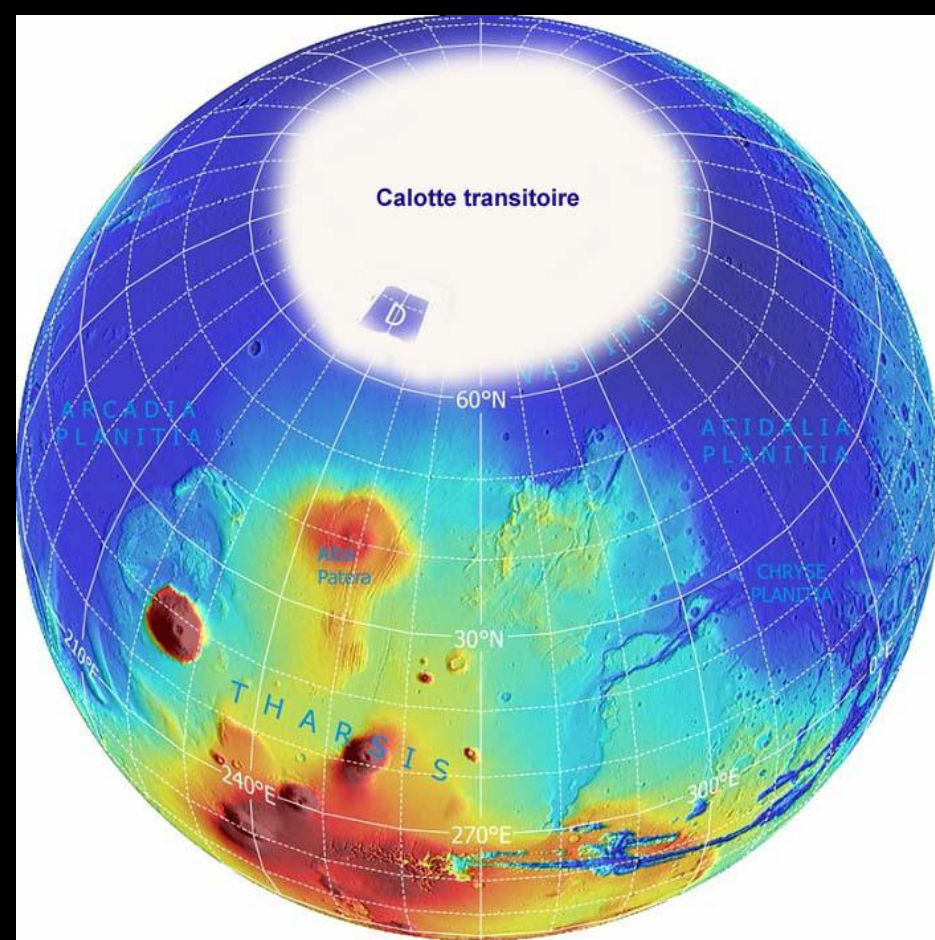
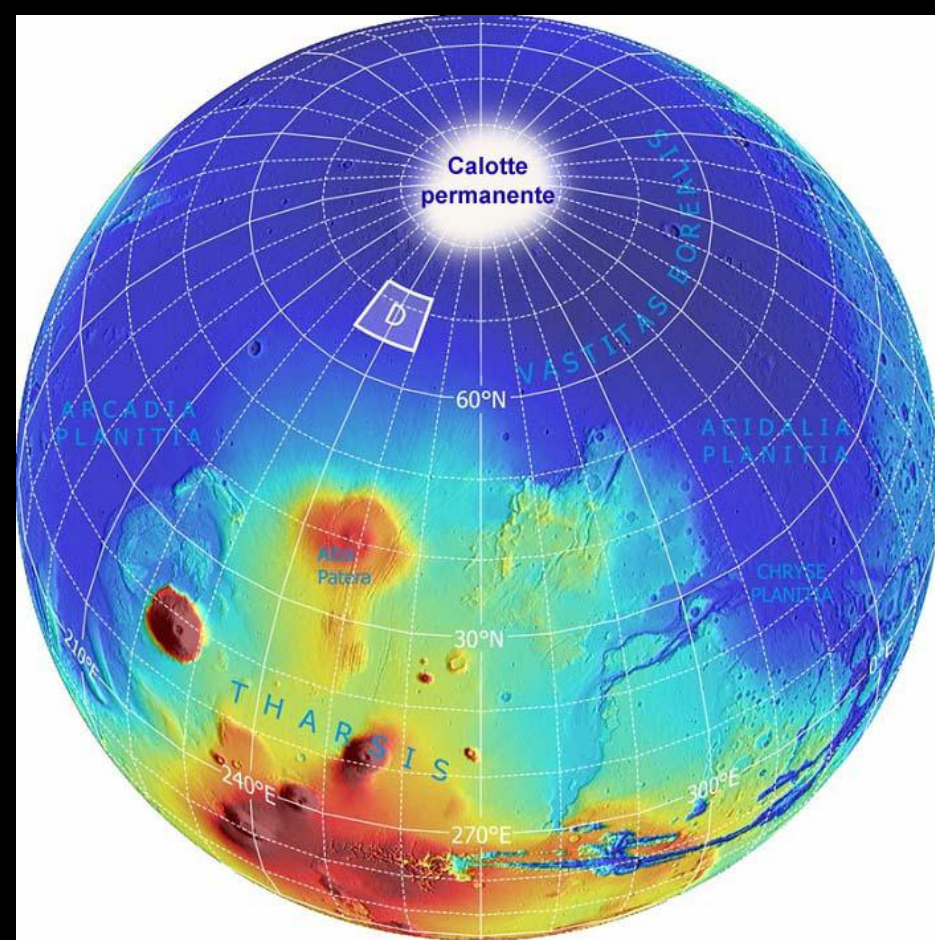
○
Cercle de
600 m de
rayon, ce que
«garantissait»
le constructeur
du robot

**Endeavour Crater
d'au moins
1 km de
profondeur**

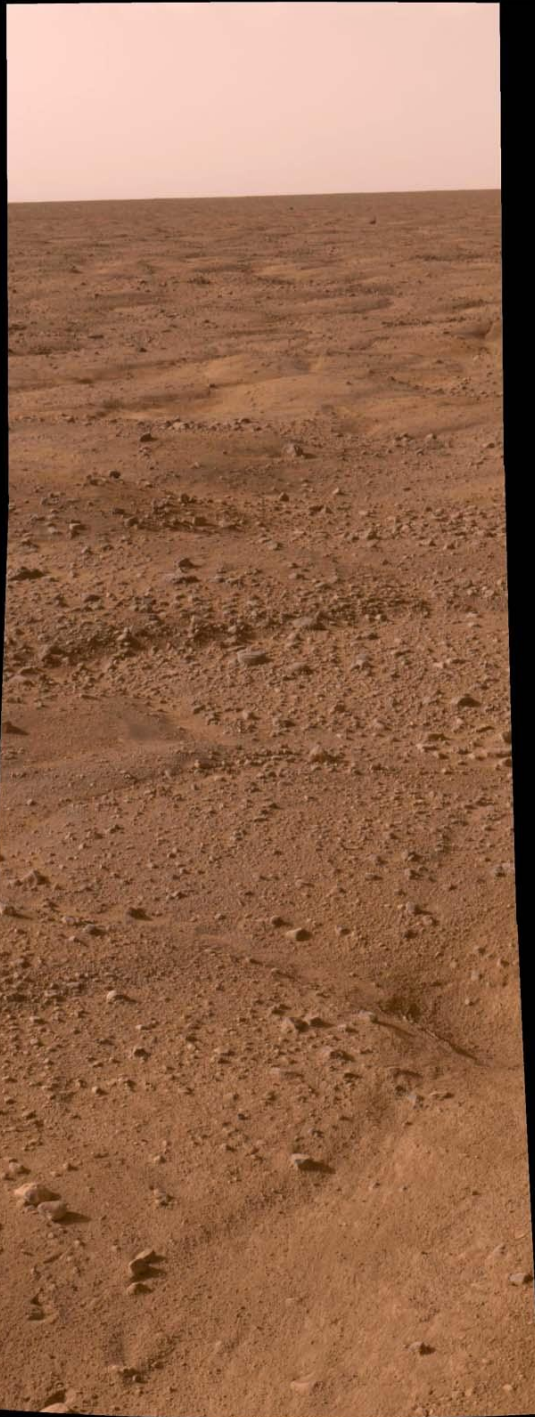
**Il ressort et tente
d'atteindre le cratère
Endeavour (> 1km de
profondeur). A suivre !**



0 3,000 6,000 12,000 Meters
OSU Mapping and GIS Laboratory

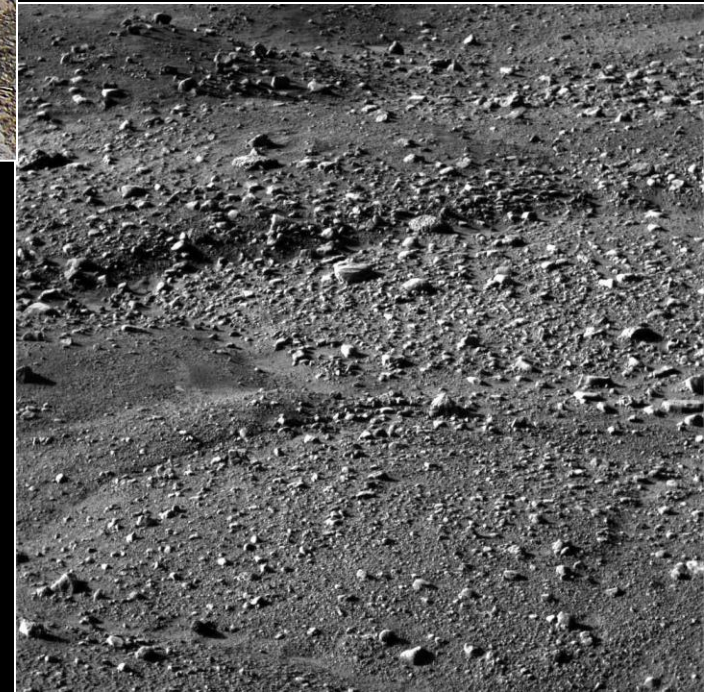


Chercher glace, argiles, carbonates et molécules organiques dans les terrains péri-polaires martiens a été l'une des tâches du 3eme robot (non mobile) Phoenix, parti le 4 août 2007, arrivé le 25 mai 2008 et « mort » de froid (c'était prévu) le 2 novembre 2008.



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

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



**Mais pour faire des sols polygonaux (sur
Terre), il faut un permafrost avec des
alternances gel-dégel superficiel.**

**Permafrost sur Mars, oui ; alternance gel-
dégel par 68° lat. nord sur Mars, non !
Alternance sublimation-condensation ?**



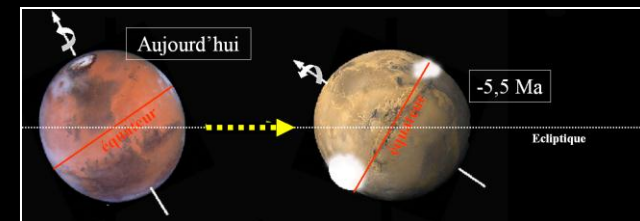
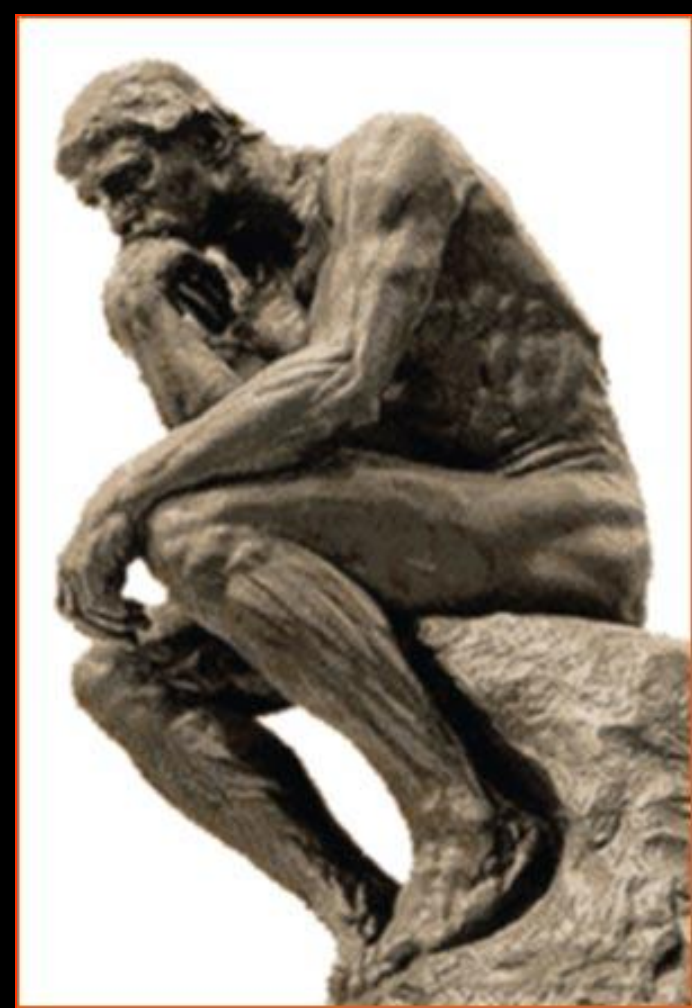
Depuis l'atterrissage, en plein été, la température oscille entre -25°C le jour et -80°C la nuit ! Et ça baisse avec l'arrivée de l'automne.

Comment faire des sols polygonaux quand il ne dégèle jamais ?

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

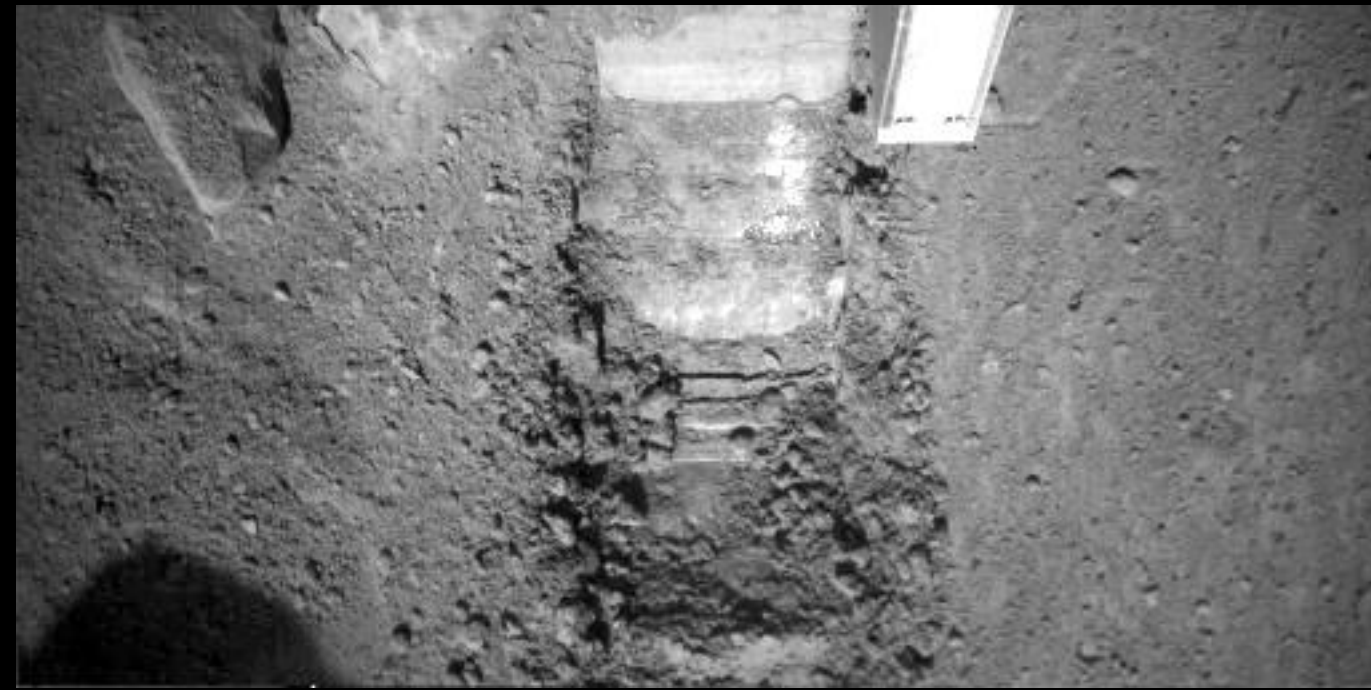
Et si ces polygones étaient fossiles, datant d'il y a $-5,5$ Ma quand les pôles étaient beaucoup plus chauds l'été ?

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



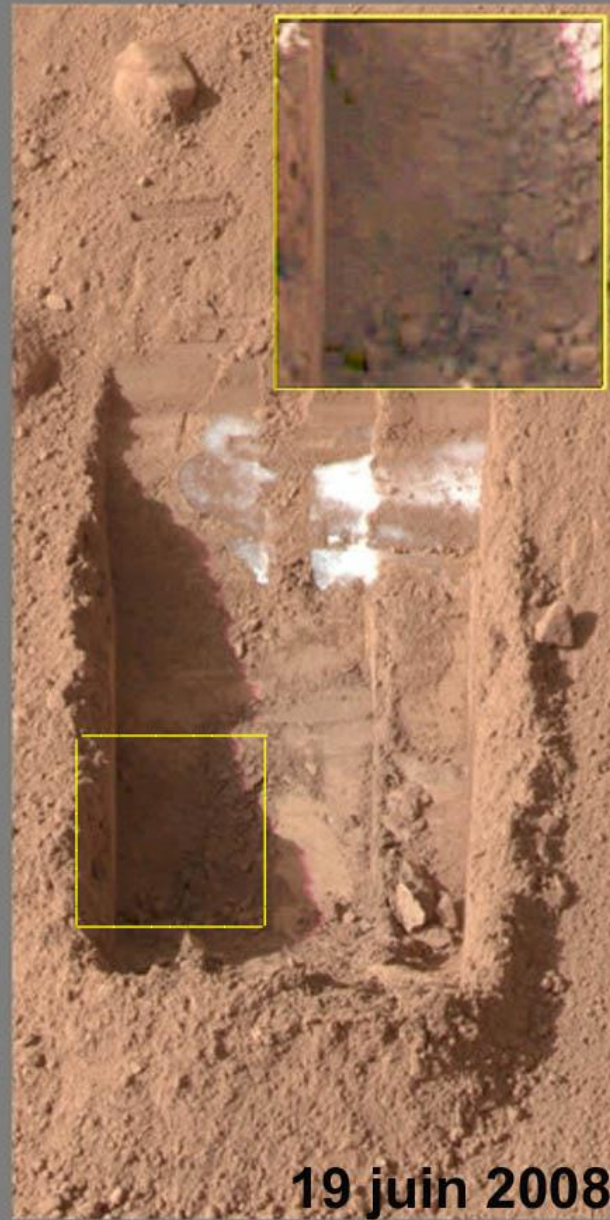
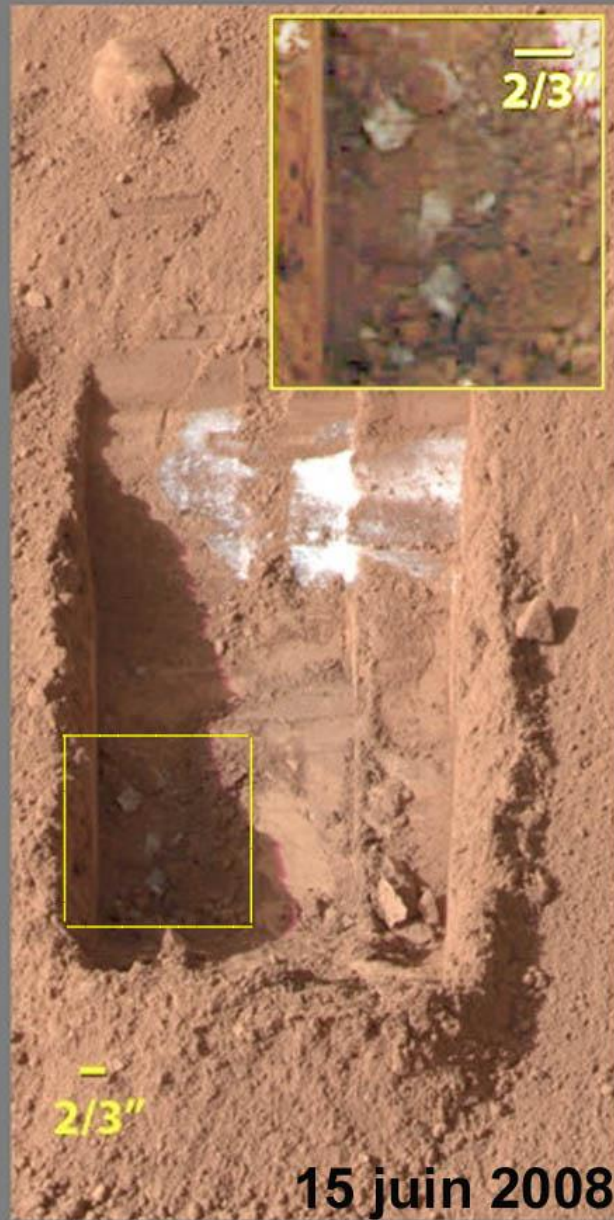
**Avec une
« pelle » (5 cm
de large) au
bout d'un bras
articulé,
Phoenix creuse
des petites
tranchées.**

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



15 juin

19 juin



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

De la glace !

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

**Contient-elle des
volatils (CH₄ ...)**

des sels

**(SO₄⁻ ...), autre
chose ... ?**

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

Victoire !



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

Résultats des analyses :
la glace est bien de la
glace d'H₂O, eau qui a
un Ph basique de 8-9, qui
contient des ions divers
(magnésium, sodium,
potassium, chlore et
perchlorate). Le sol
contient des argiles
jusqu'à 5% de carbonate
de calcium. Tout cela
révèle un « passé »
humide !



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

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



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

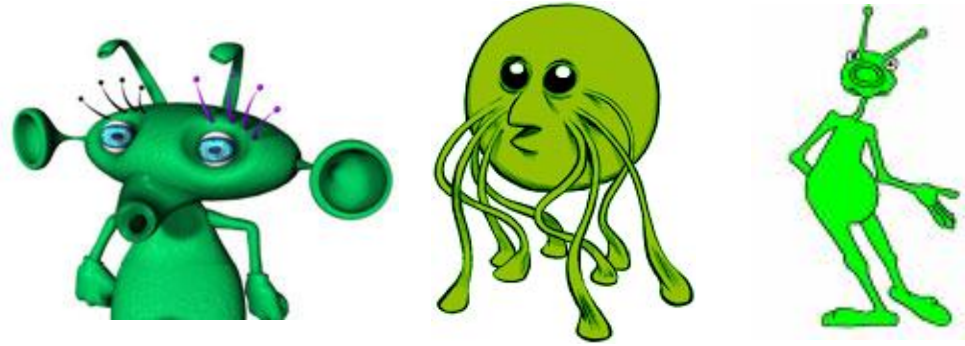
***Entre 4-3,8 et 3,5-3 Ga, période de transition.**

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

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

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

Plus vieilles traces de vie sur Terre



Terre trop chaude

Eau liquide

Ere des bactéries et des êtres unicellulaires

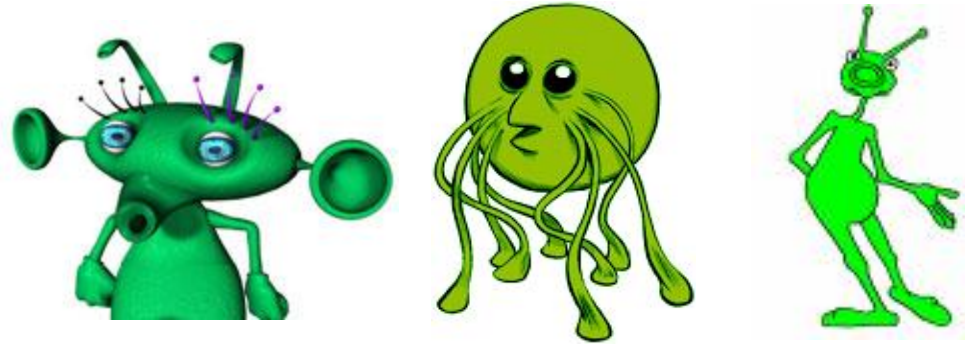
Bactéries, végétaux, animaux.

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



Tous les espoirs sont permis !

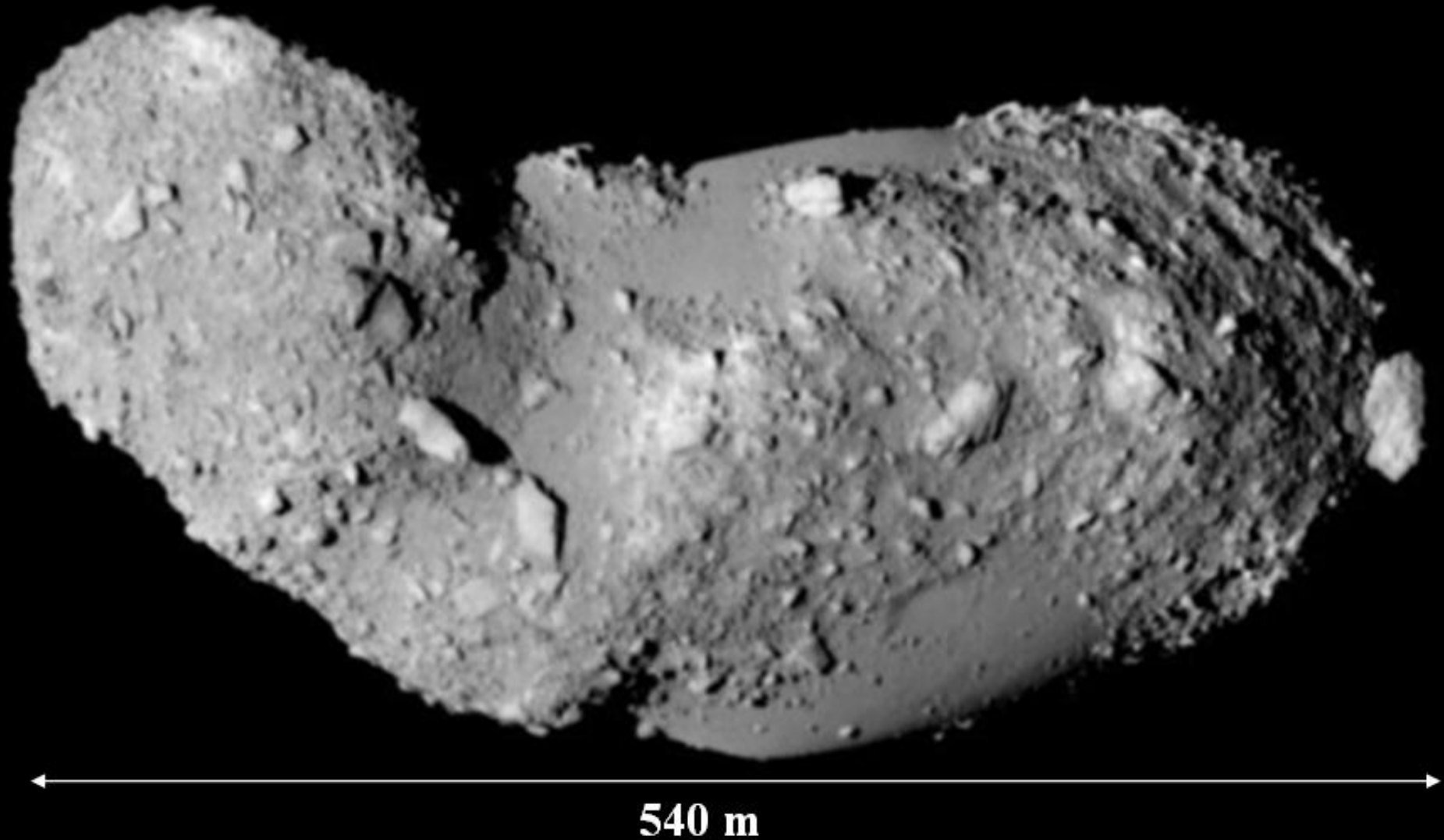
Y-a-t-il (y-a-t-il eu) des martiens ??

Mais y avait-il de la matière organique dans notre nébuleuse à nous, il y a 4,5 Ga ? Allons chercher des « fossiles » non modifiés de cette époque dans la ceinture des astéroïdes



Orbite d'un astéroïde géocroiseur = une météorite potentielle

**Voici, Itokawa
(2005, mission japonaise Hayabusa)**



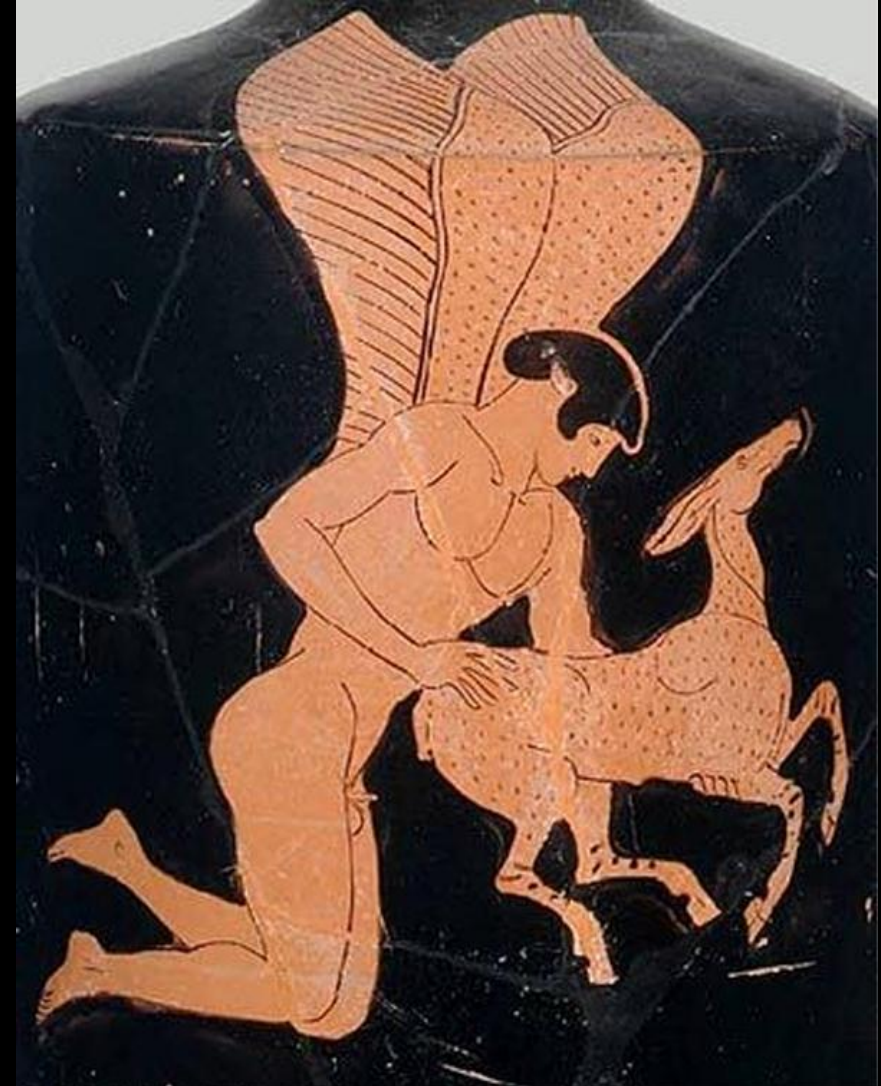


33 km

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



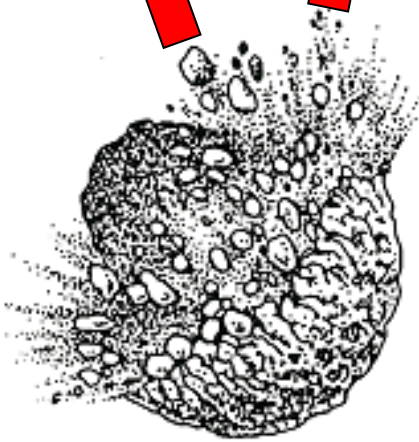
**Éros, Musée du Louvre.
A qui tend-il les bras ?**



**EROS WITH FAWN, Museum of Fine
Arts, Boston, Massachusetts, USA**

**Je rappelle que le noms des astéroïdes (découverts avant 1970)
sont tirés de la mythologie « péri-méditerranéenne ».**

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



Catastrophic
disruption
by collision



Reassembly by mutual gravity



Rubble pile model

Les météorites en sont des fragments.



Itokawa

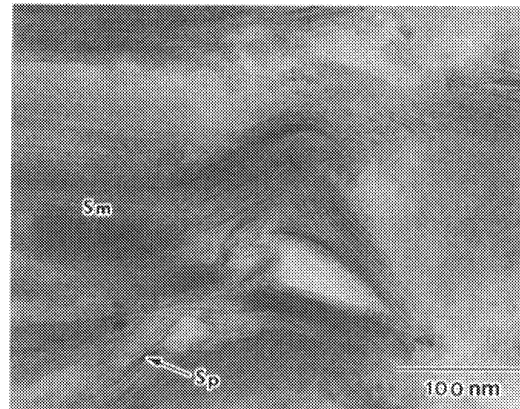
540 m



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

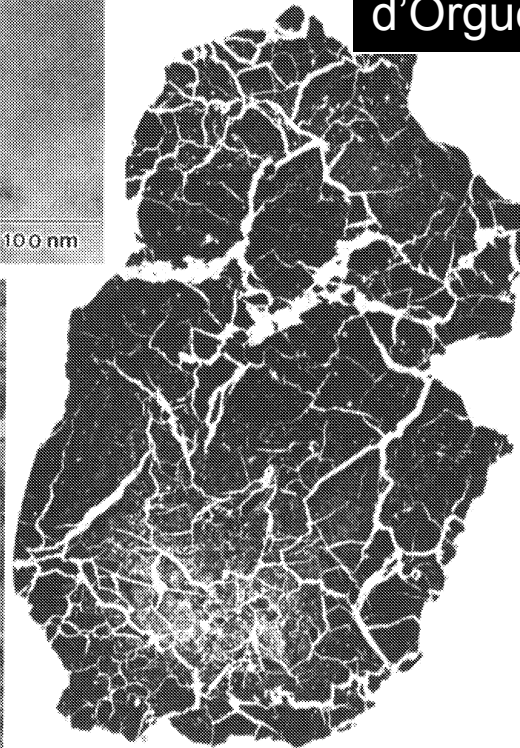
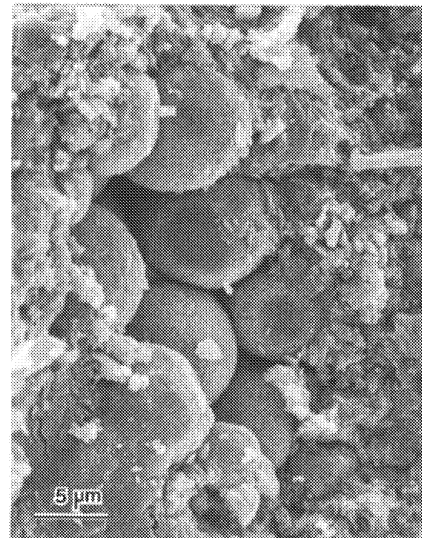
**L'eau dans les météorites . Il y en a jusqu'à 10%,
inclus dans des minéraux hydroxylés (argiles,
serpentes...) Ces météorites se sont formées (ou
ont été altérées) en présence d'H₂O, à T < 300°C**

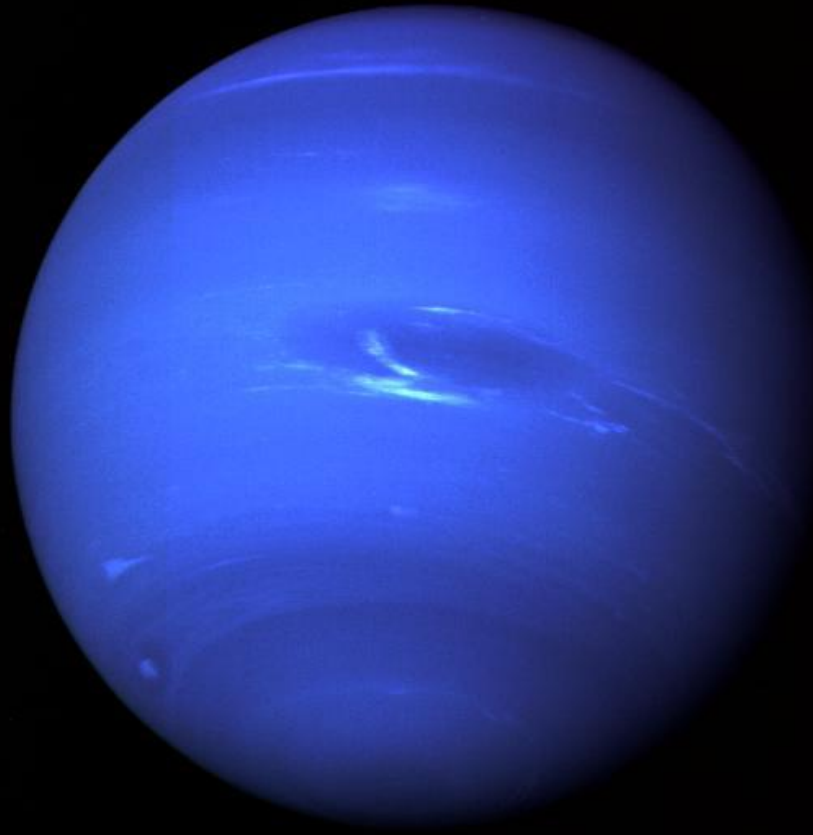
Image TEM:
Smectite (argile) et
serpentine



Veines de phosphates
dans la chondrite
d'Orgueil

Spherules de
magnetite,
oxyde de fer





Au delà des astéroïdes, les planètes géantes

Caractéristiques de la surface supérieure des nuages

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

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

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

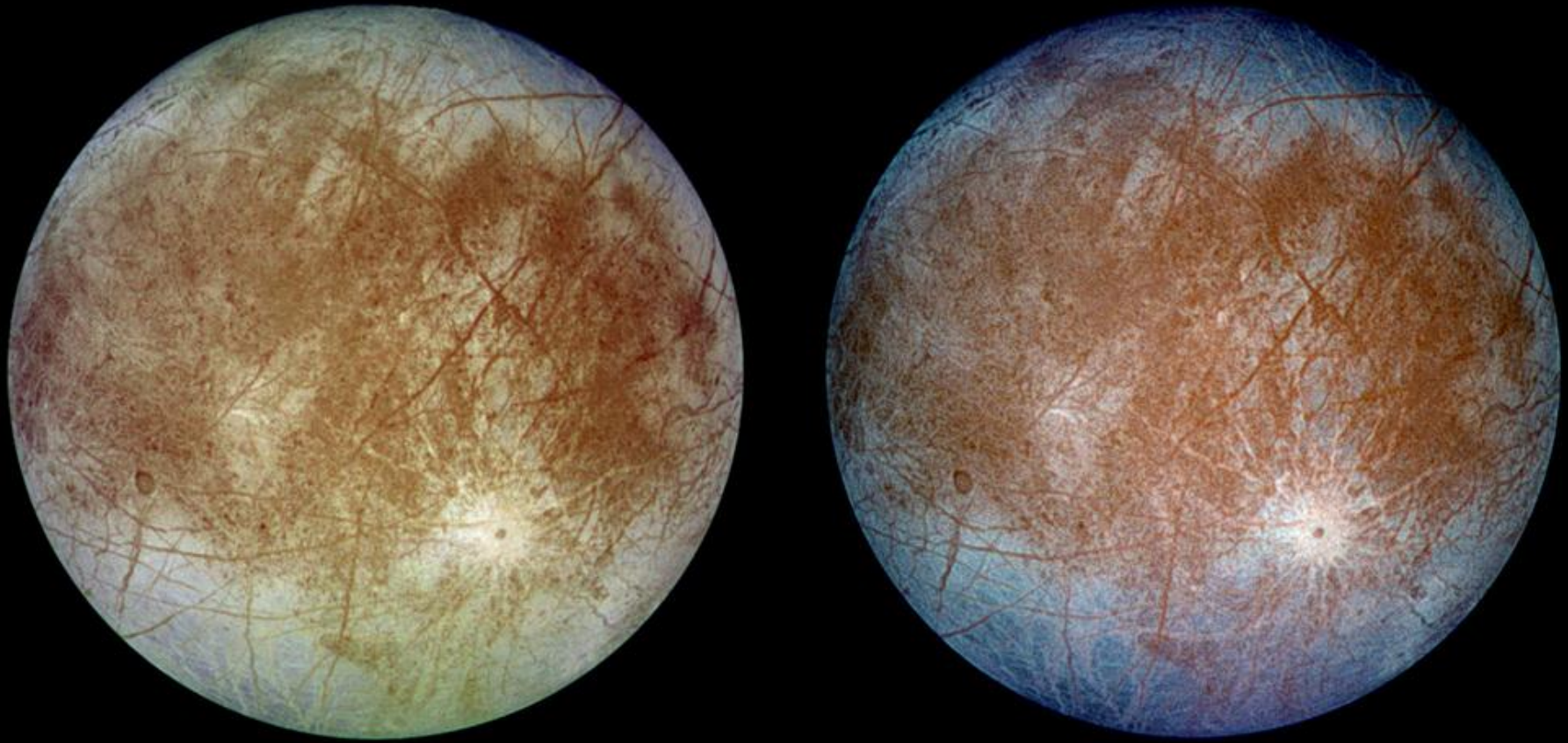
**T = - 150°C
à - 200 °C**

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

**Europe
(taille de
la Lune)**

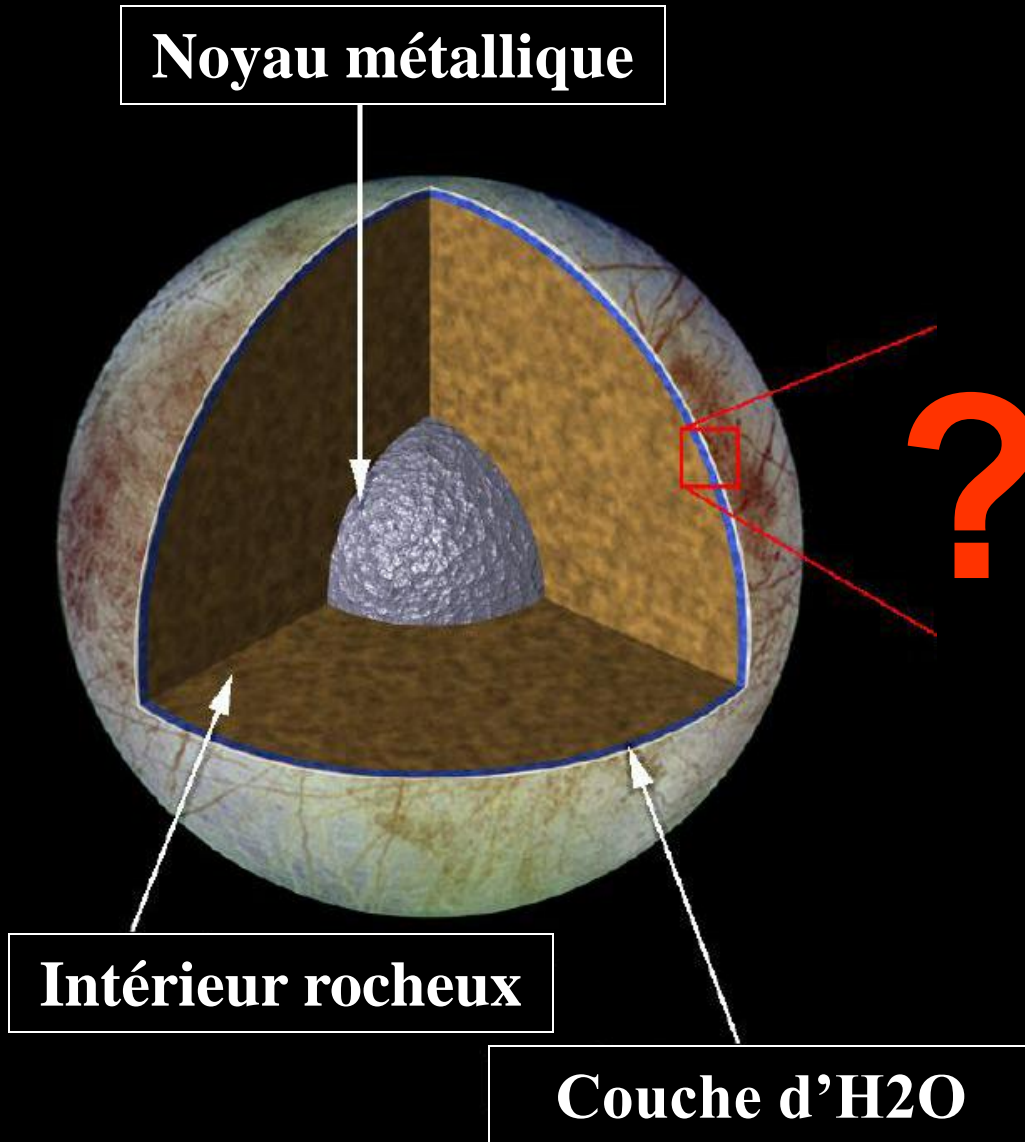
Les 4 planètes géantes ont des satellites, 17 « gros » (et des dizaines de « petits »). Parmi leurs 17 satellites principaux, un n'est constitué que de roches (Io), un autre est constitué de roches recouvertes de glaces (Europe) et les 15 autres sont constitués majoritairement de glaces. On va en étudier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

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



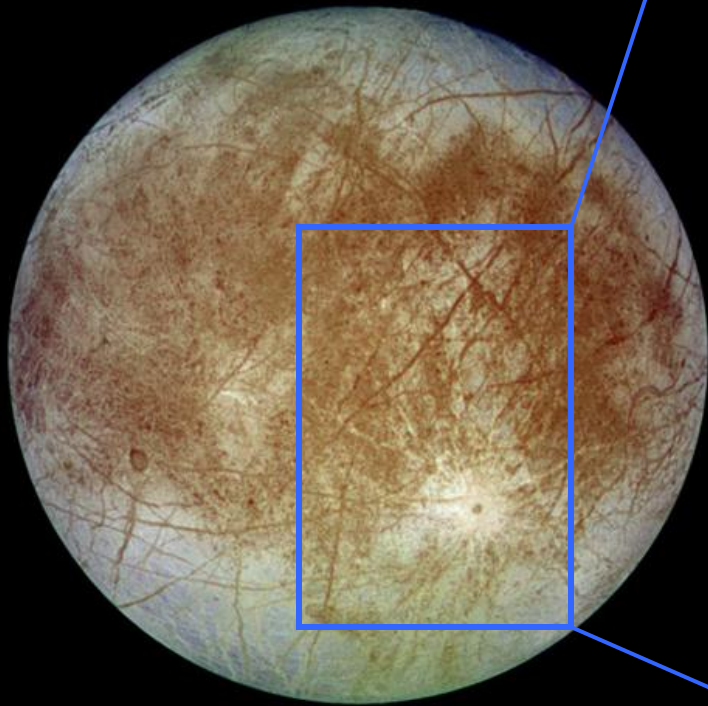
← 3000 km →

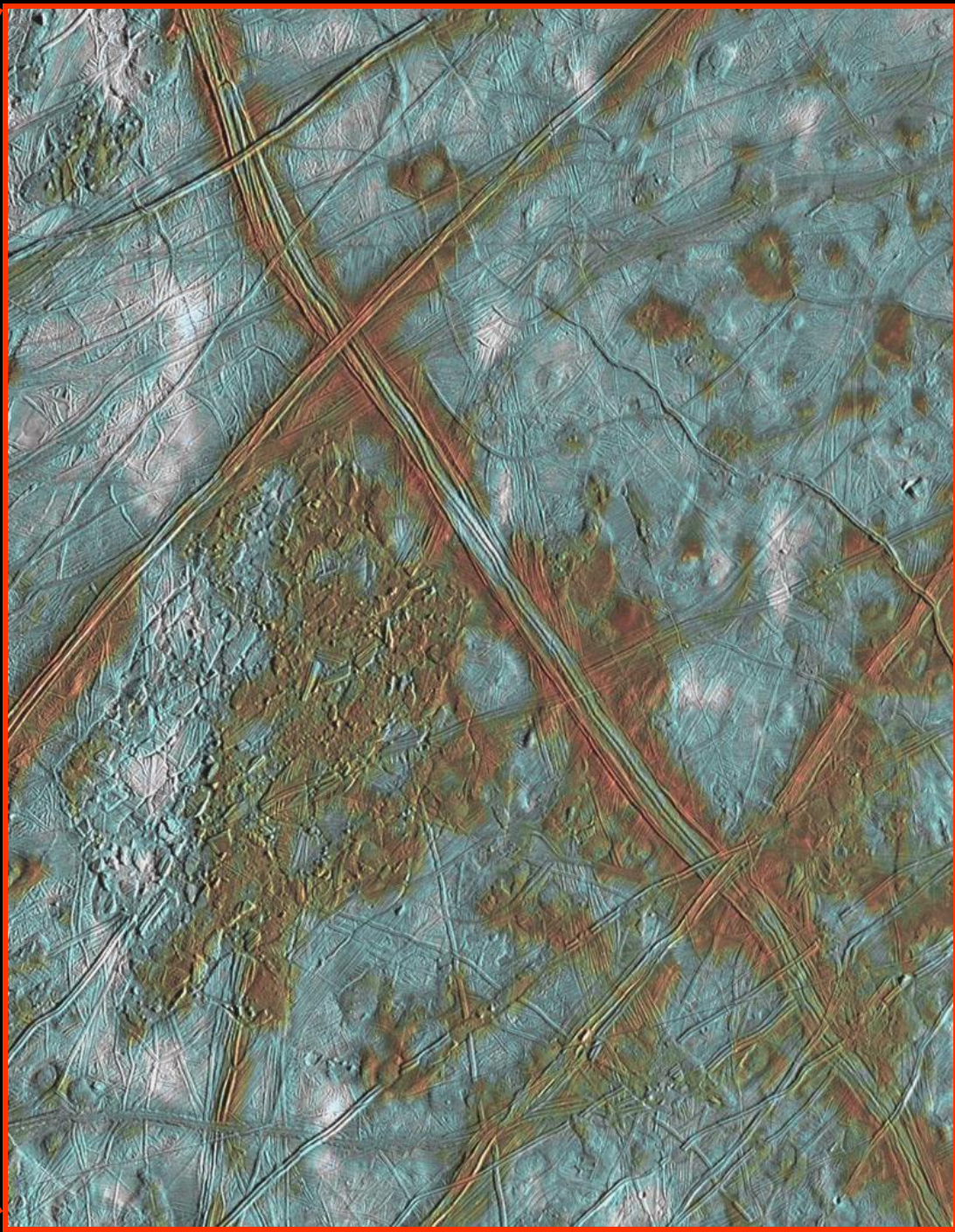
Europe.



La masse volumique (3 g/cm^3) indique que c'est un corps identique à la Terre, recouvert d'un océan de 100 km d'épaisseur (Terre 3 km), mais cet océan est gelé, car il fait au mieux -150°C en été au soleil)

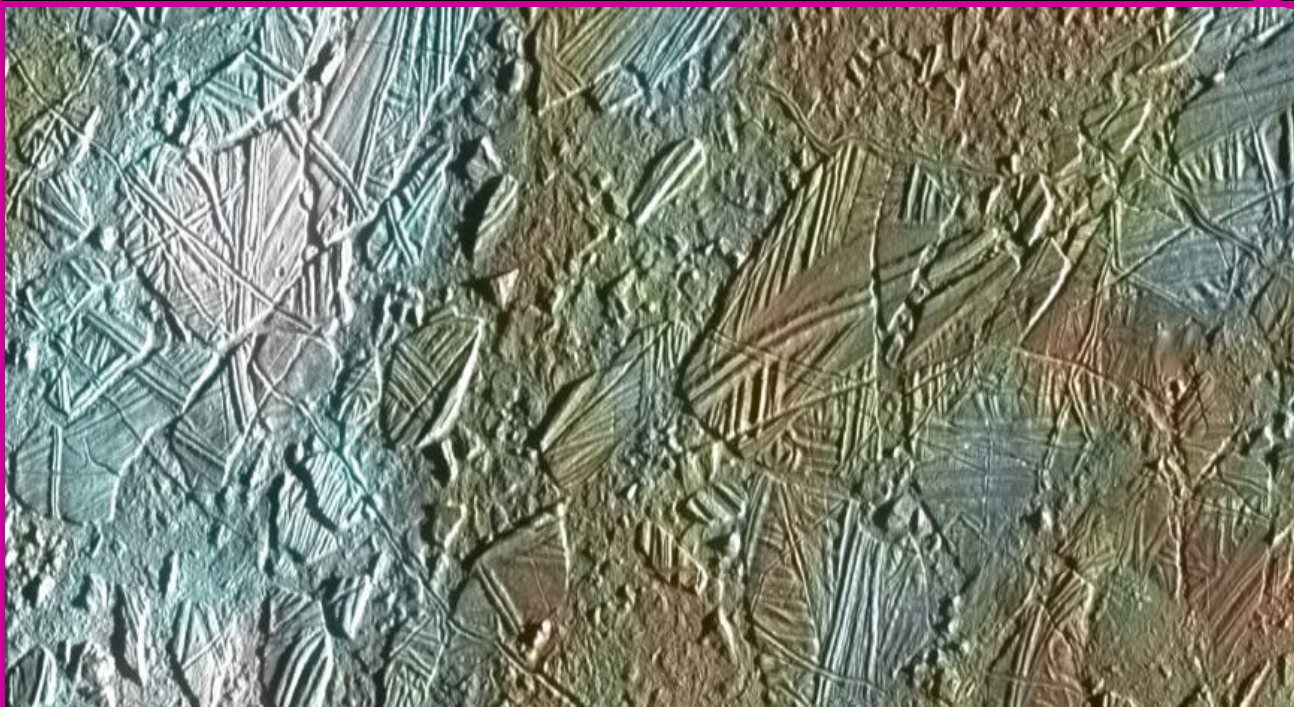
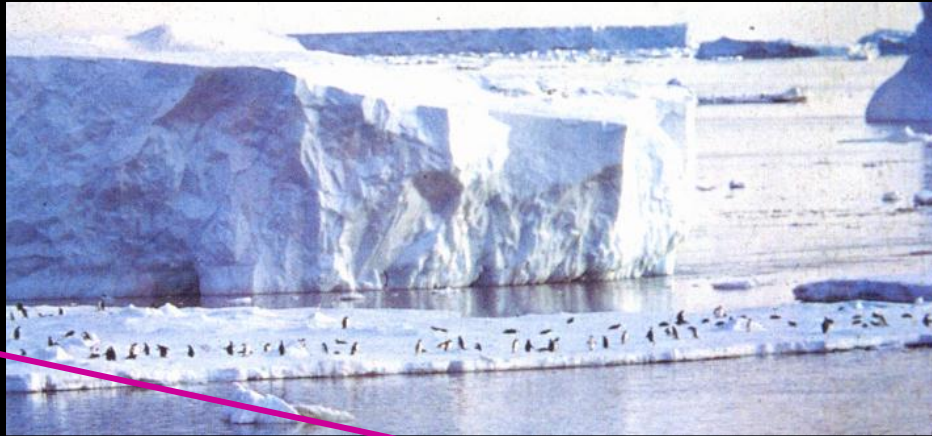
**Faisons une
série de zooms
sur Europe**





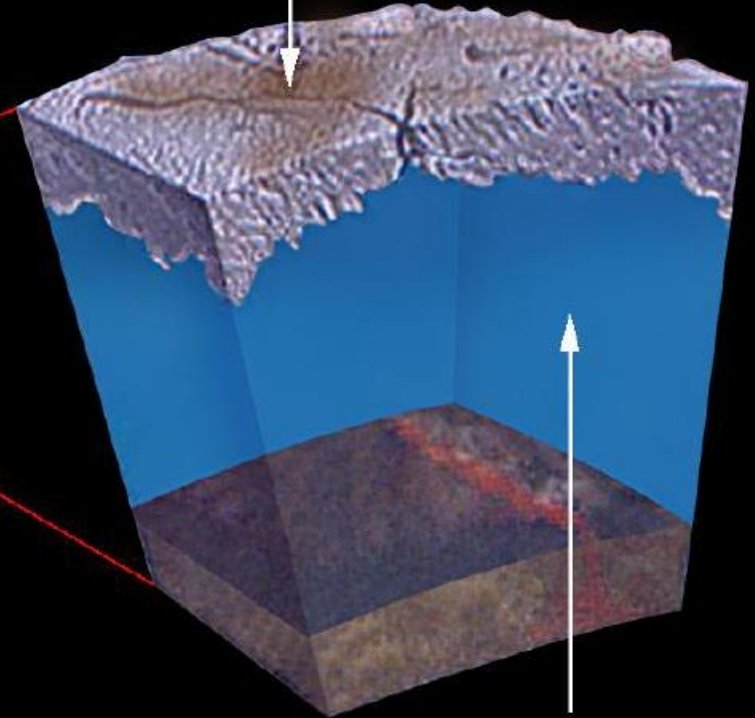
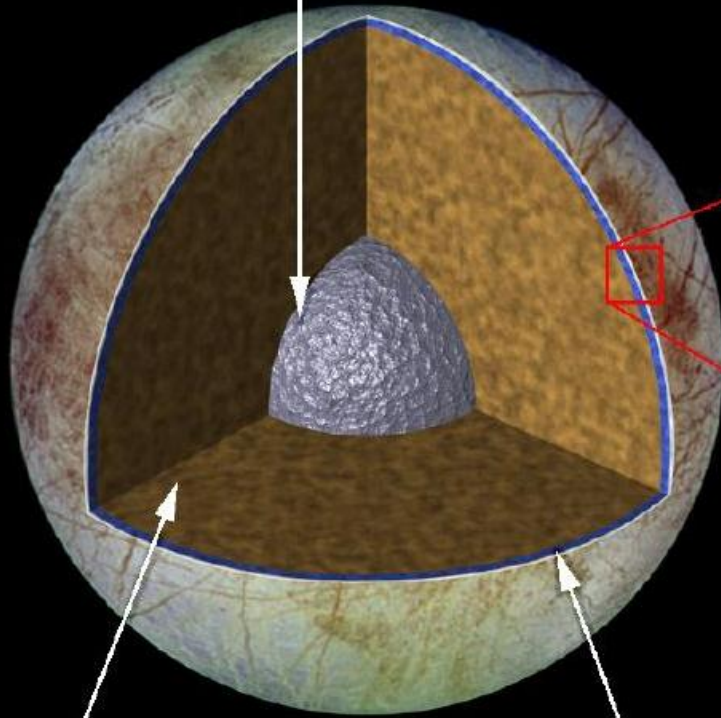
Avouez que ça ressemble !

**Archimède
permet de
calculer
l'épaisseur
de la
banquise
(~ 10 km) !**



Noyau métallique

Banquise de glace



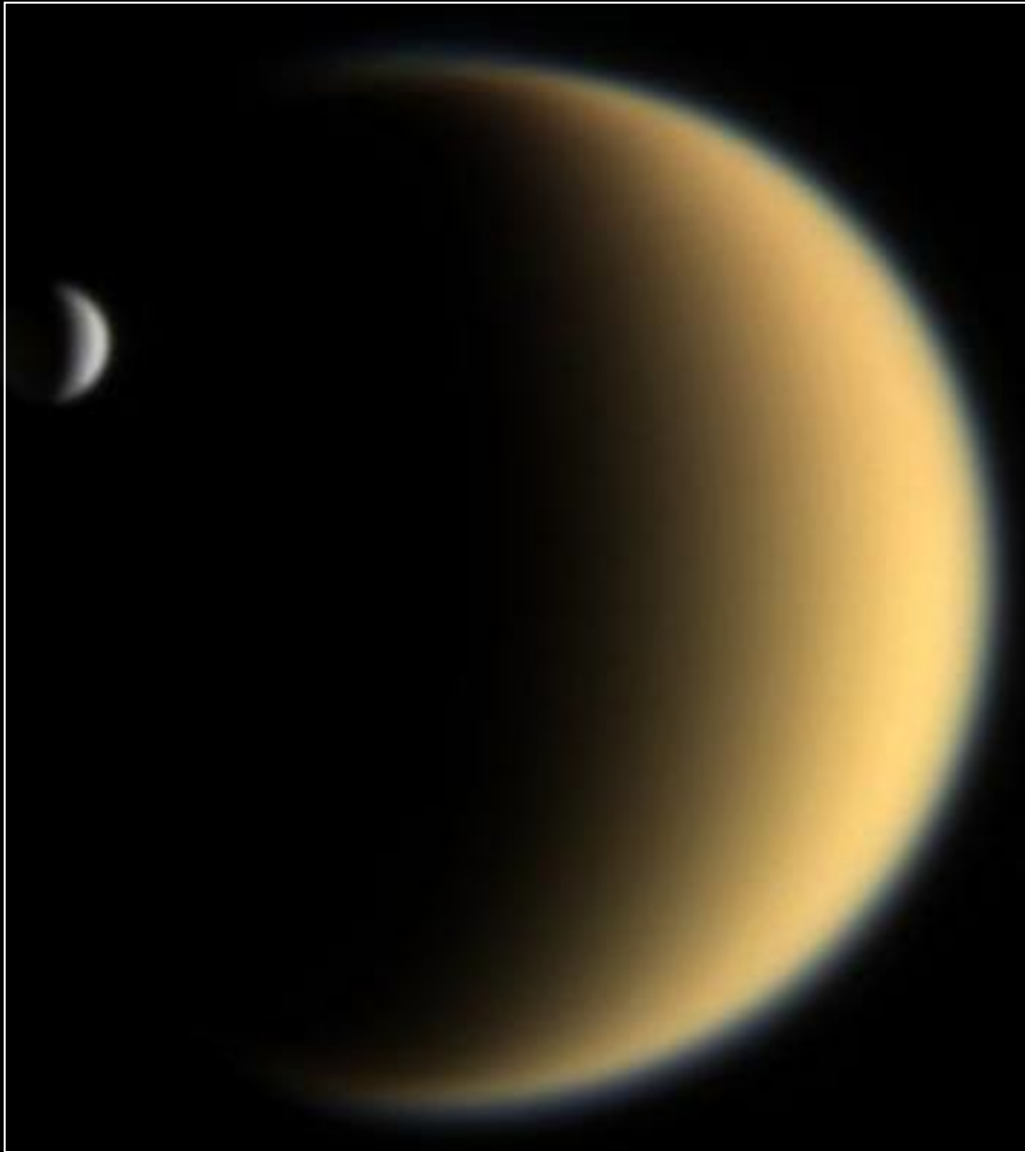
Intérieur rocheux

Couche d'H2O

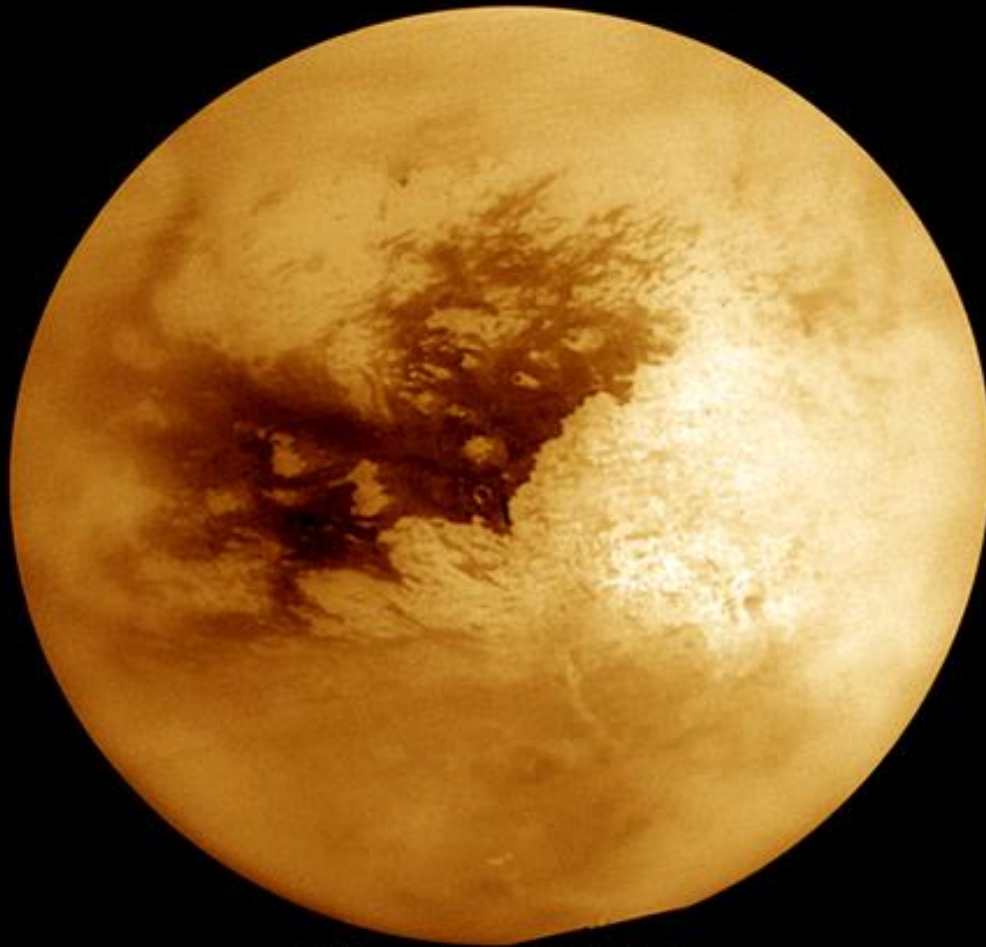
Océan liquide sous la glace

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

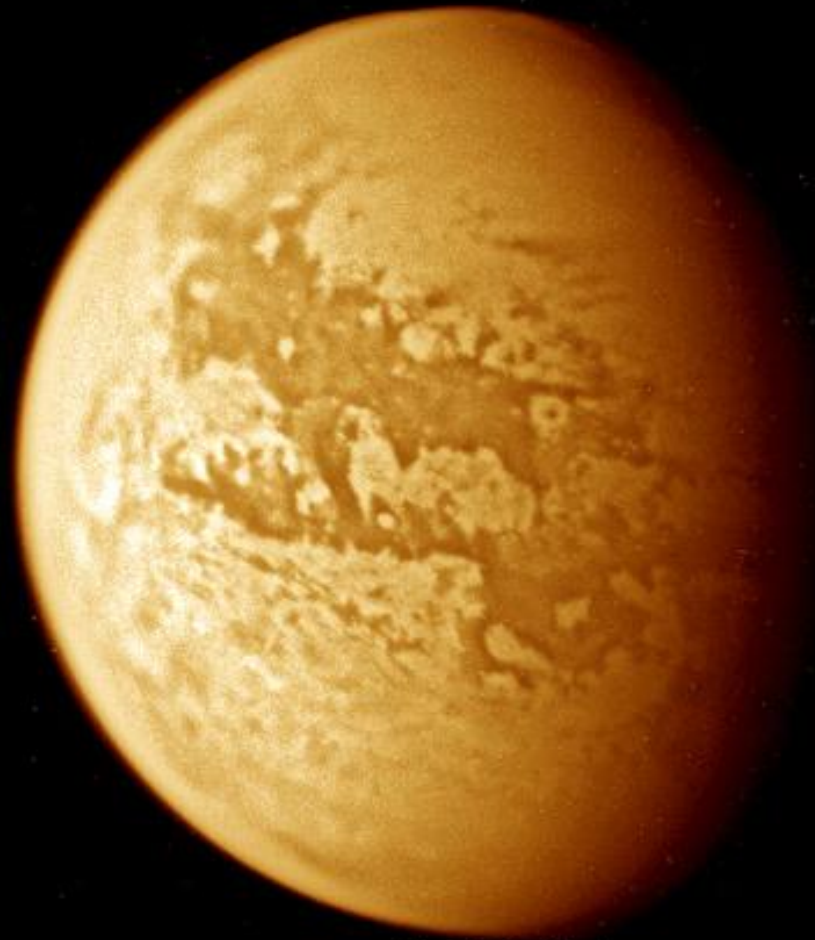
**Un exemple de « gros » satellite (de Saturne)
principalement constitué de glace :**



**Titan ($D = 5150$ km,
 $\rho = 1,9$), avec Encelade au
1er plan pour comparer
les dimensions. Titan
est le 2eme plus gros
satellite du système
solaire (après Gany-
mède, plus gros que
Mercure). C'est le seul
satellite du Système
Solaire avec une
atmosphère dense (N_2 ,
 CH_4 et aérosols de
macro - molécules organiques**



février 2005

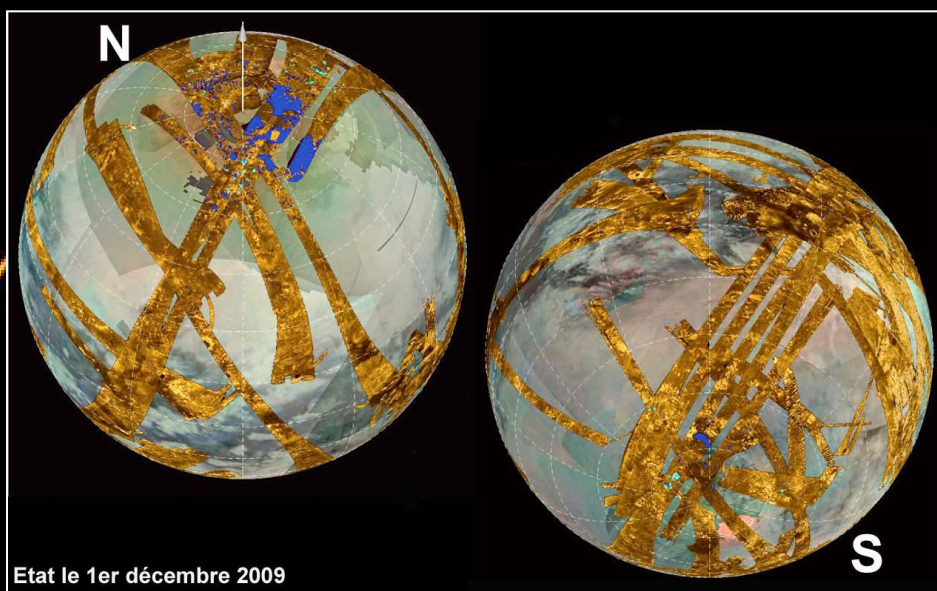


avril 2005

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

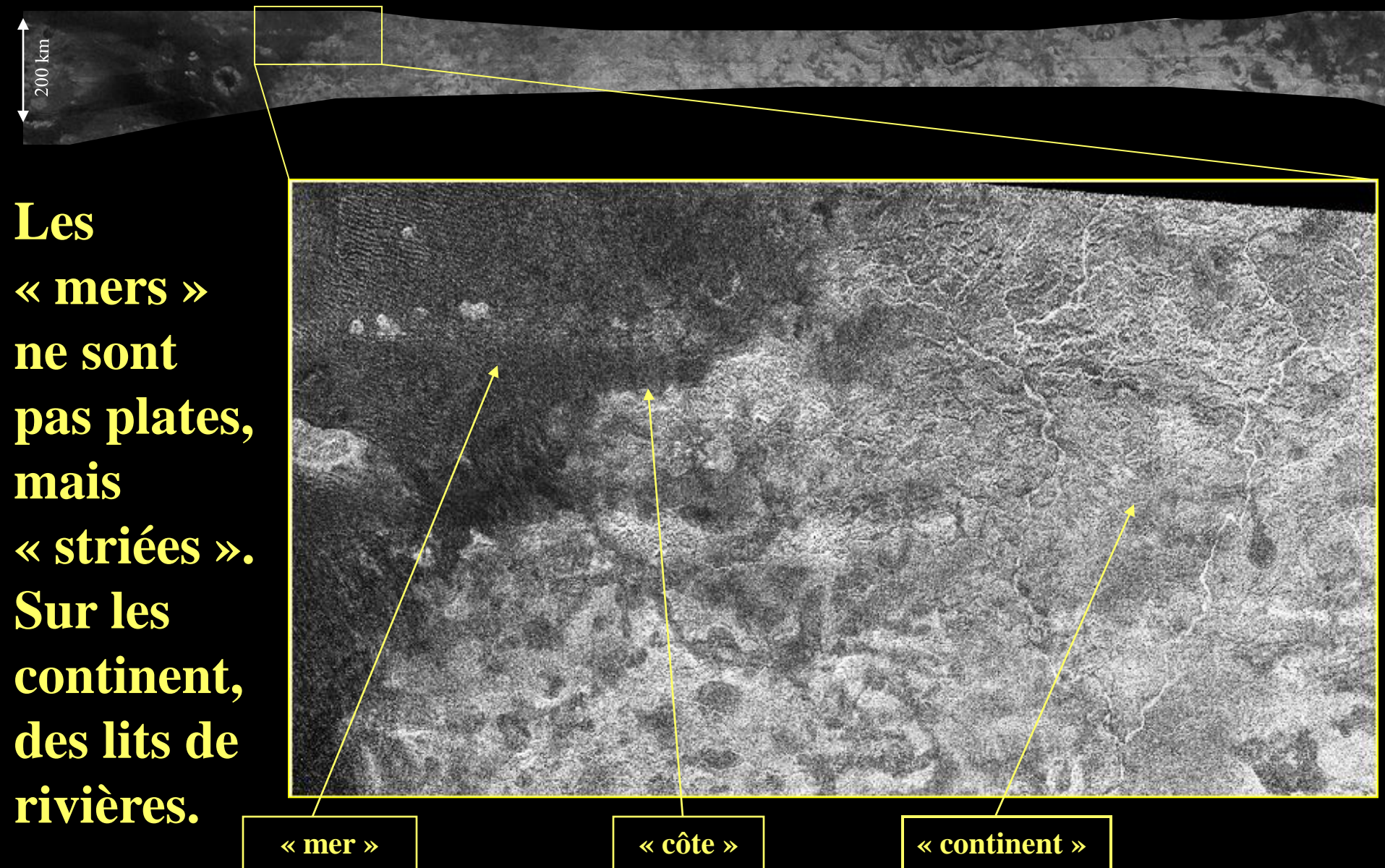
JPL

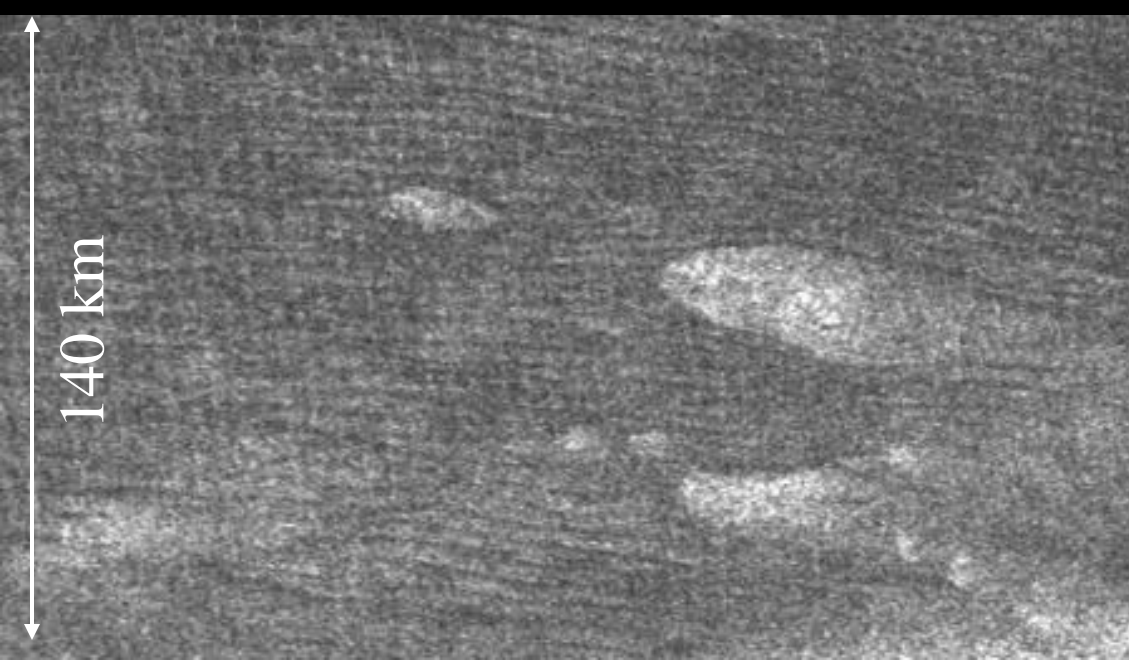
CASSINI RADAR



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

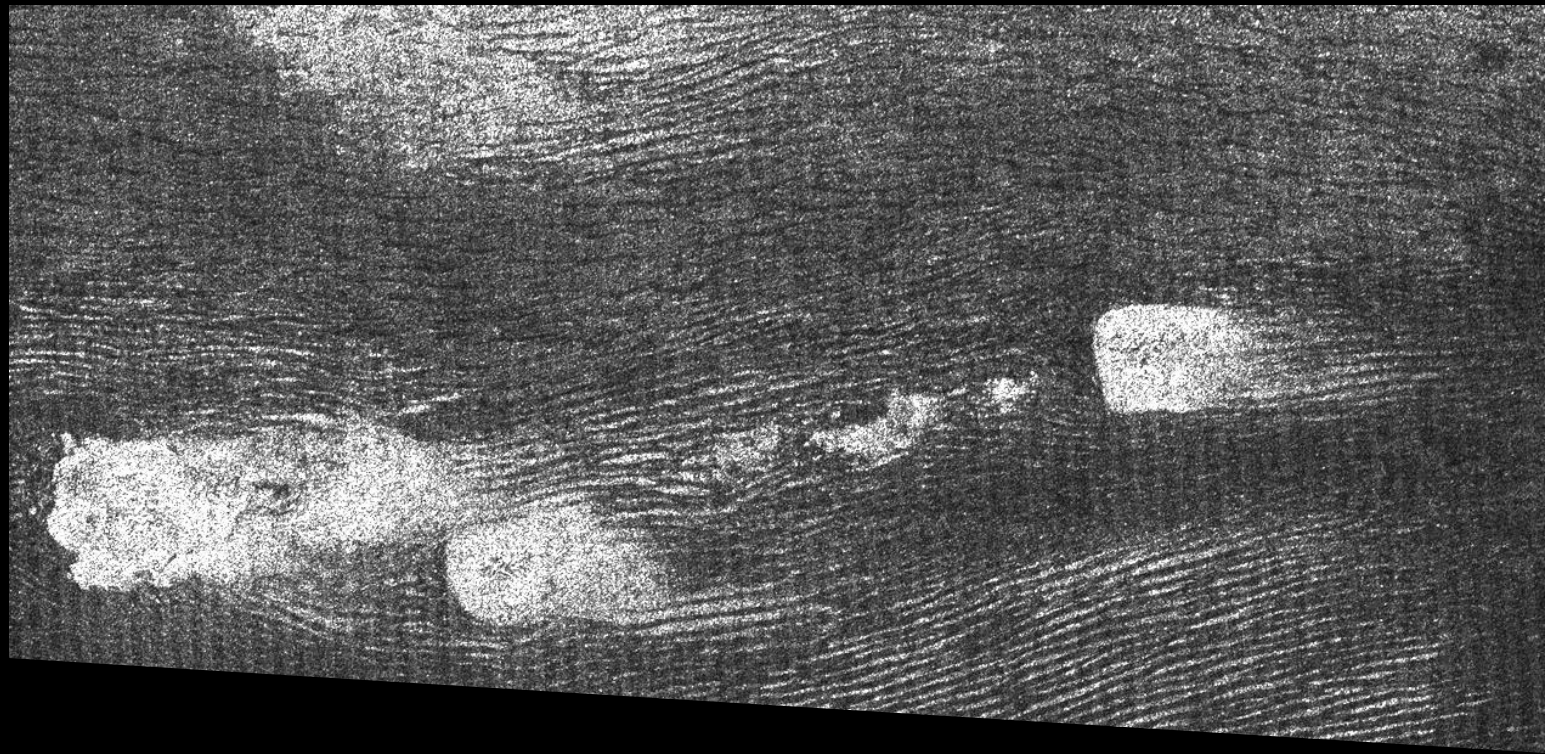
Exemple d'une bande radar (avril 2005) avec la limite « mer » en sombre et « continent » en clair

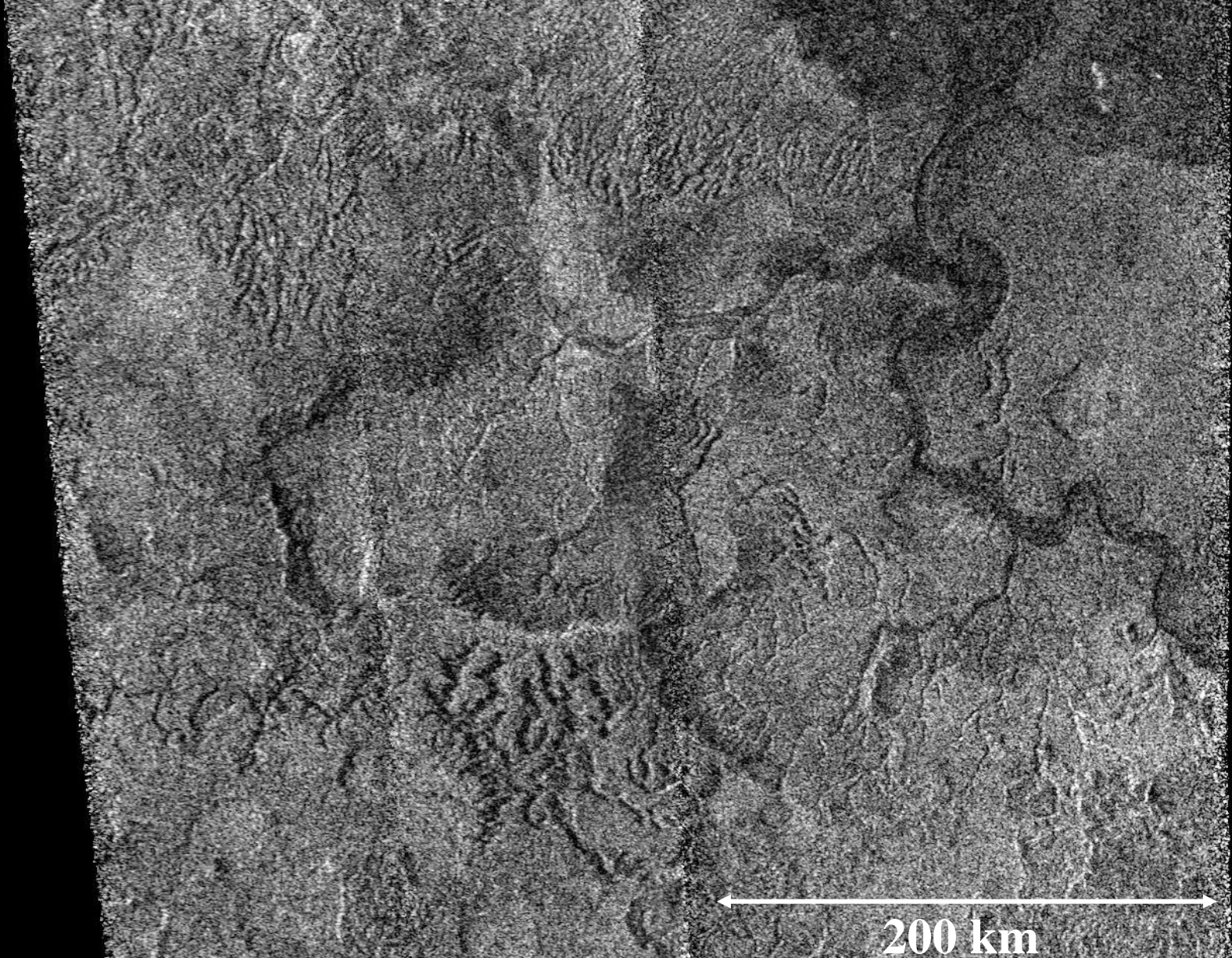




Ces stries dans les « mers », ce sont des champs de dunes. Il ne s'agit pas de mer de méthane liquide, mais de mers de sable (sable de glace ou d'hydrocarbures bien sur) !

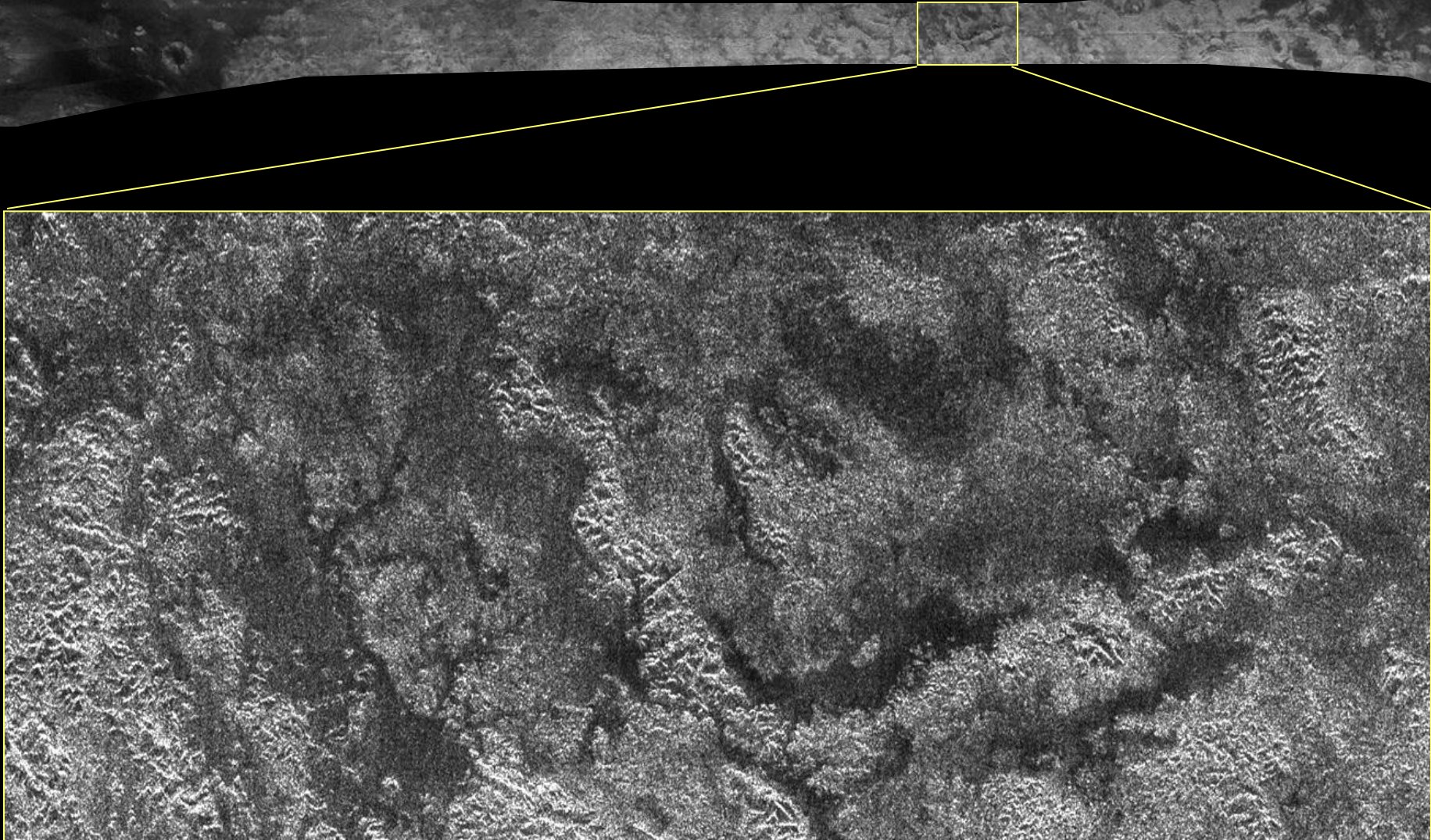
Détails dans les «mers»





**Sur les « continents, Rivières de CH₄ (ici à sec)
et méandres**

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





150 km

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



Image © 2010 DigitalGlobe

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

©2009 Google

4.98 km

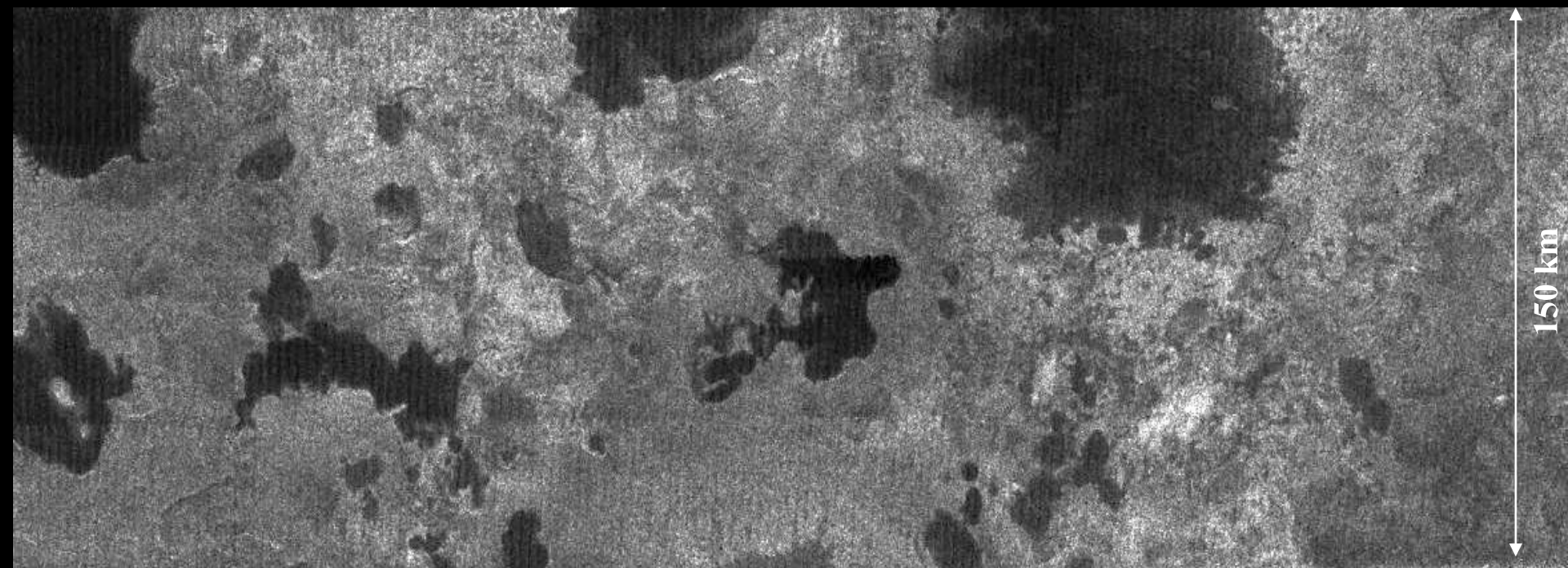
Date des images satellite : 13 sept. 2007

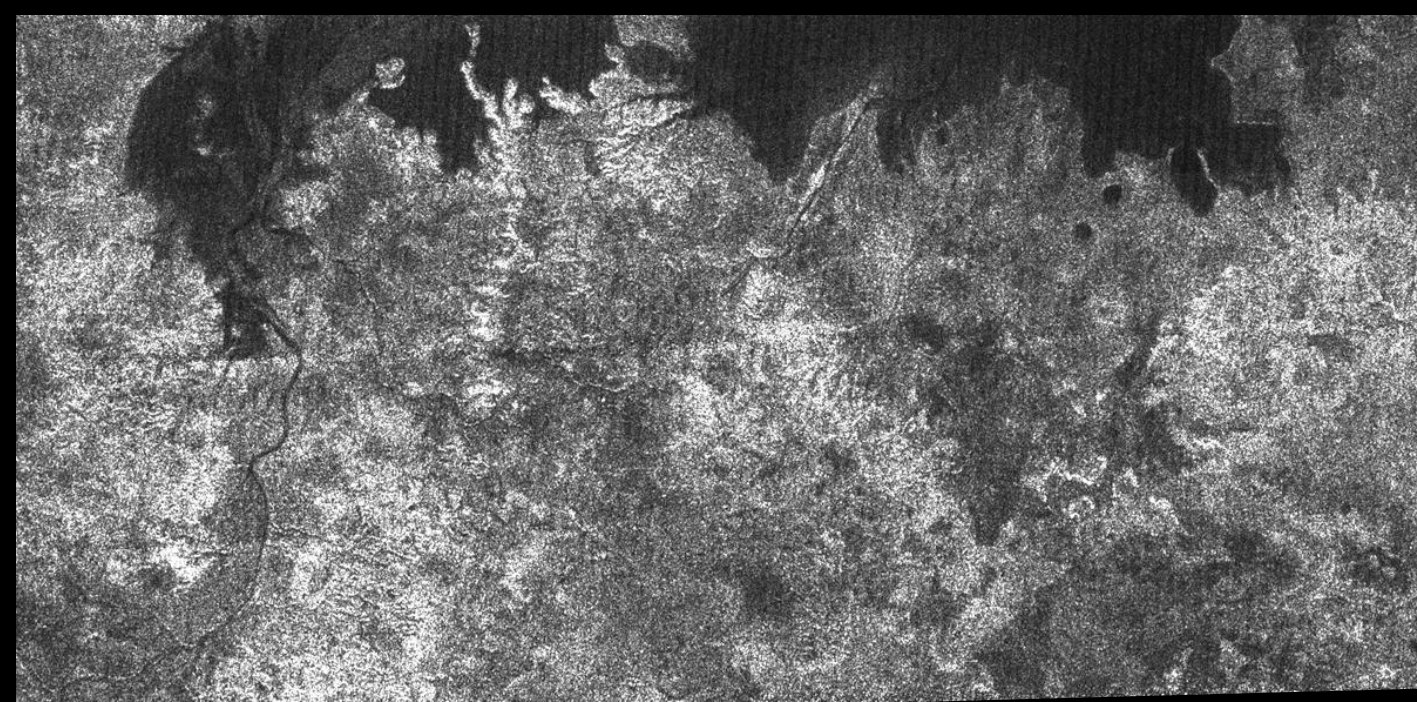
40°49'47.66" N 14°08'04.33" E élév. 138 m

Altitude 17.21 km

La même chose dans la région de Naples

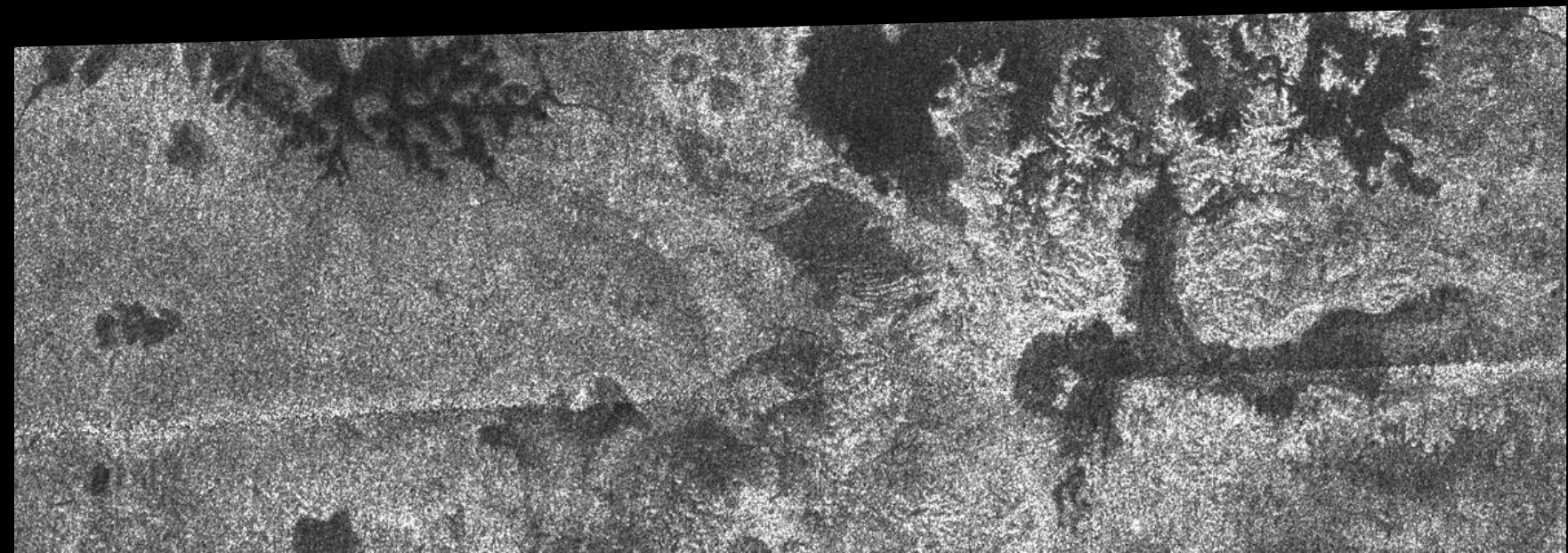
Et les survols radar de juillet et septembre 2006 (puis beaucoup d'autres depuis), au dessus du Pôle Nord plongé dans la nuit polaire, montrent de très probables lacs, lacs de méthane liquide (ou plutôt d'un mélange méthane-éthane) à -190°C .





100 km

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



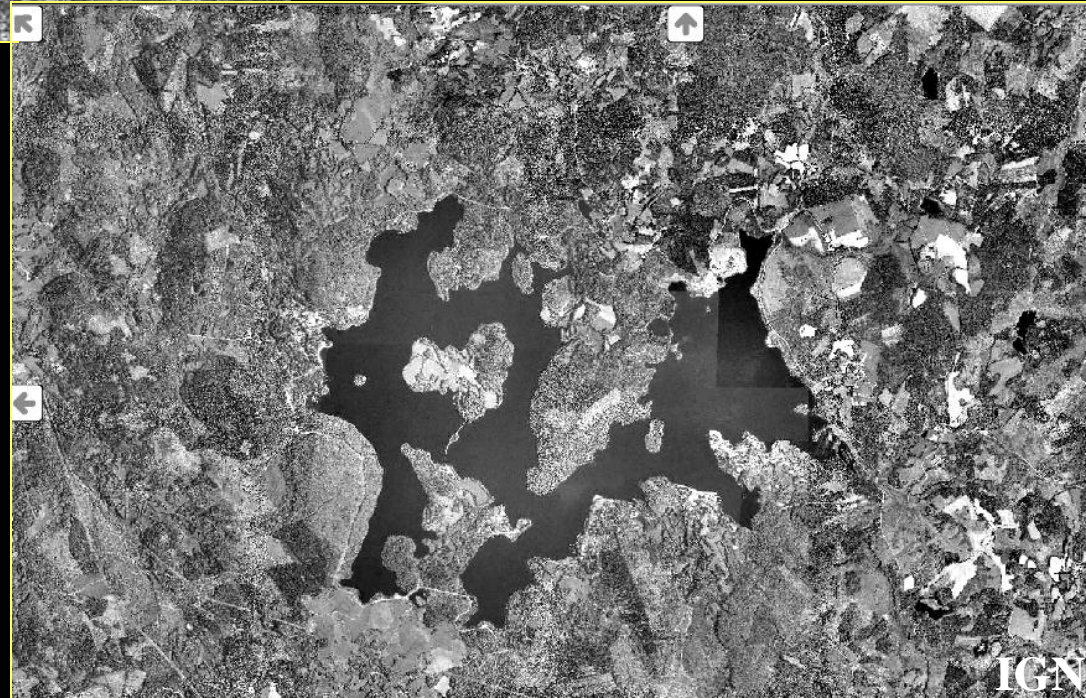
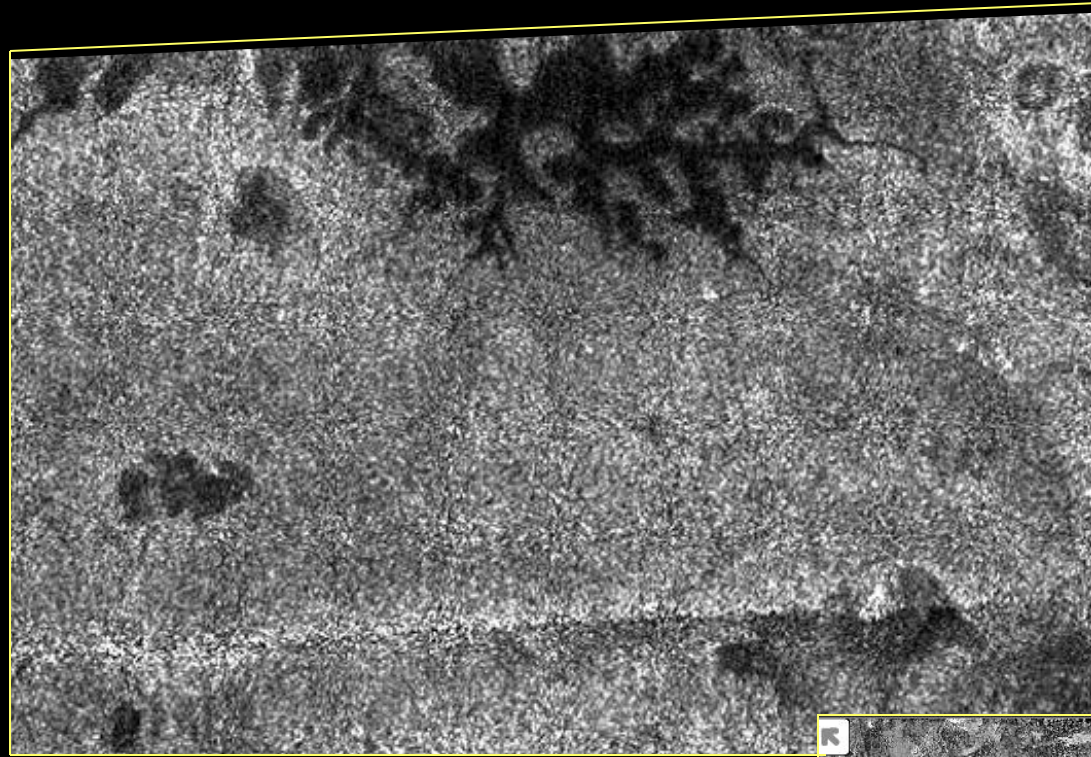


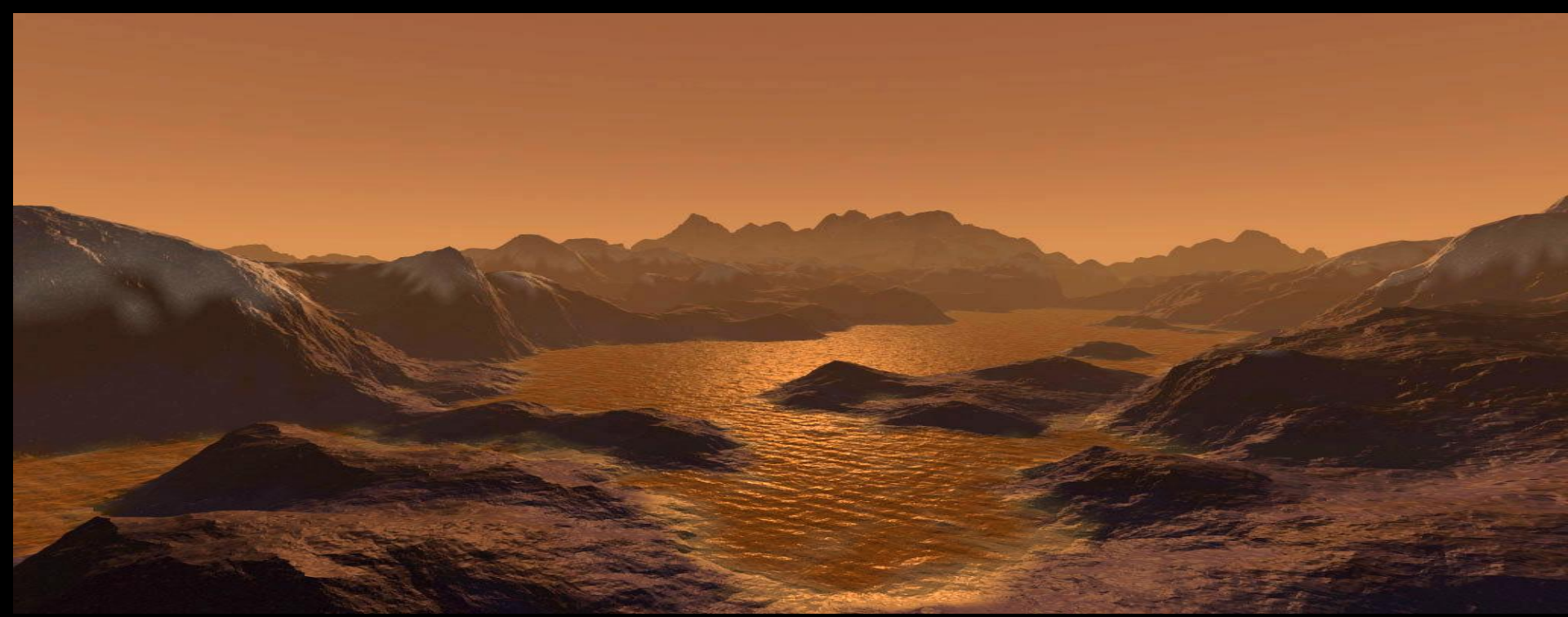
Estuaire et delta « titanien »



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


Quel est le lac titanien et le lac limousin (lac de Vassivière) ?





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

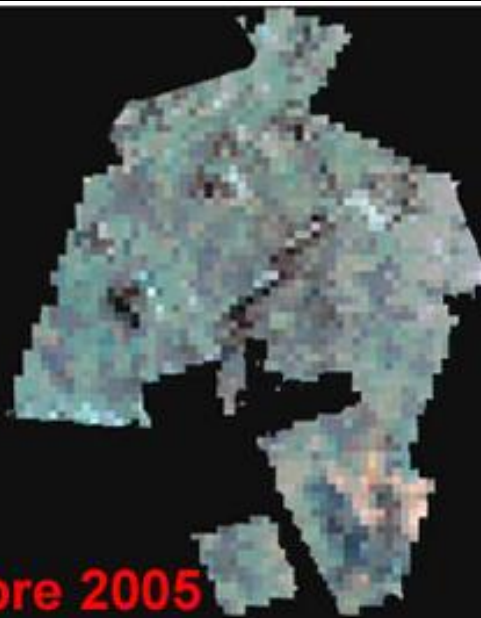
Méthane et éthane liquides étant de bons solvants organiques (non polaires il est vrai), on peut y supposer une chimie organique fort complexe, et pourquoi pas plus?

A circular infrared (IR) image showing a bright sun reflecting off a smooth surface, likely a polar lake. The sun is a small, bright white-yellow spot at the top center of the circle. The reflection is a larger, glowing yellow-orange arc that curves across the top and sides of the circle. The background is dark, representing the surrounding environment.

**Depuis 1 ans,
c'est le printemps
au nord, et le
soleil éclaire le
pôle, régions des
lacs. Voici une
vue (IR) prise le 8
juillet 2009 où
l'on voit le soleil
se réfléchir sur la
surface lisse du
plus grand de ces
lacs polaires.**

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

Region 2



27 octobre 2005

500 km

Region 2



15 janvier 2006

500 km

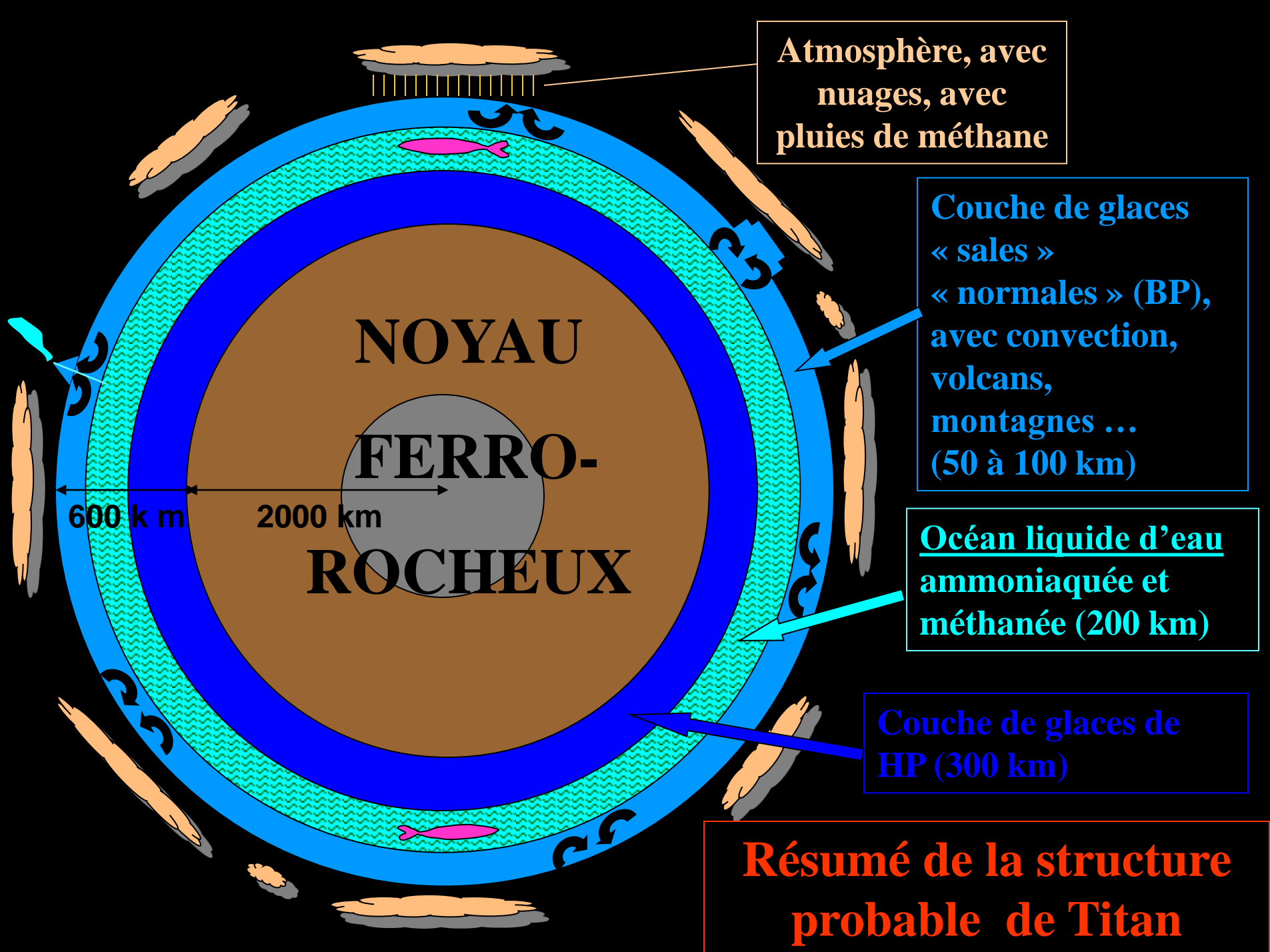
Region 2



18 mars 2006

500 km

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



Atmosphère, avec nuages, avec pluies de méthane

Couche de glaces « sales » « normales » (BP), avec convection, volcans, montagnes ... (50 à 100 km)

Océan liquide d'eau ammoniacuée et méthanée (200 km)

Couche de glaces de HP (300 km)

Résumé de la structure probable de Titan

De la glace en surface, normal, il fait -200°C .

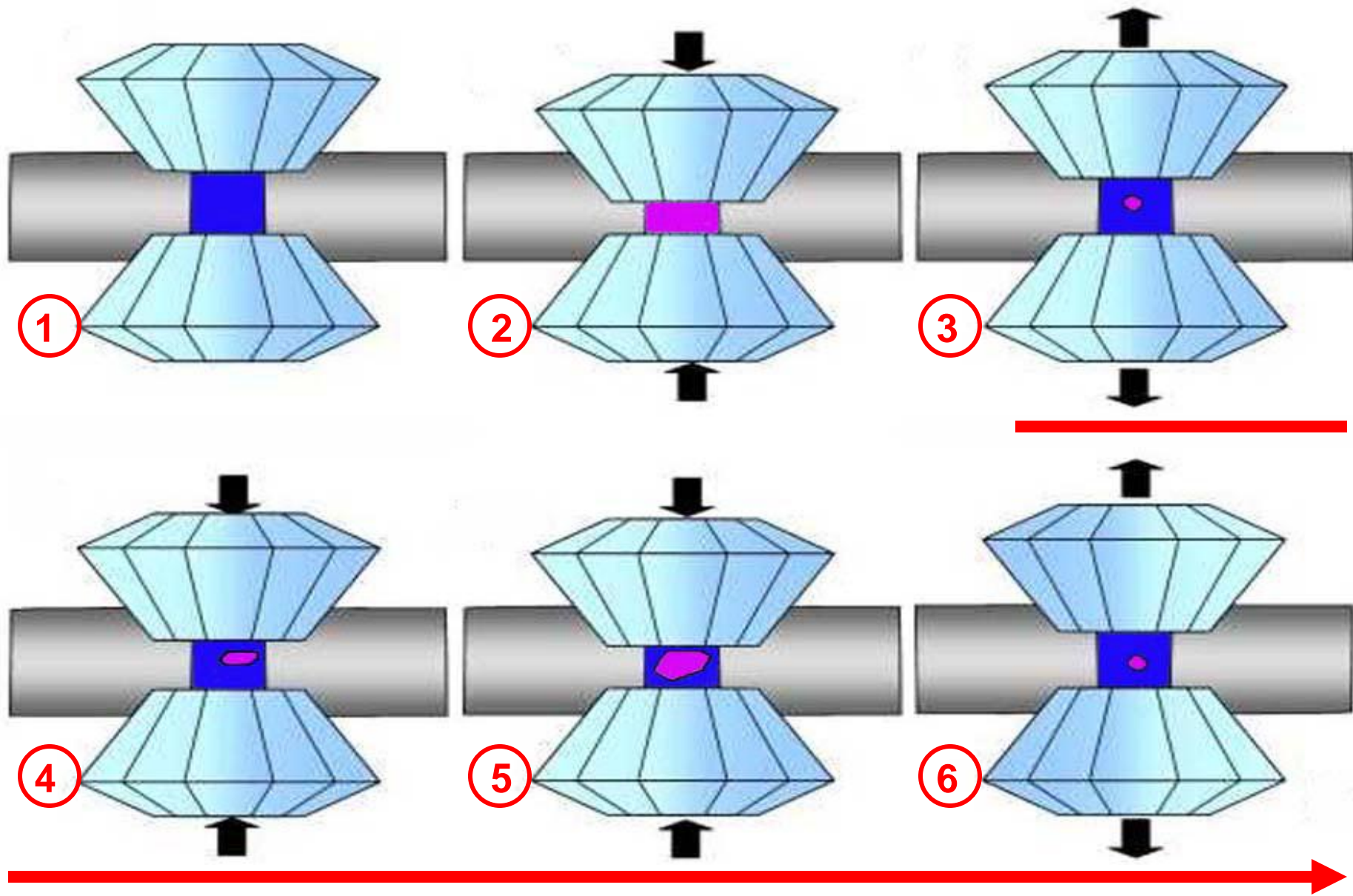
**En profondeur, il fait plus chaud, l'eau est liquide.
Toujours normal !**

**Mais pourquoi une nouvelle couche de glace
encore plus en profondeur alors qu'il fait encore
plus chaud ?**

A cause de la pression !

(voir film)

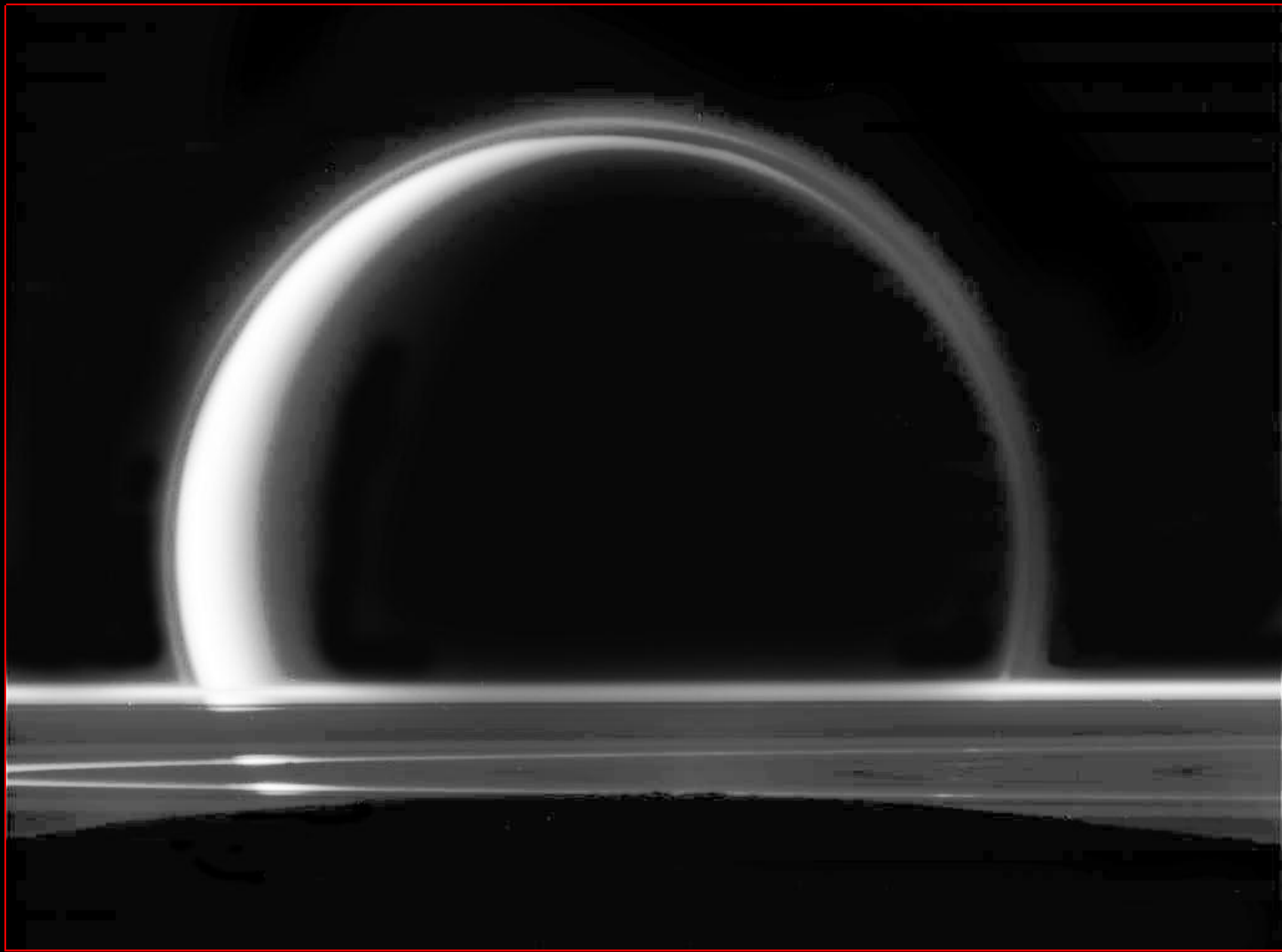




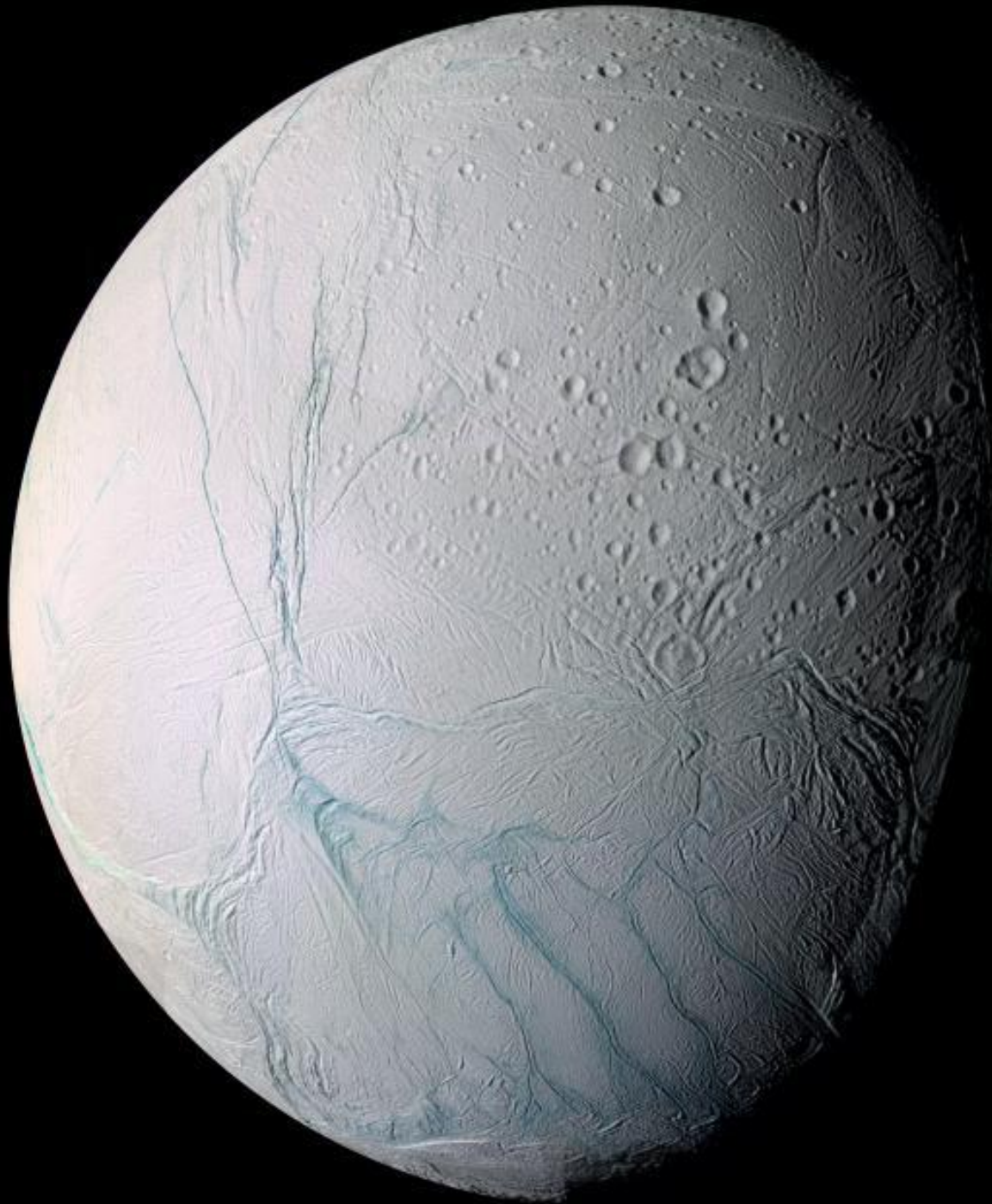
Principe du film sur la cristallisation de la glace sous pression. Le film concerne les étapes 3 et suivantes.



**Et voici un
quartier
d'Encelade
($D = 510$ km),
dont la face
sombre est
bien éclairée
par la lumière
cendrée
venant de
Saturne**

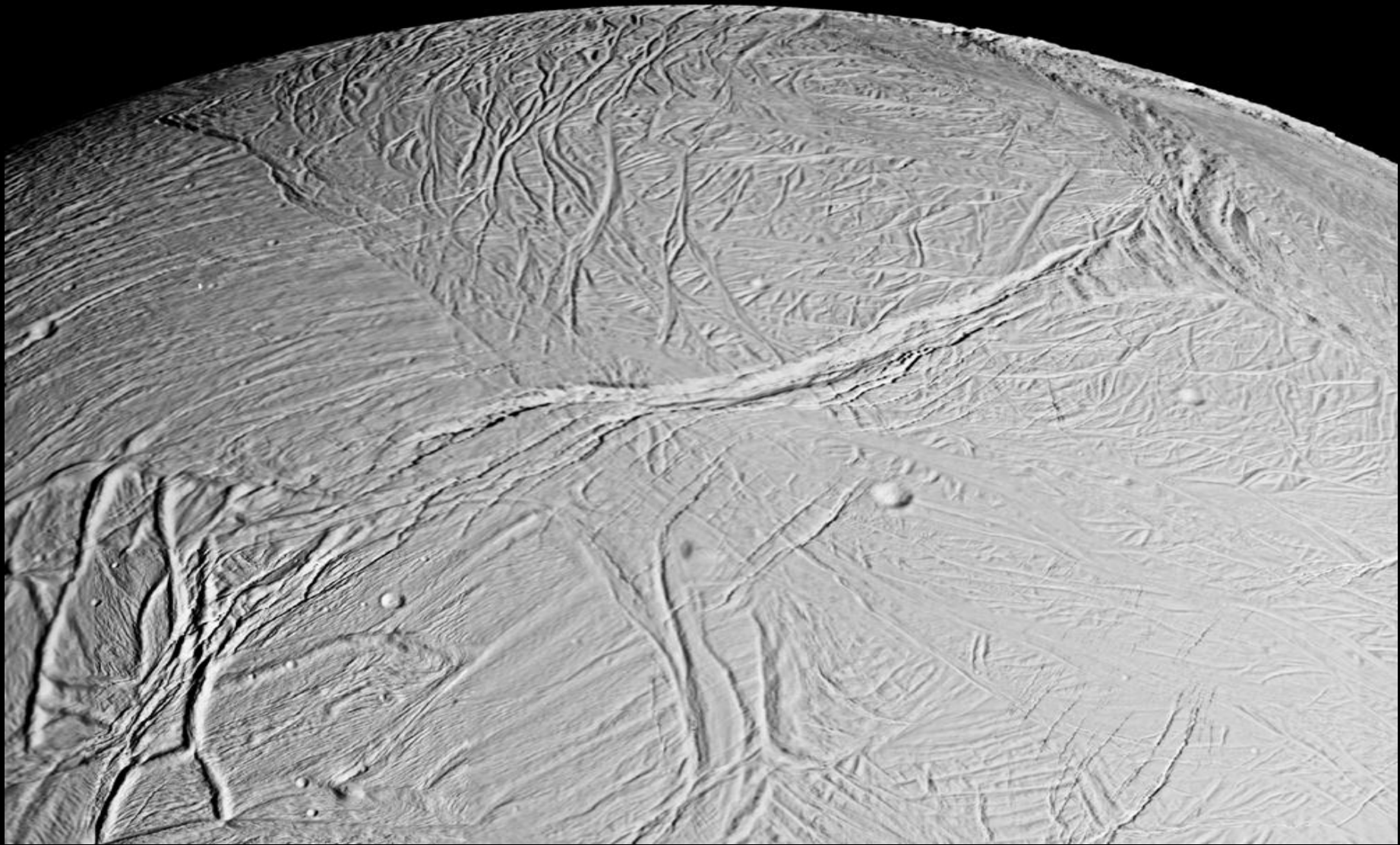


Une image étonnante : au tout 1er plan, Encelade (coté nuit) masquant partiellement les anneaux, qui eux même masquent partiellement Titan



**Pour vous rappeler la
petite taille
d'Encelade**

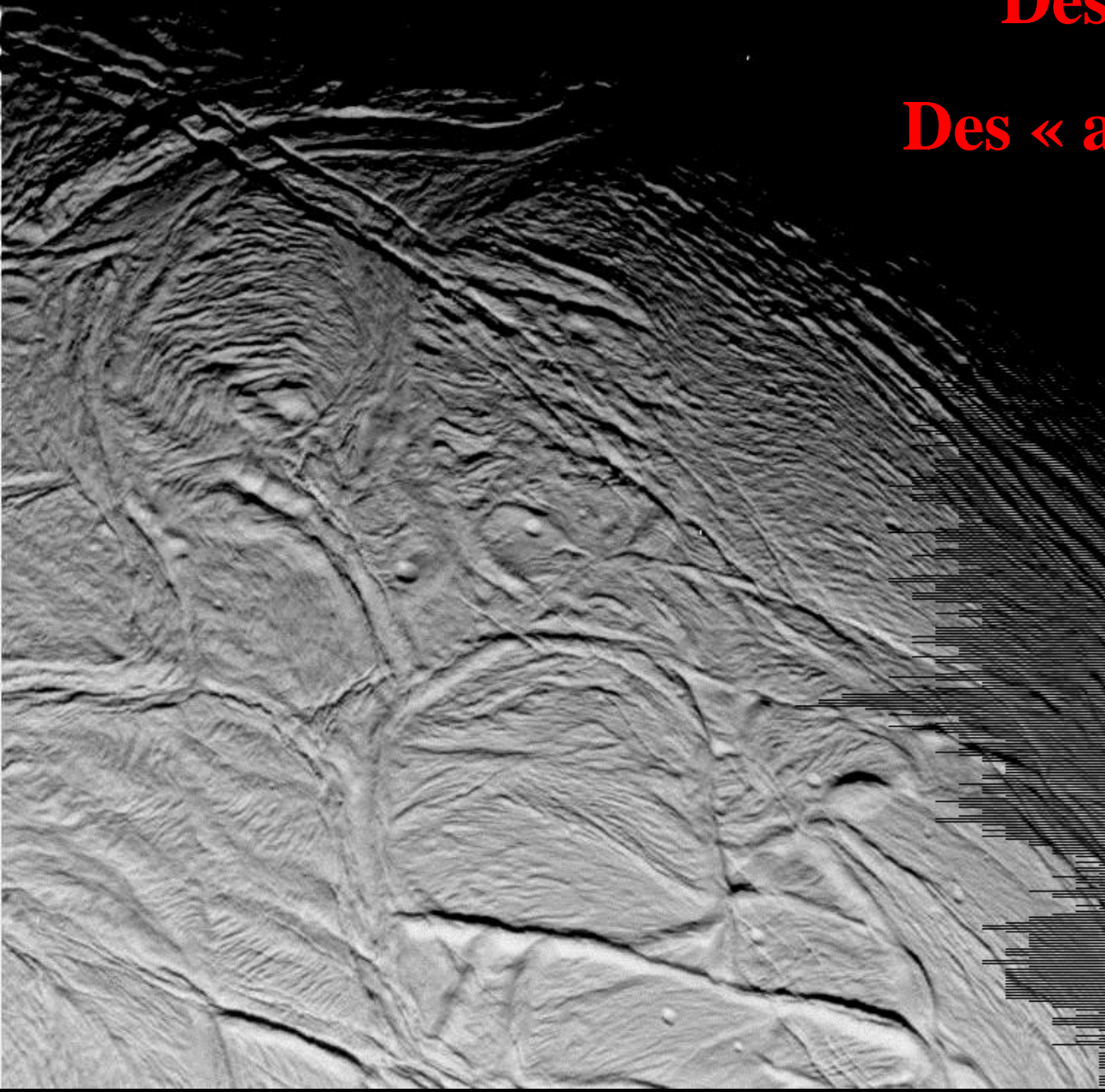


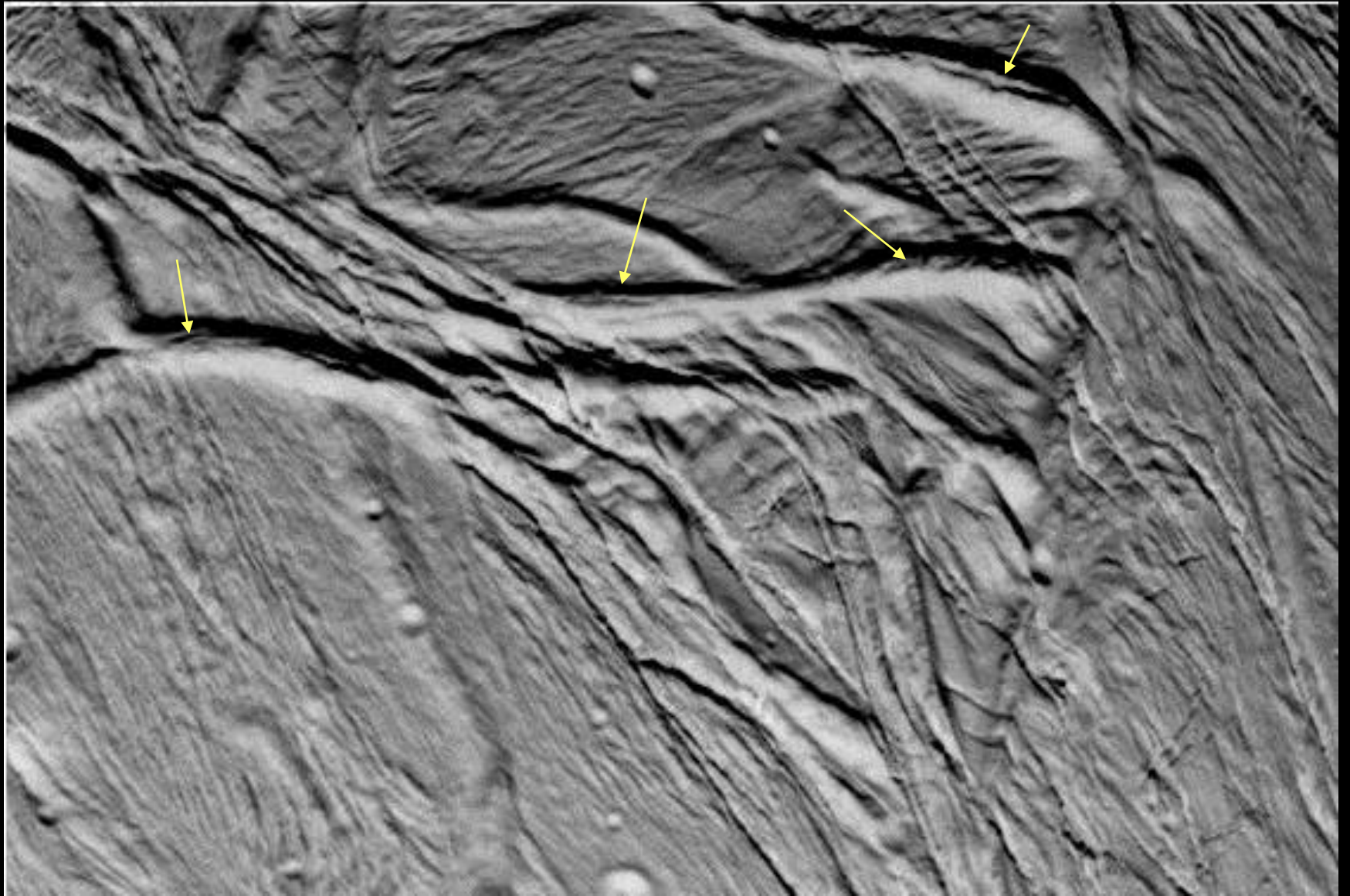


**Des images rapprochées du 1er survol (02 / 2005).
Quel satellite, quelle activité !!**

Des giga-rides .

Des « anticlinaux » ??

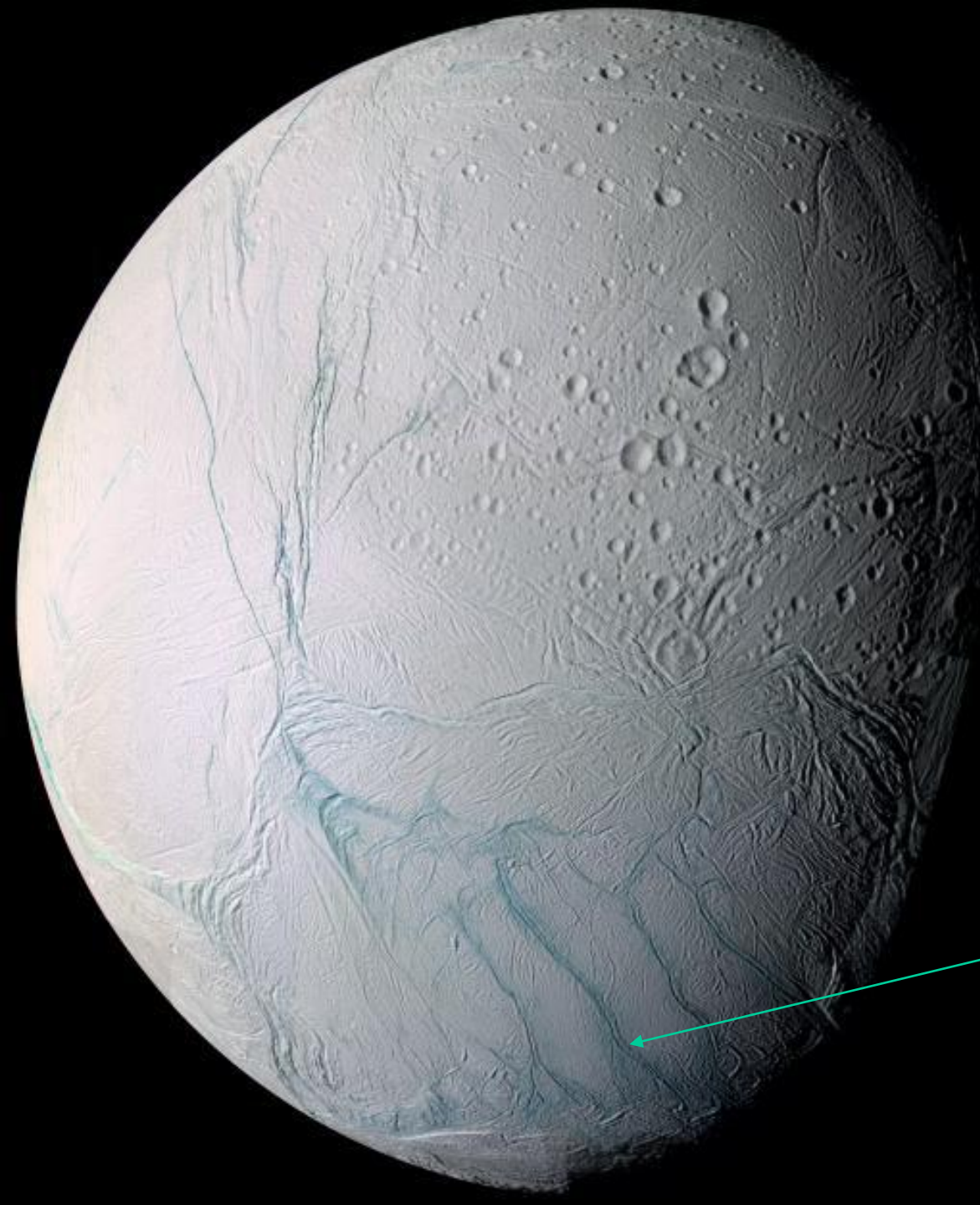




Détail de ces giga-rides. Parfois, il y a une fracture sommitale.

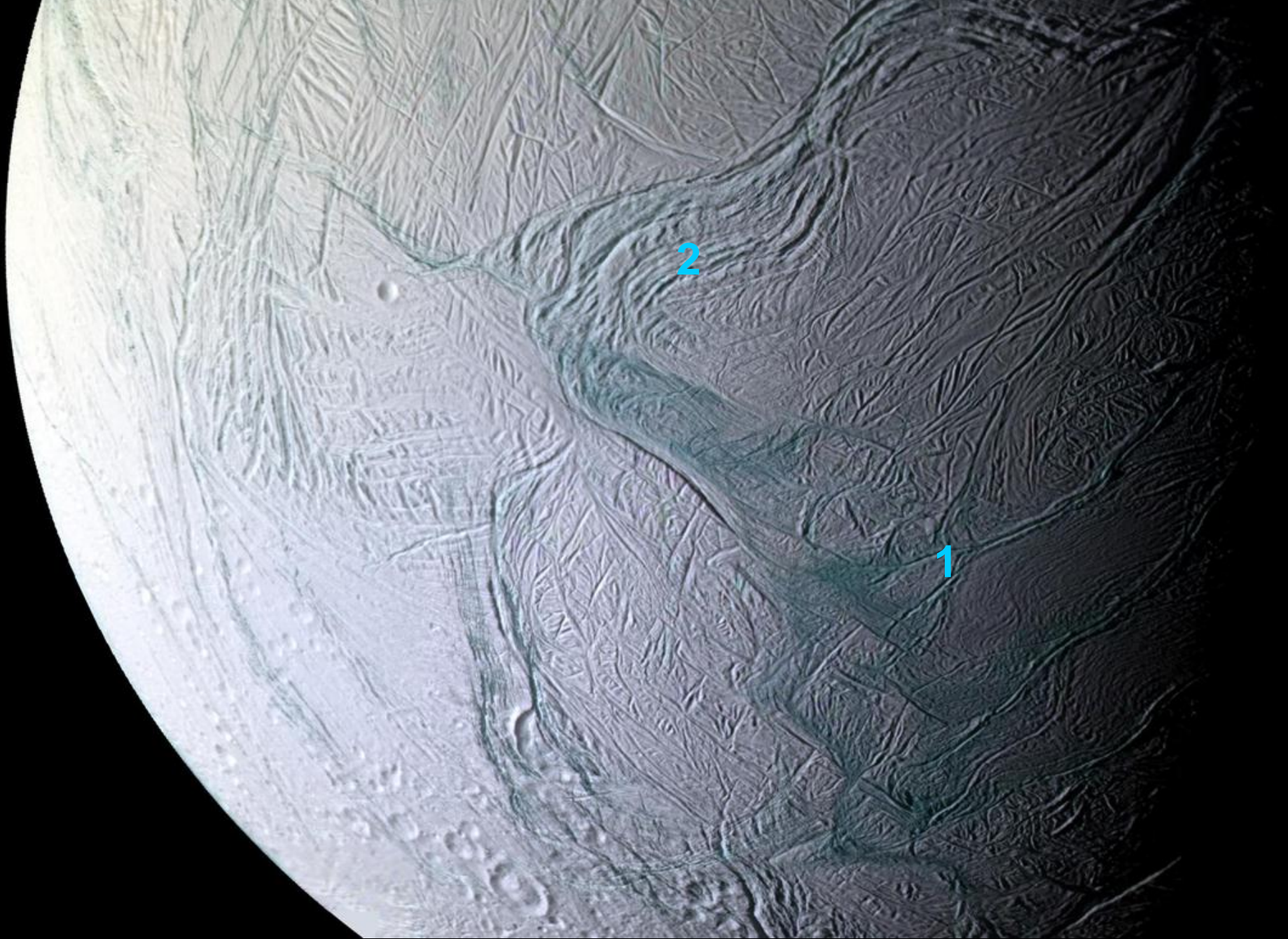


**Cela ressemble à de giga-
« rides de pression » dont
voici 2 mini-équivalents
terrestres, à Hawaï et en
Antarctique**

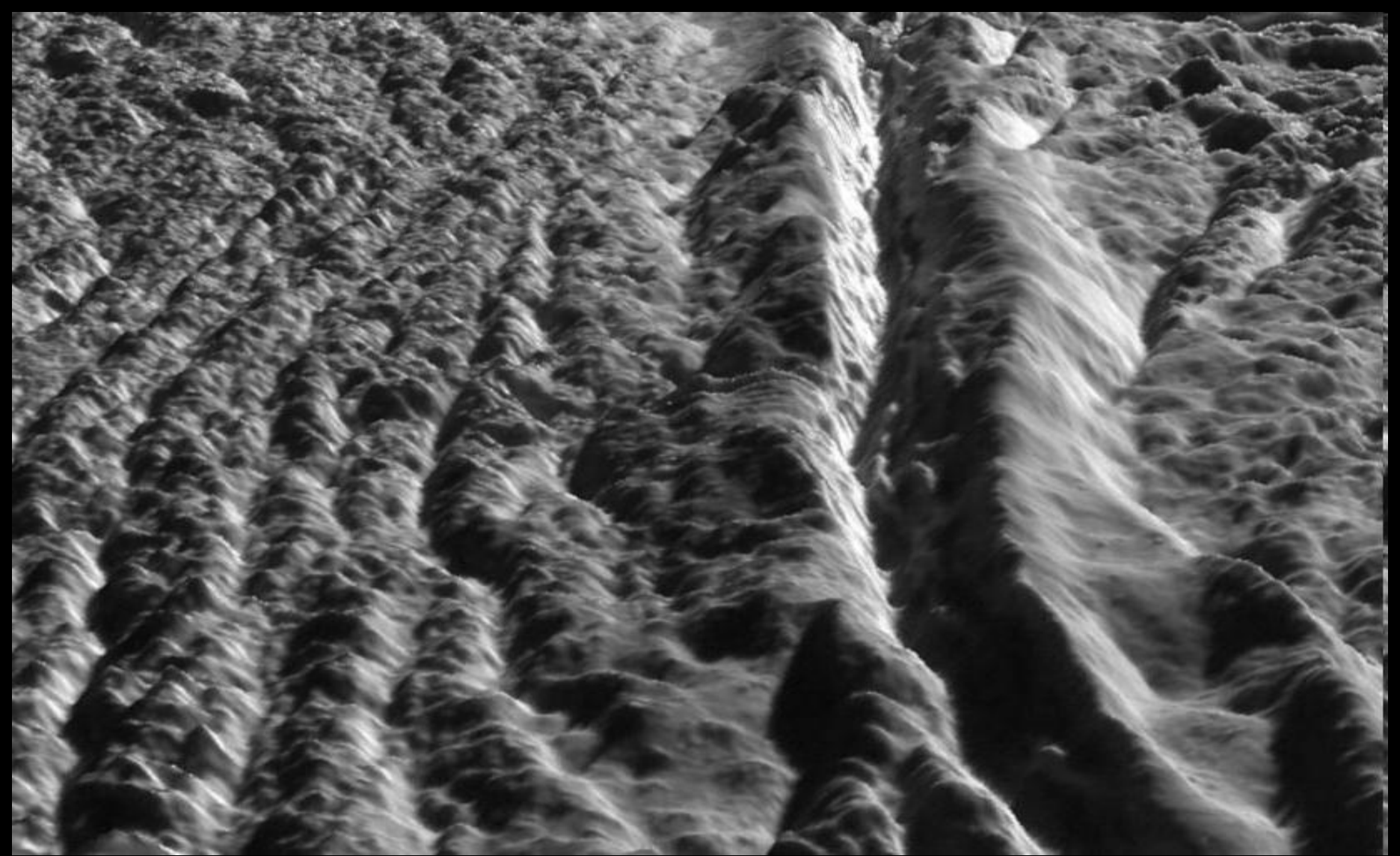


**Le 14 juillet
2005, Cassini a
survolé
Encelade par le
sud**

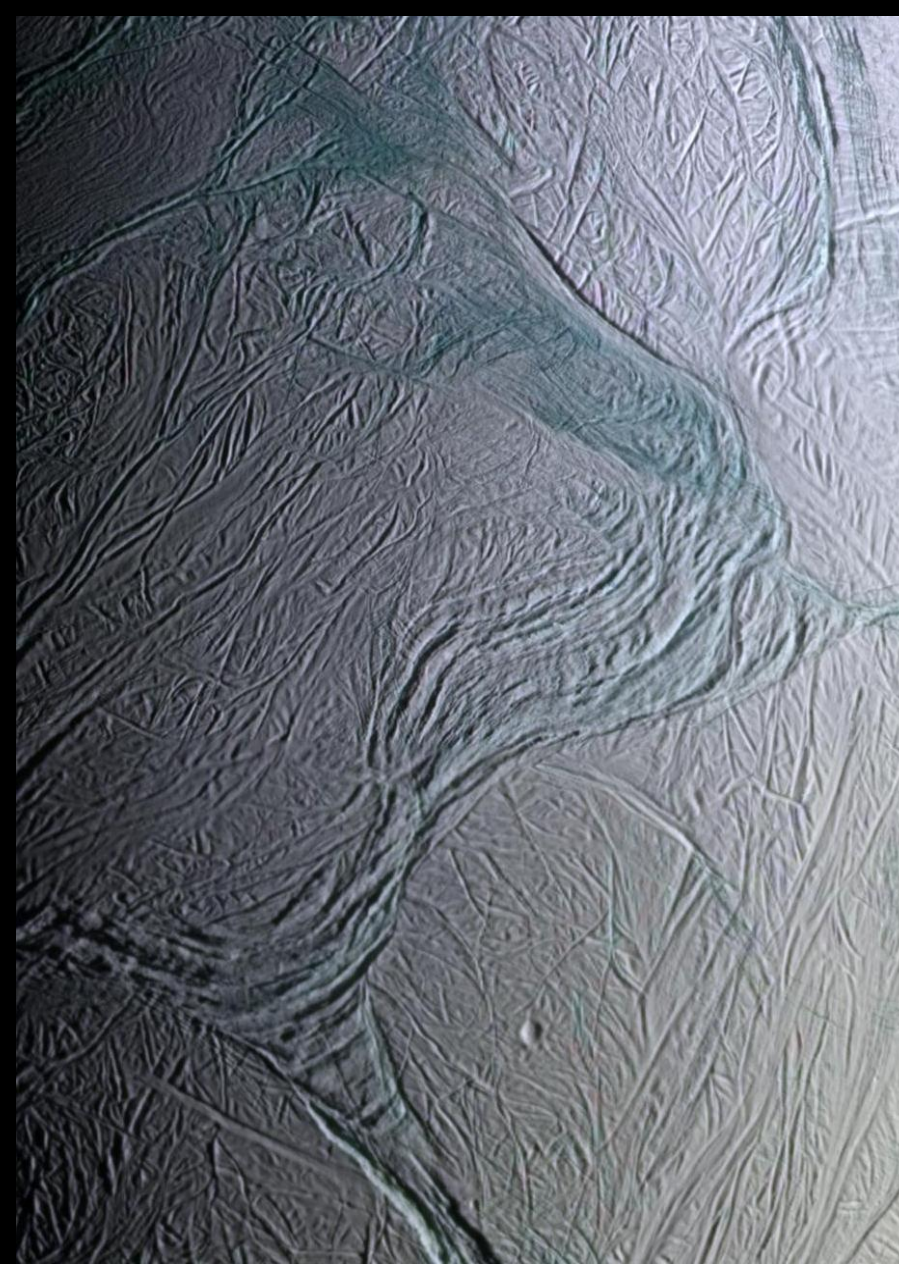
**Le Pôle Sud, région
avec moins de cratères
et encore plus
« tourmentée » que le
reste, avec des
« rayures de tigre »**



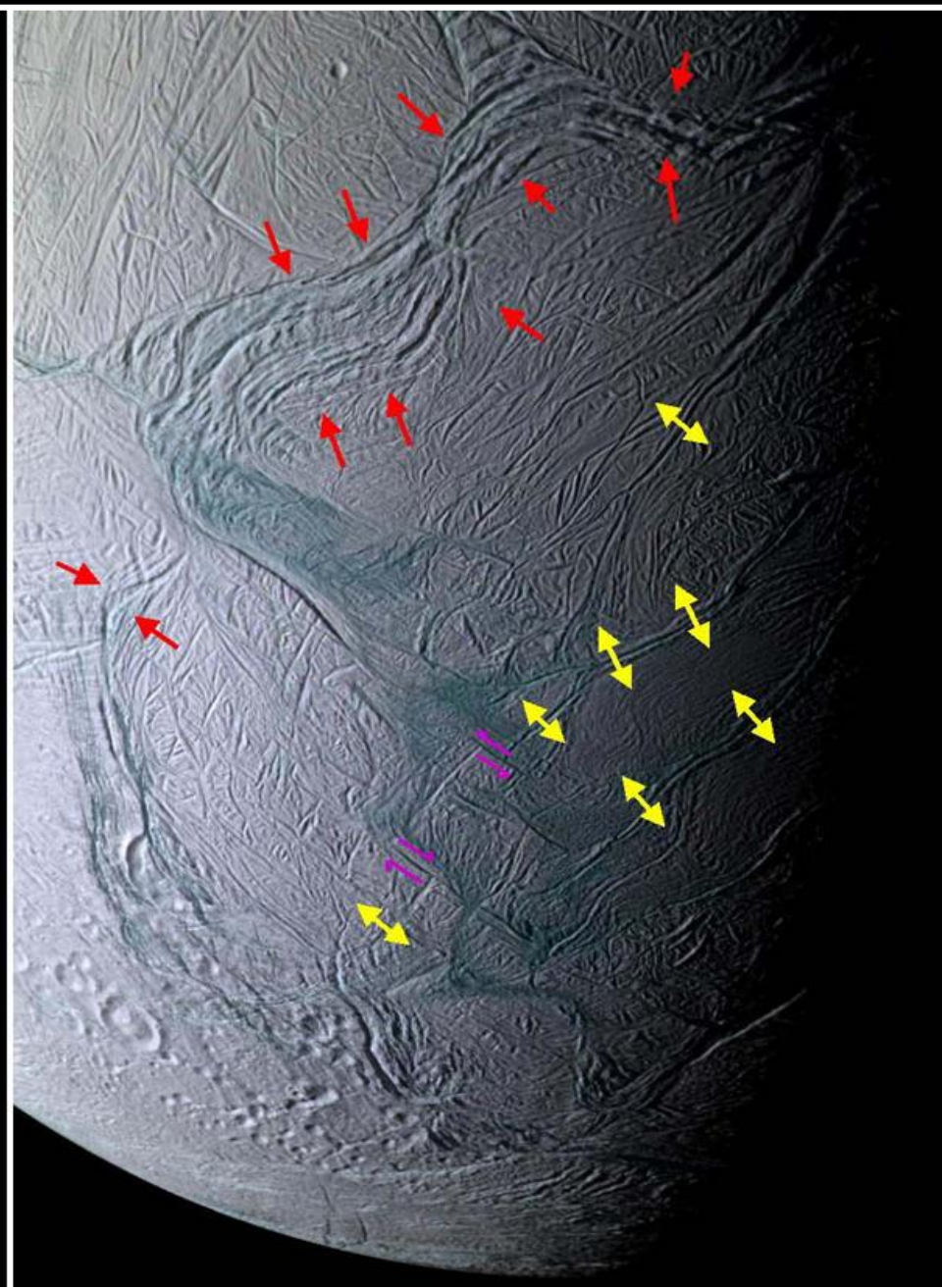
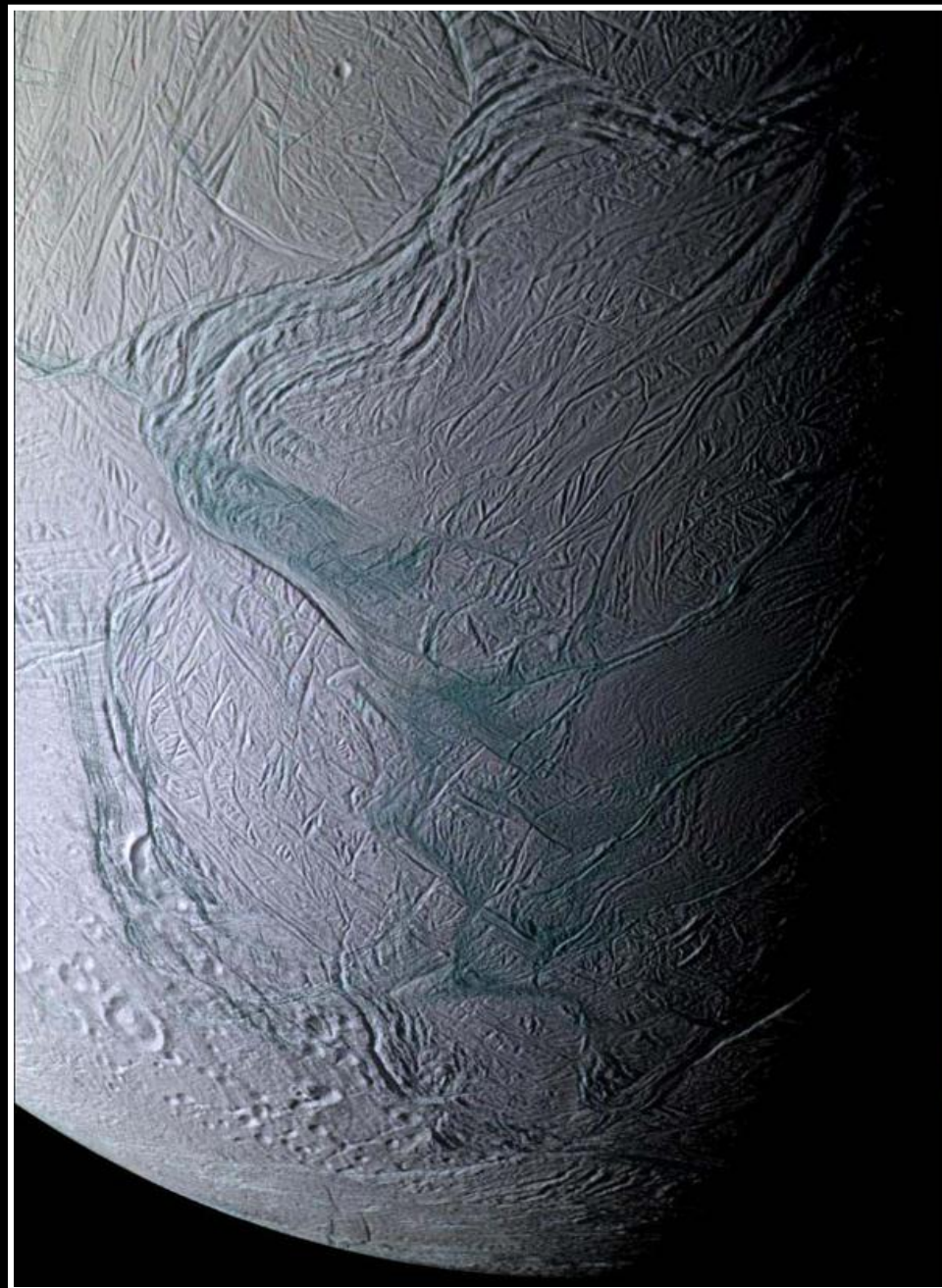
Regardons deux détails de cette région près du Pôle Sud



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

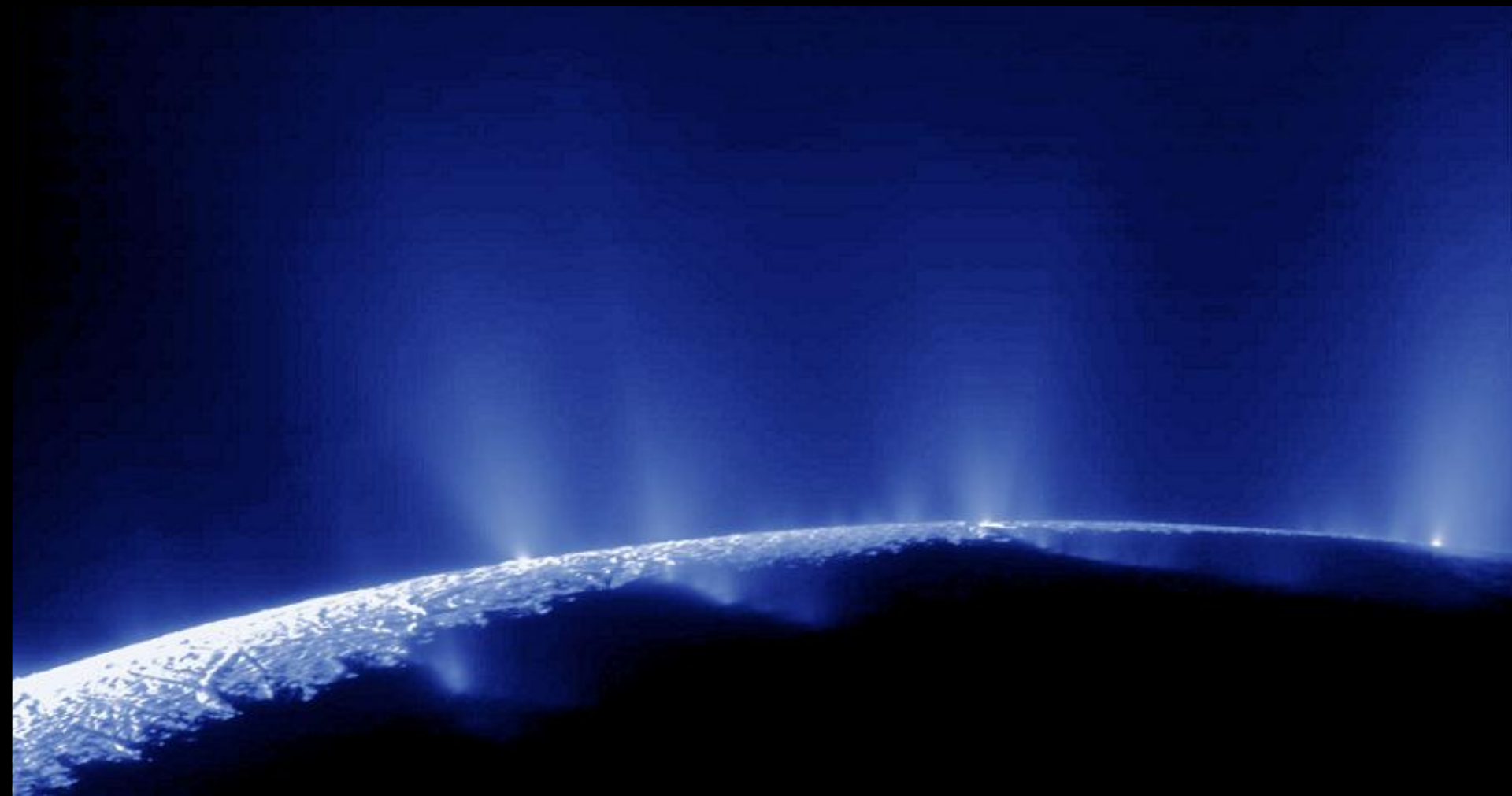


(2) Ce fragment de Montagne Circum-Polaire ressemble à une chaîne de collision



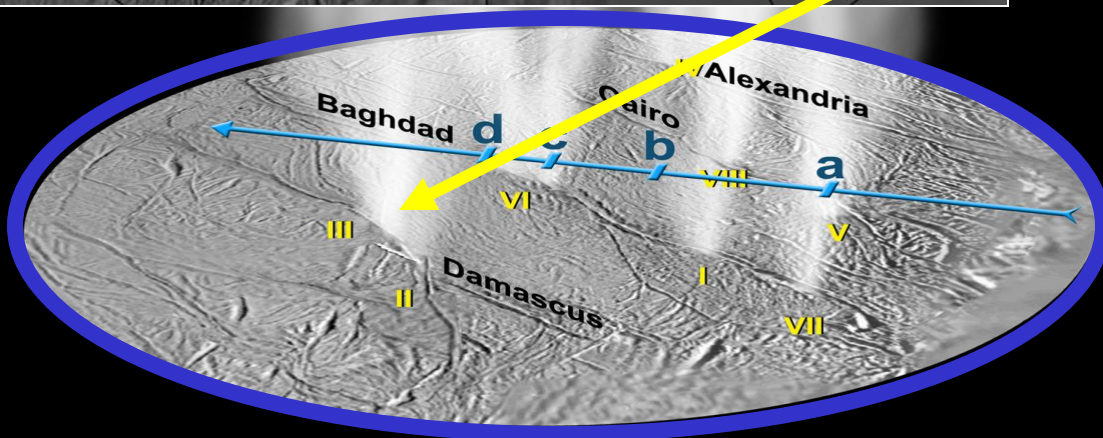
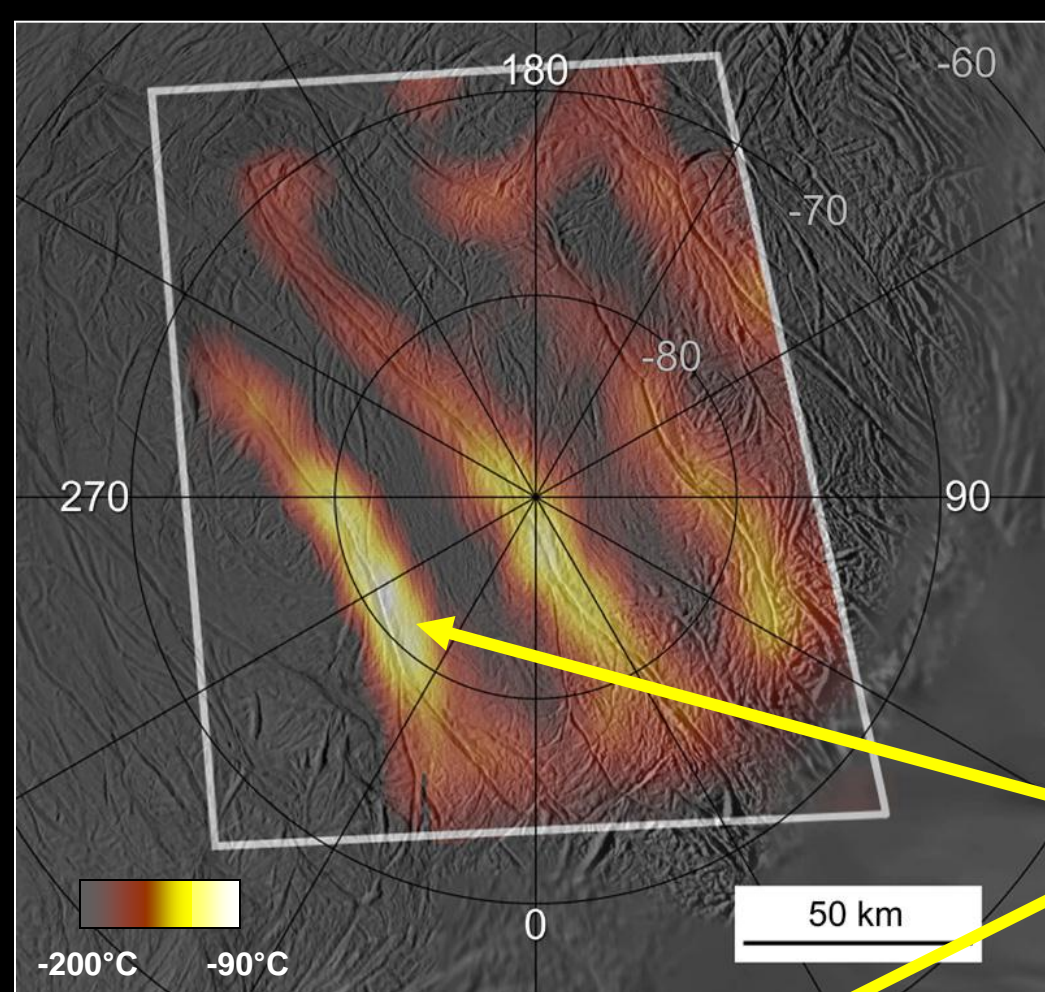
Une pseudo tectonique des plaques sur Encelade ?

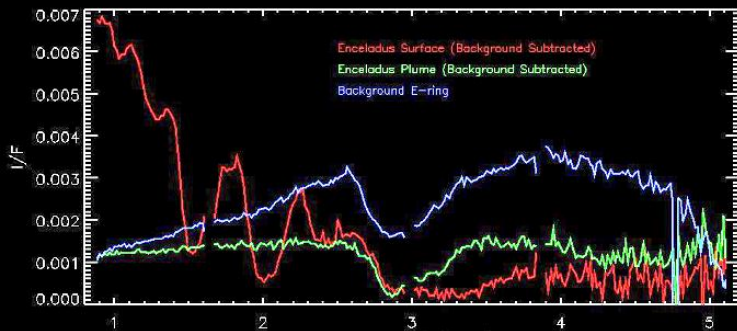
Nouvelle du 27 novembre 2005 : au dessus du Pôle Sud, il y a des jets de micro-particules (de givre d'H₂O) qui diffusent la lumière solaire. Il s'agit de volcans (d'H₂O) actifs. Des puristes les appellent geysers !



**Résultats du 27 mars
2008 :
la température au
dessus du pôle sud.**

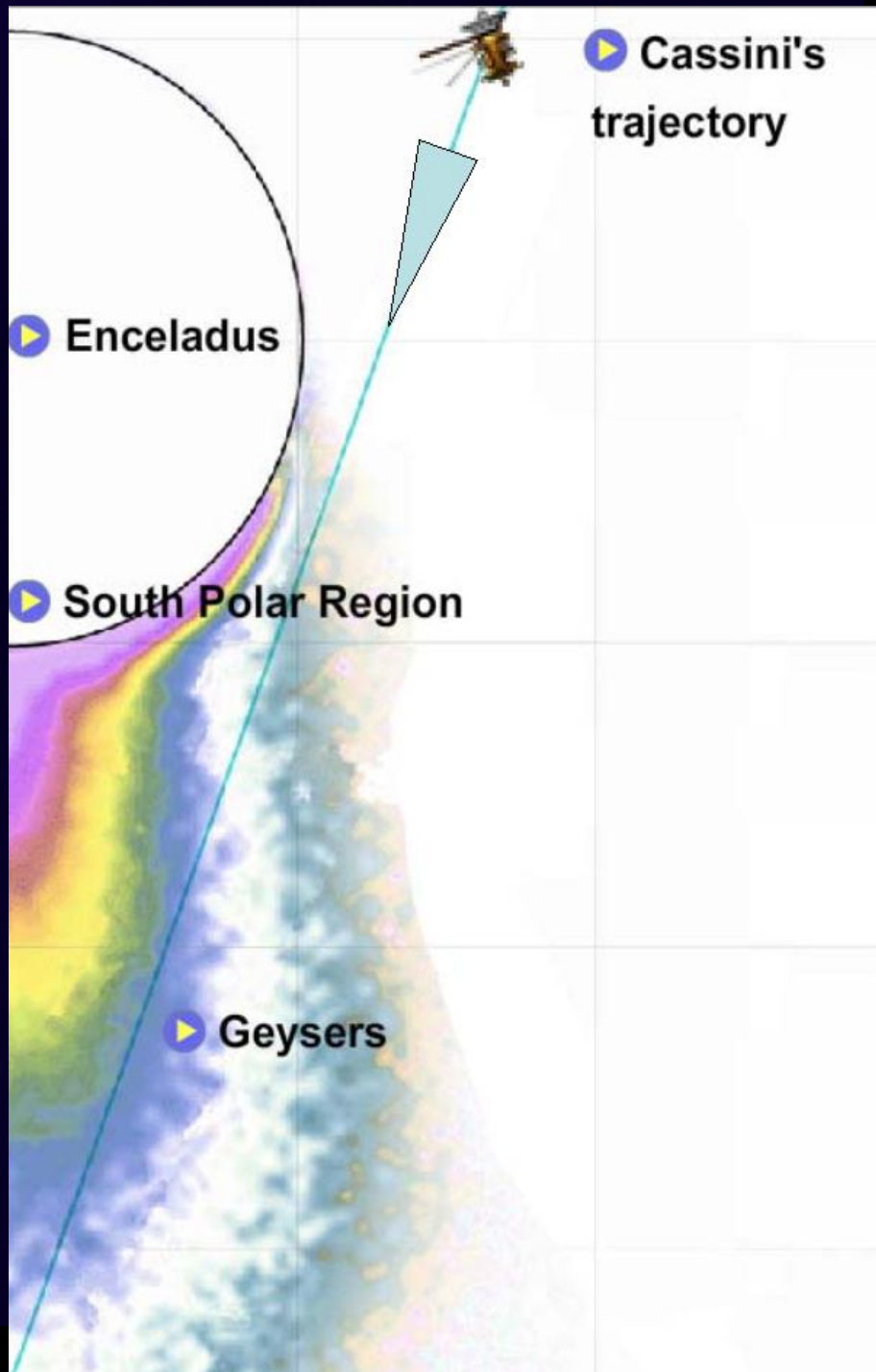
**La température
des « zones en
gris » est de
 -200°C . Là où
elle est maximale,
elle est de -93°C ,
soit un excès de
 $+107^{\circ}\text{C}$**



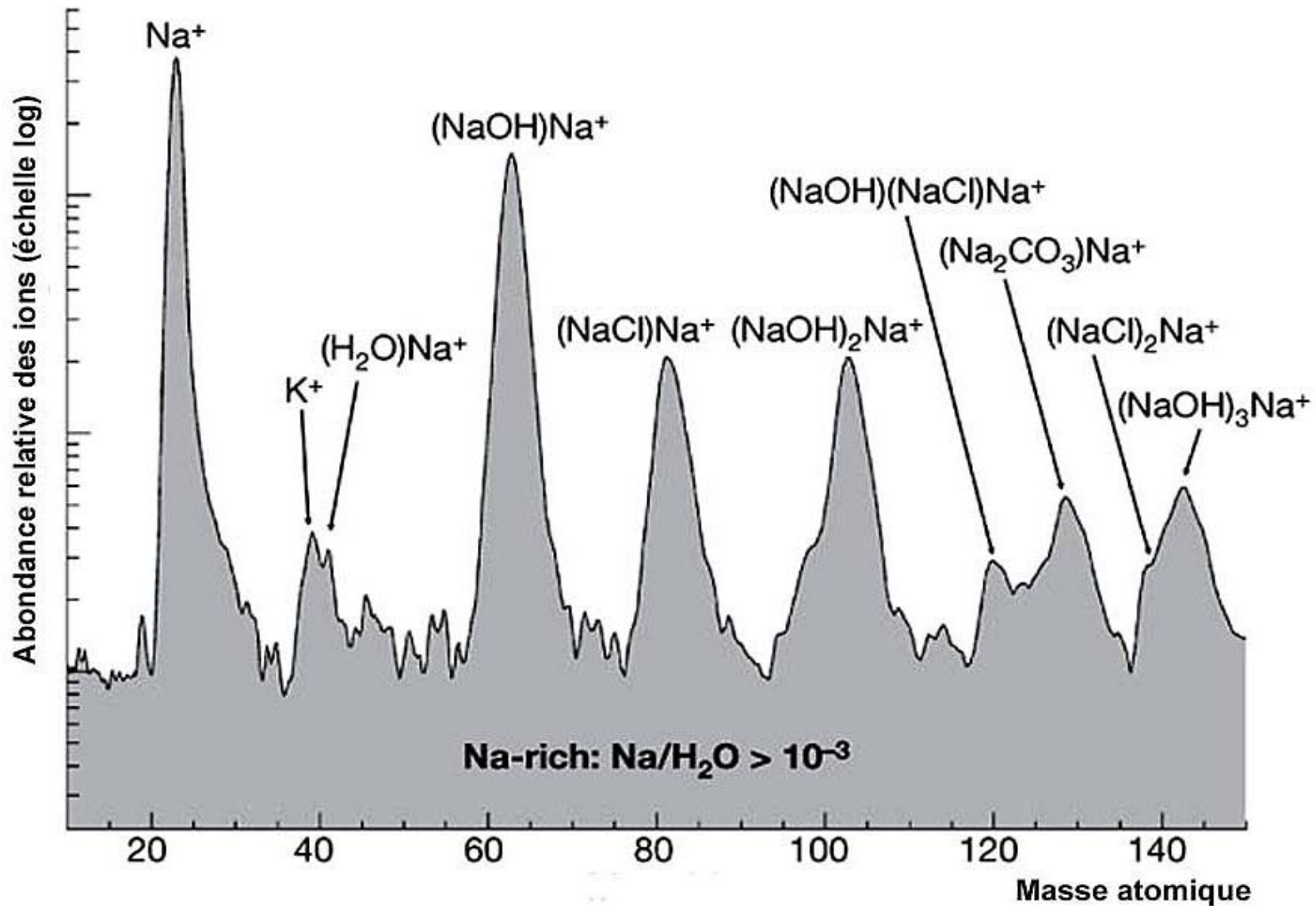


**Le panache de « fumée »,
aussi grand qu'Encelade lui
même**

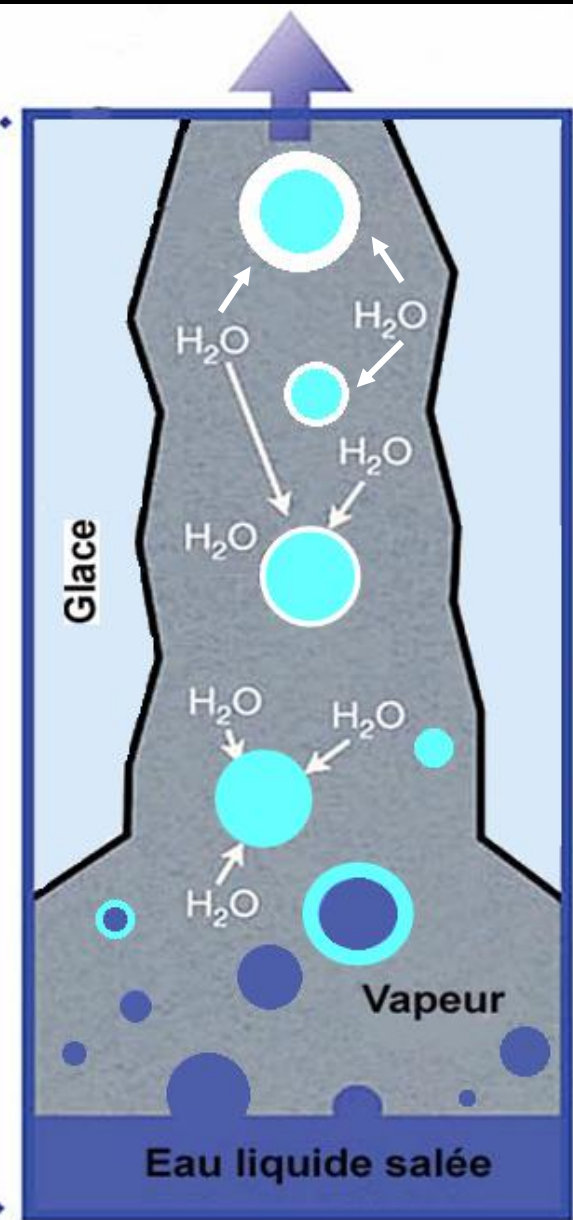
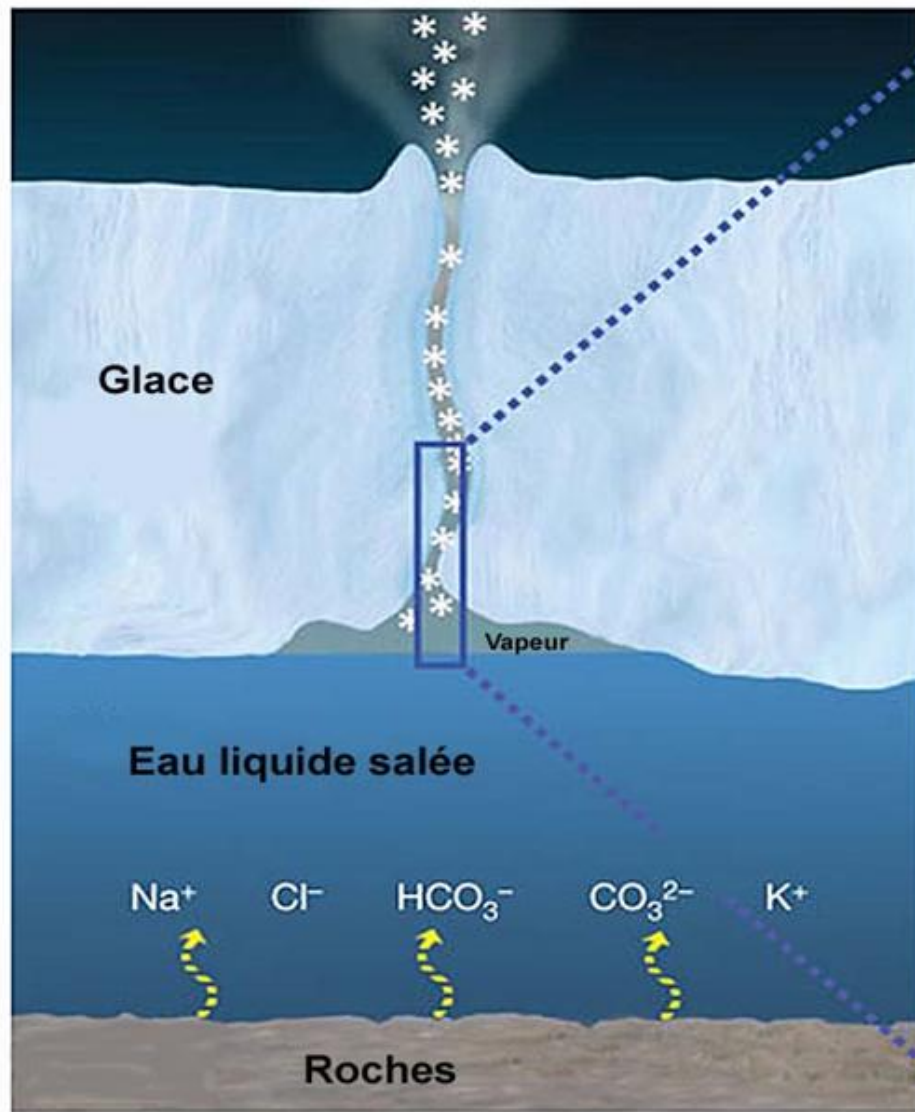
La même « éruption » 2 ans plus tard (2010). Ce qui sort a été analysé « spectralement » : de la « fumée » de fines particules de glace d' H_2O , sans raies spectrales du sodium.



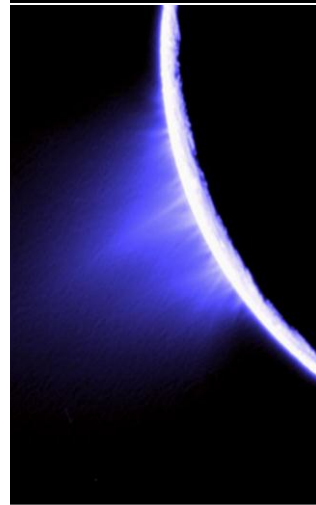
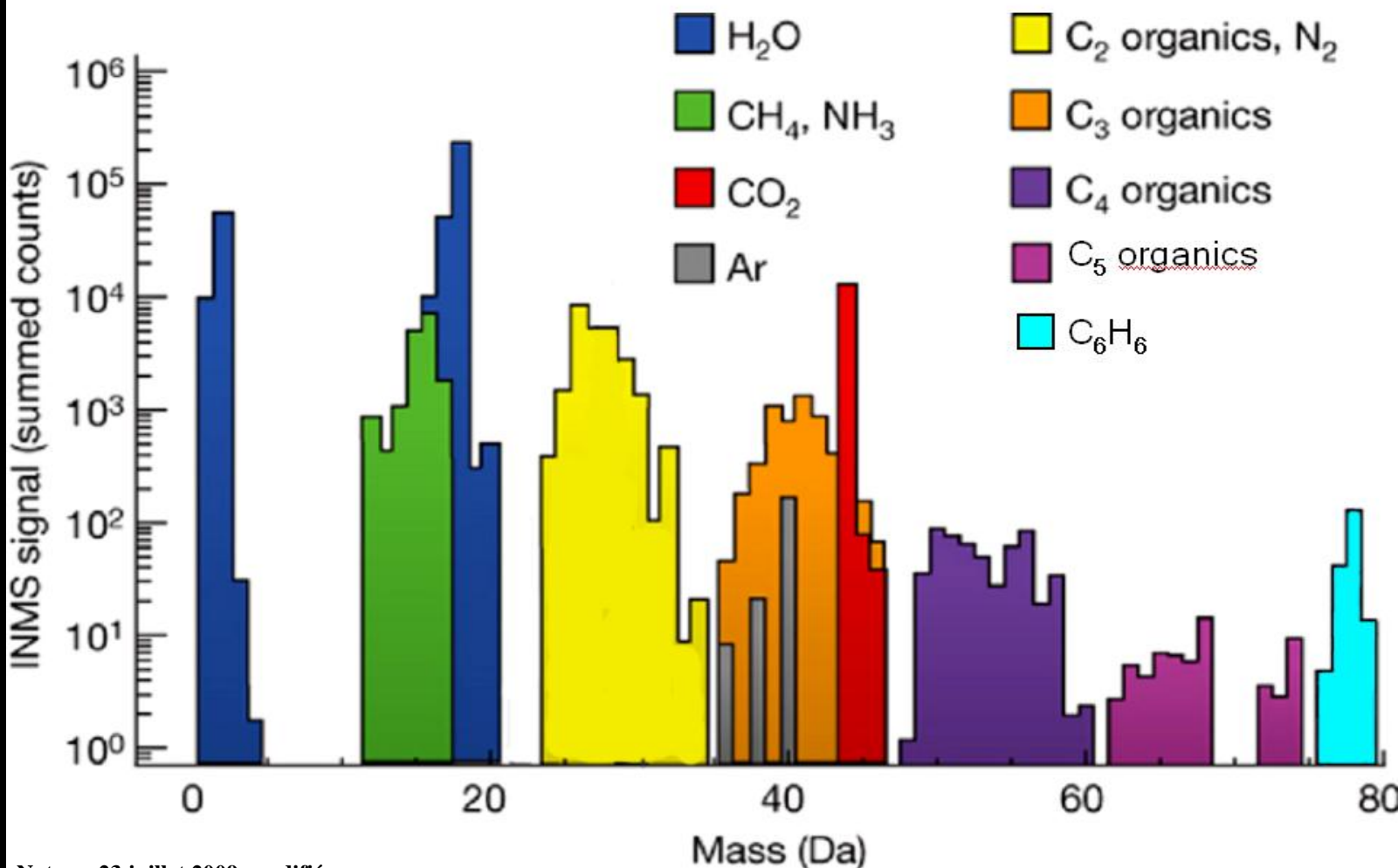
Des survols ont été re-programmés pour traverser ces panaches « geyseriens ». Tous les instruments destinés à la haute atmosphère de Titan ont fonctionné à plein régime.



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



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

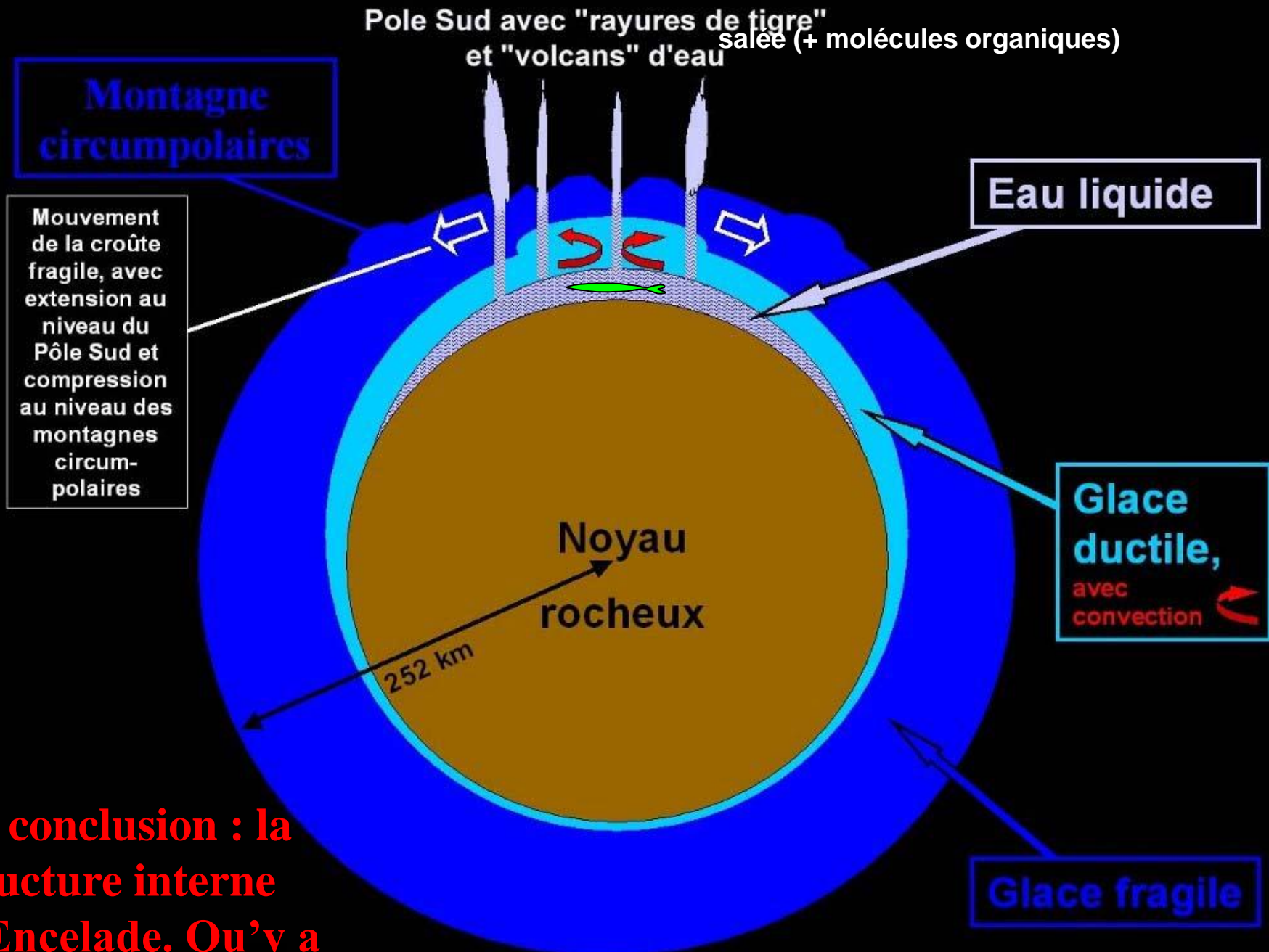


Premiers résultats concernant la matière organique des panaches : il y en a, en quantité non négligeable, et de fort complexes (jusqu'à C_6) ! Et en plus il y a de l'ammoniac ! Tout ça, ce sont les molécules précurseuses de la vie !

**Comment faire un tel volcanisme sur un si petit corps,
dans une région si froide ?**

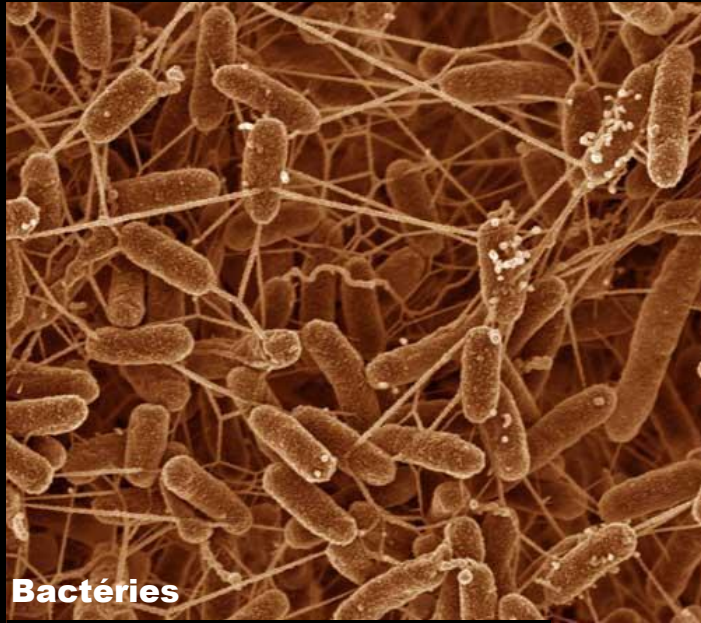
**Un peu d'ammoniaque et de sel dans la glace, ce qui
facilite sa fusion,
des marées qui
déforment et
réchauffent
l'intérieur
(comme pour
Io), et le tour est
(presque) joué !**





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

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



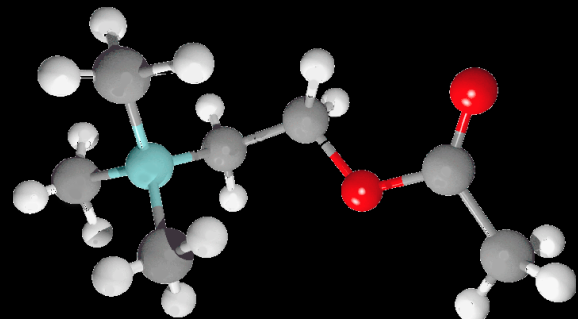
Bactéries



Homo (sapiens ?)

La vie « à la mode terrestre », des êtres/organes les plus simples (bactéries) aux plus complexes (cerveau humain) c'est une suite de multiples réactions chimiques extraordinairement compliquées. Que faut-il pour que de telles réactions chimiques puissent avoir lieu ?

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

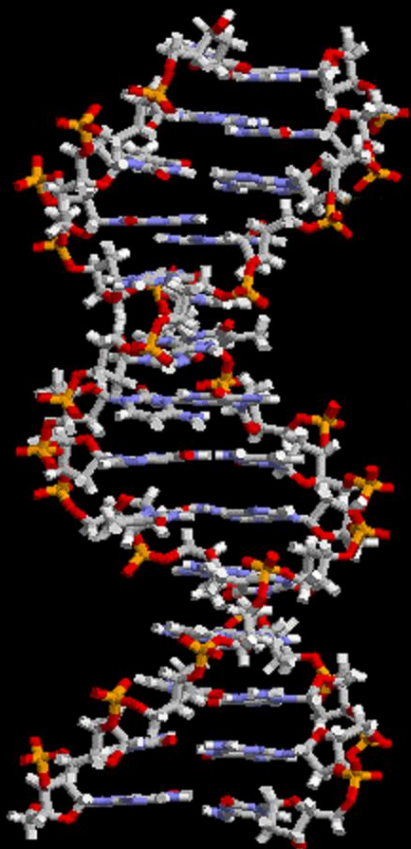


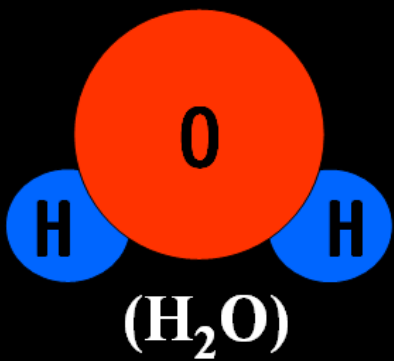
Pour faire des molécules complexes, les chimistes nous disent qu'il faut une architecture basée sur un atome

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

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

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





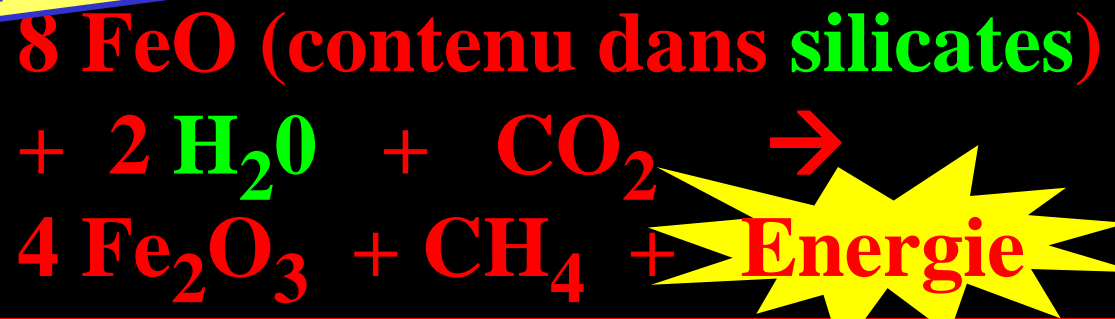
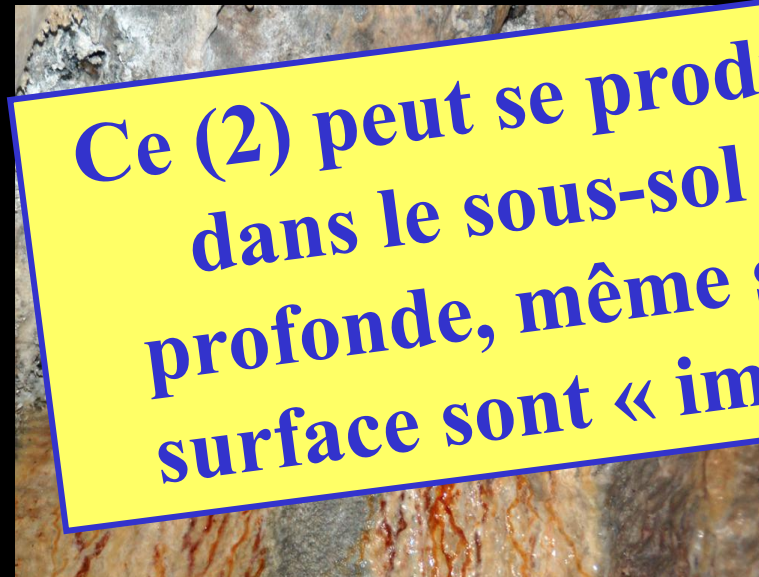
Les chimistes nous disent que l'eau (H_2O) est de loin le plus puissant et efficace solvant possible pour les molécules carbonées. Le méthane (CH_4 et l'ammoniac NH_3) liquides sont aussi des candidats, à priori beaucoup moins prometteurs (surtout le méthane qui est non polaire), mais théoriquement possibles.



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

- (1) la lumière solaire à la base de la photosynthèse,
- (2) des réactions chimiques à la base de la chimiosynthèse.

Ce (2) peut se produire en profondeur dans le sous-sol ou dans de l'eau profonde, même si les conditions de surface sont « impropres » à la vie !



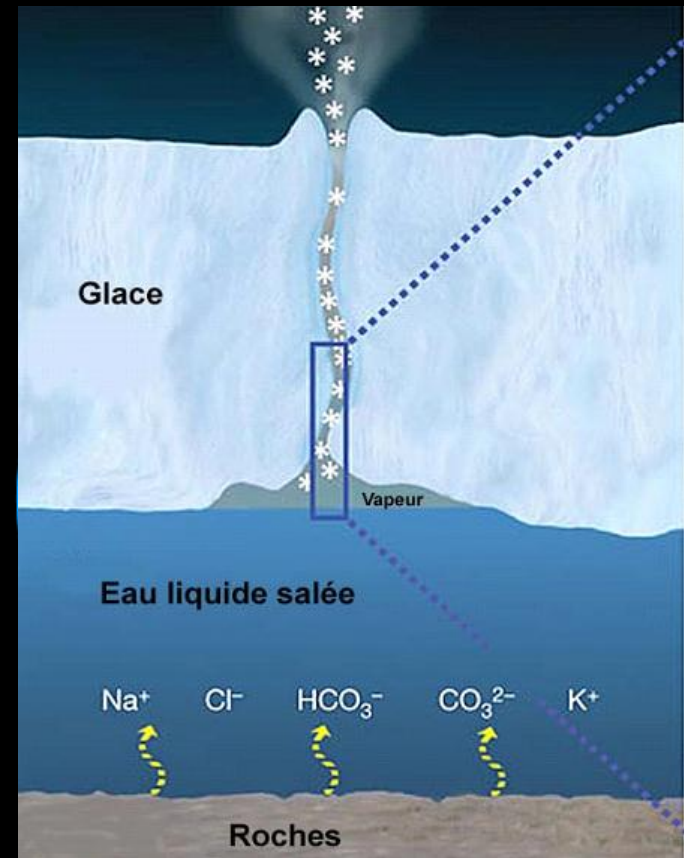
Où, dans le système de Saturne, y a-t-il à la fois les trois « ingrédients » nécessaires à la vie « à la mode terrestre » : (1) Carbone et molécules organiques, (2) eau liquide, et (3) énergie disponible ?

- Carbone et molécules organiques : partout !

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

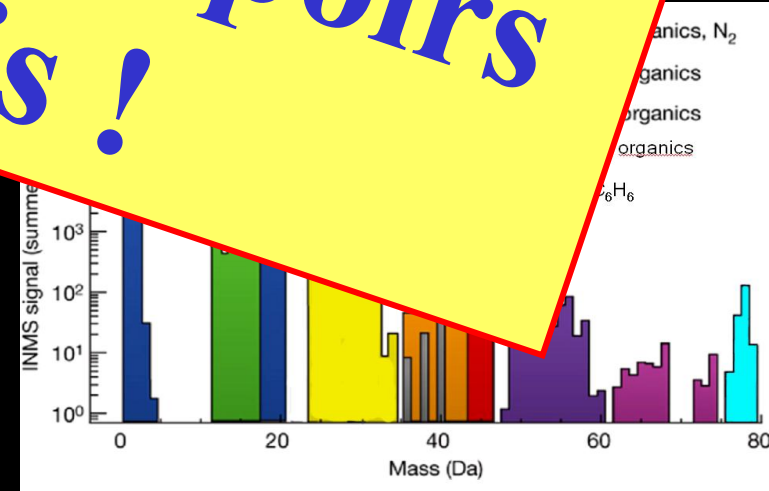
- Energie disponible dans cet océan sous-glaciaire ?

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



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

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

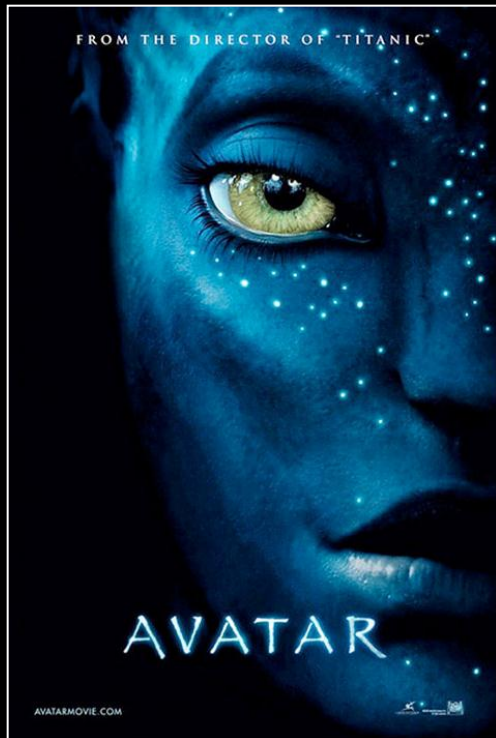


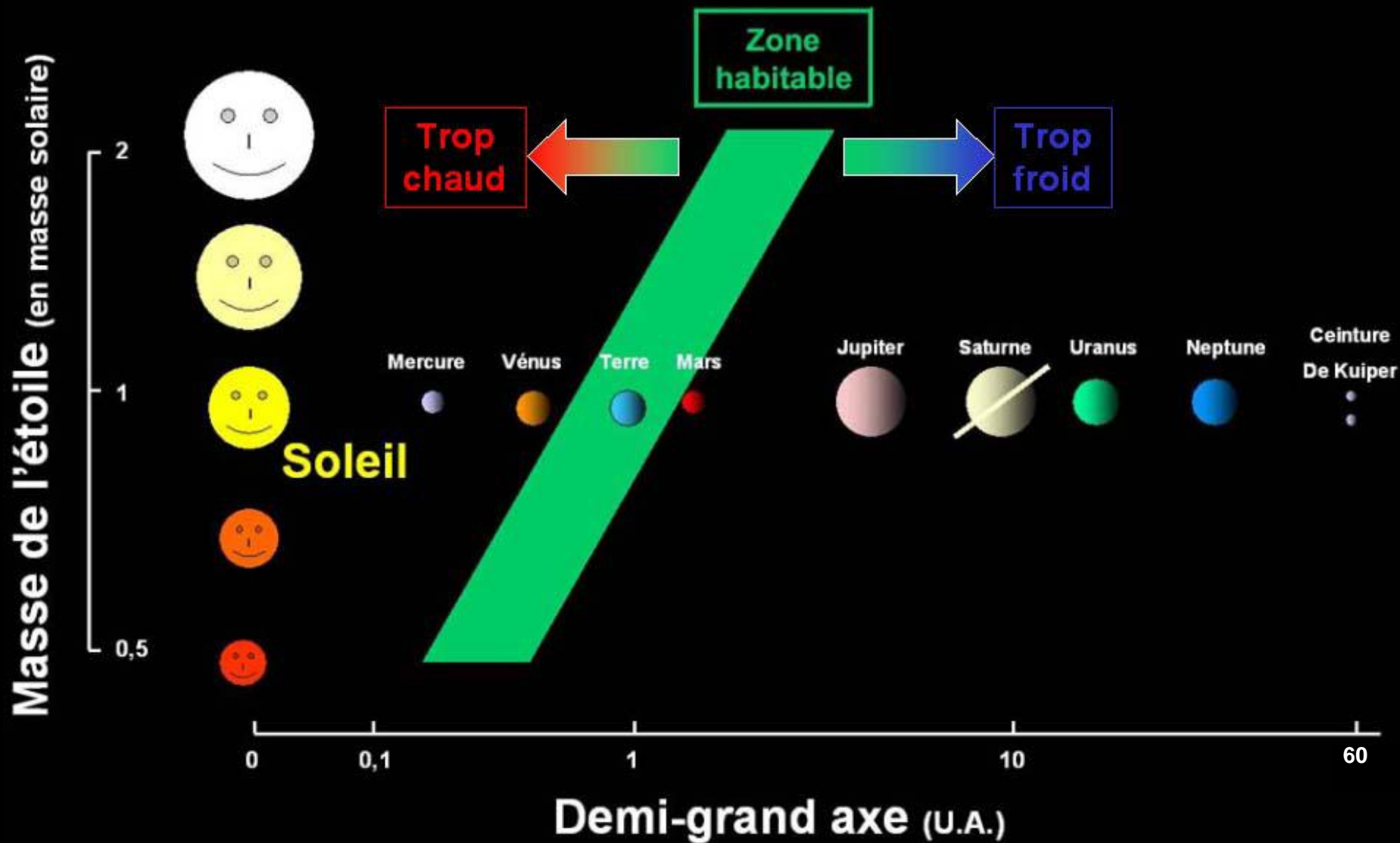


Une parenthèse pour piquer une « grosse colère » sur la notion de zone (ou de fenêtre) d'habitabilité.



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





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

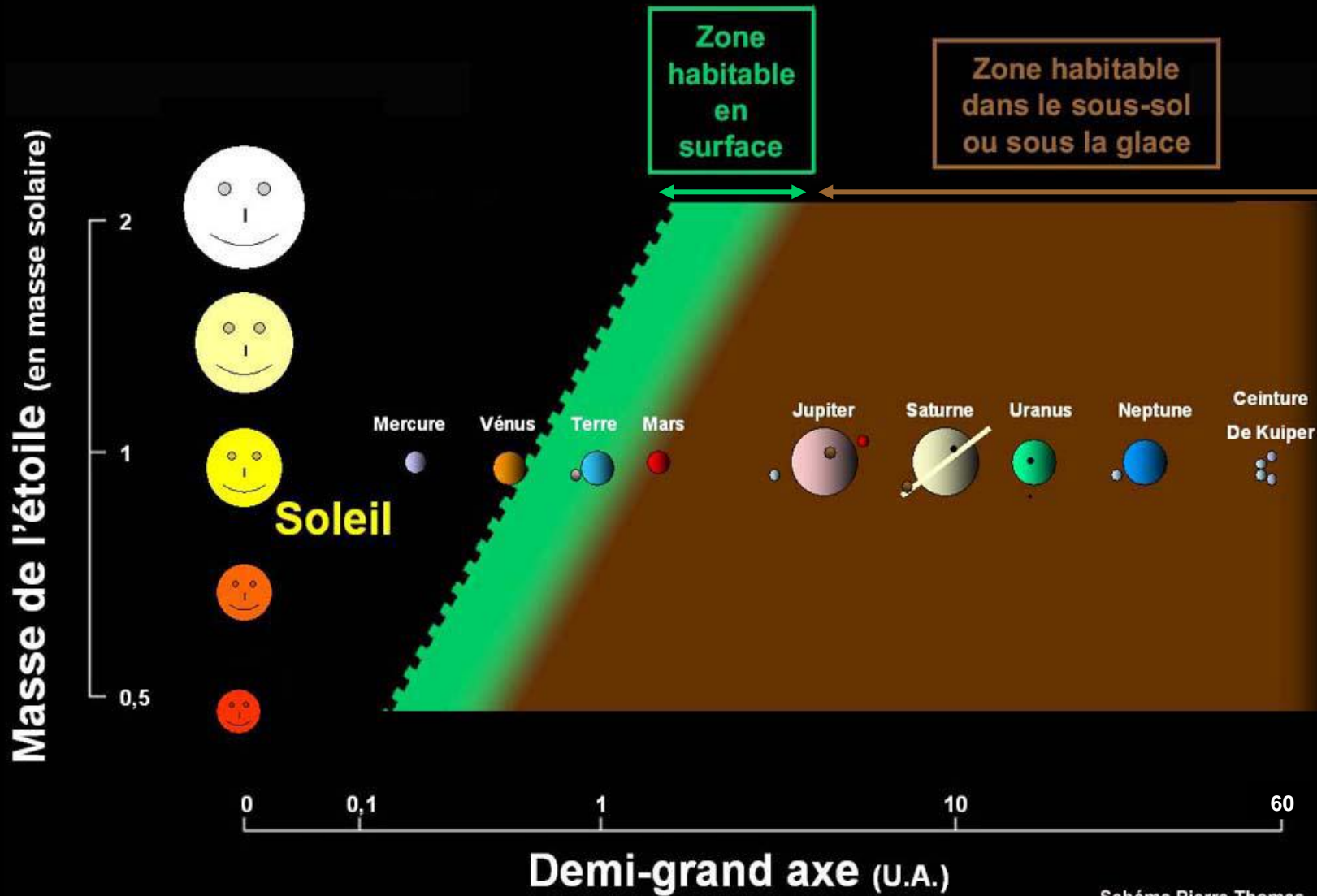
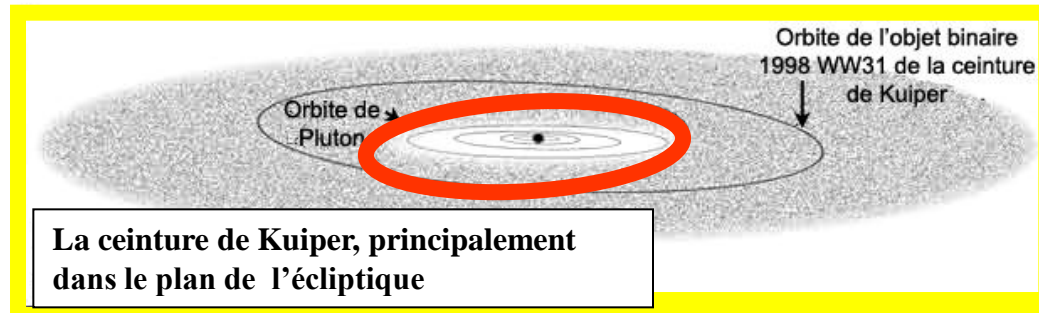


Schéma Pierre Thomas

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

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

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



Le nuage de Oort, hors de l'écliptique

This diagram shows a large, spherical cloud of small bodies surrounding the Sun. A yellow oval highlights the inner region where the Kuiper Belt is located. A text box below the diagram states: "Le nuage de Oort, hors de l'écliptique".

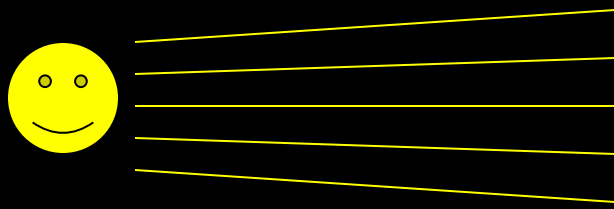


Les molécules et ions (gaz et poussières) cométaires identifiées depuis la Terre



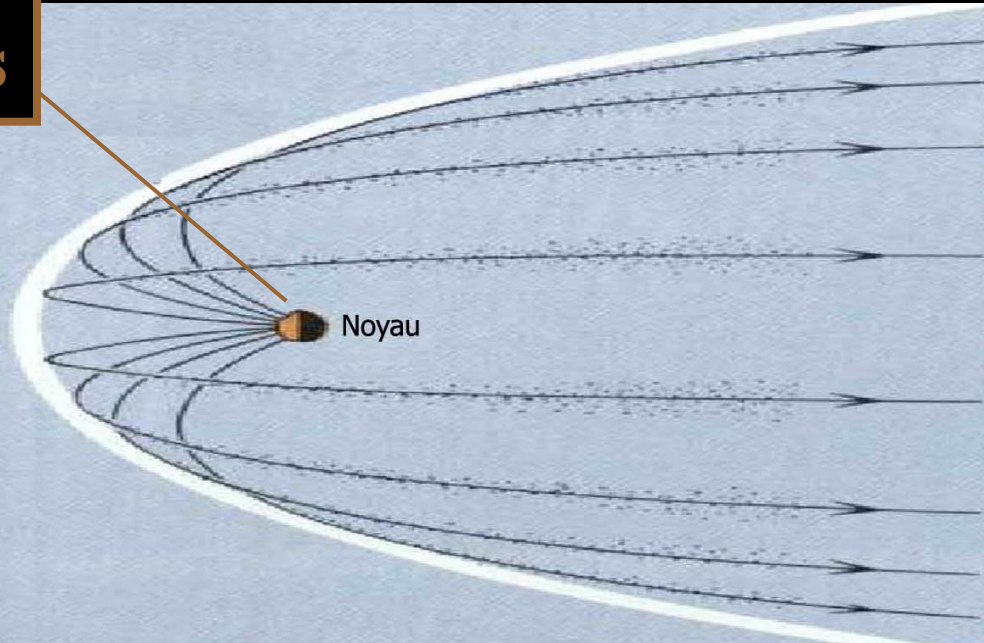
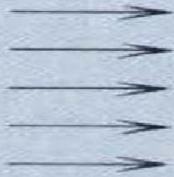
- H_2O , OH , H_2O^+ , H_3O^+ ,
- CO , CO_2 , CO^+ , HCO^+ ,
- H_2S , SO , SO_2 , H_2CS , OCS , CS ,
- CH_3OH , H_2CO , HCOOH , CH_3OCHO ,
- HCN , CH_3CN , HC_3N , HNCO , CN , NH_3 , NH_2 , NH_2CHO , NH ,
- CH_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , CH^+ , C_3 , C_2 ,
- He , Na , K , O^+ ,
- Mg_2SiO_4 (olivine magnésienne)
- ainsi que les variétés isotopiques suivantes : HDO , DCN , H^{13}CN , HC^{15}N , C^{34}S

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



**Noyau de
glaces sales**

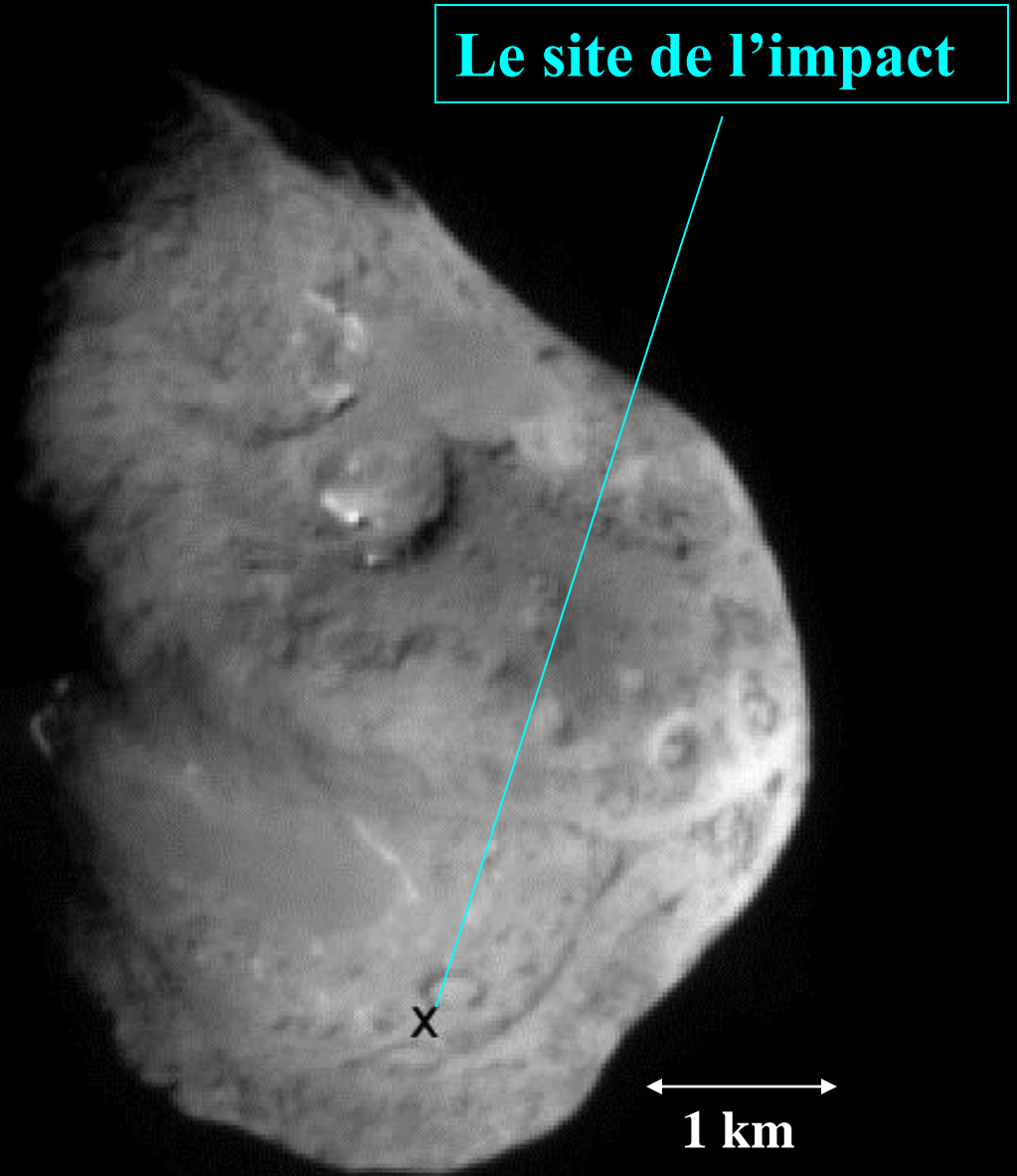
Photons et
vent solaire



Noyau

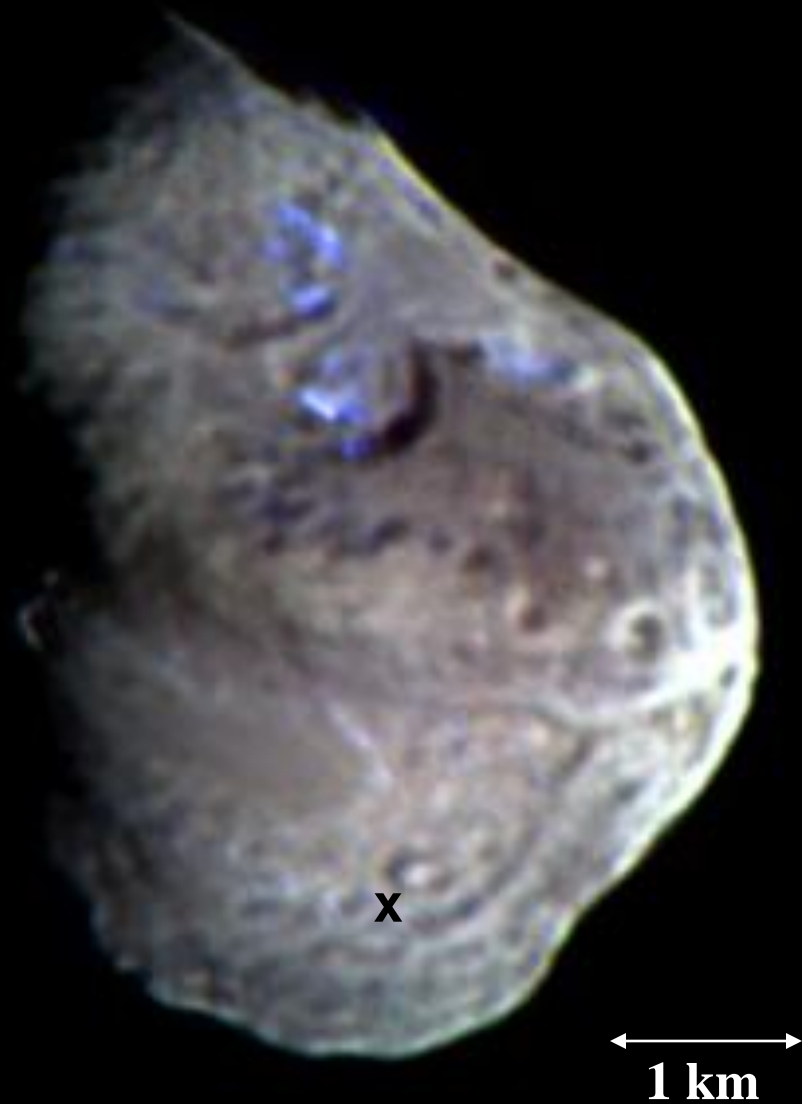
Déviations des
poussières
par les photons
et le vent solaire
dans la direction
opposée au soleil
--> formation de
la queue

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

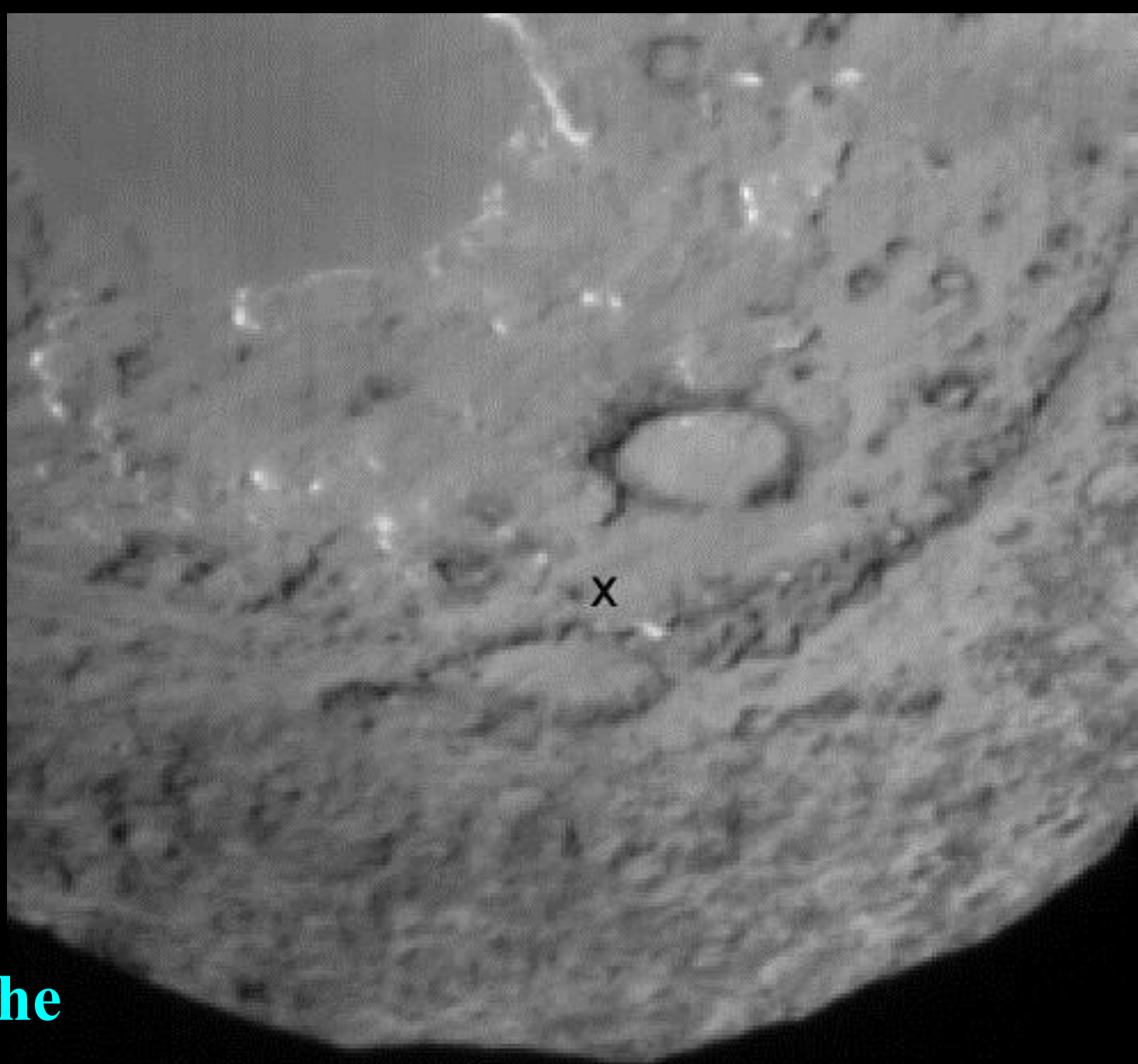


**Avant l'impact, de
la spectroscopie. En
bleu, les surface de
« glace vive »
d'H₂O.**

**Le reste, un
mélange infâme !**

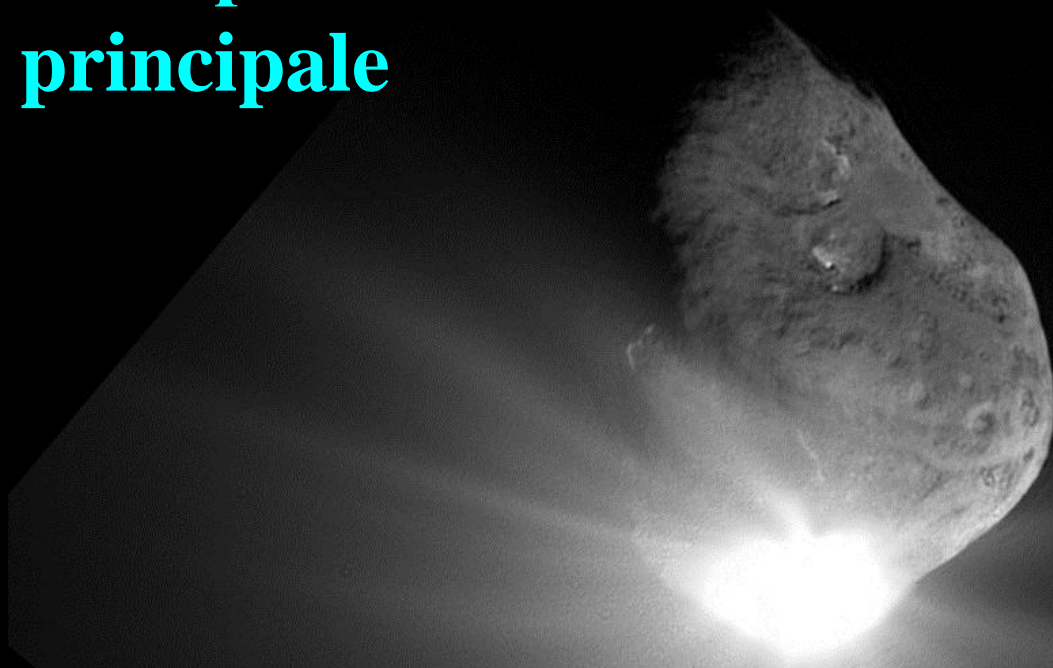


**Un
« boulet »
quitte la
sonde
principale.**

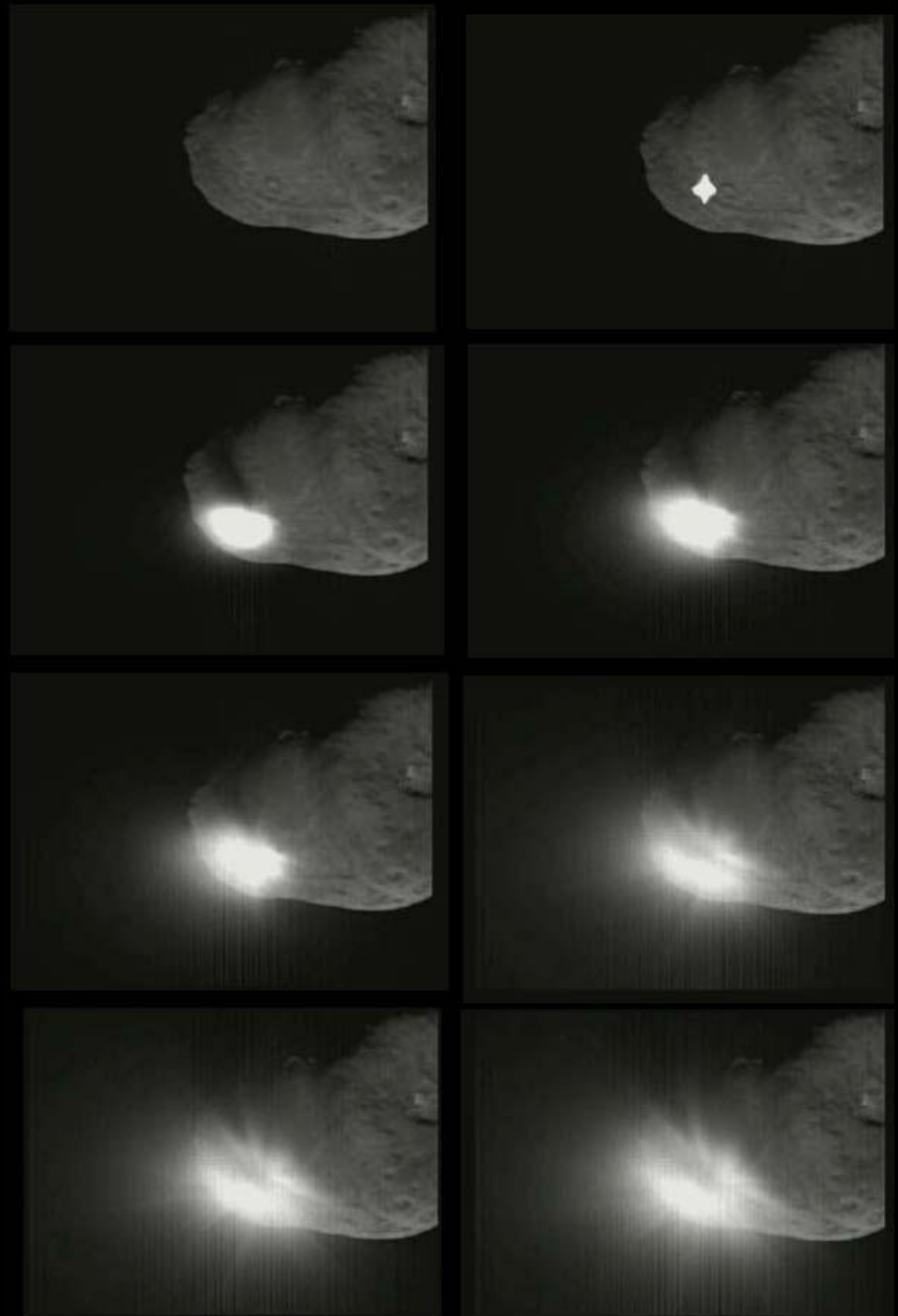


Il s'approche

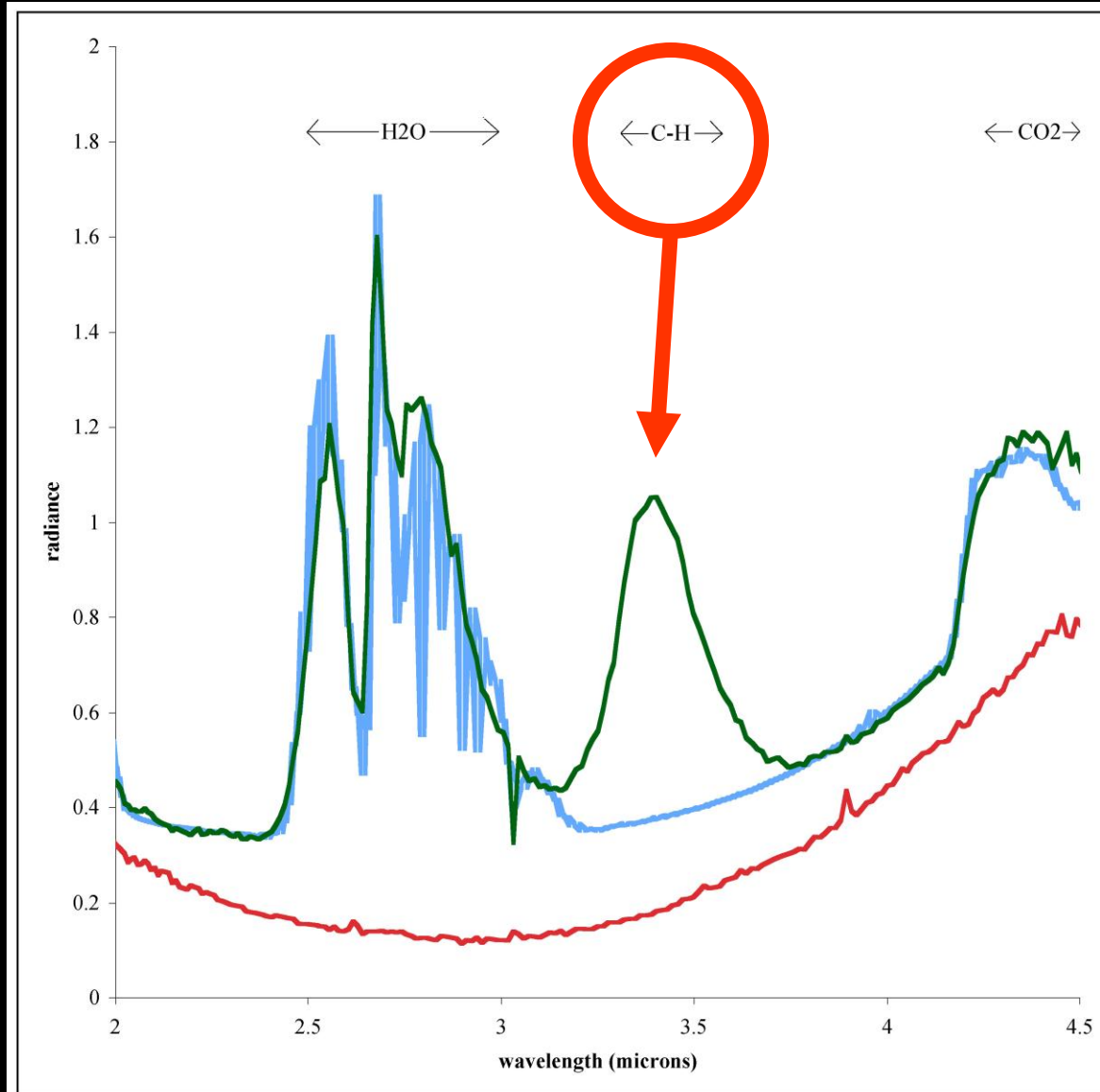
L'impact vu par la sonde principale



**Le film de
l'impact : une
image toute les
40 secondes**



**Le spectre IR des
« gaz
d'échappement » :
H₂O, CO₂ et
hydrocarbures. Il y a
bien de l'eau sur
cette comète !
Surprise, les études
terrestres montrent
que le rapport
poussières/glaces est
beaucoup plus
important que
prévu.**



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



165 diapositives pour vous parler d'eau liquide, de vapeur et de glace. Je crois qu'il est temps de s'arrêter ! Merci de votre attention.



