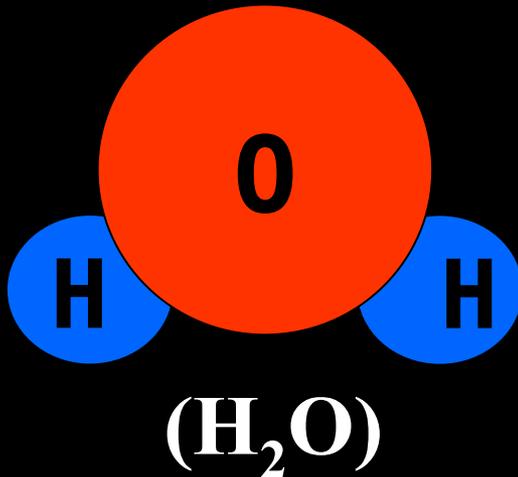
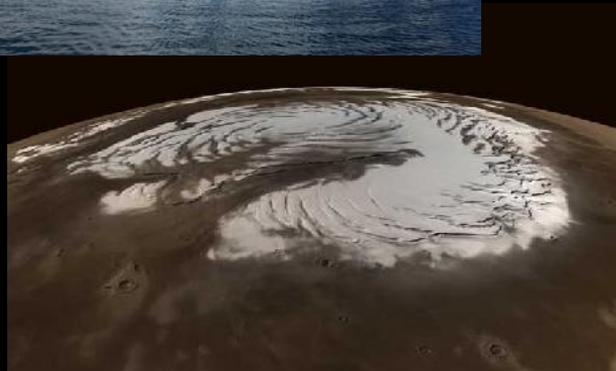
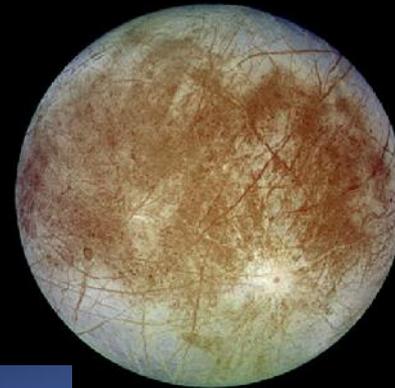


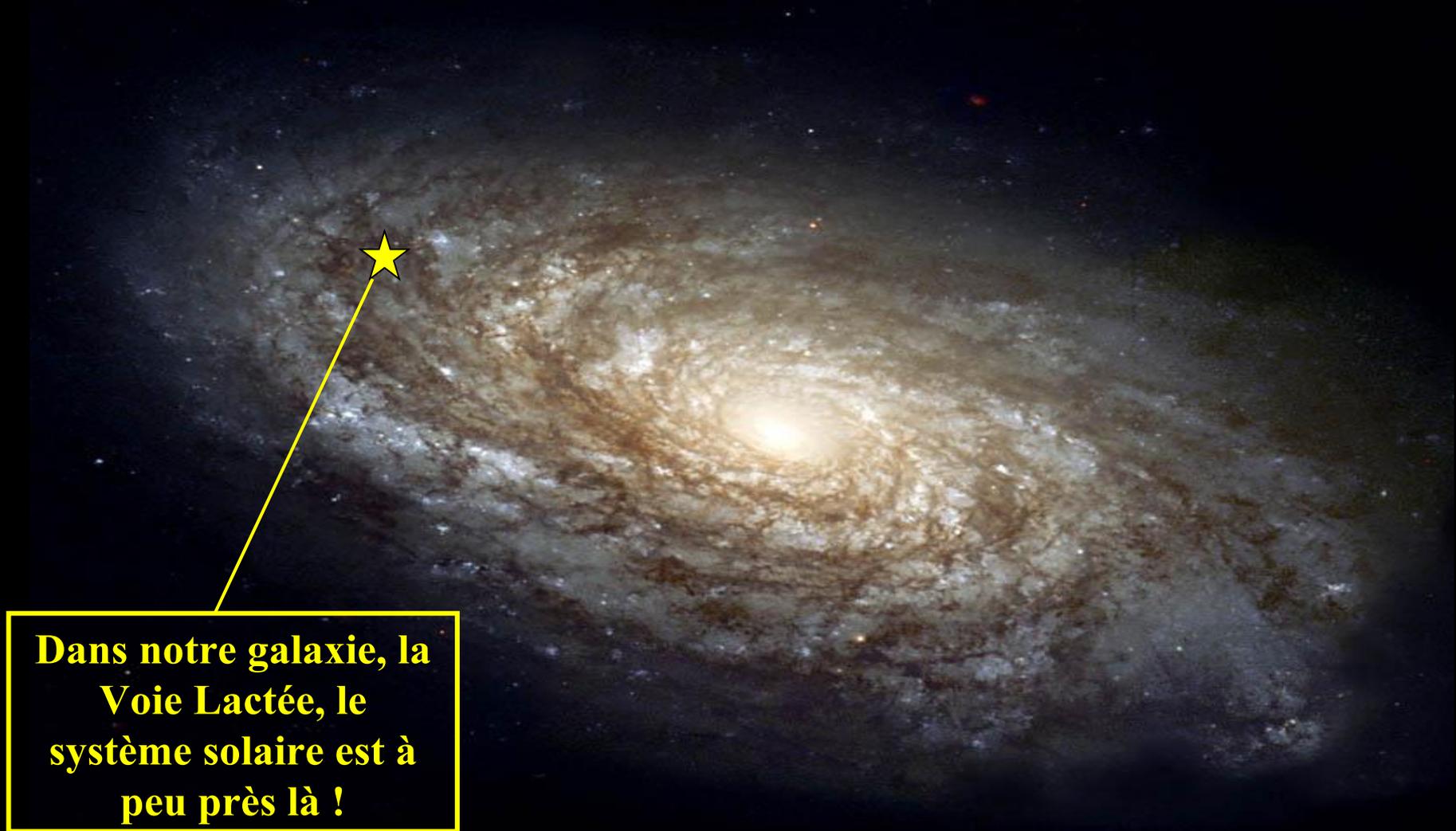
# L'eau dans le système solaire

Pierre Thomas, ENS Lyon



Saumur, 13 octobre 2007

**Avant de parler Système Solaire, voici une galaxie, rassemblement de 200 000 000 000 d'étoiles. De quoi est fait une galaxie ?**



**Dans notre galaxie, la Voie Lactée, le système solaire est à peu près là !**

**Dans une galaxie, quelle est la proportion des différents atomes ? Sur 1 000 000 000 d'atomes, il y a (environ) :**

**Hydrogène : 910 580 000**

**Hélium : 88 000 000**

**Oxygène : 800 000**

**Carbone : 300 000**

**Azote : 100 000**

**Néon : 100 000**

**Silicium : 30 000**

**Magnésium : 30 000**

**Fer : 30 000**

**Soufre : 12 000**

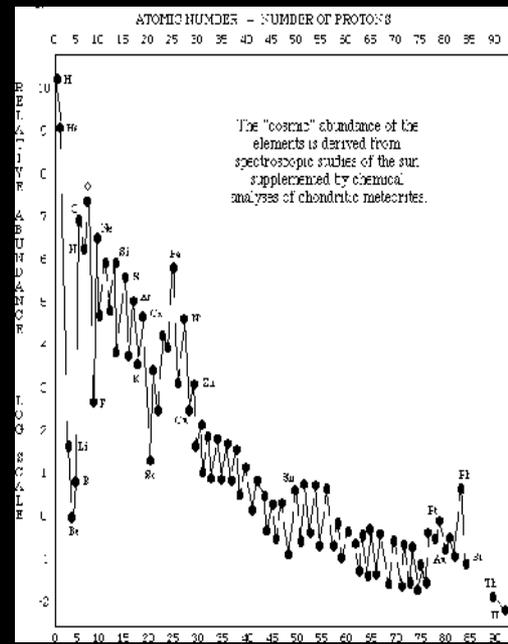
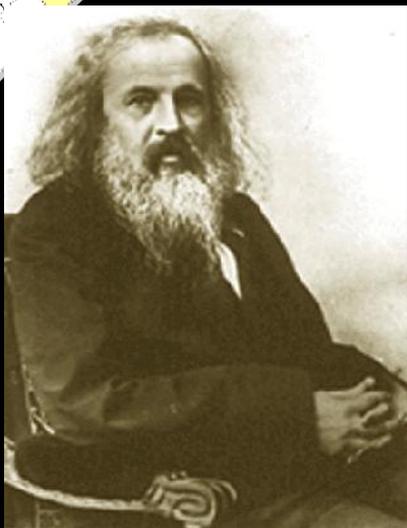
**Argon : 4 000**

**Aluminium : 3 000**

**Calcium : 3 000**

**Nickel : 2 000**

**Tous les autres : 6 000**



**On retrouve ces atomes dans les nébuleuses,  
nuages de gaz et de poussières internes à notre  
galaxie, nuages à l'origine des systèmes  
stellaires**



# Dans ces nébuleuses, ces atomes vont réagir entre eux pour former des composés moléculaires



- Hydrogène
- Oxygène
- Carbone
- Azote
- Silicium
- Magnésium
- Fer
- Aluminium
- Calcium

**H<sub>2</sub> (hydrogène moléculaire)**  
(molécule n° 1)

**H<sub>2</sub>O = eau**  
(Molécule n° 2)

**CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> et**  
**CHON = matière organique**  
(molécules n° 3)

**Silicates variés = cailloux**  
(molécules n° 4)

**Fer métallique**  
(« molécule » n° 5)

# Ces composés sont-ils solides ou gazeux ?



H<sub>2</sub> (hydrogène moléculaire)  
(molécule n° 1)

n° 1)

H<sub>2</sub>O = eau (Molécule n° 2)

CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>  
et CHON = matière organique  
(molécules n° 3)

Silicates variés = cailloux  
(molécules n° 4)

Fer métallique  
(« molécule » n° 5)

**Il fait froid :**  
**H<sub>2</sub>O, CHON,**  
**NH<sub>3</sub>, Silicates et**  
**Fer sont sous**  
**forme de**  
**poussières**  
**solides (de glace**  
**pour H<sub>2</sub>O), H<sub>2</sub>**  
**est encore**  
**gazeux**

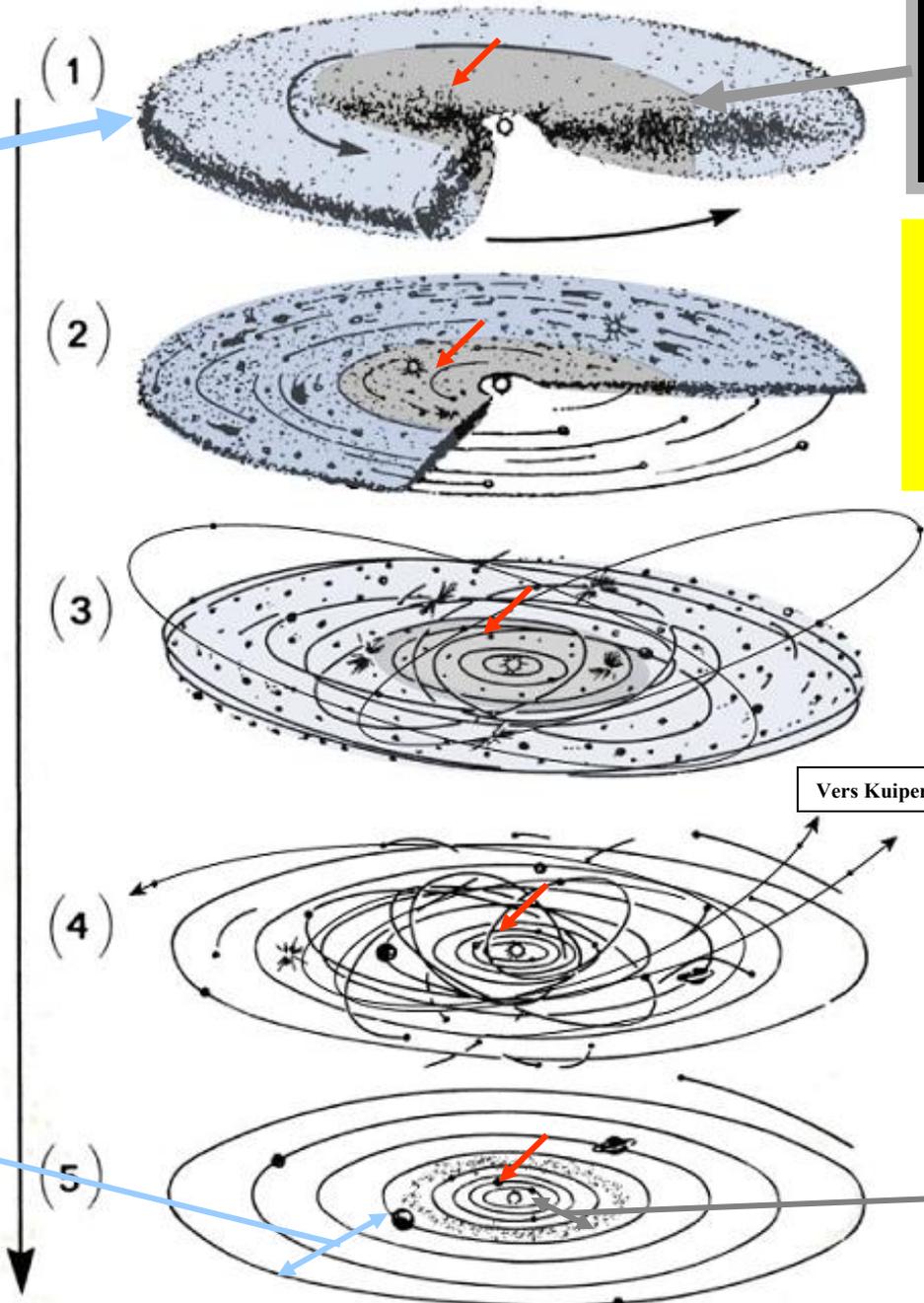
**Il fait tiède : les**  
**poussières de**  
**Silicates et Fer**  
**s'hydratent**  
**légèrement ; H<sub>2</sub>,**  
**H<sub>2</sub>O, CHON et**  
**NH<sub>3</sub> sont encore**  
**gazeux**

**Il fait chaud :**  
**Silicates et Fer**  
**sont sous forme**  
**de poussières**  
**solides, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O,**  
**CHON et NH<sub>3</sub>**  
**sont encore**  
**gazeux**

**Poussières ferro-silicato-glacées**

**Poussières ferro-silicatées**  
(hydratées à la frontière)

**(2) Les poussières s'agglomèrent en « blocs » kilométriques**



Vers Kuiper et Oort

**Planètes et satellites « de glaces » et planètes géantes**

**Planètes et satellites « rocheux »**

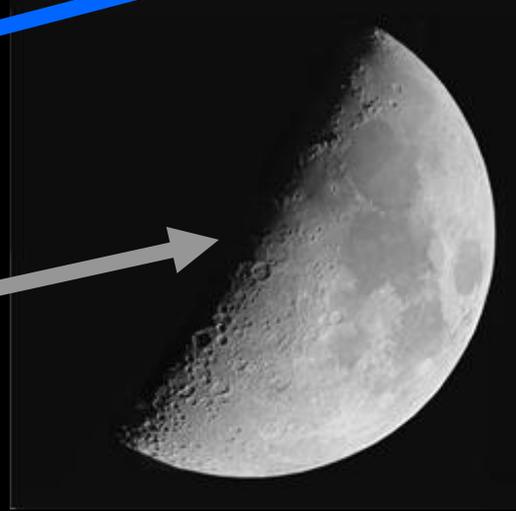
# Récapitulons

Si il fait chaud et que la gravité est suffisante, le peu d'eau initial monte en surface, reste à l'état liquide (l'océan)

Si il fait chaud mais que la gravité est insuffisante, le peu d'eau part

Si il fait froid ( dans le Système Solaire externe), les 60% d'eau initiaux restent, en glace (→ corps de glace)

Si la gravité est très importante et qu'il fait froid, le corps de glace va attirer l'Hydrogène et l'Hélium qui restent (→ Planète géante)



# L'eau sur Terre : 3 sites principaux :

$10^{21}$  kg

= 1 000 000 000 000 000 000 000 kg  
= 1/1000 de la Terre



Je n'en  
dirais pas  
plus !



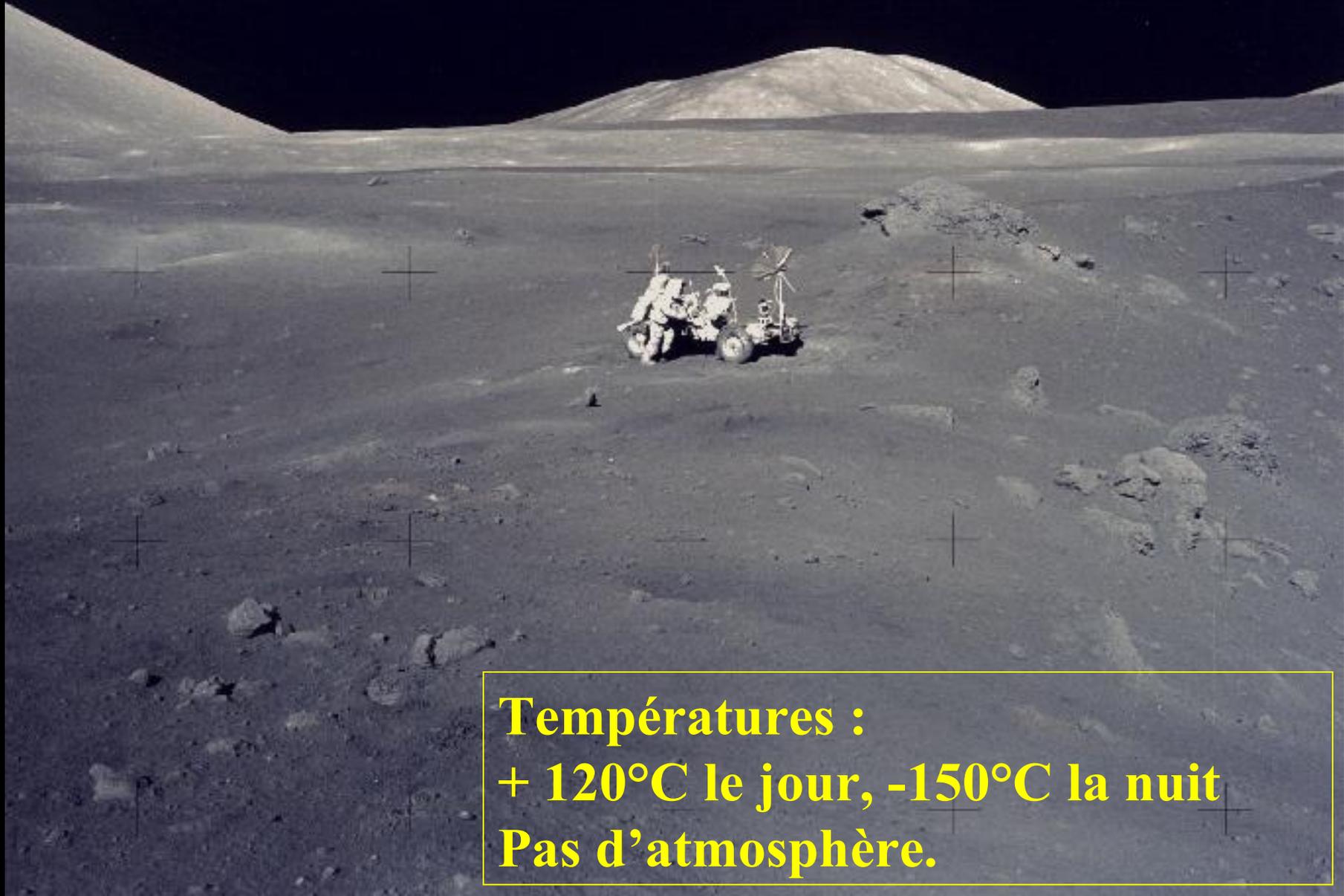
$10^{21}$  kg

$10^{19}$  kg

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



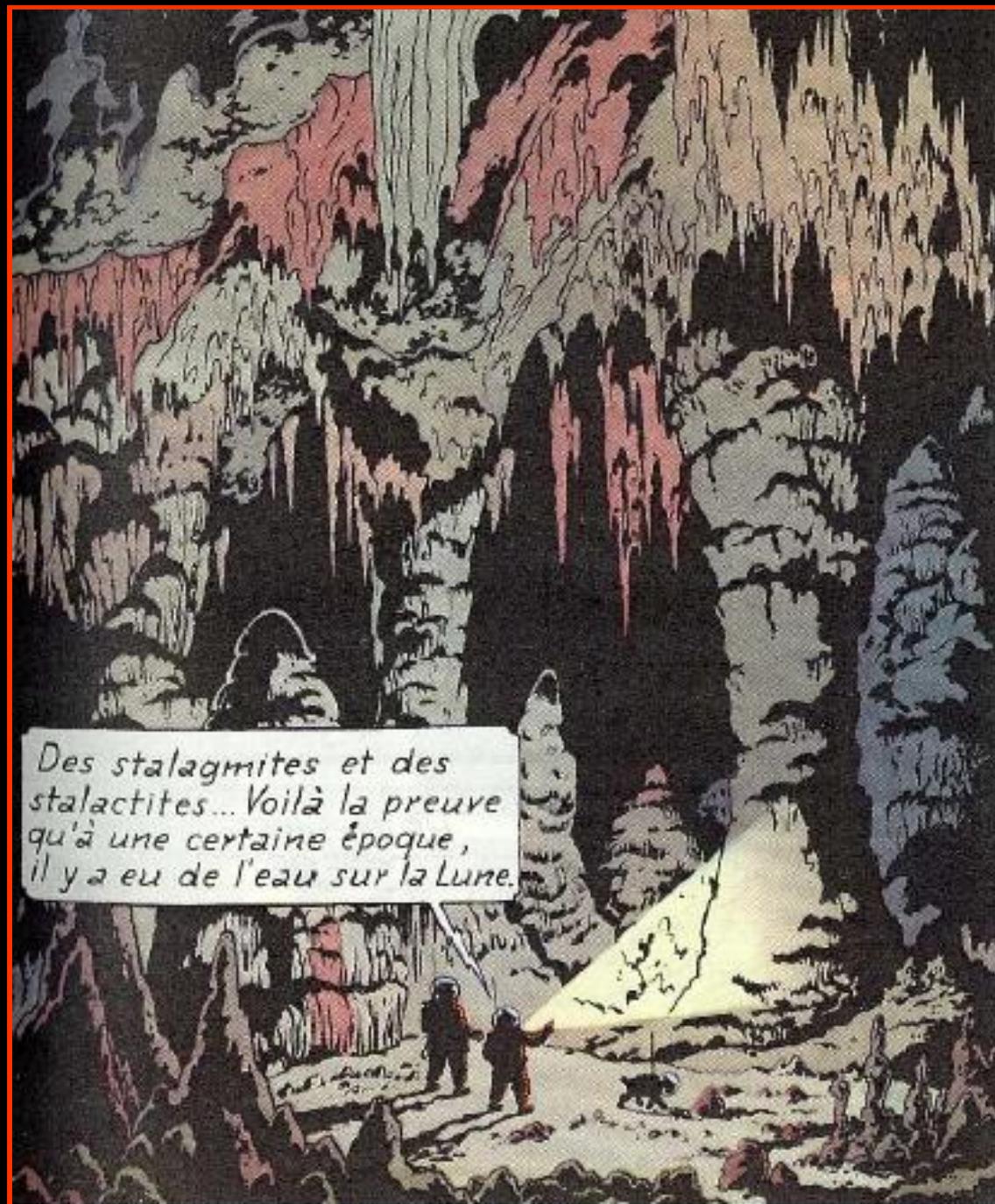
# L'eau sur la Lune : Y en a pas !



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

Encore que ...  
Hergé en met dans  
une grotte.

D'abord avec des  
stalactites (eau  
ancienne) et aussi  
avec de la glace (eau  
actuelle)



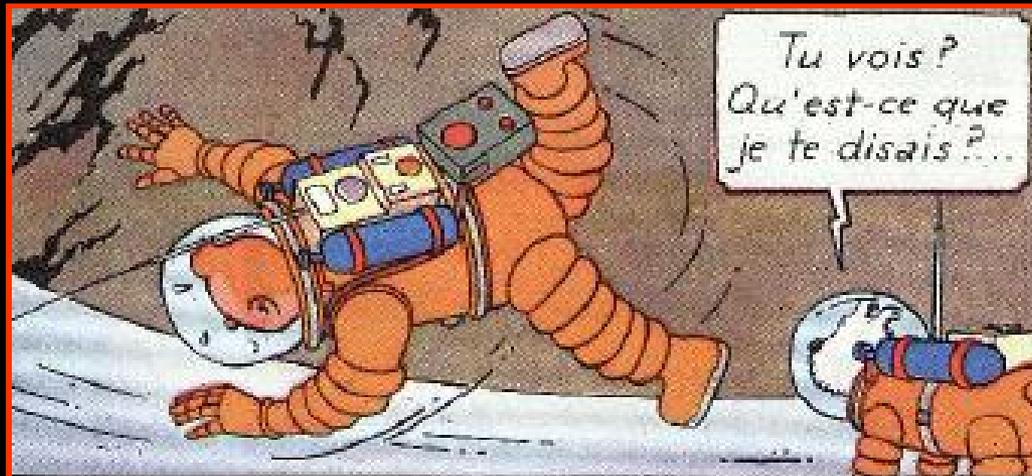
**Mais stalactites ne veut pas forcément dire eau  
(+ calcaire). La preuve, cette grotte dans une coulée  
basaltique, avec stalactites de lave (refroidie).**



# Détail de stalactites basaltiques



Hergé met de la glace dans une grotte, car dans une grotte, il n'y a jamais le soleil et Hergé pensait qu'il y faisait  $-150^{\circ}$  en permanence, comme pendant la nuit.

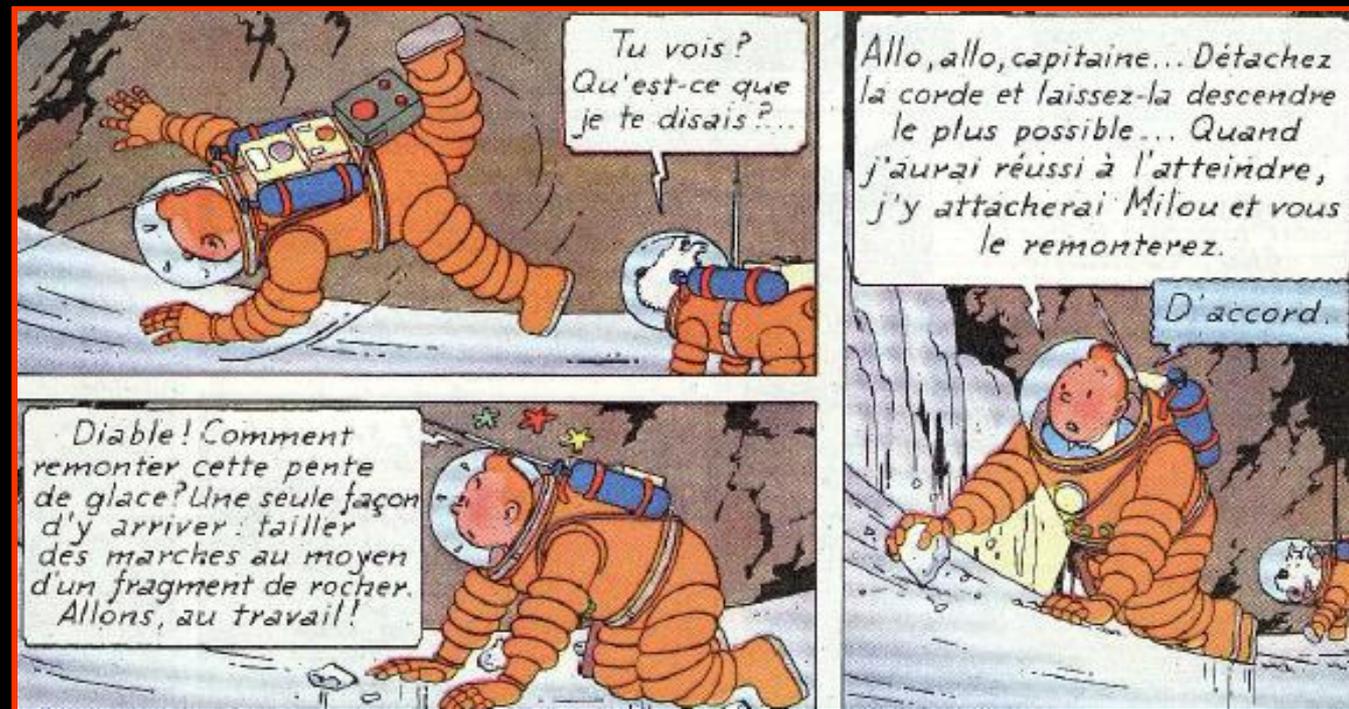


**Or, la température dans une cave-grotte profonde, c'est la moyenne été / hiver , jour / nuit, soit à peu près 12 à 15 °C dans nos régions**

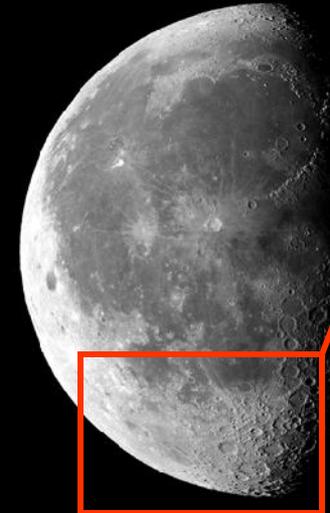


Dans une grotte lunaire, la température est donc la moyenne annuelle, à savoir  $(120-150)/2 = -15\text{ °C}$

Et à  $-15\text{ °C}$  dans le vide, de la glace d'eau s'évapore (se sublime) très vite (quelques m / siècle), comme la glace carbonique à  $20\text{ °C}$



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



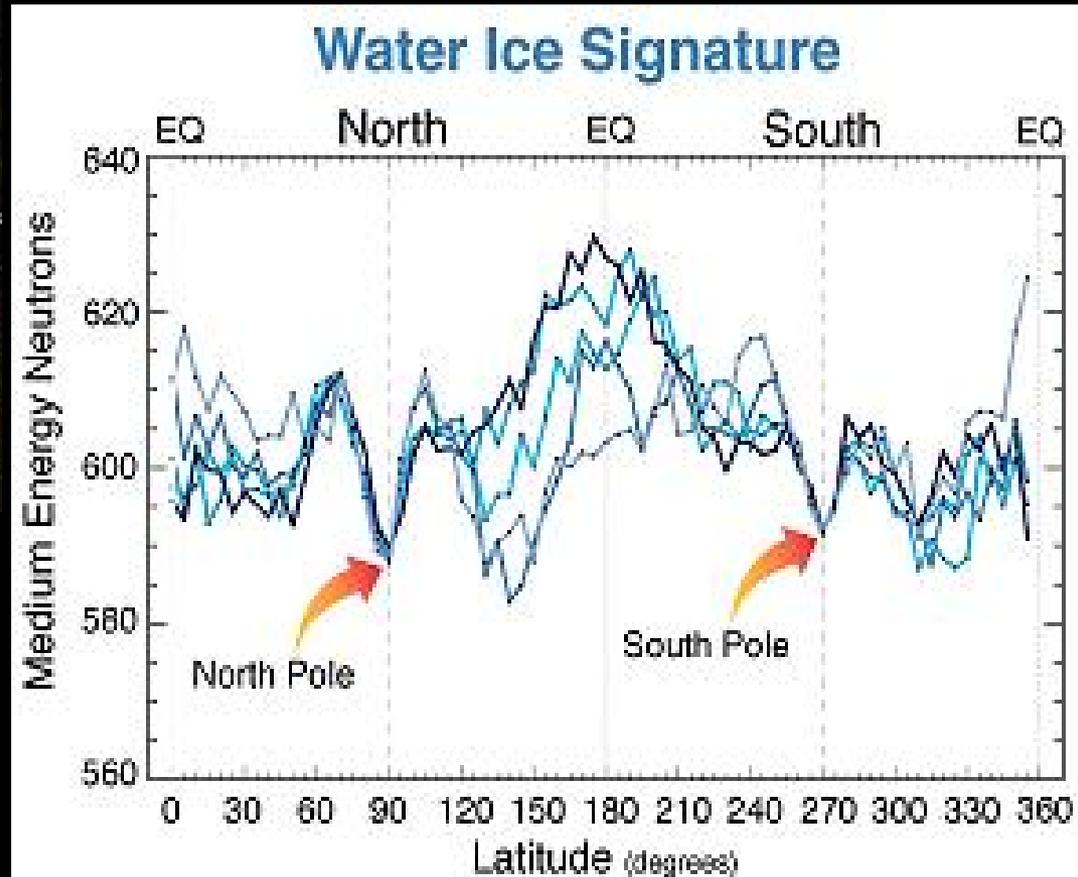


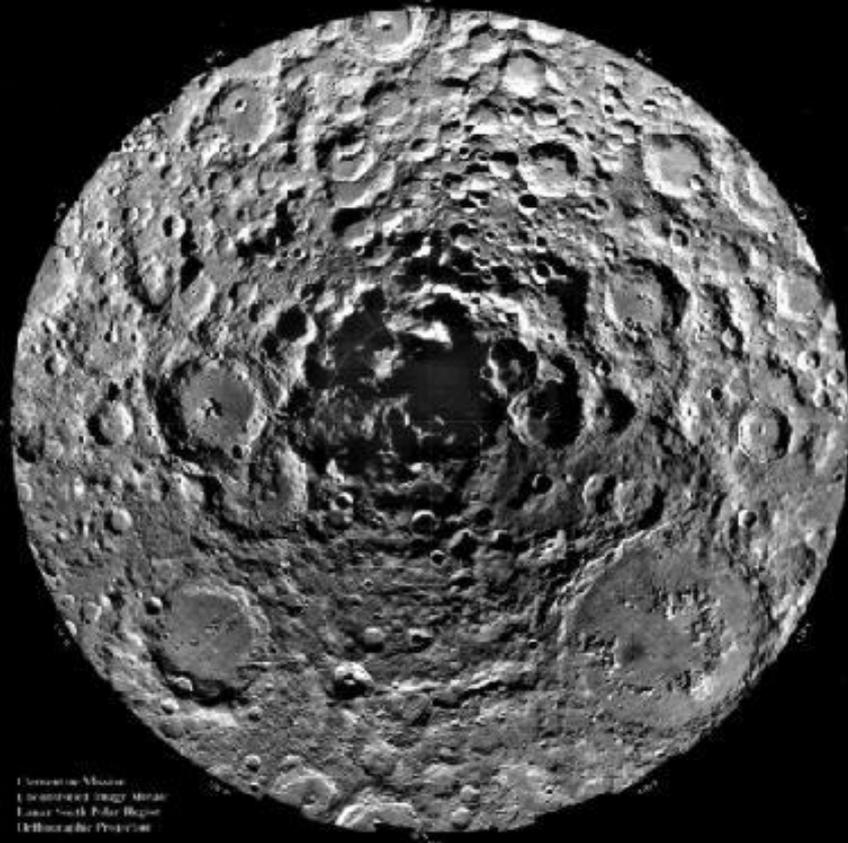
La Lune reçoit des rayons cosmiques. Ces rayons arrivent au sol et provoquent des réactions nucléaires. Ces réactions nucléaires fabriquent des neutrons. Si il y a du Deutérium dans le sol, ces neutrons sont ralentis. Il n'y a plus qu'à mesurer la vitesse des neutrons émis par les cratères polaires pour savoir si il y a de la « glace lourde »



**La sonde Lunar Prospector en orbite polaire autour de la Lune. Elle avait un détecteur de neutrons, neutrons ralentis par des substances telles qu'H<sub>2</sub>O**

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

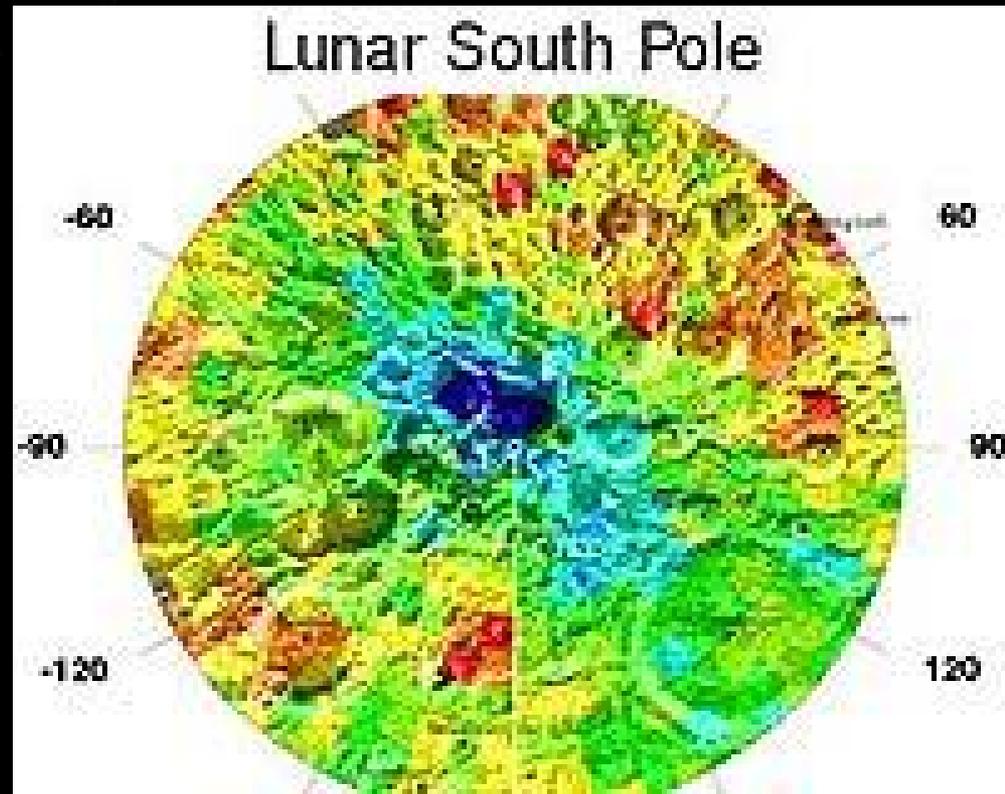




© 2009 NASA  
Lunar Reconnaissance Orbiter  
Lunar South Pole Region  
LRO/Diviner/Diviner

**Et c'est à l'emplacement de ces cratères que les neutrons sont ralentis. Ces cratères contiendraient de la glace d' $H_2O$  !**

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

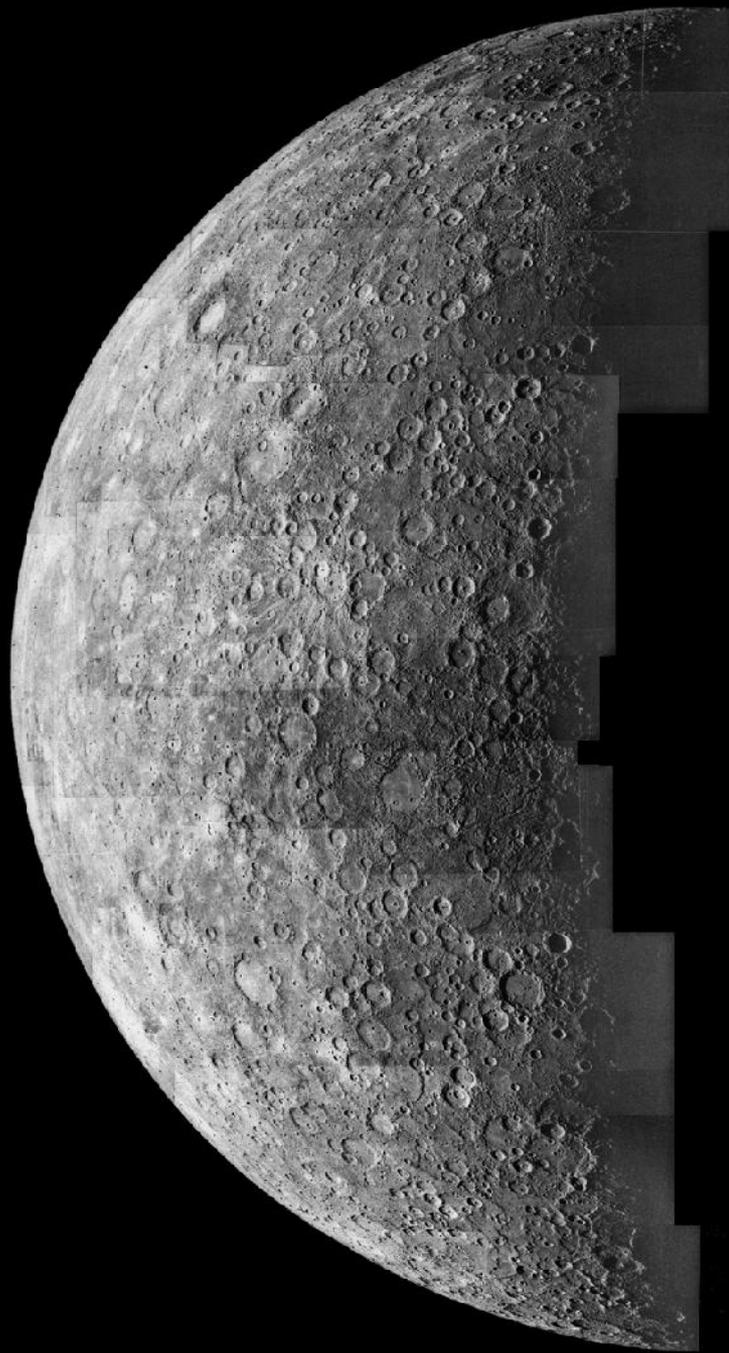




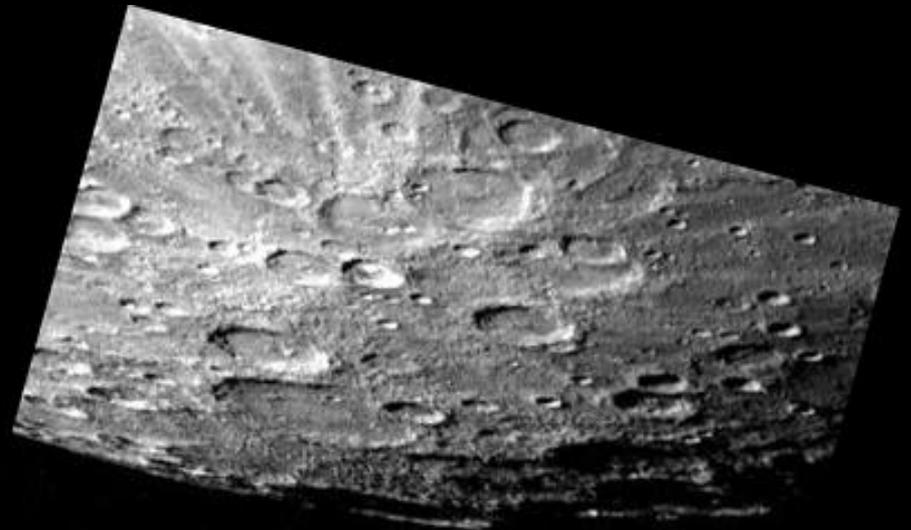
**D'où viendrait cette  
glace sur la Lune ?**

**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.**

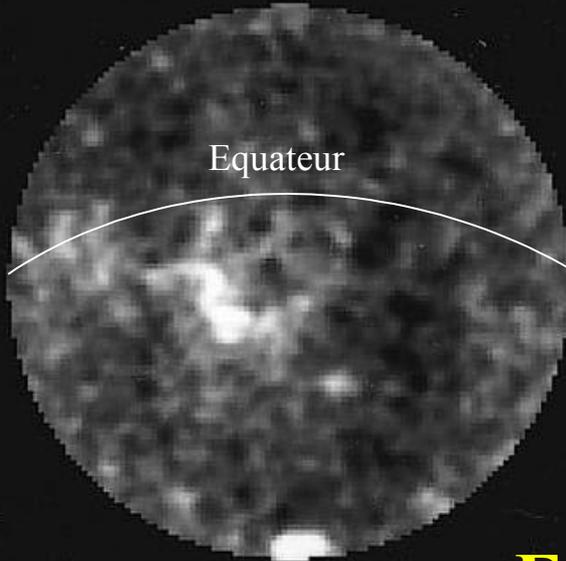
**Et c'est pareil au niveau des cratères polaires de Mercure**



**Mercure : + 450°C le jour,  
-150°C la nuit. Et il y a  
aussi des cratères polaires  
dans une nuit perpétuelle.  
Mais une seule sonde à  
visité Mercure (en 1975),  
sans détecteur de neutrons.**

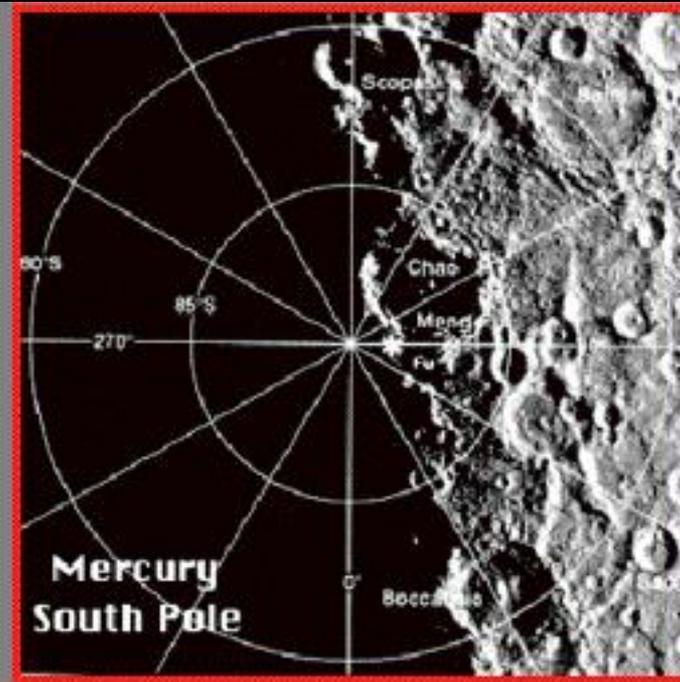
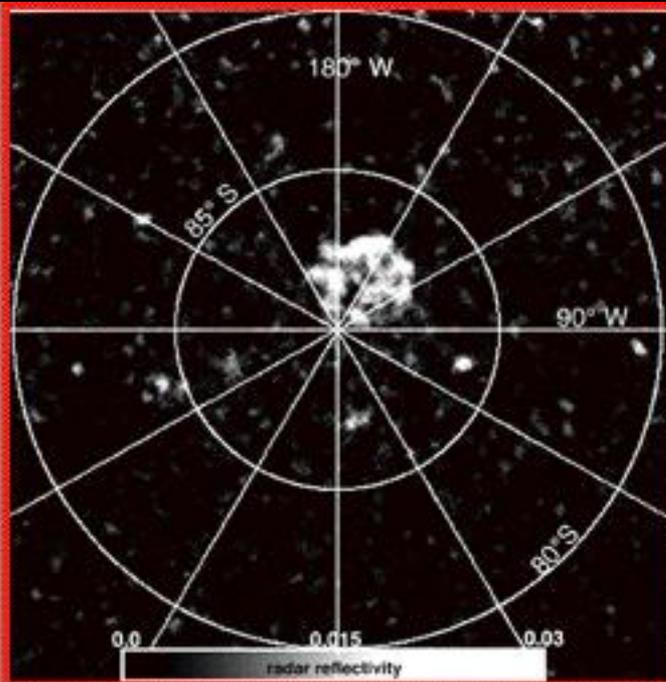


À cause de l'inclinaison de l'orbite de Mercure sur l'écliptique, ses pôles sont « visibles » depuis la Terre. Voici une vue radar de Mercure, avec des taches réfléchissantes au Pôle Sud. La tache principale correspond à un cratère.



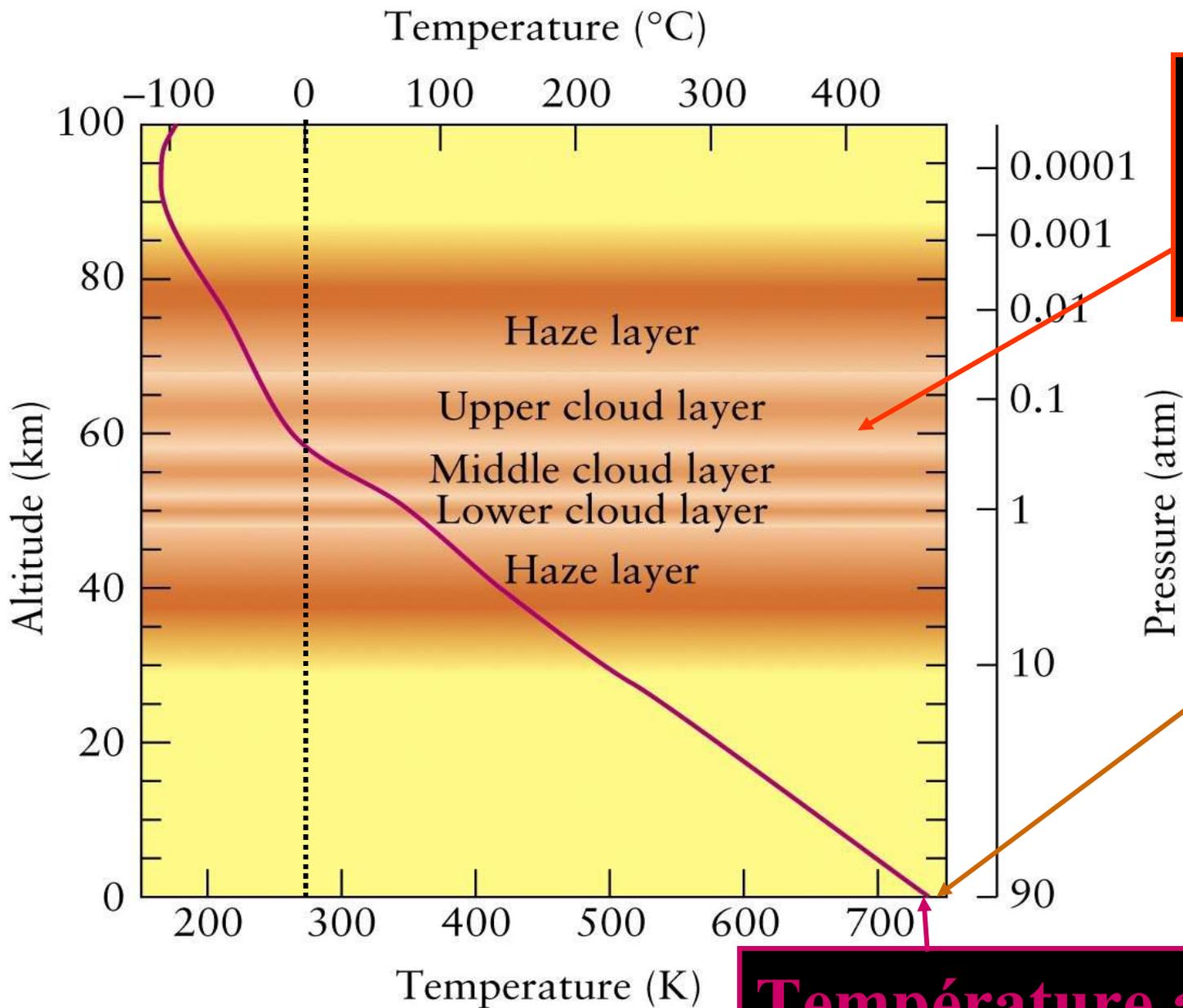
Pôle Sud

Et la glace réfléchit bien les rayons radar !





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



**Nuages  
d'acide  
sulfurique**

**Pression  
de  
90 atm.**

**Température au sol de  
450 $^{\circ}\text{C}$  (725 K)**

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

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

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

**Ar : 0.007%**

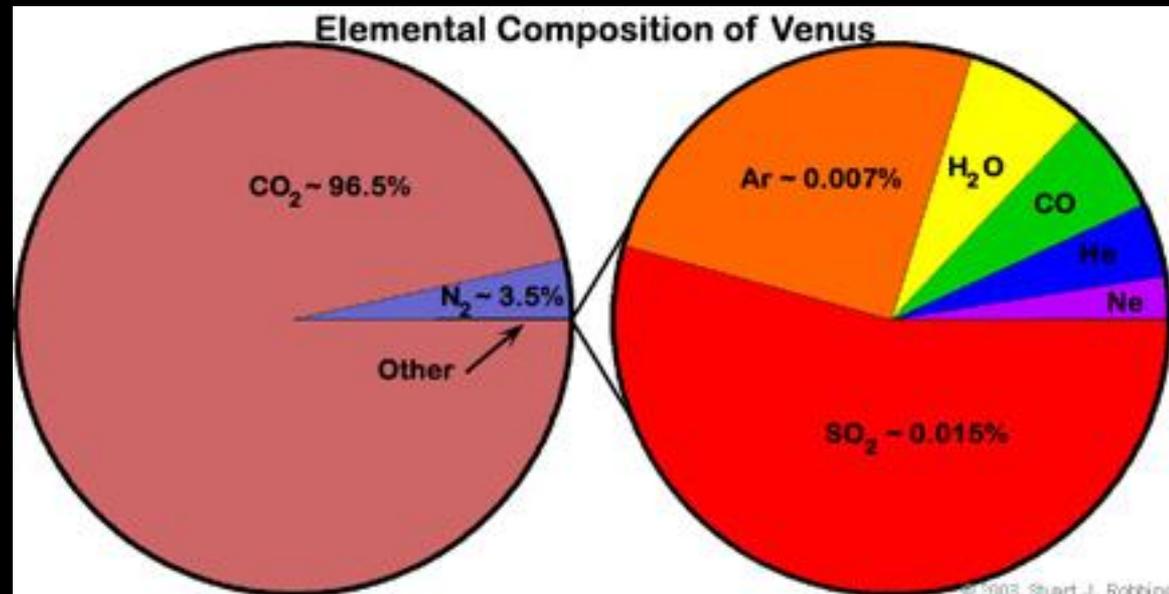
**H<sub>2</sub>O:  
0.002%**

**CO :**

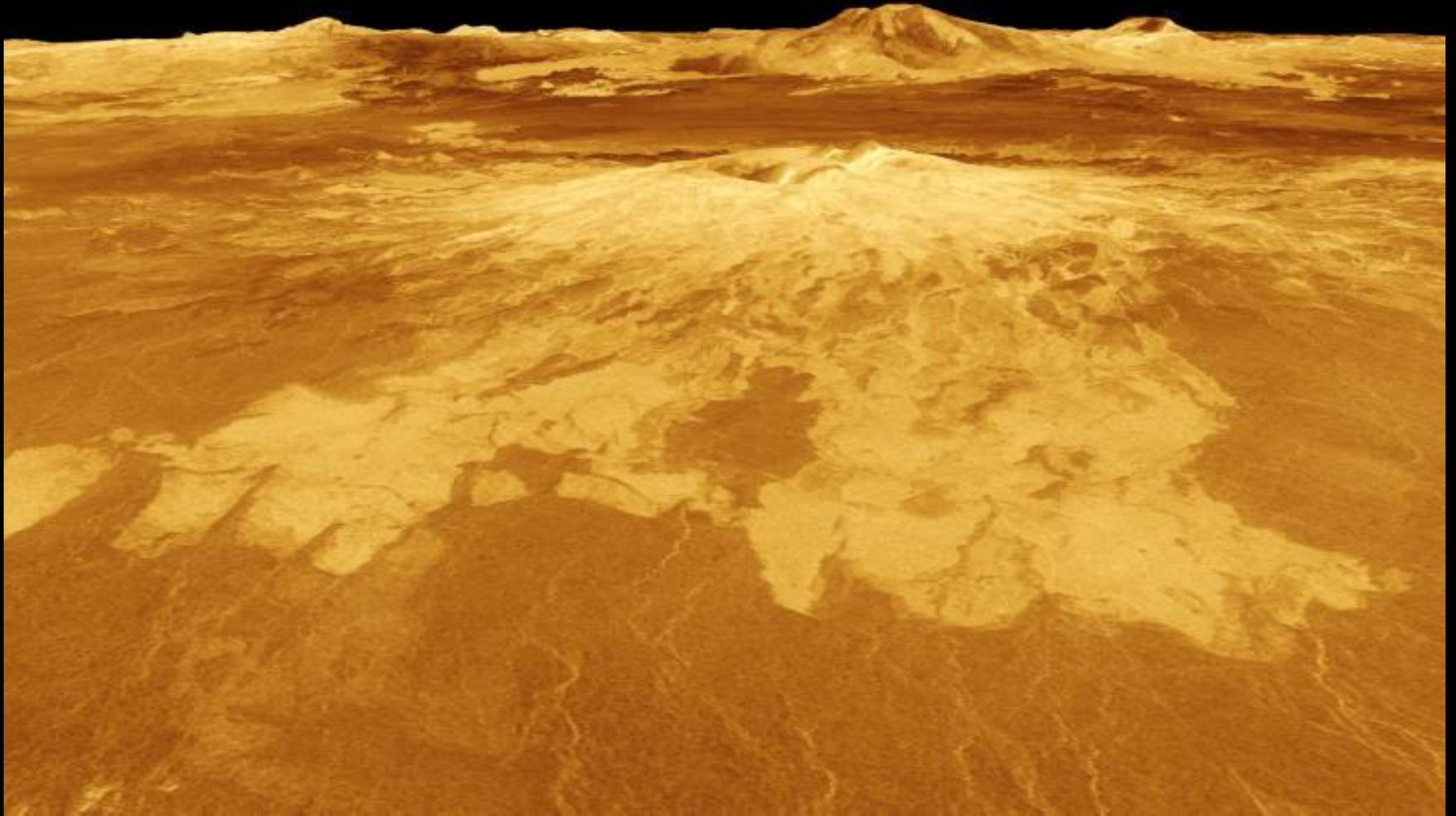
**0.0017%** **La composition de l'atmosphère vénérienne :**

**He : 0,002% de vapeur d'eau (2.10<sup>-5</sup>).**  
**0.0012%**

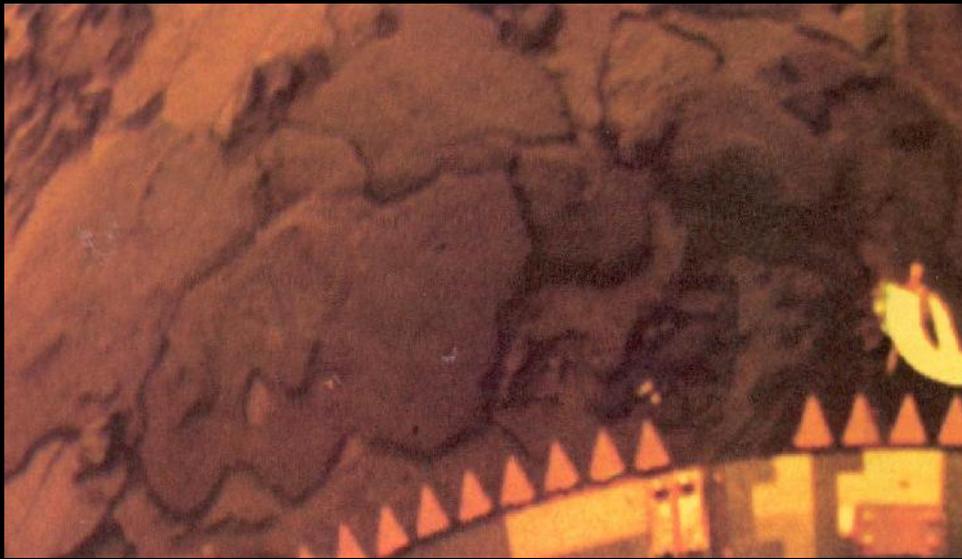
**Si toute cette eau atmosphérique recouvrait la  
surface de Vénus, cela ferait une couche d'eau  
liquide d'environ 1 cm d'épaisseur  
(eau précipitable).**



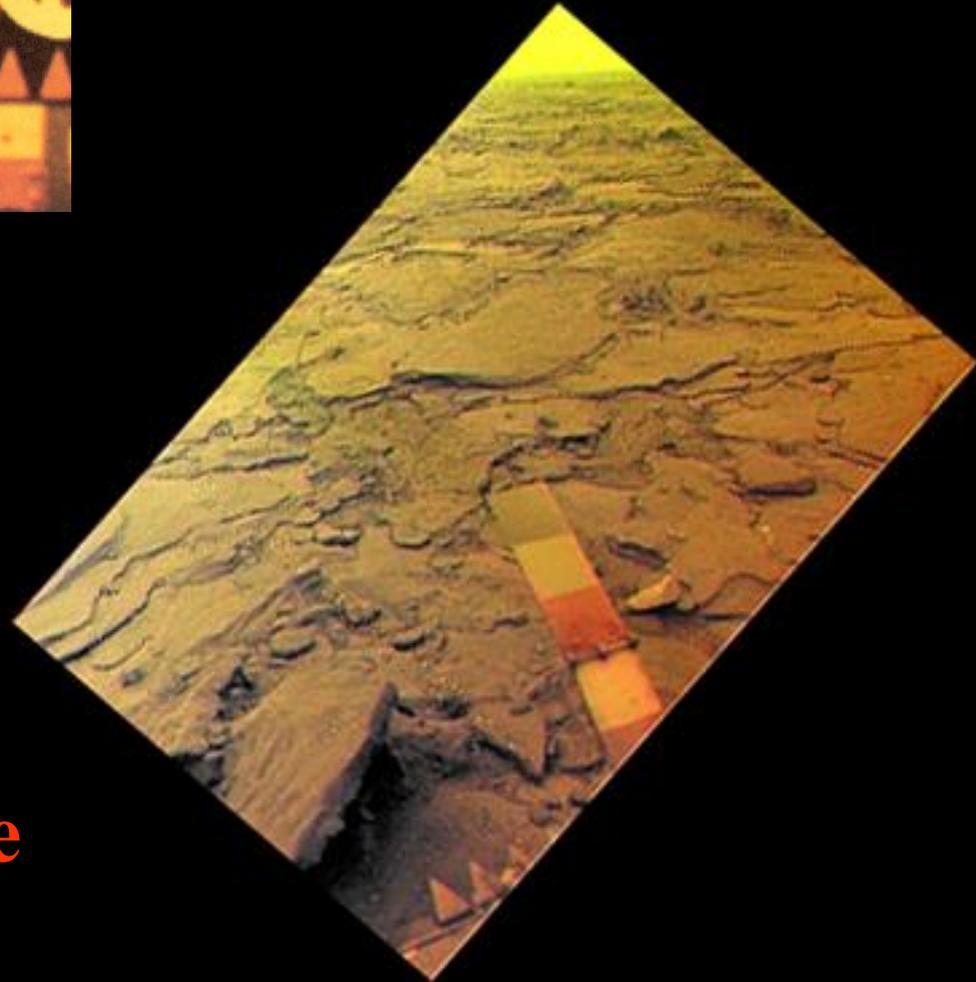
**Où est partie cette eau vénérienne ? Sans doute  
photolysée par les abondants UV solaires, avec  
échappement de l'H<sub>2</sub>**

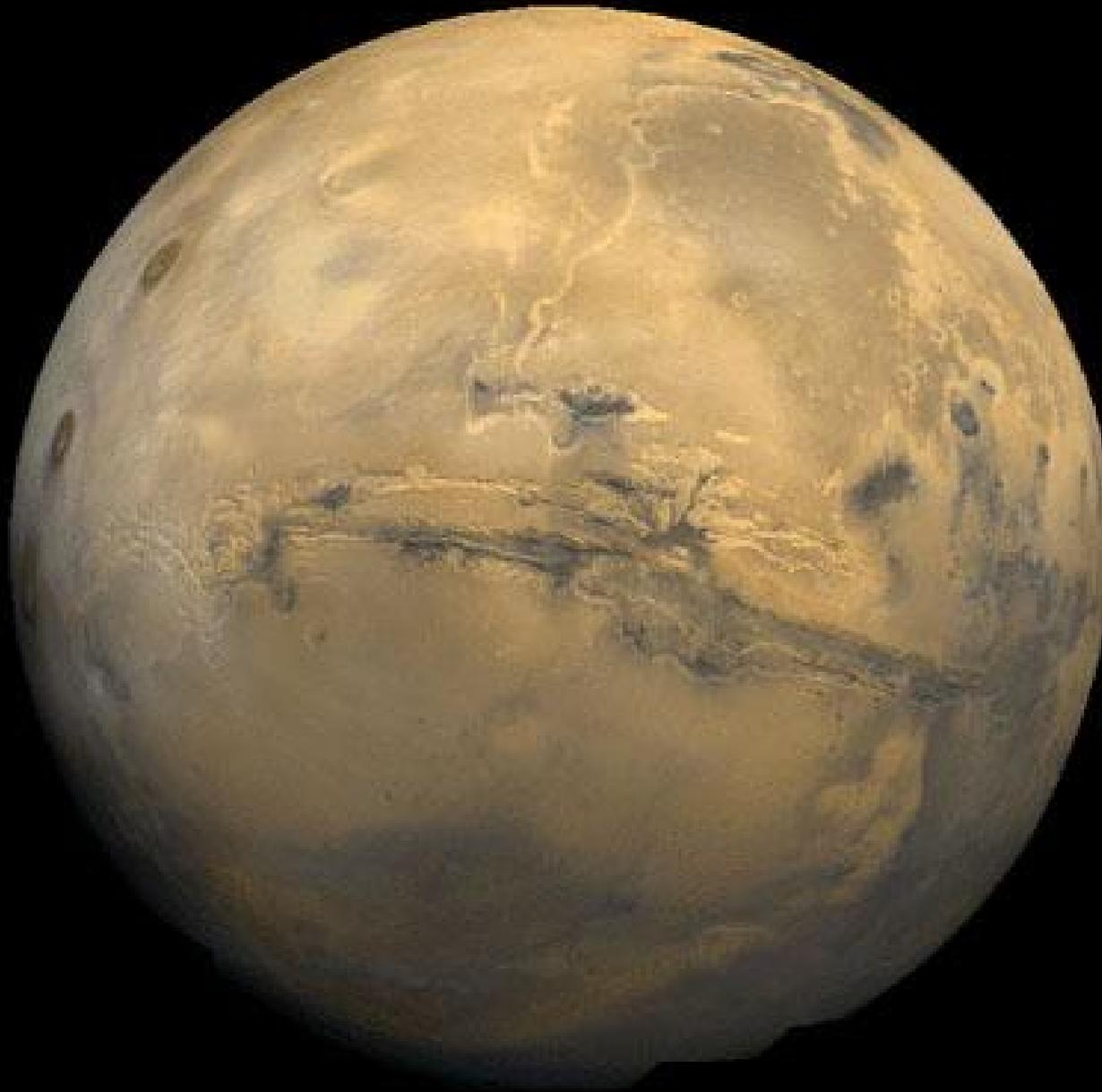


**Mais où est l'O<sub>2</sub> ?**



**Les sols de Vénus,  
photographiés par des  
sondes soviétiques, sont  
rouges, sans doute  
riches en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. L'O<sub>2</sub>  
libéré par la photolyse de  
l'eau y serait piégé**





# Mars.

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



CASSINI 1666

Doc. Pierre Thomas

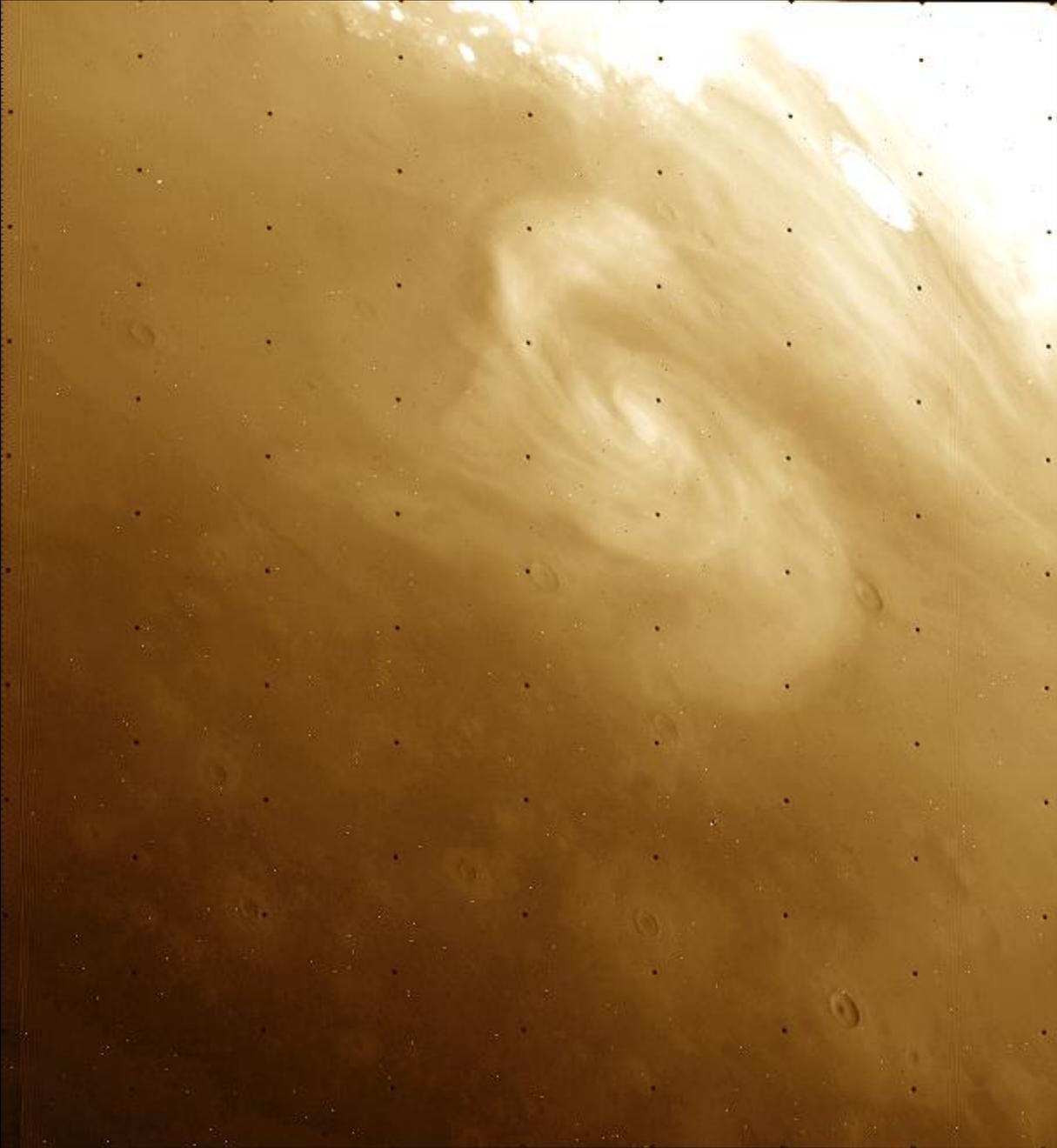
**1666 : Cassini découvre des calottes polaires sur Mars.**

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

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

**Où trouve-t-on de l'eau sur Mars ? Partout !**  
**Sur la calotte polaire nord, donc**  
**(cette calotte à la taille de celle du Groenland).**





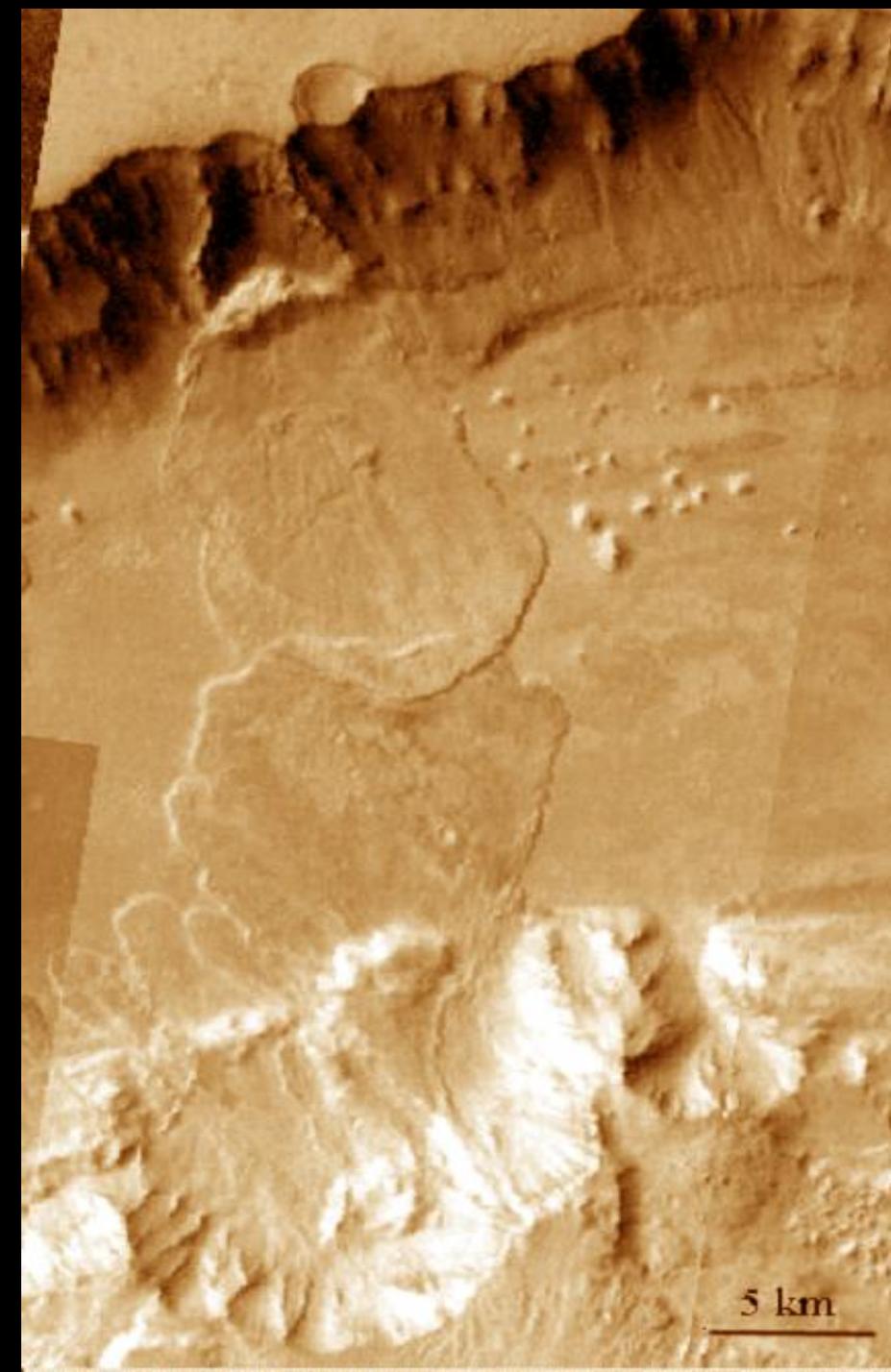
# Dans l'atmosphère

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

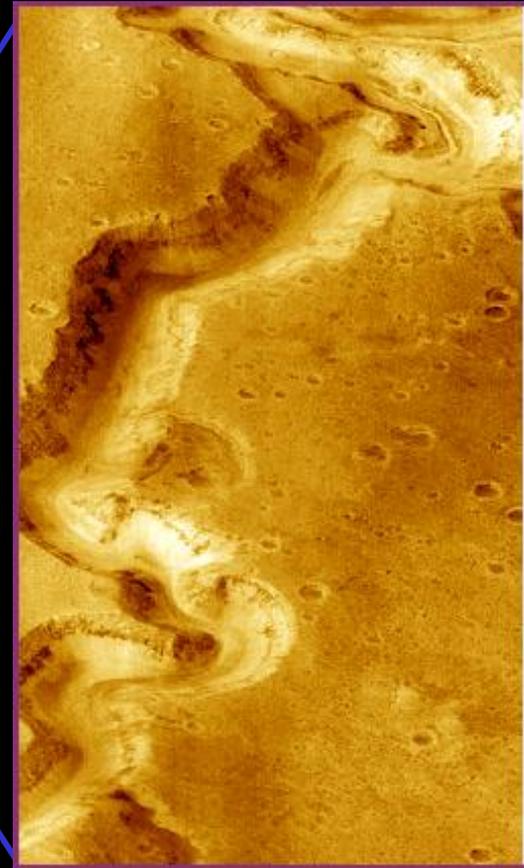
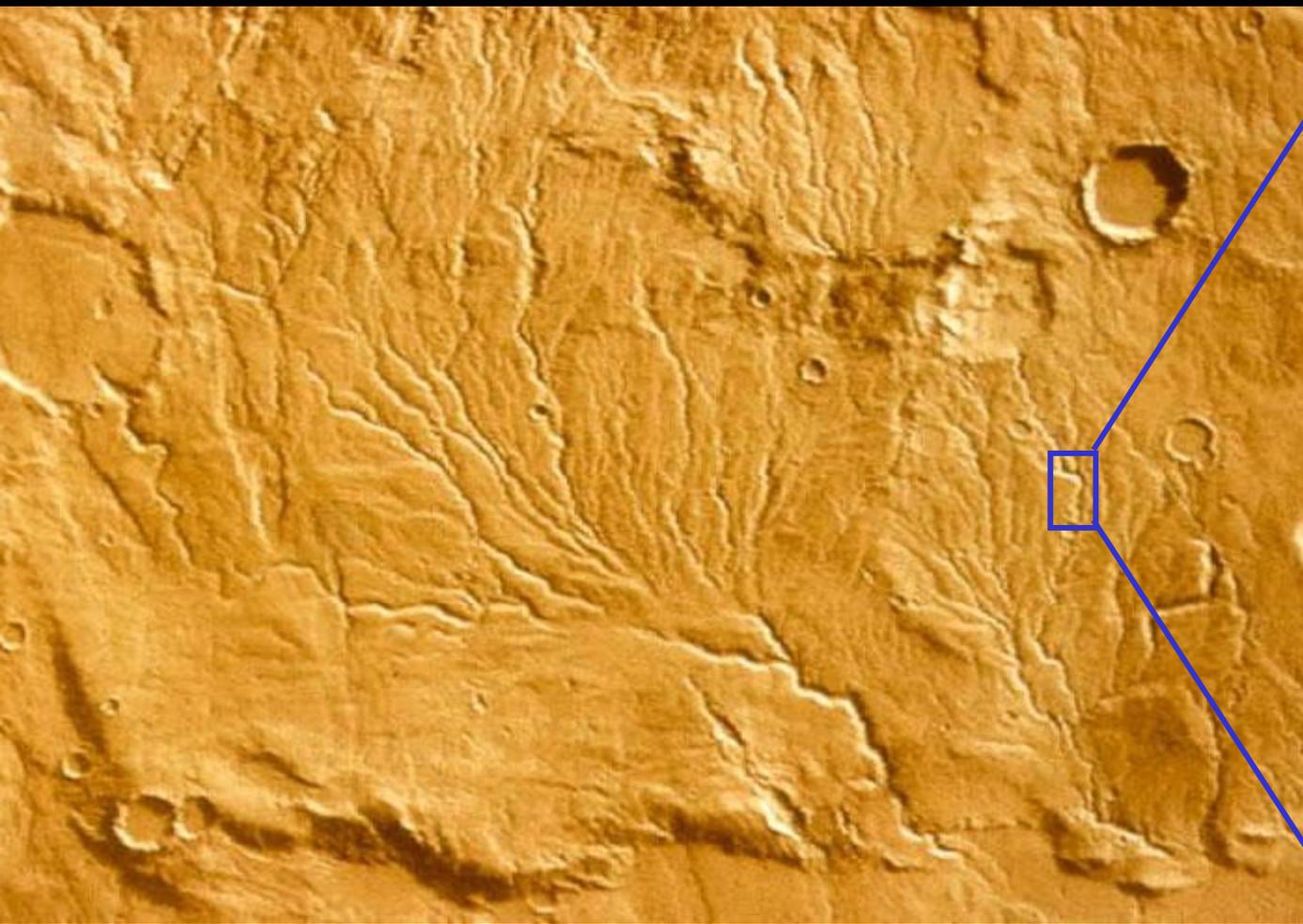


**Il y en a  
dans le  
sous-sol  
profond.  
Les  
cratères y  
font  
« sploch »**

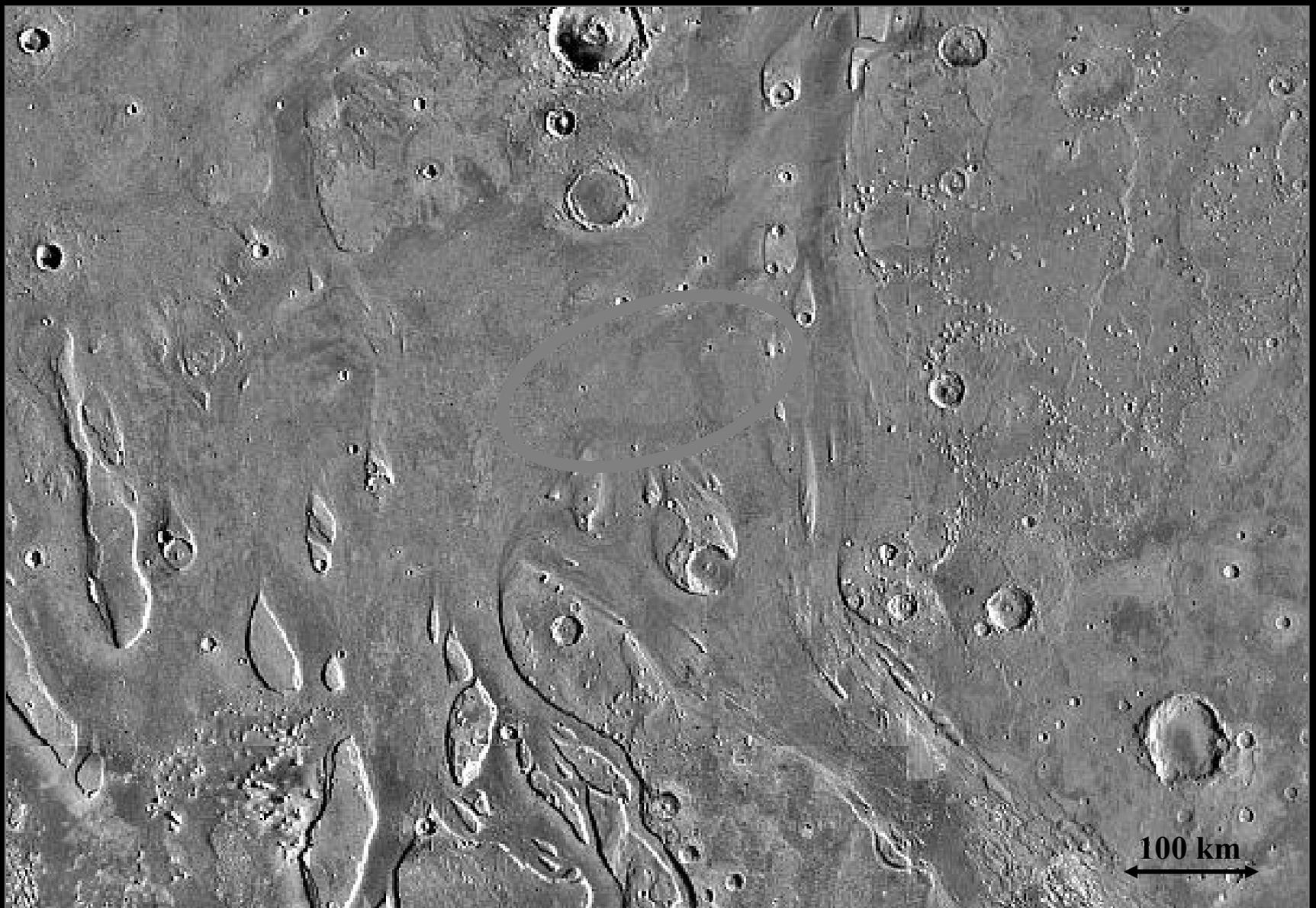
**Elle a permis des  
glissements de  
terrains qui  
ressemblent à des  
coulées de boue**



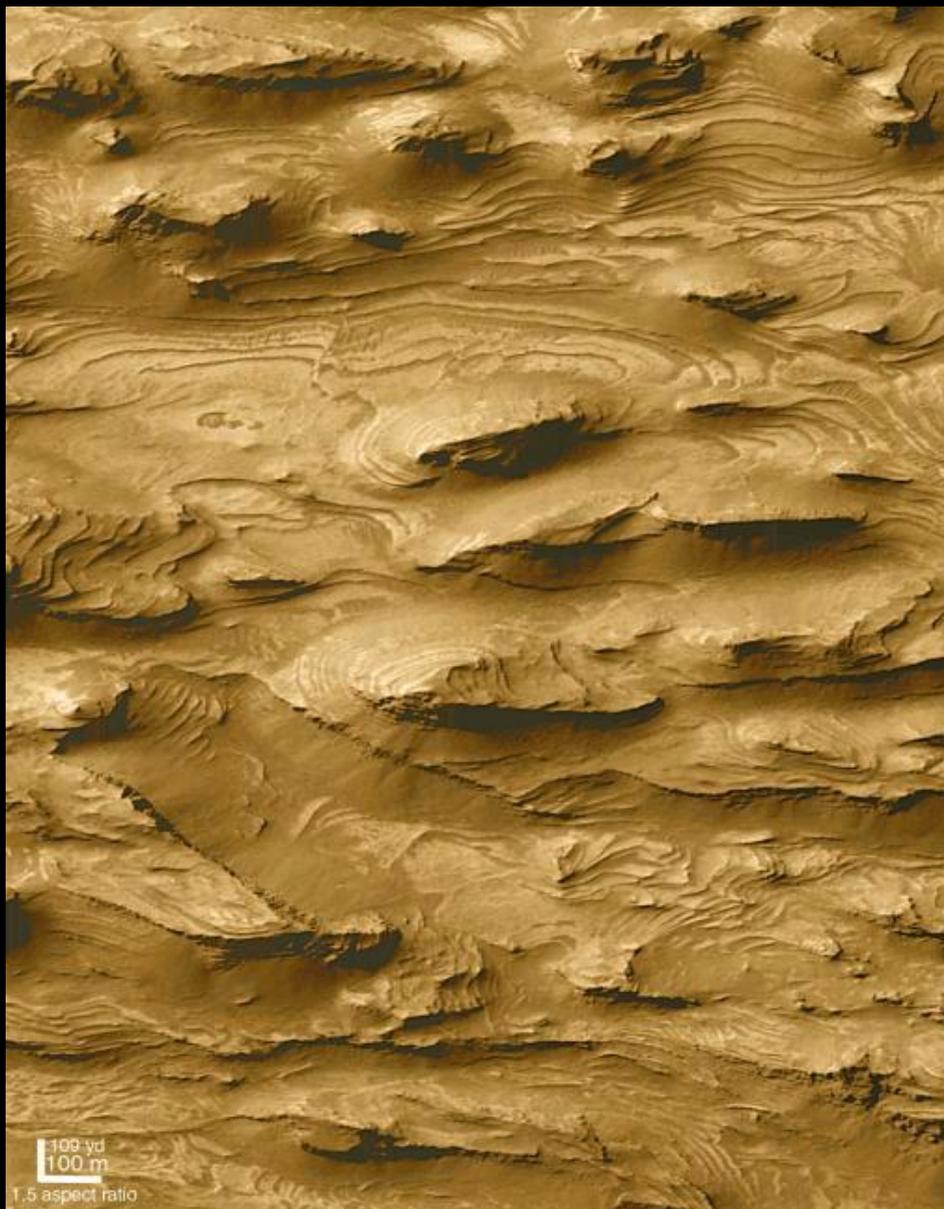
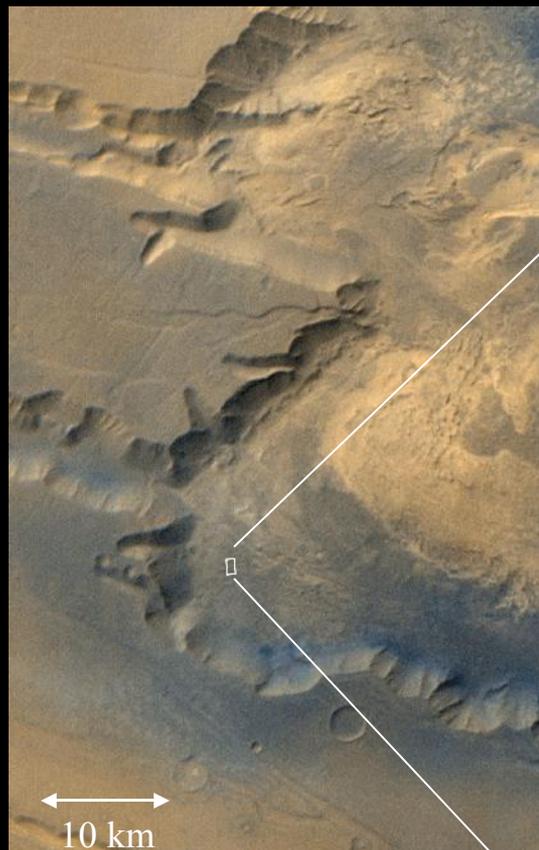
5 km



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



**Dans un passé moins lointain (3,5 Ga), des débâcles ont fait des réseaux de vallées très larges, avec estuaires, îles ...**



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

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 c

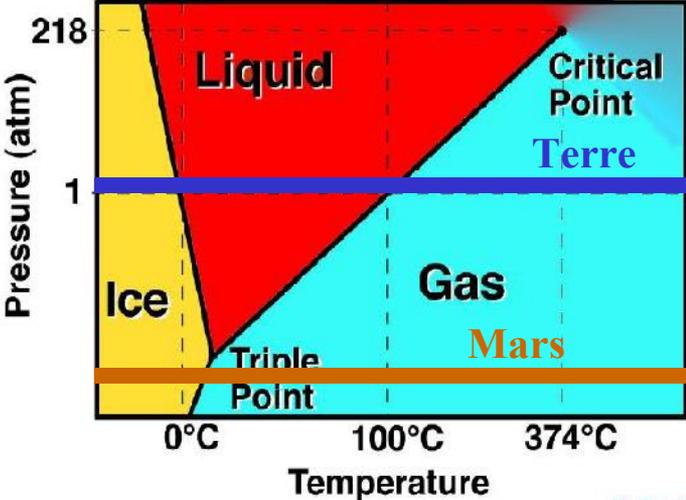
en moyenne  $-50^{\circ}$ , elle est sur

très faible proportio

Que se pass

« tiède », issue d

boue et gèle à la

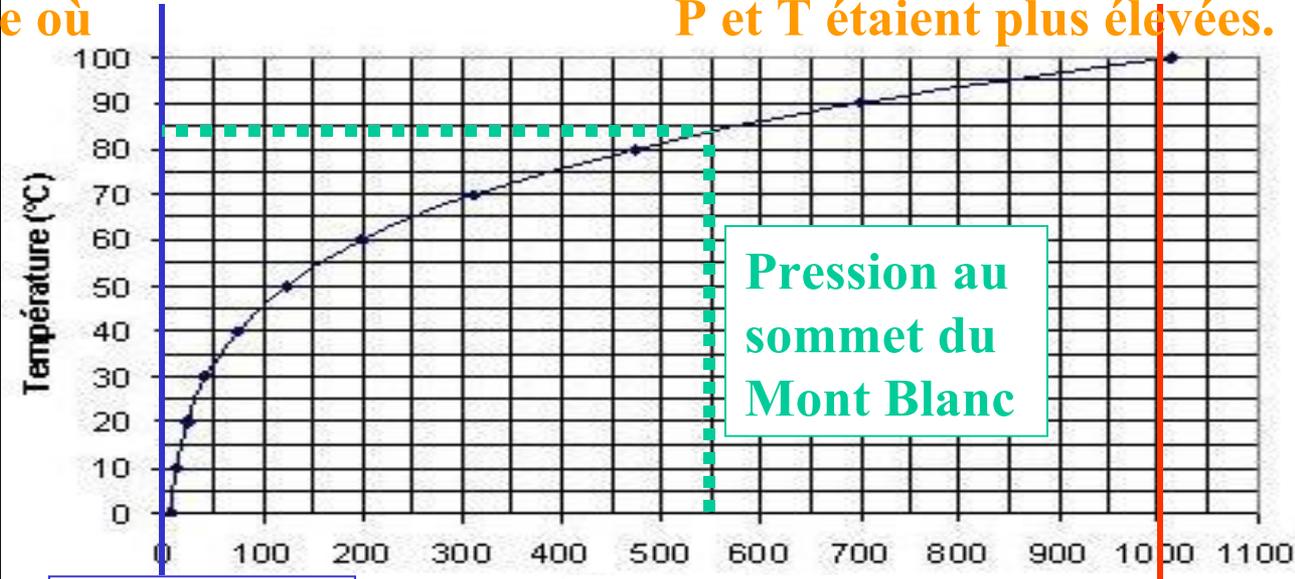


de l'eau  
L'eau

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

**Voici 2 des grandes questions que l'on se pose en ce début de 21ème siècle :**

**(2) Depuis quand n'y a t'il plus d'eau liquide en surface ?**

**(3) Cette eau liquide, n'était-elle que transitoire, ou était-ce de l'eau pérenne, avec pluie, rivières tranquilles, mer ... ?**

**C'est pour commencer à répondre à ces questions que 7 sondes (dont 1 européenne) ont été envoyées depuis 10 ans**

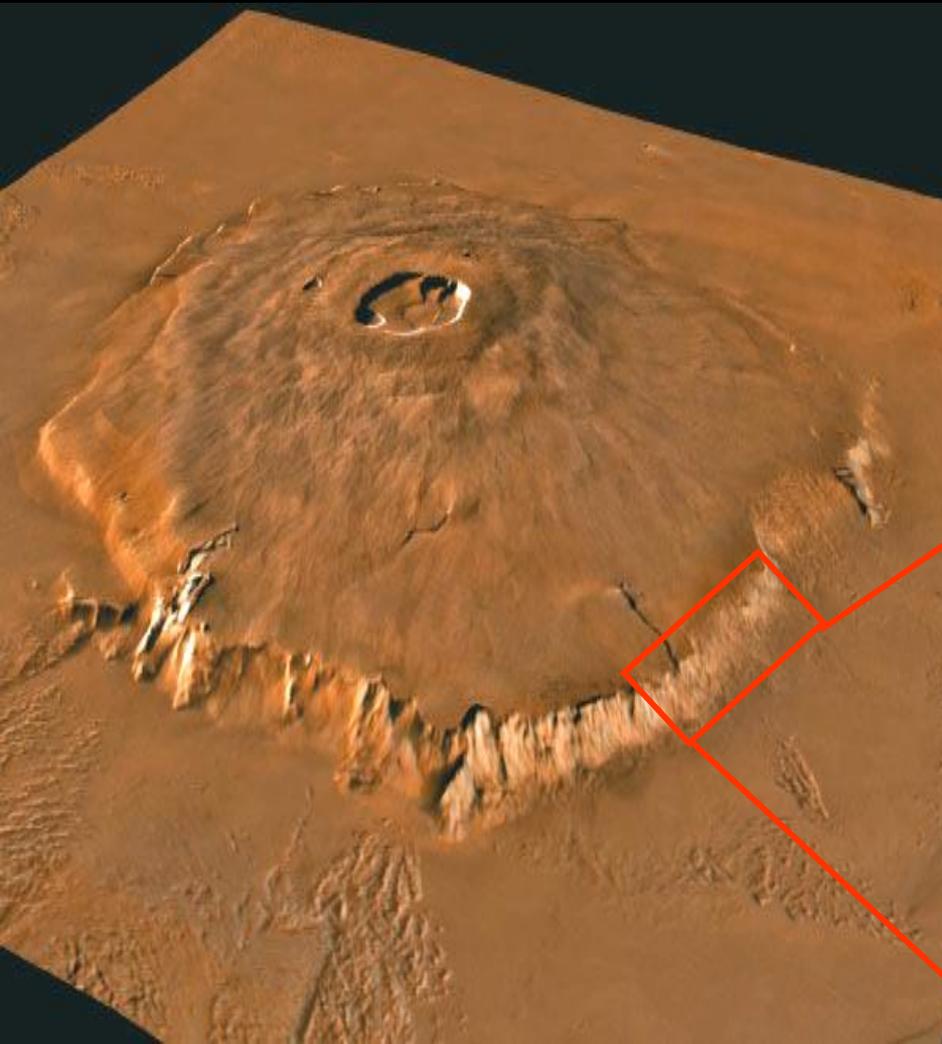
**Exemple  
d'eau liquide  
transitoire :  
une éruption  
volcanique  
dans un sol  
gelé ou sous  
un glacier.**

Vatnajokull 1996

**Exemple d'eau liquide  
pérenne, tranquille ... :  
la Loire alimentée par  
des sources, les pluies ...**



**Les résultats des sondes en orbite : on voit bien mieux qu'avant (les sondes Viking, 1976) des paysages prouvant qu'il y a de l'eau, liquide ou solide.**



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



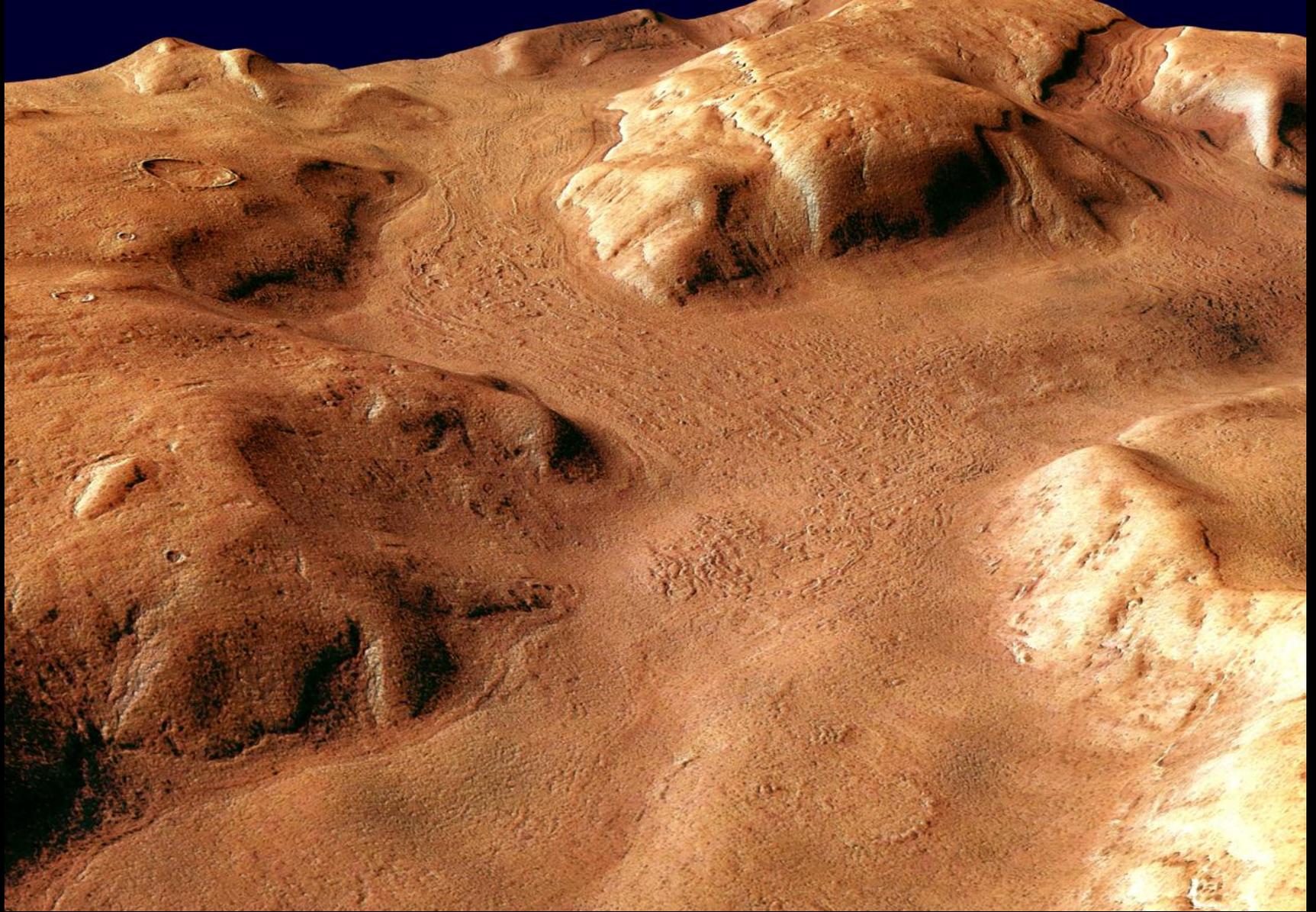


Flancs d'Olympus Mons



Flancs d'une montagne antarctique

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

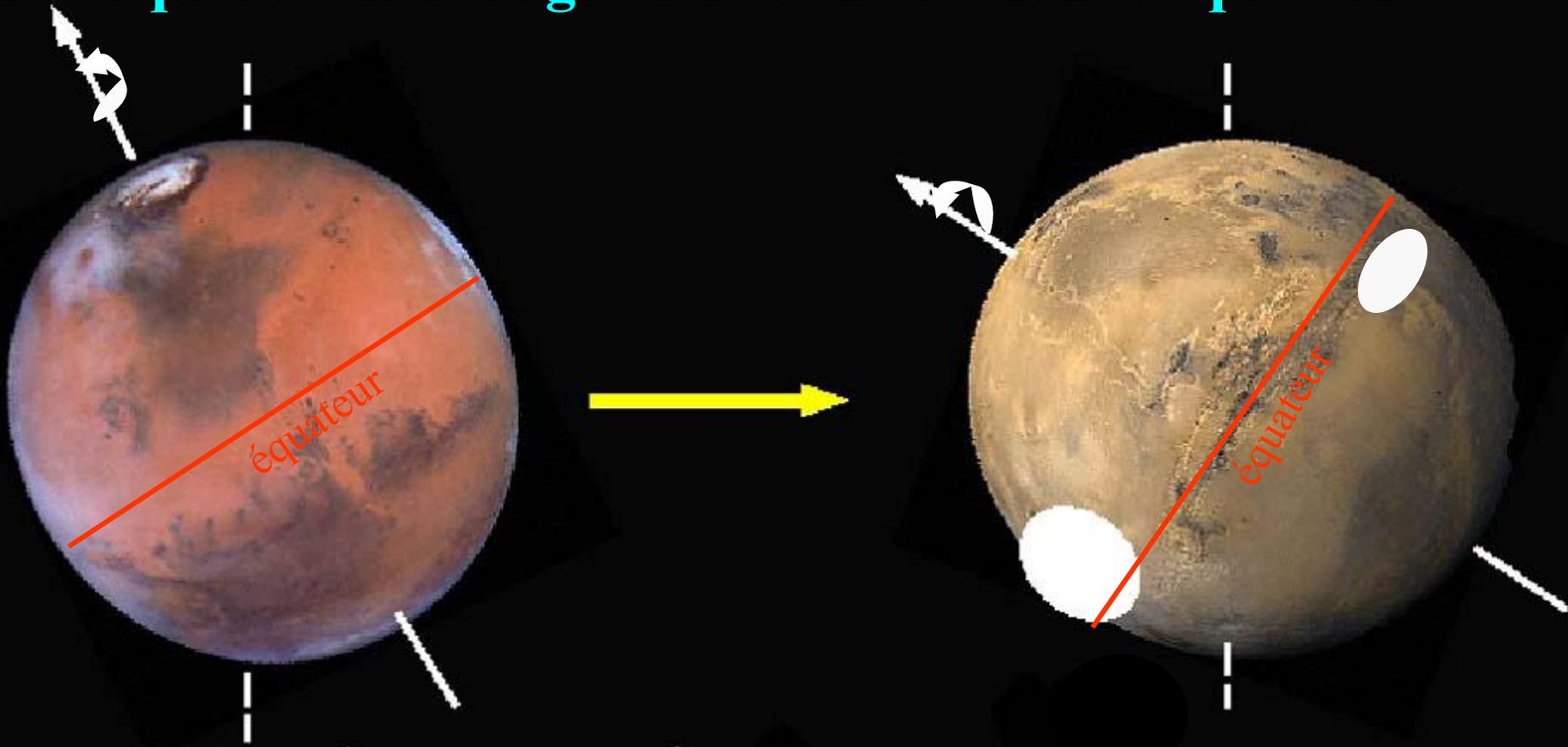


**Autre glacier de la région de Reuil Vallis,  
autres montagnes équatoriales.**



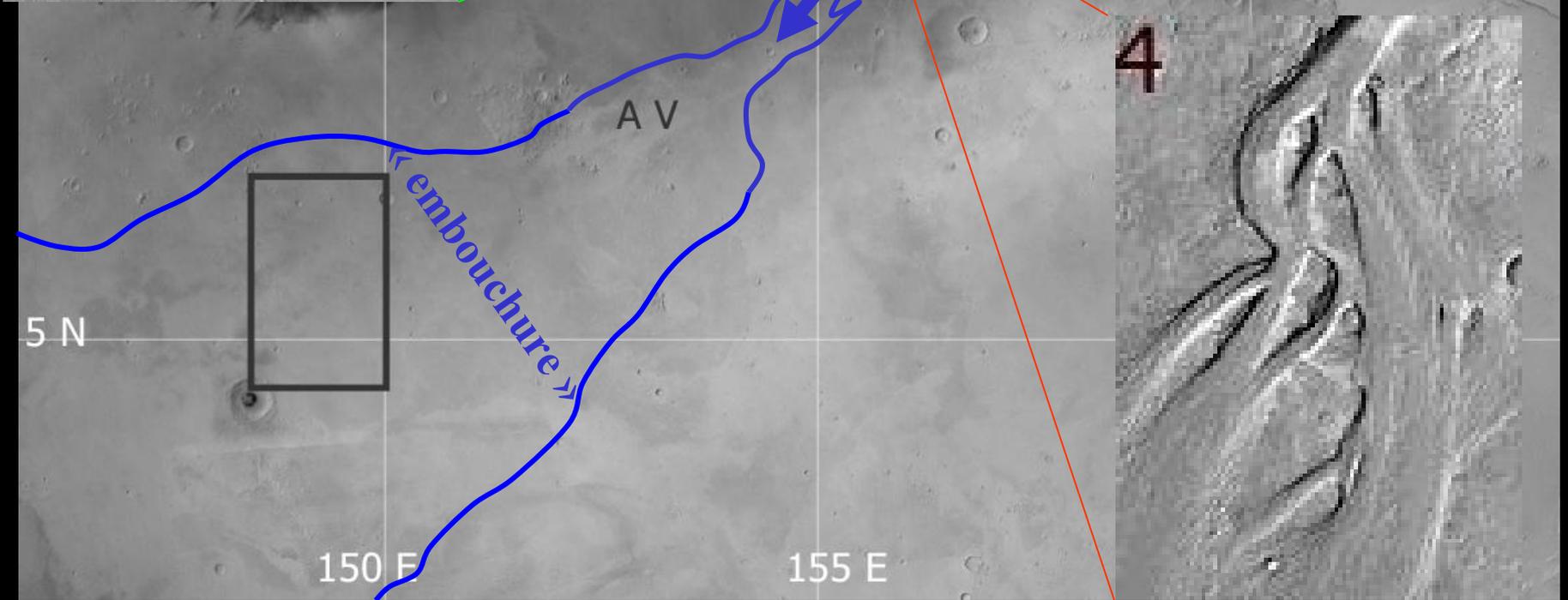
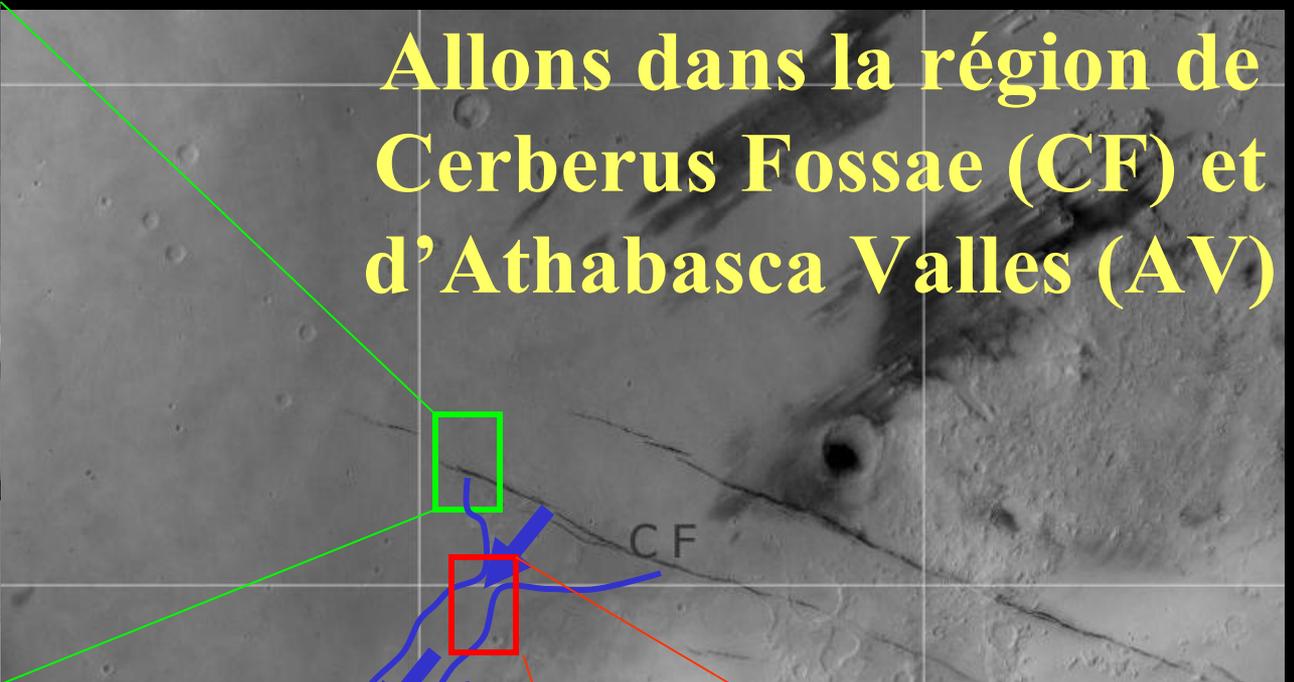
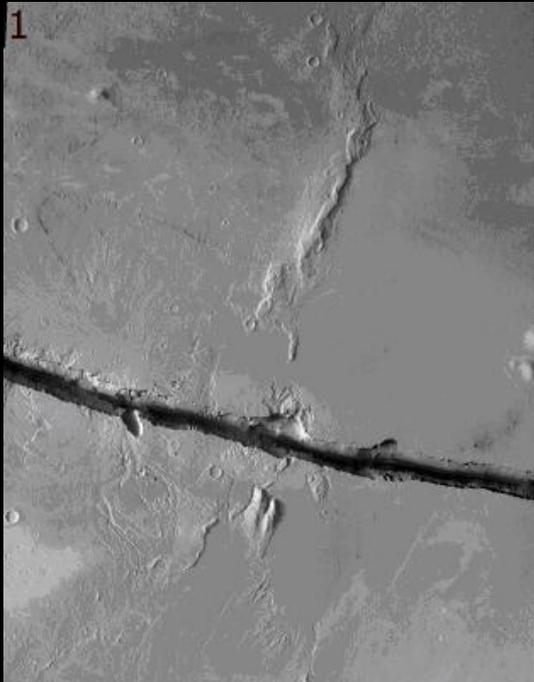
**Une possible analogie terrestre. Mais pourquoi des glaciers récents sur les montagnes équatoriales ?  
Une histoire de bascule chaotique de l'axe de rotation.**

# Pourquoi d'anciens glaciers dans les zones équatoriales ?



**La variation d'inclinaison de l'axe des pôles peut expliquer la variation de taille et de position des calottes glaciaires. Les derniers glaciers équatoriaux auraient moins de 10 millions**

Allons dans la région de  
Cerberus Fossae (CF) et  
d'Athabasca Valles (AV)



5 N

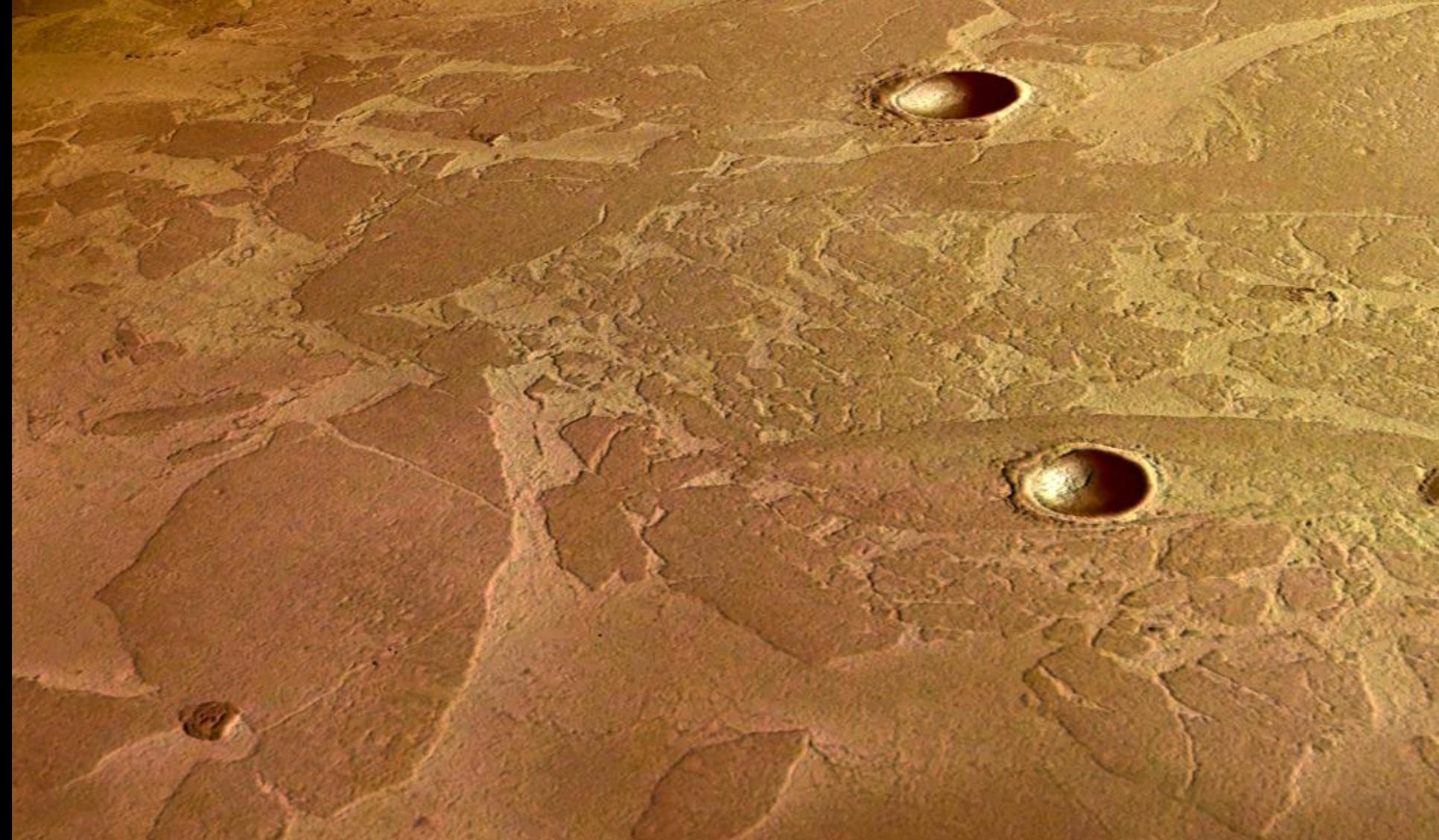
150 E

155 E

« embouchure »

AV

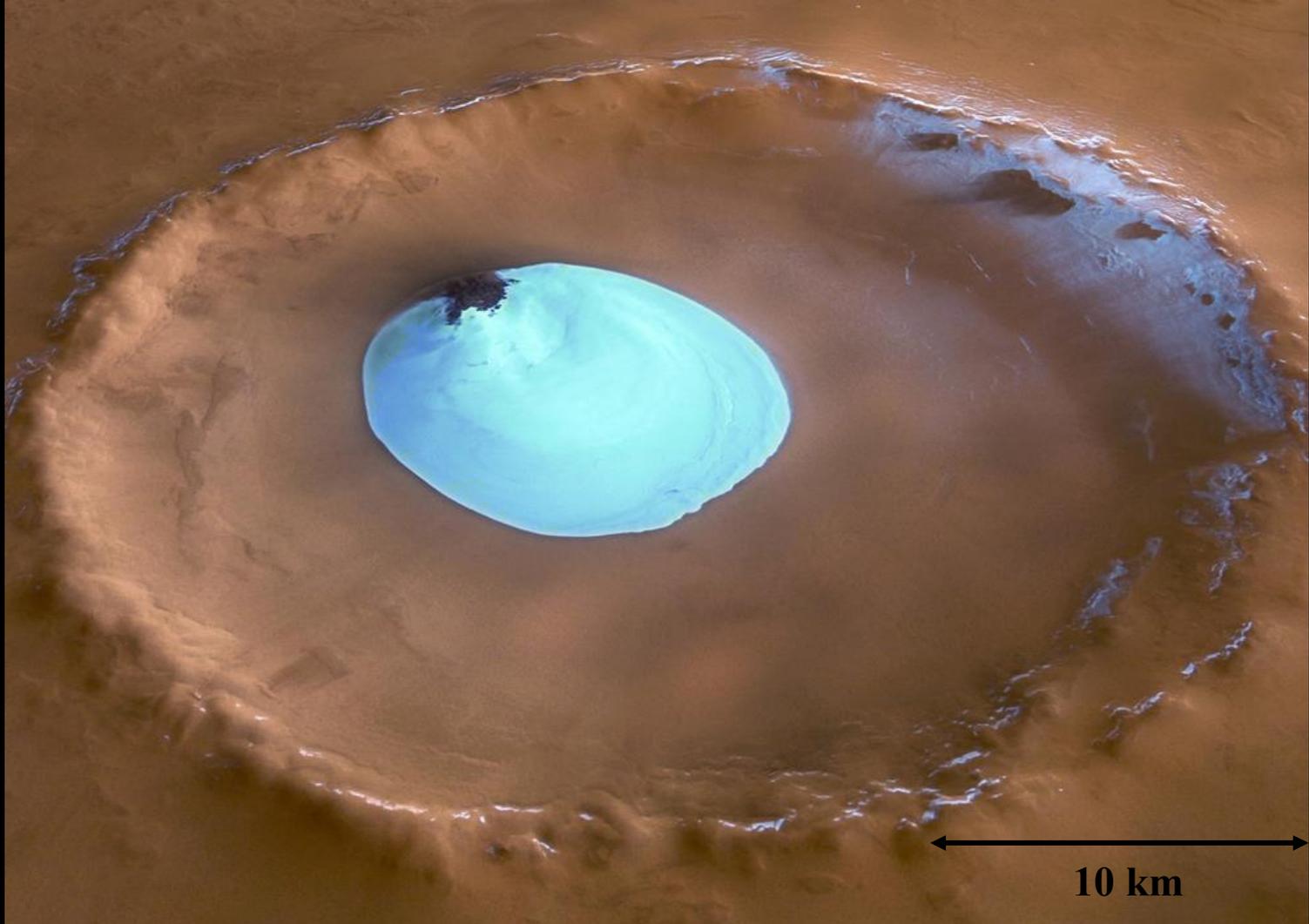
CF



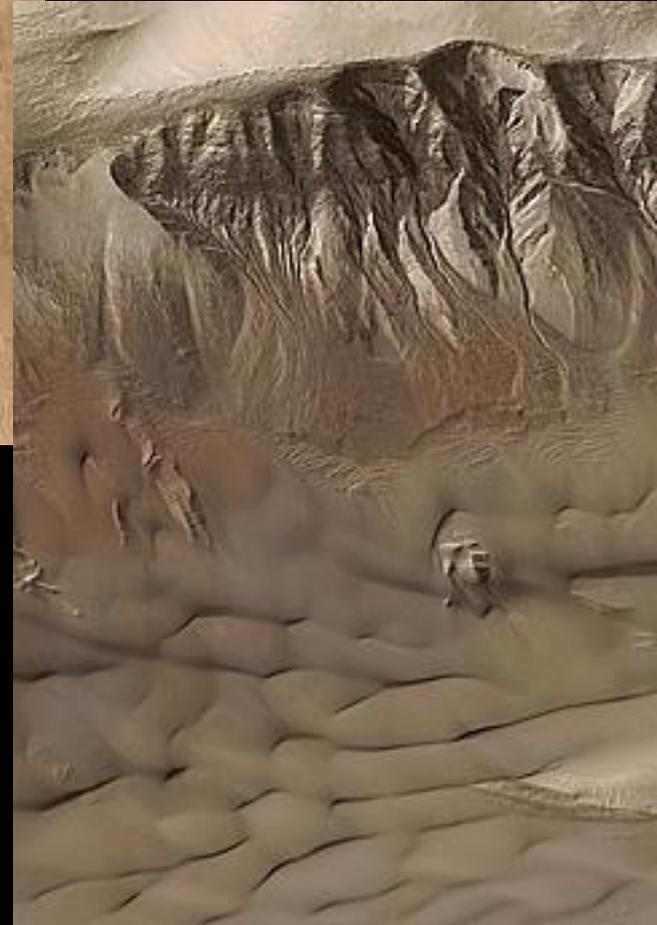
**L'embouchure : une paléo-banquise dérivante  
sur un paléo-lac gelé  
(âge : quelques dizaines millions d'années**



**Deux possibles  
équivalents  
terrestres**



**Et voici, au fond d'un cratère dont les flancs nord sont recouverts de givre ou de neige, un lac gelé, pas du tout « paléo »**



**Et voici ce qu'on appelle des « gullies » (ravine, voire rigole), petites ravines de quelques centaines de mètres qui dévalent des pentes « exposées au soleil » d'anciens cratères ou de vallées.**

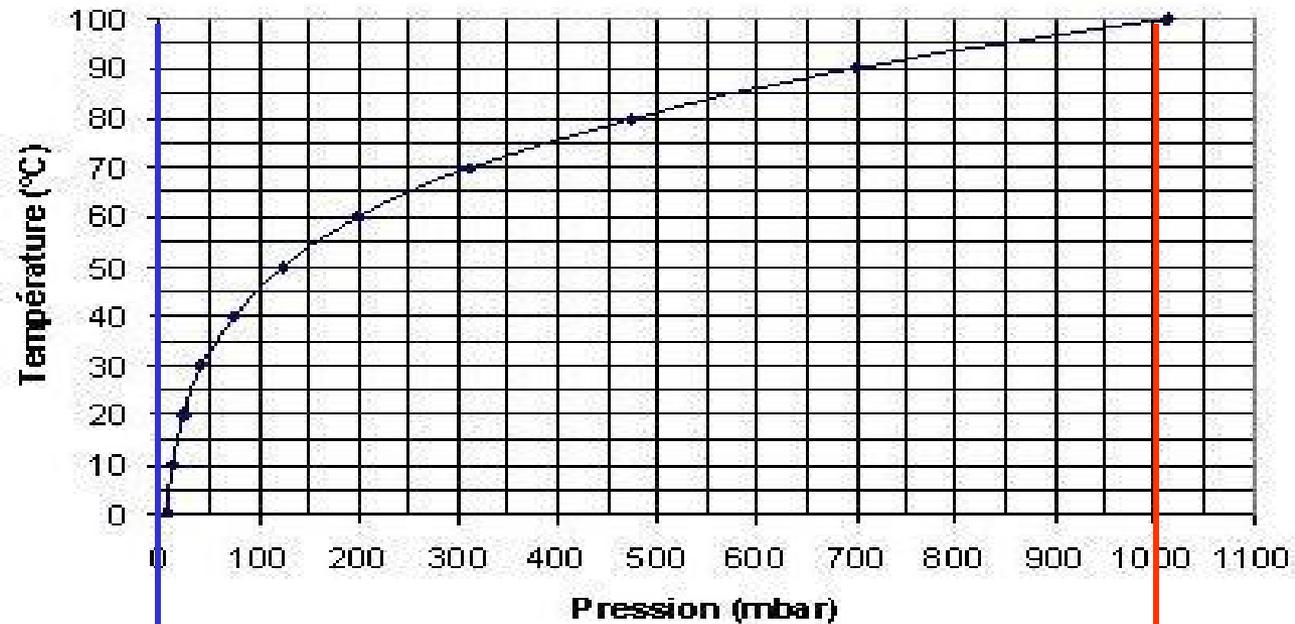
**Les gullies ont été découvertes en 1997**

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

**A**



**Sur Mars, la pression de de 6 mbar (hPa). A cette pression, l'eau ne peut pas être liquide. Elle est en glace et/ou en vapeur. Et comme il fait en moyenne  $-50^{\circ}$ , elle est surtout en glace, avec une très faible proportion de vapeur. Que se passe t'il si on renverse sur mars de l'eau « tiède » issue d'une thermos présurisée ? L'eau boue et gèle à la fois !**



**Pression  
sur Mars**

**Pression  
sur Terre**

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

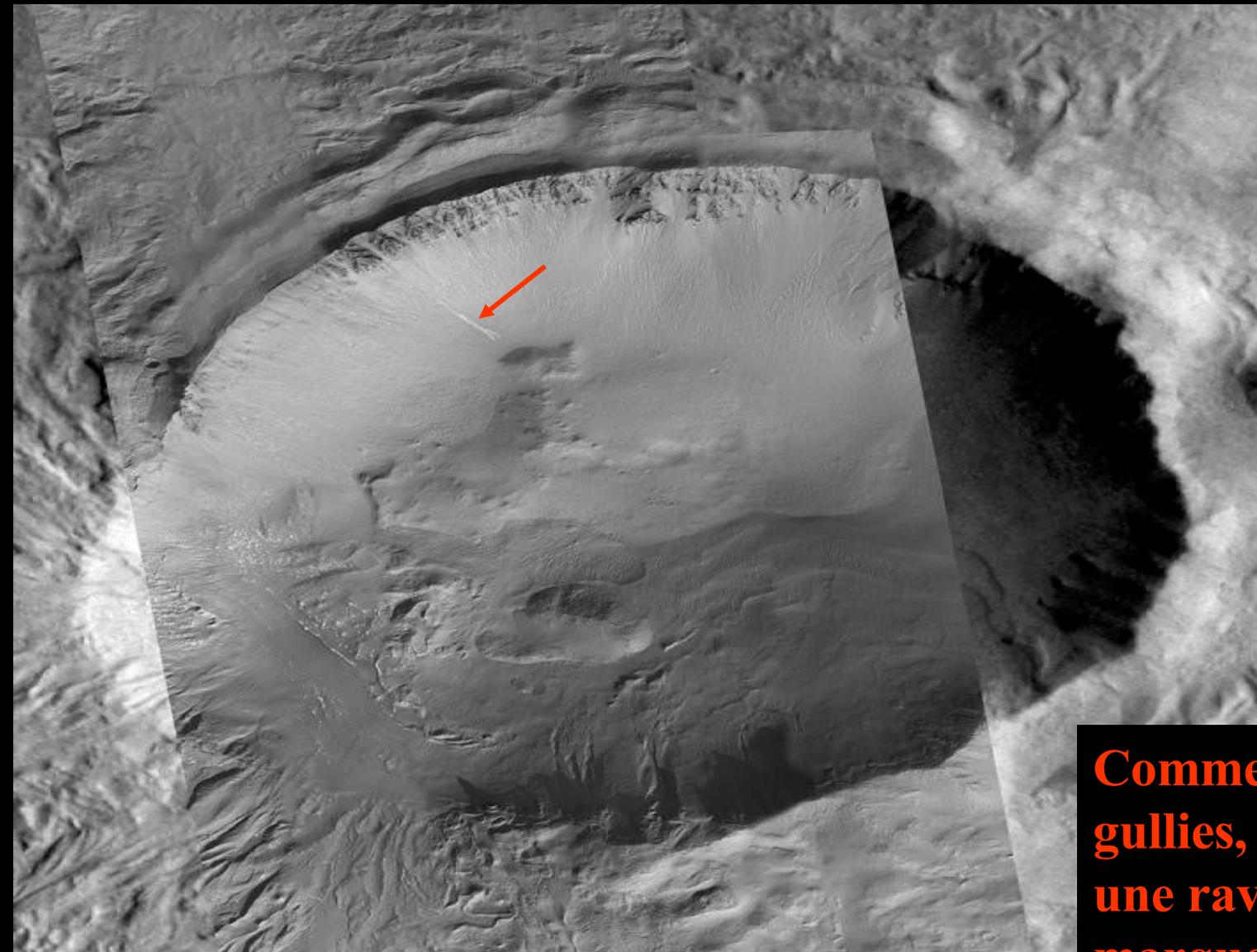


Sur les versants exposés au soleil, la température peut approcher les 0°C

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

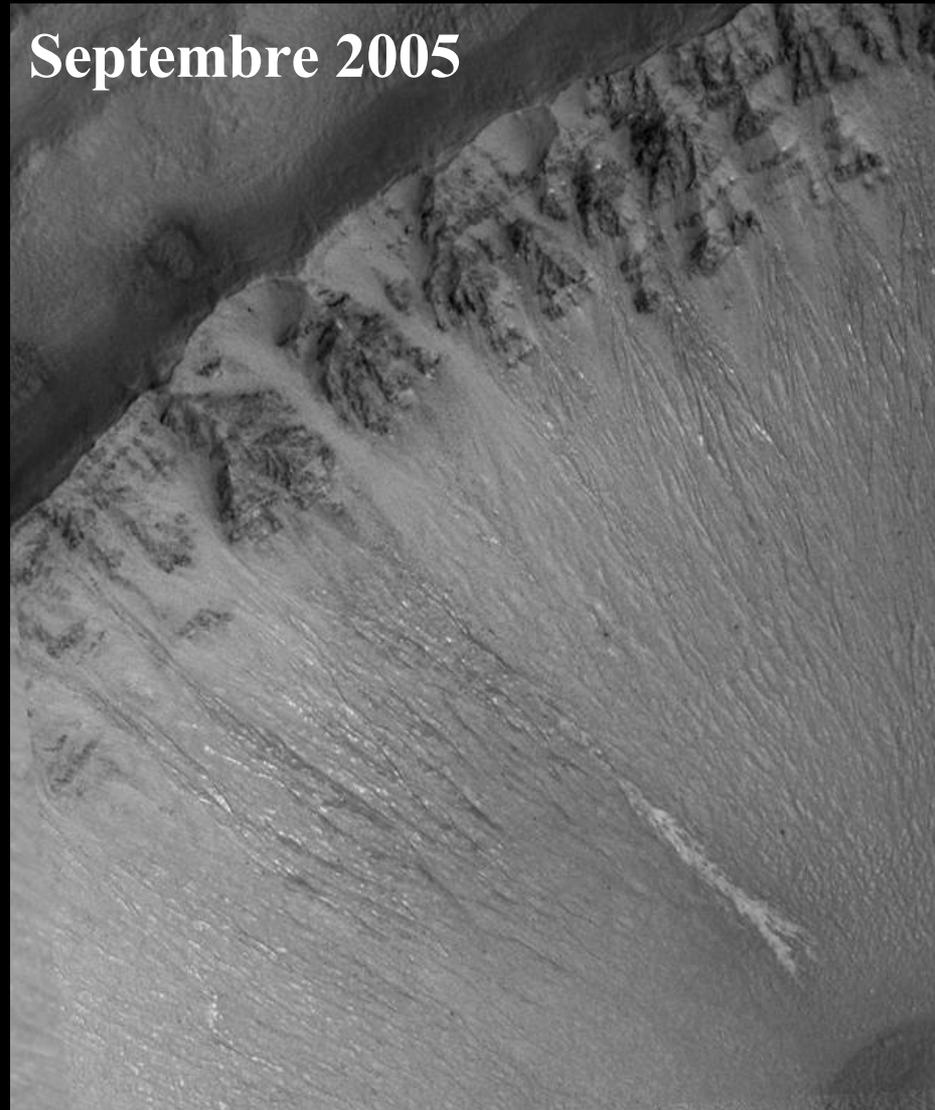
La glace peut fondre sous ces versants réchauffés, l'eau liquide peut crever les terrains étanches et s'écouler, brièvement.

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

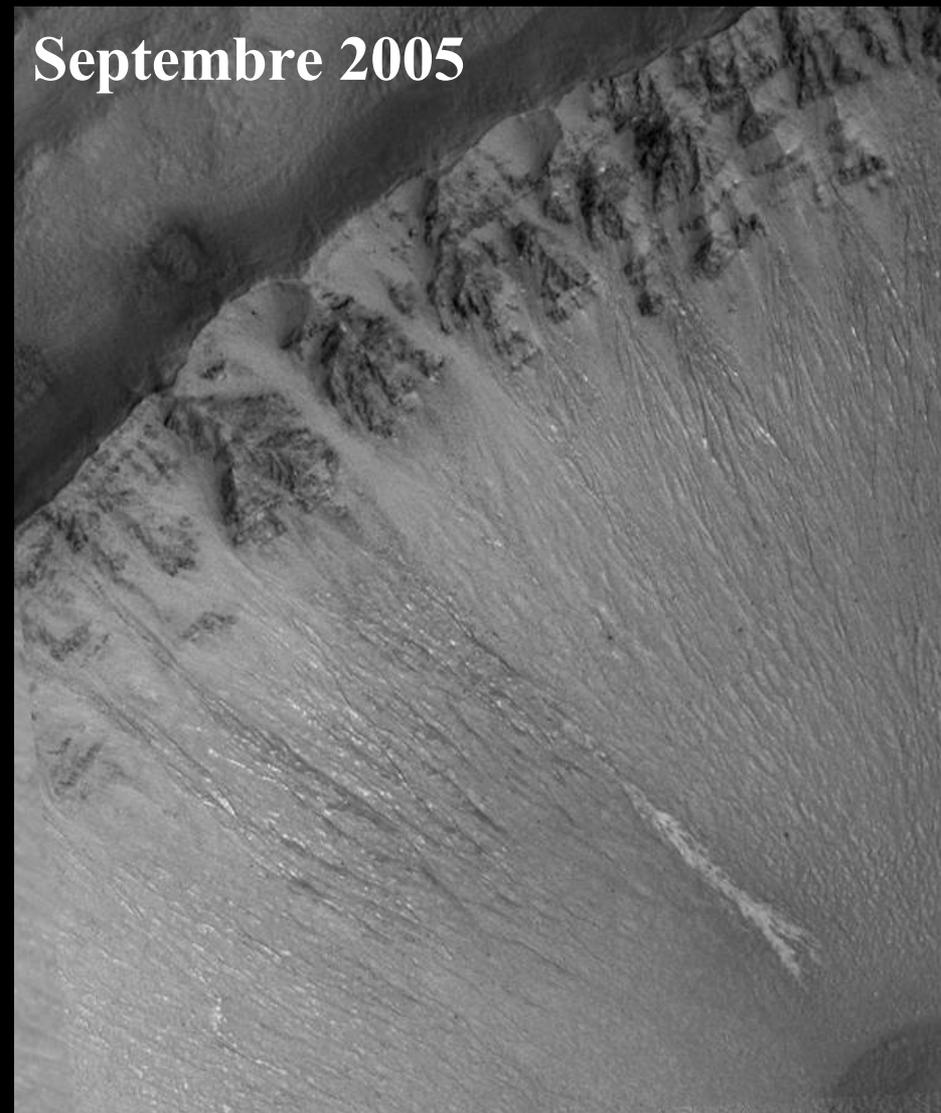


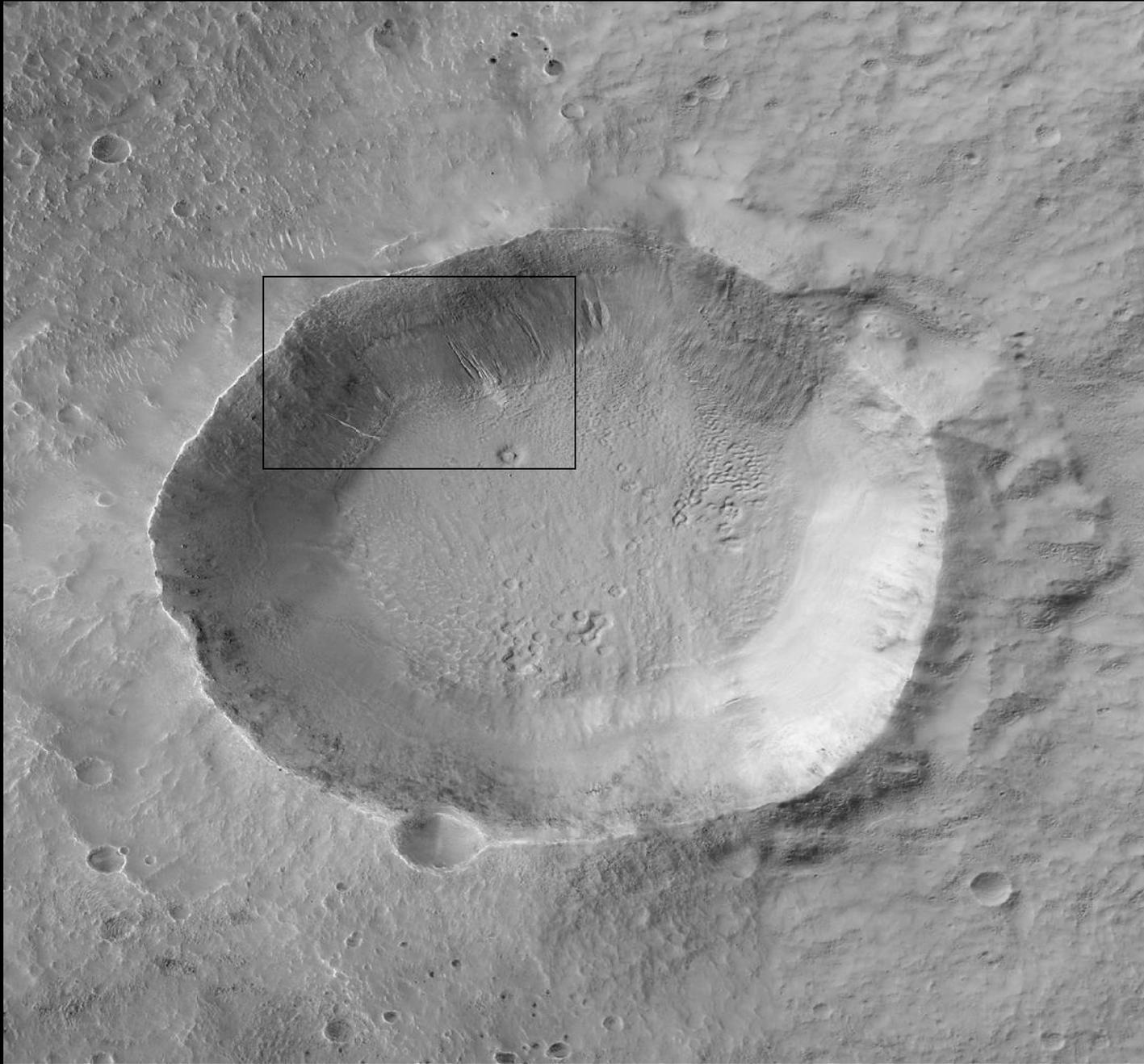
**Comme 1 % des gullies, ce n'est pas une ravine, mais une marque « claire »**

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



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



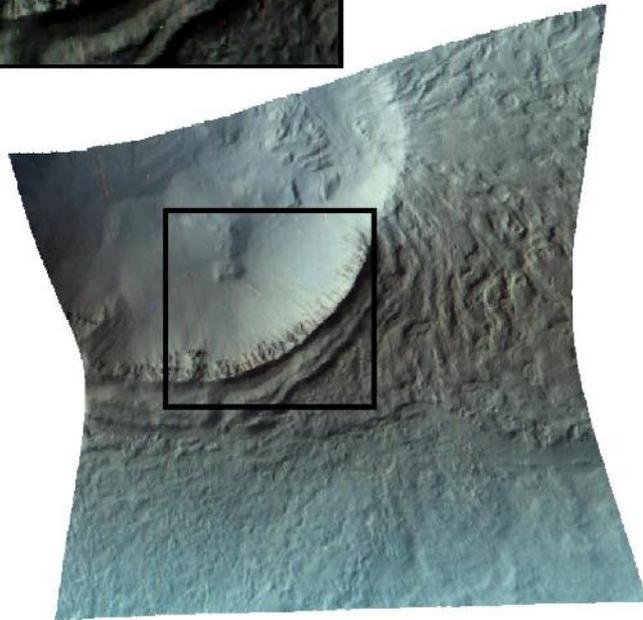
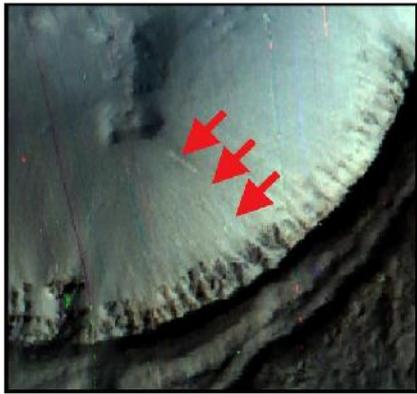


**Un  
deuxième  
cratère  
avec ...**

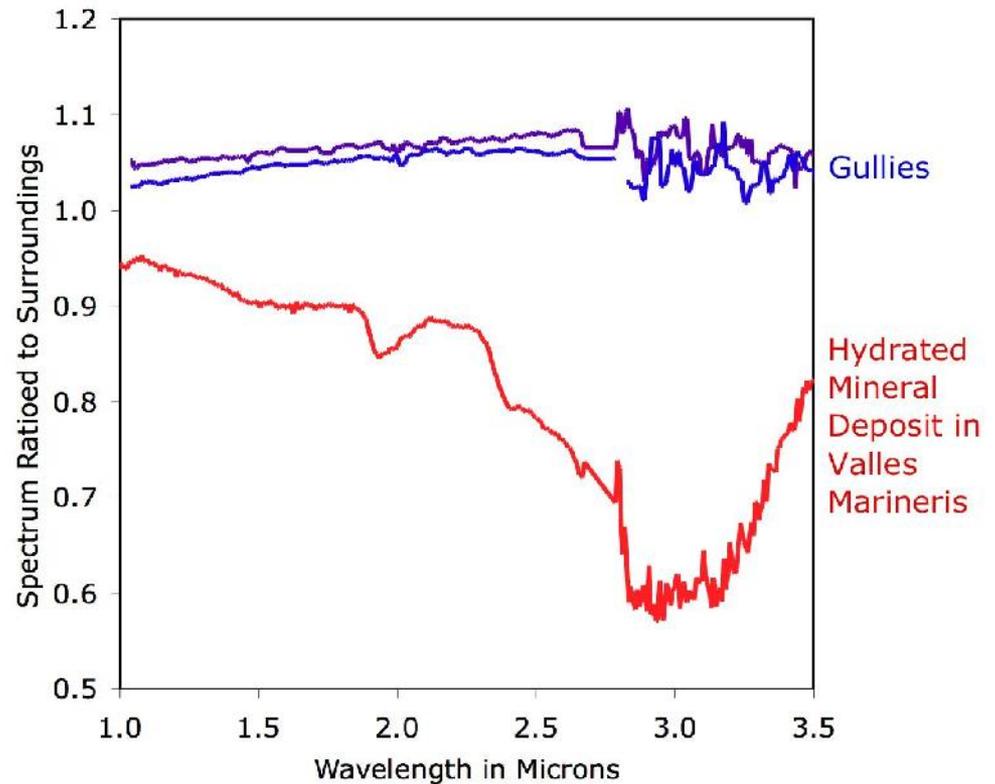


**La aussi un gully s'est fait remplir d'un dépôt blanchâtre entre 2001 et 2005.**

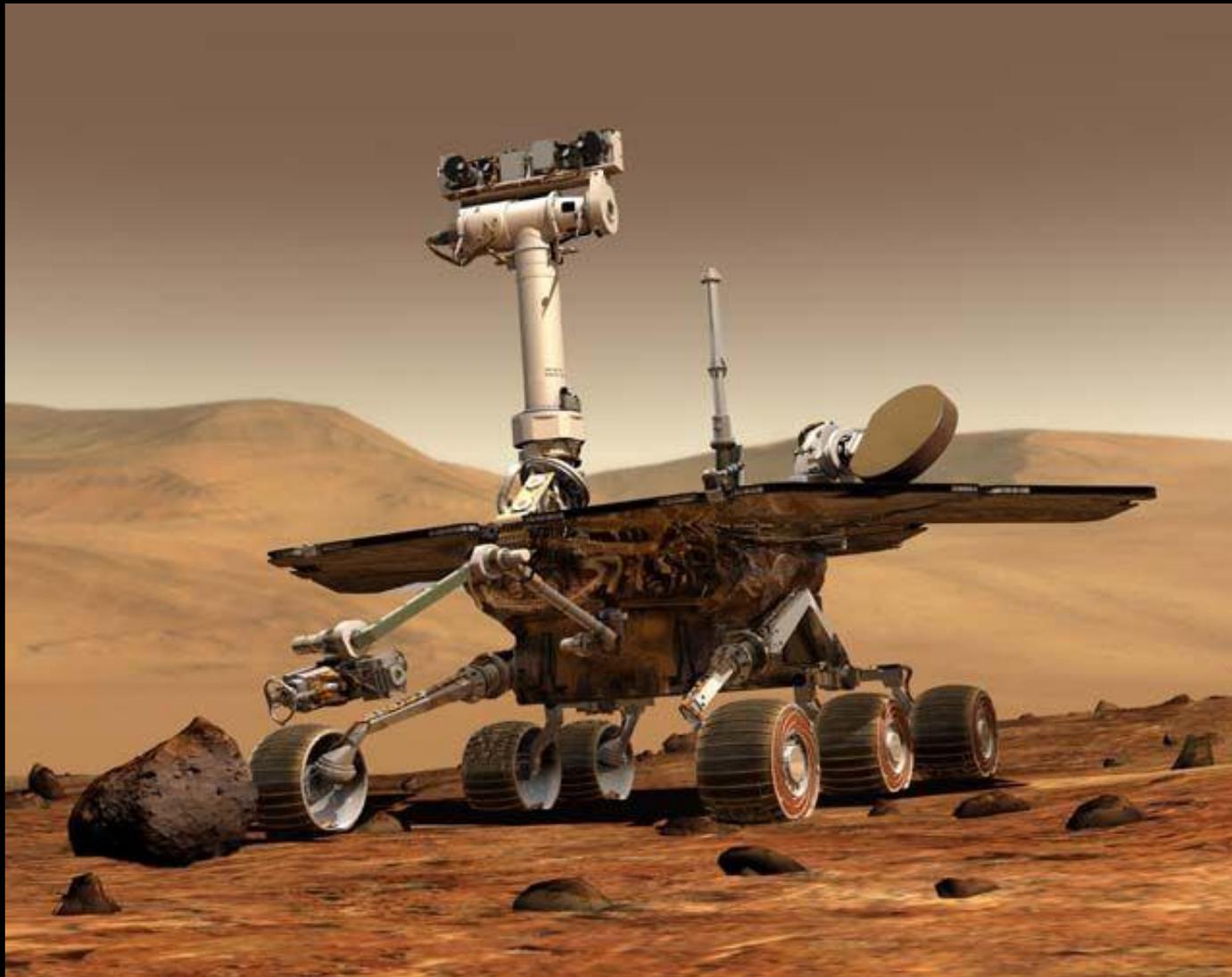
**Il semblerait bien que de l'eau liquide (en déséquilibre) ait coulé sur Mars au**



10 km



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

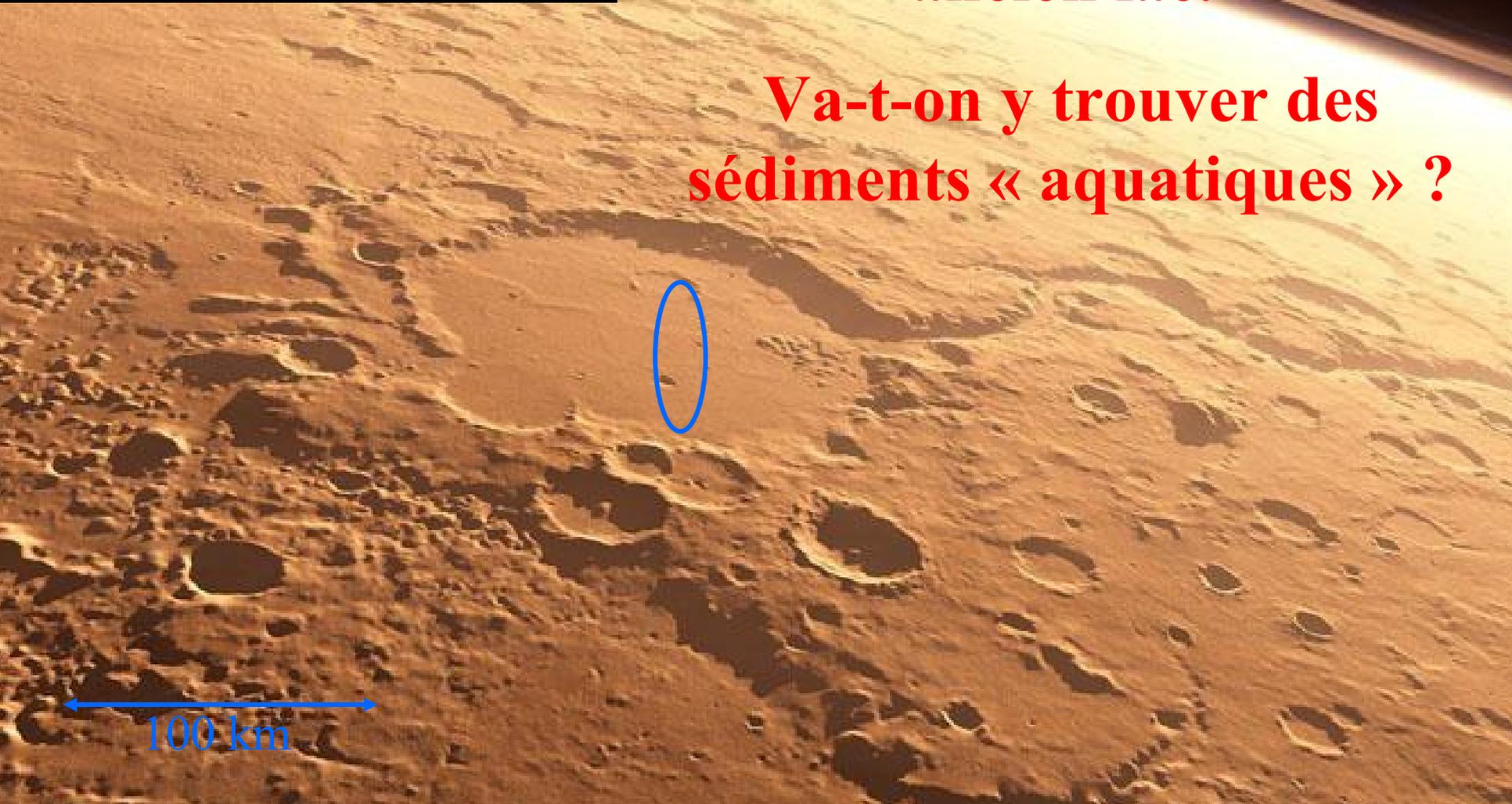


**Les résultats des 2 robots Nasa  
(ceux concernant l'eau)**

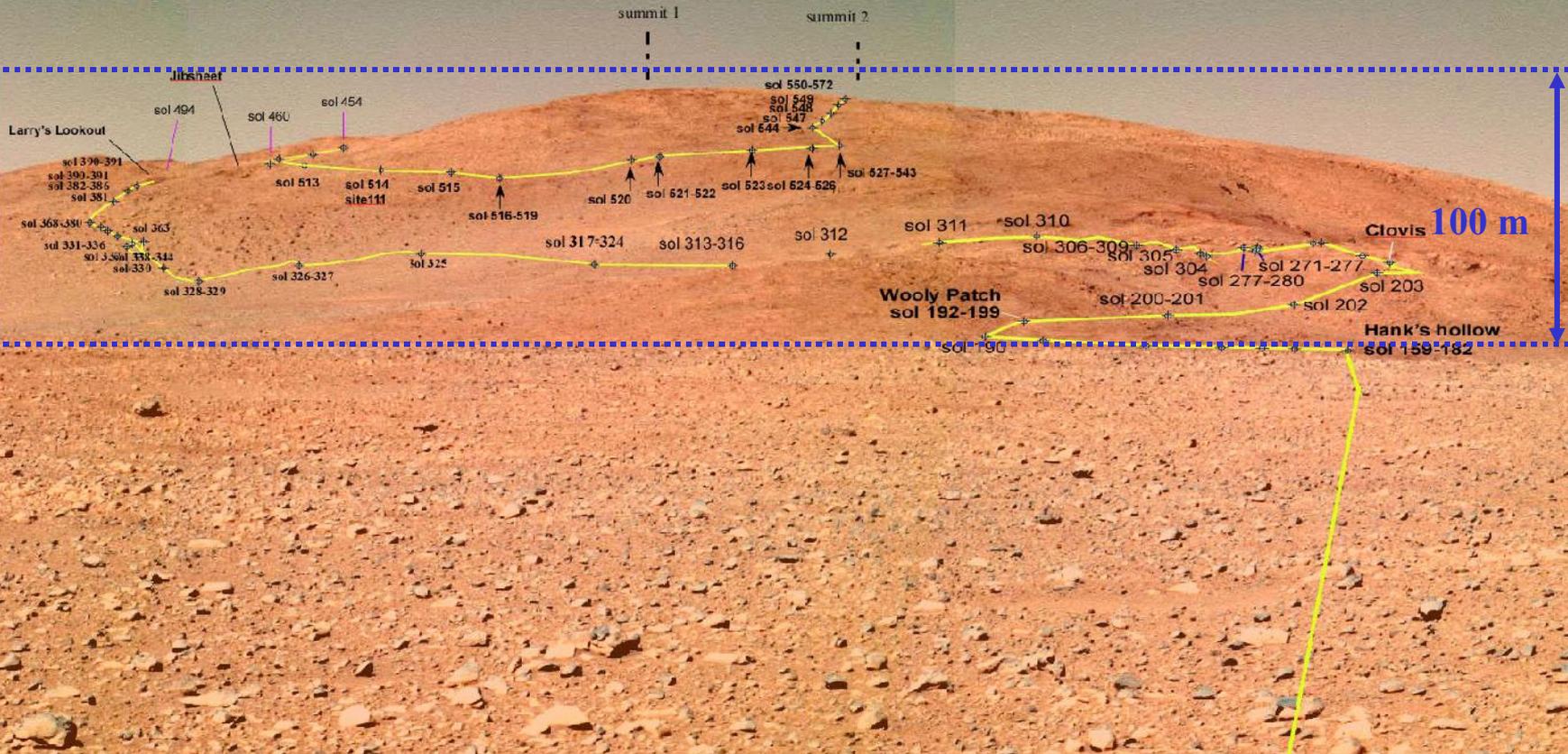


**Voilà où s'est posé le 1er robot, Spirit, au fond du cratère Gusev, probable ancien lac.**

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



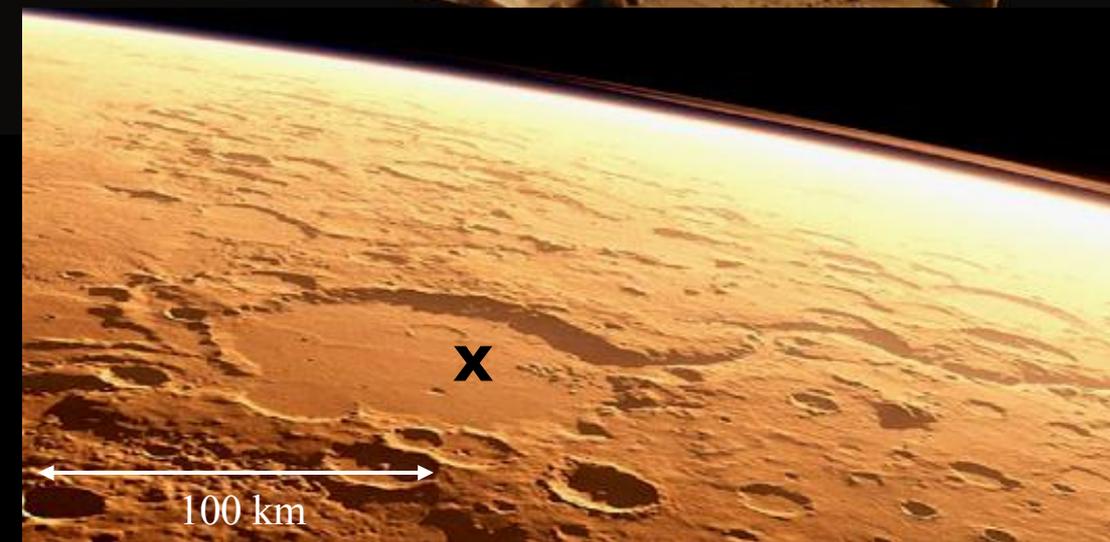
# En janvier 2004, Spirit s'est posé à 3 km de collines



**En août 2005, Spirit est arrivé au sommet des collines, après avoir roulé 5,5 km.**  
**Il est maintenant de l'autre côté des collines, après avoir parcouru au total 7,3 km**



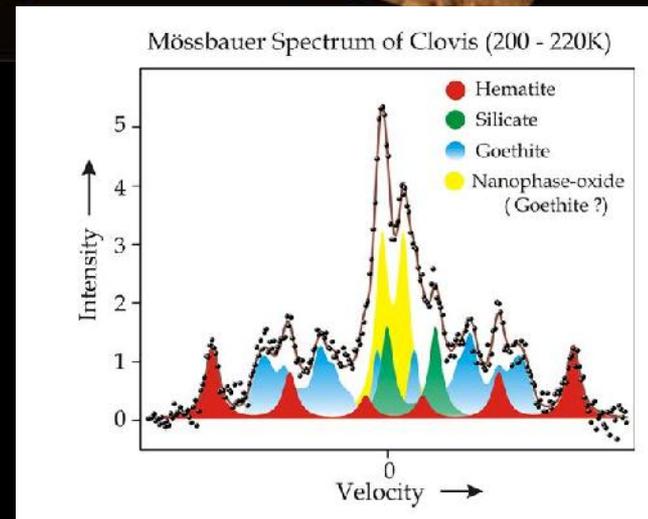
Sol 519



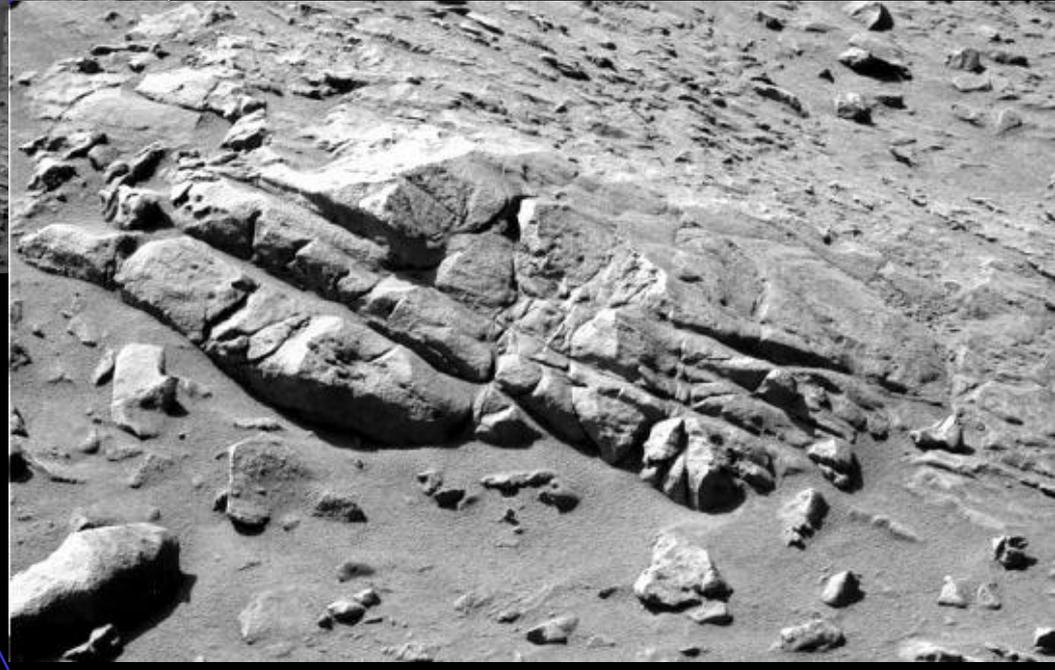
**Avant de parler d'eau,  
un paysage : quand il  
fait clair, on découvre  
les bords du cratère  
Gusev, à 50 km de là.**



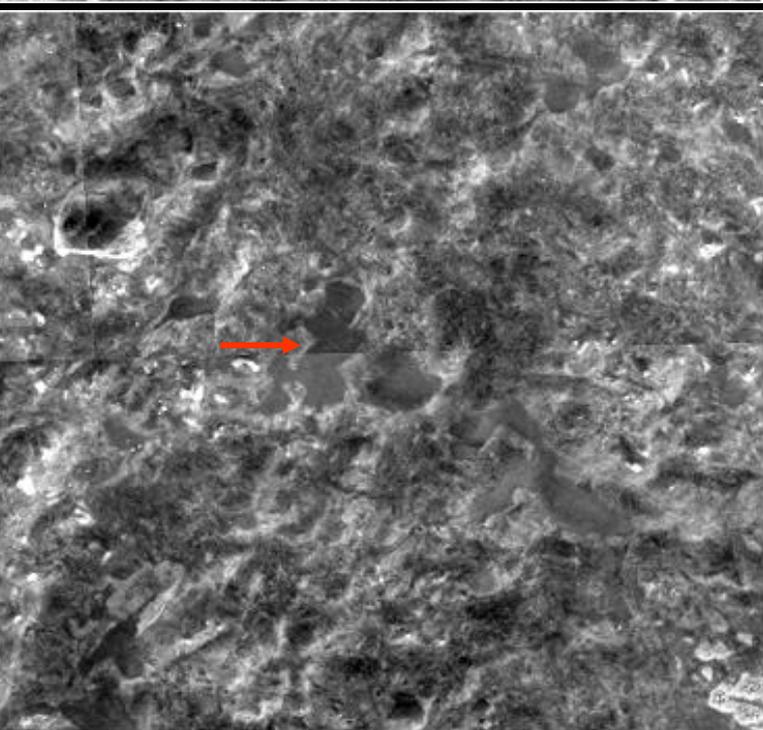
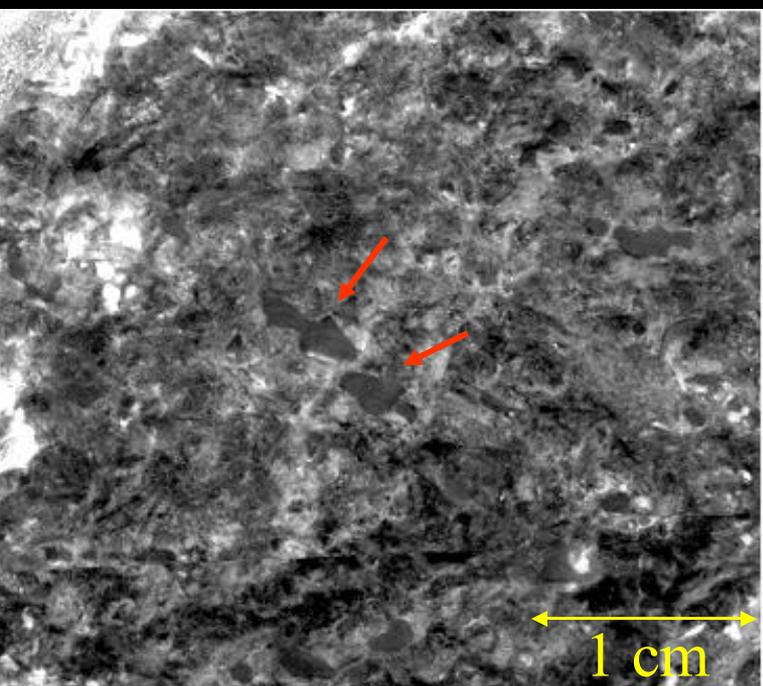
**En gros, quand il analyse, il trouve du basalte. Quelle déception ! Parfois, il y a des preuves que ce basalte a été altéré par de l'eau, maigre consolation.**



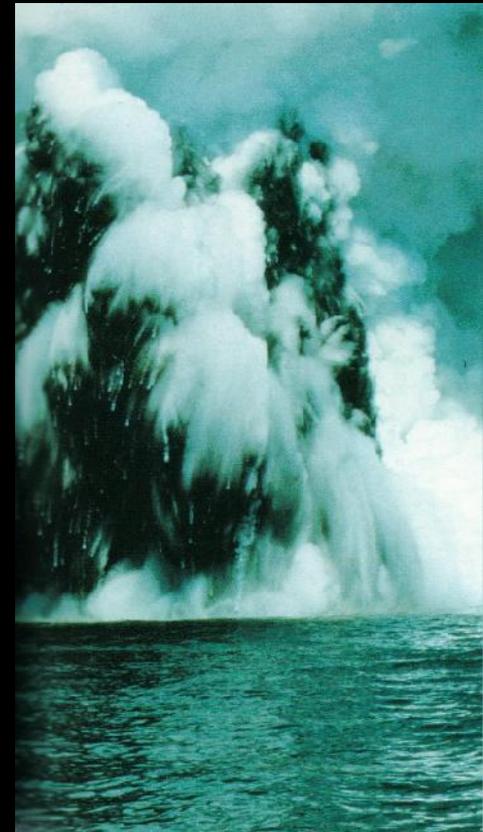
**Il trouve aussi des  
roches stratifiées.  
Sédiments, cendres  
volcaniques ?**

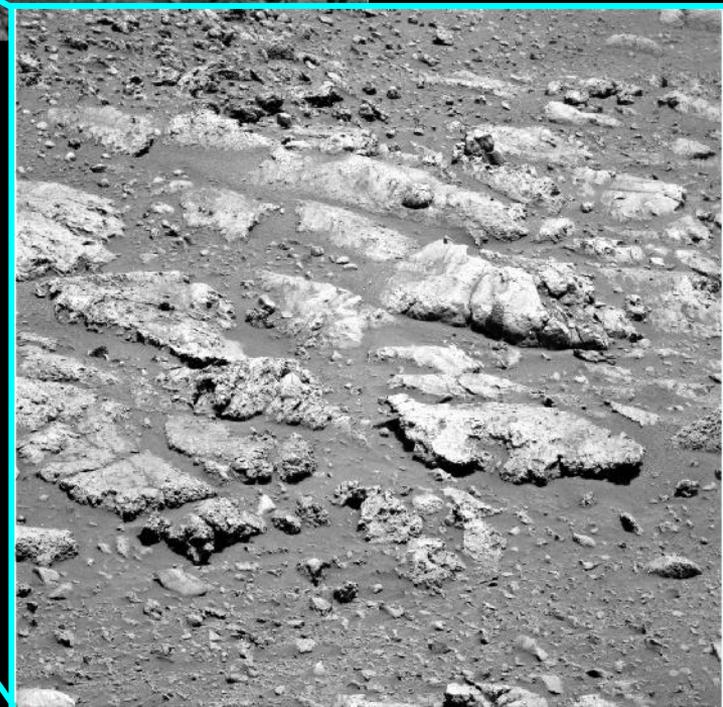
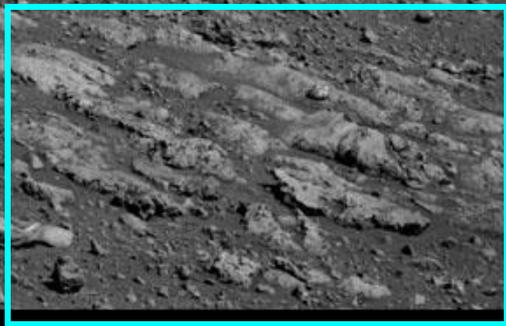
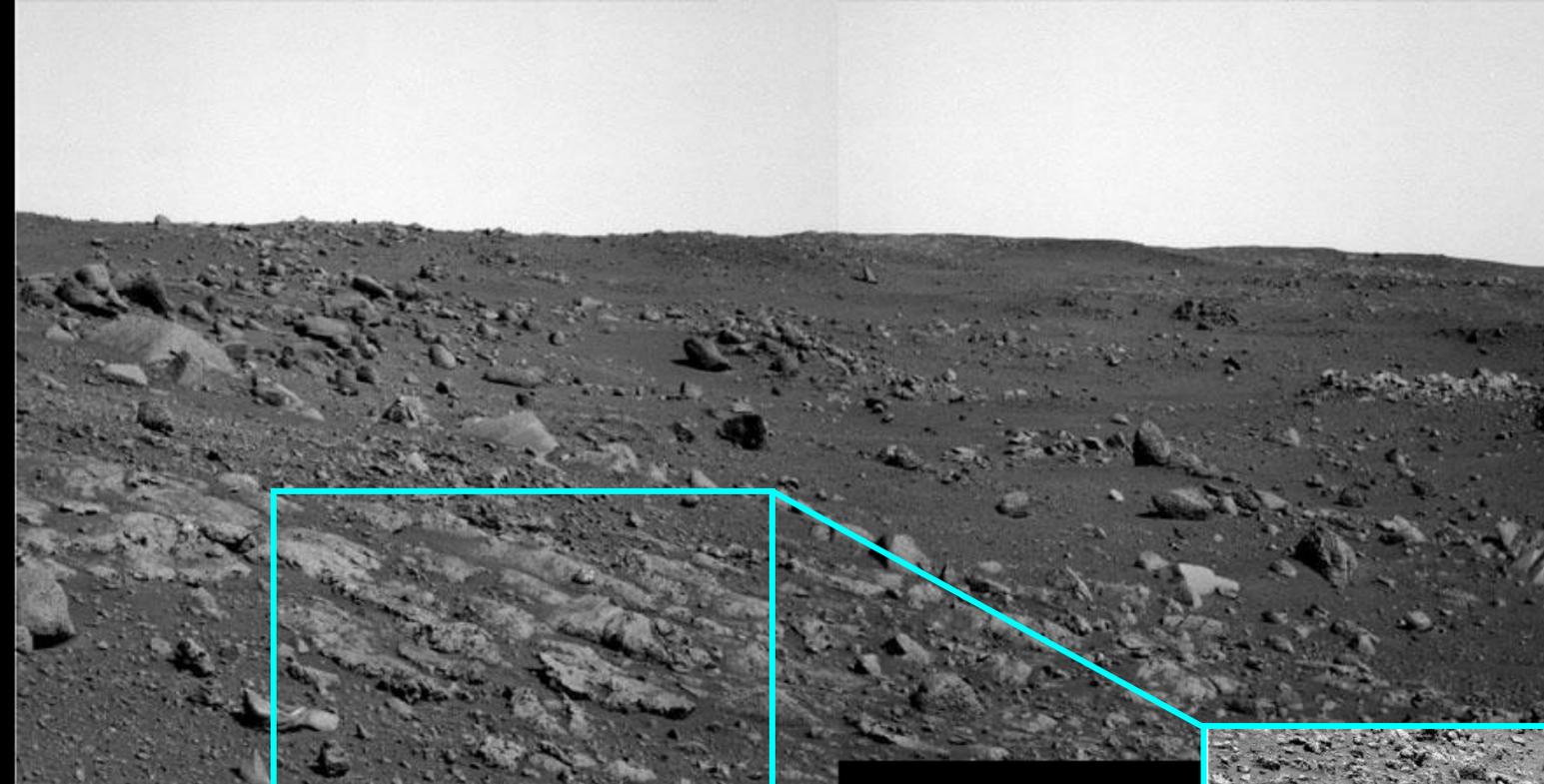


# Il les regarde au « microscope » et découvre des formes géométriques (cristaux ?)



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

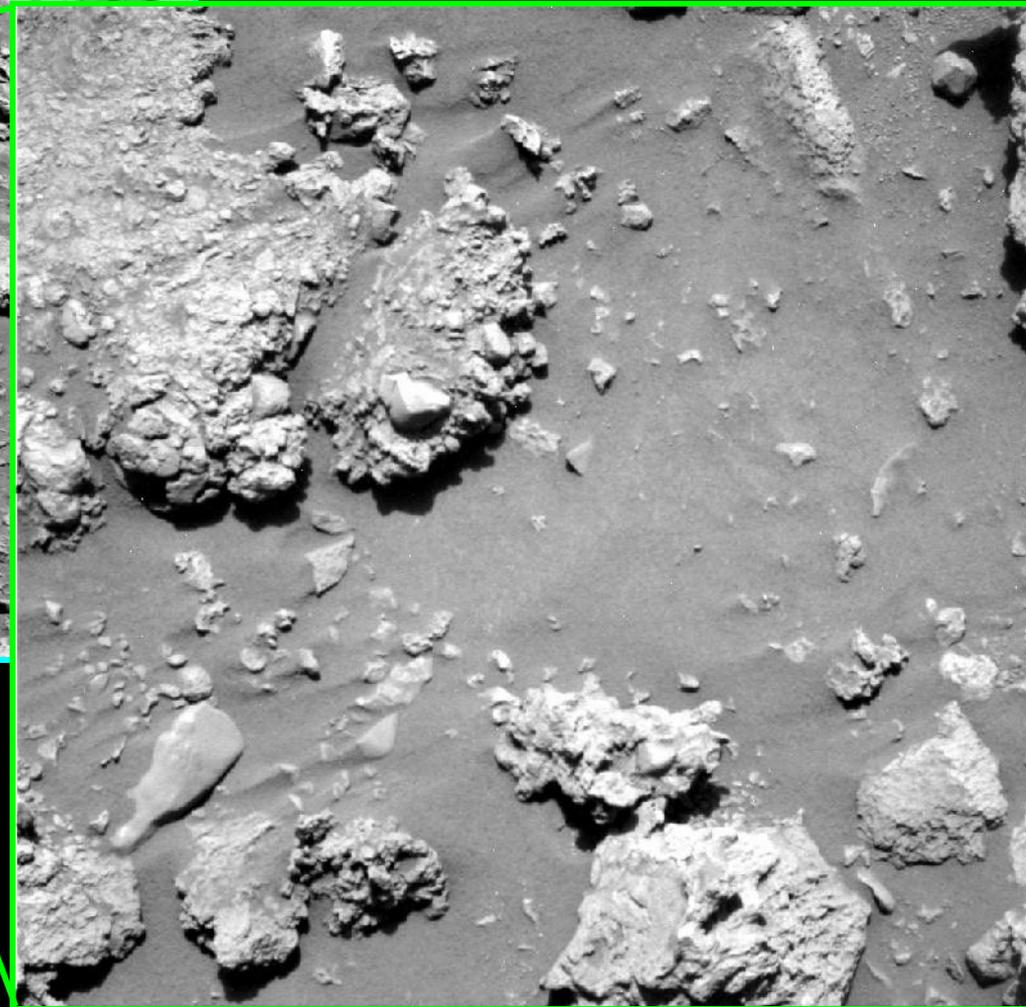
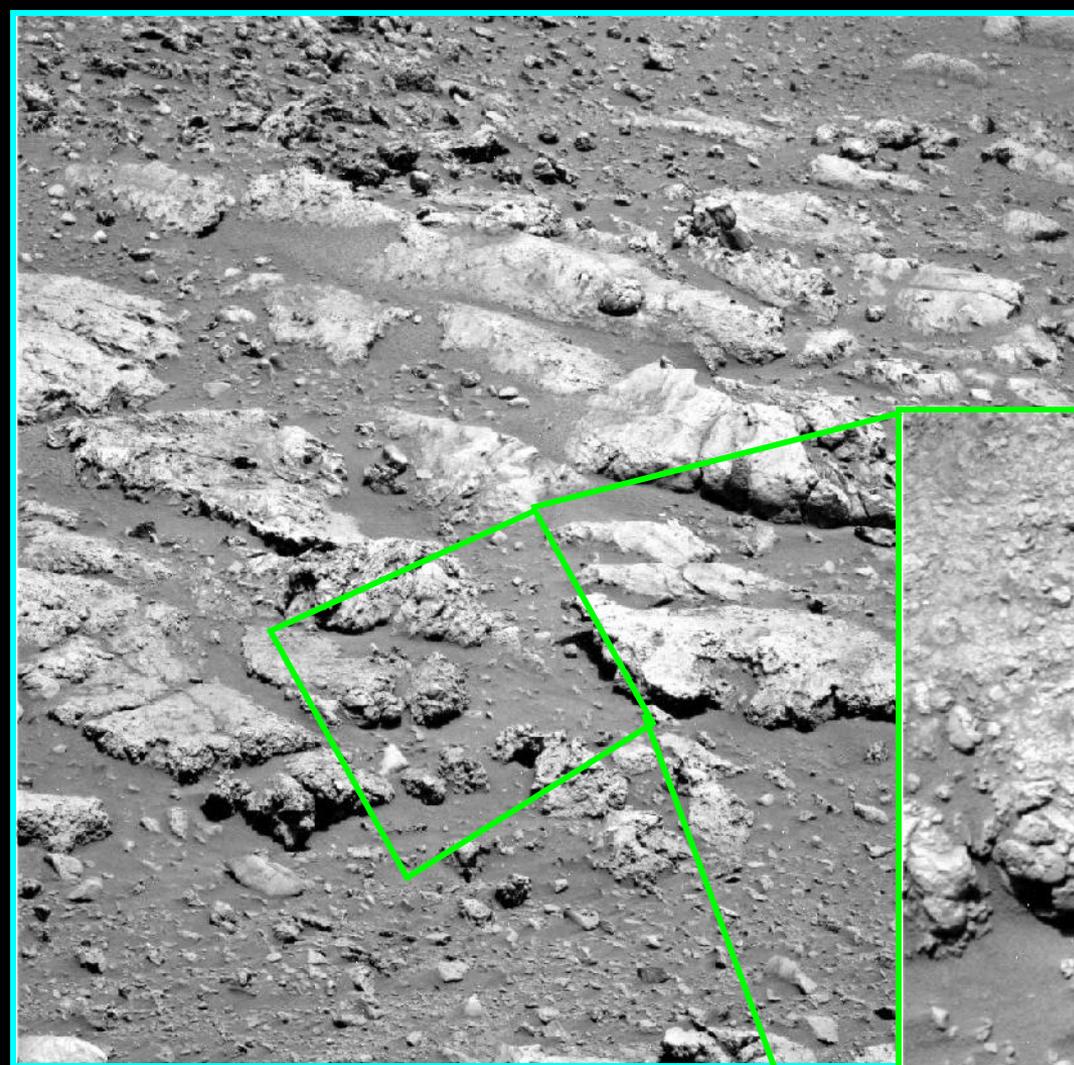




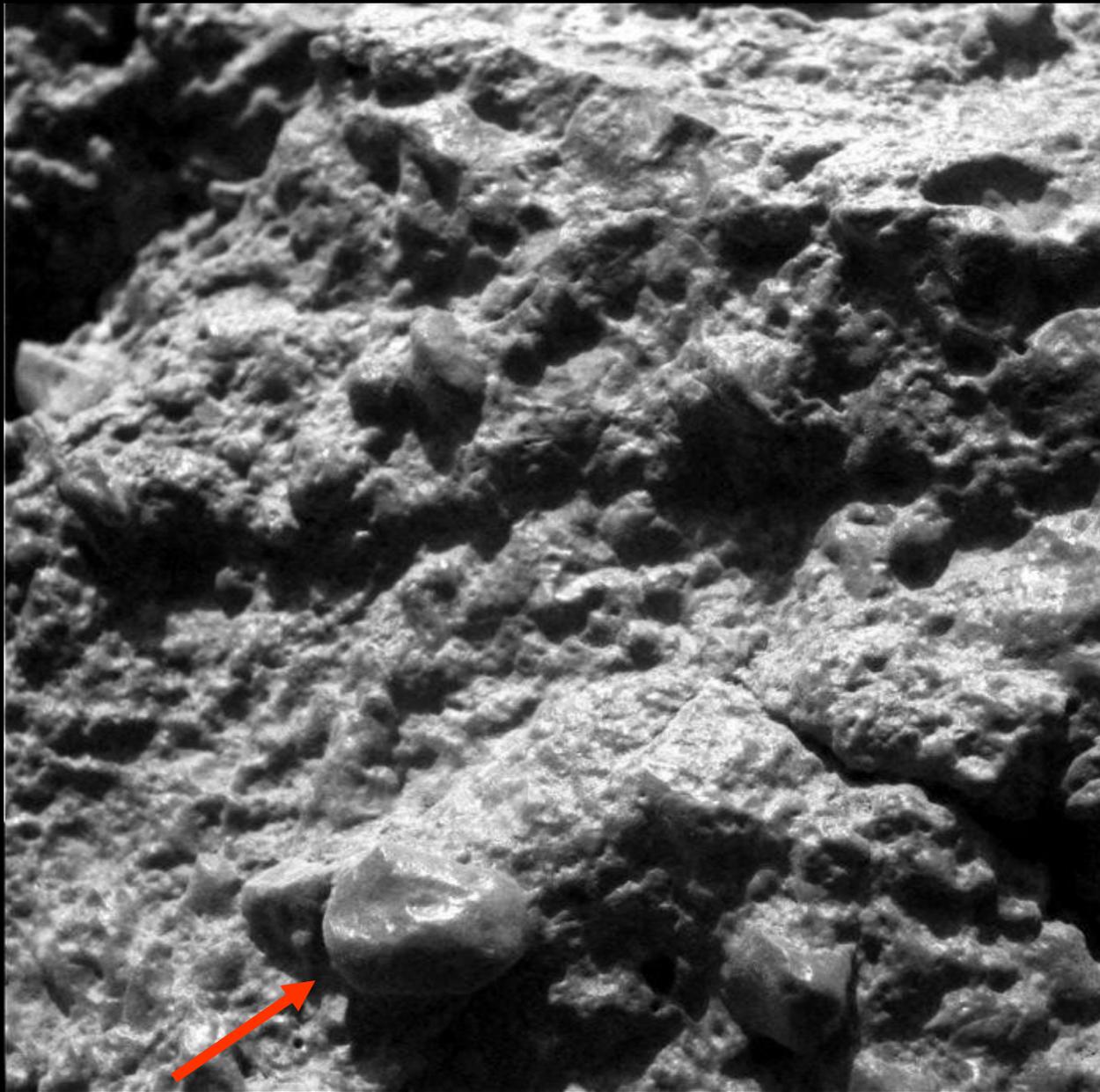
**Près du sommet, de  
nouveaux affleurements**

**Détaillons cet  
affleurement vaguement  
stratifié**

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



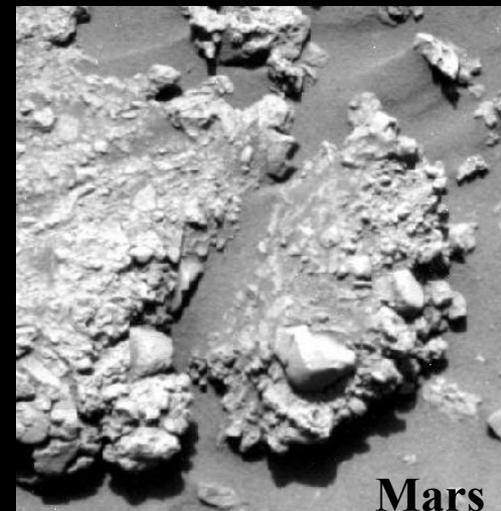
**Brèches sédimentaires,  
brèches volcaniques,  
brèches d'impact ?**

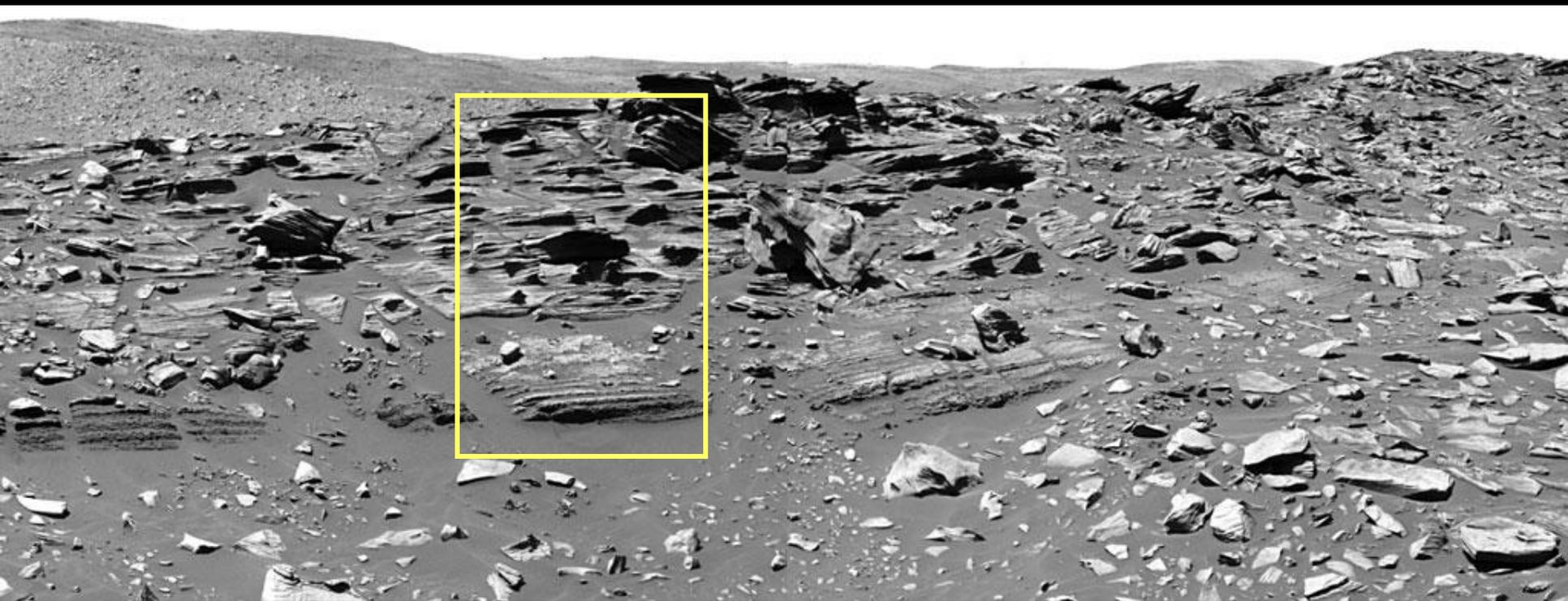


**Certains  
« galets » de  
la brèche  
sont  
arrondis. Ils  
ont été  
« roulés » par  
de l'eau ou  
dans du  
matériel  
« boueux »**



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





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



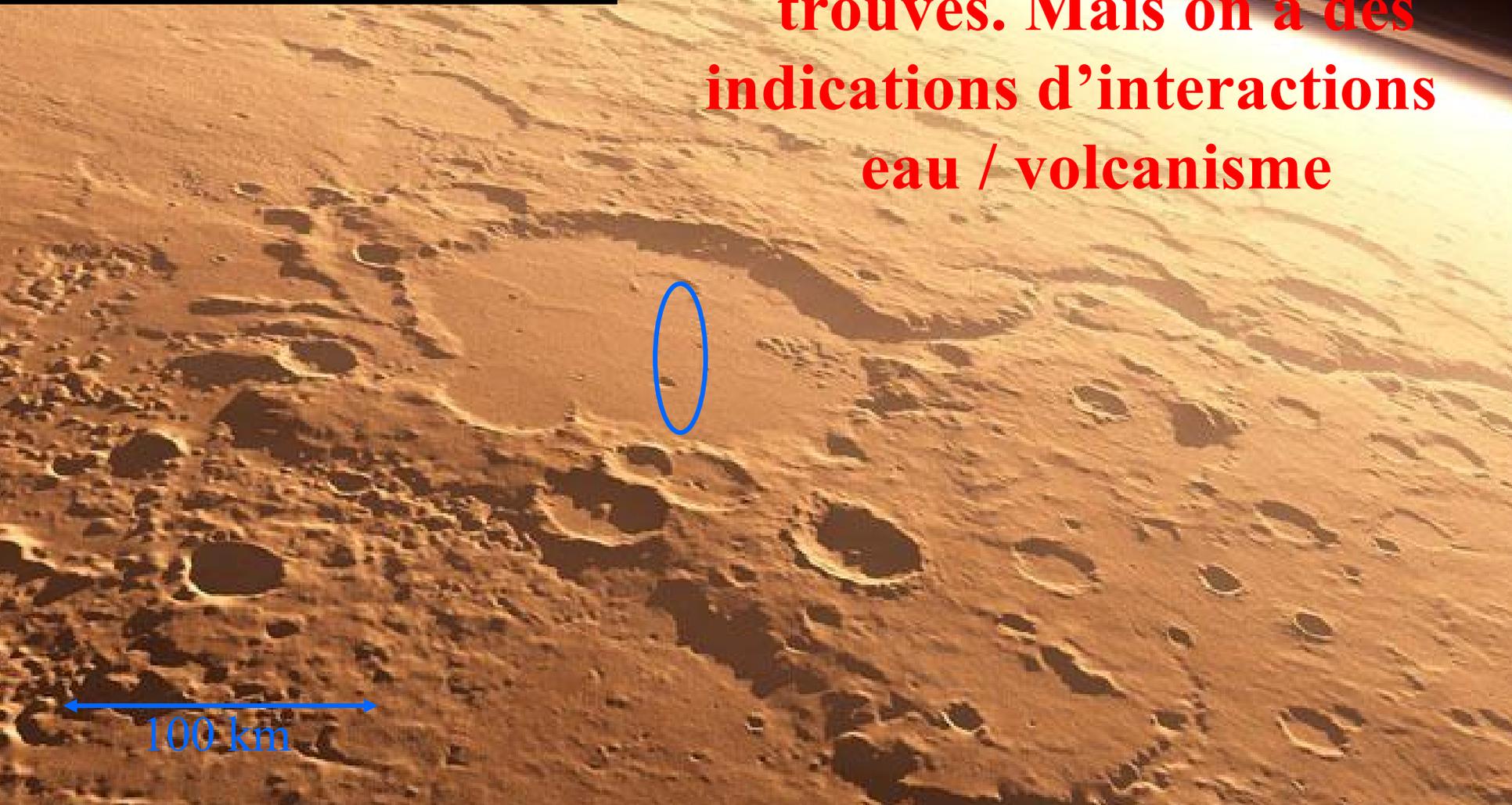
**Ca vous fait penser à quoi, cette disposition ?**

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

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

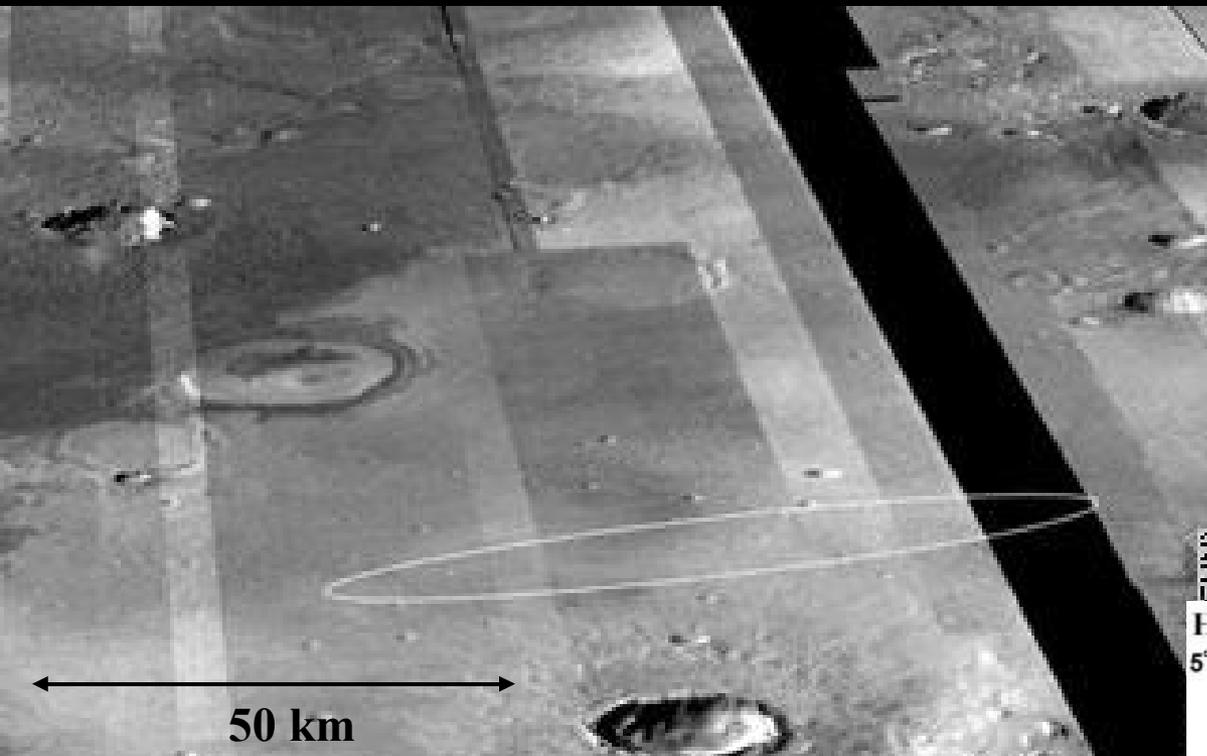


**En bref, on était allé  
chercher des sédiments  
lacustres, on ne les a pas  
trouvés. Mais on a des  
indications d'interactions  
eau / volcanisme**



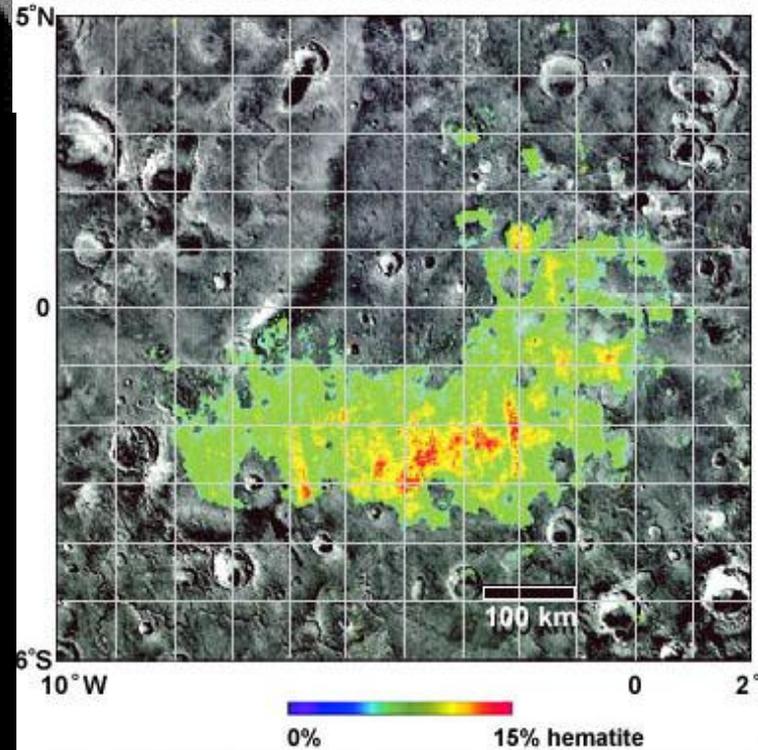
100 km

# Opportunity



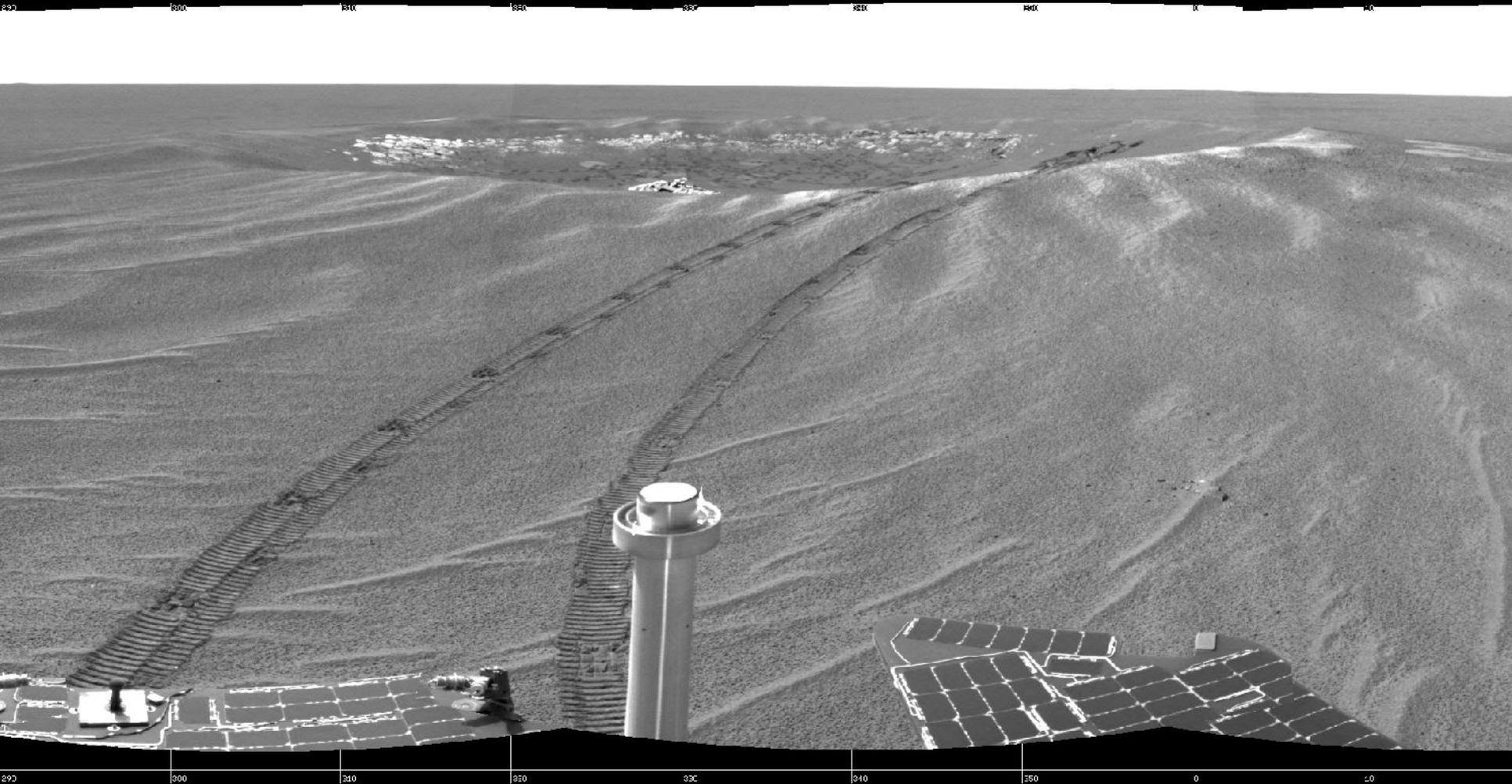
OPNS

HEMATITE DISTRIBUTION MAP FROM TES DATA

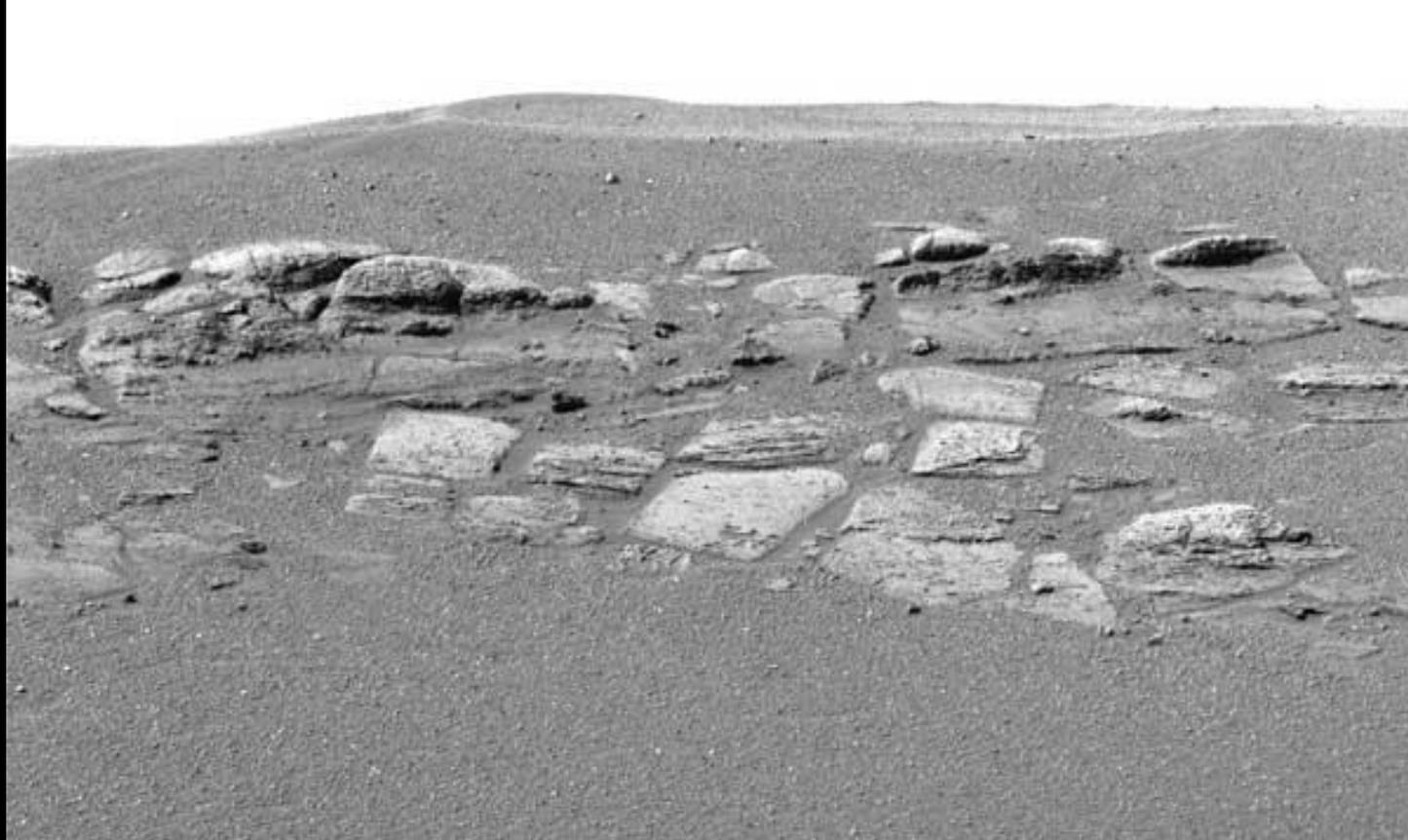


(Figure based on Christensen et al., (2001) JGR, v. 106(E10), Plate 2, p. 23,877)

Opportunity, le 2eme robot, 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.



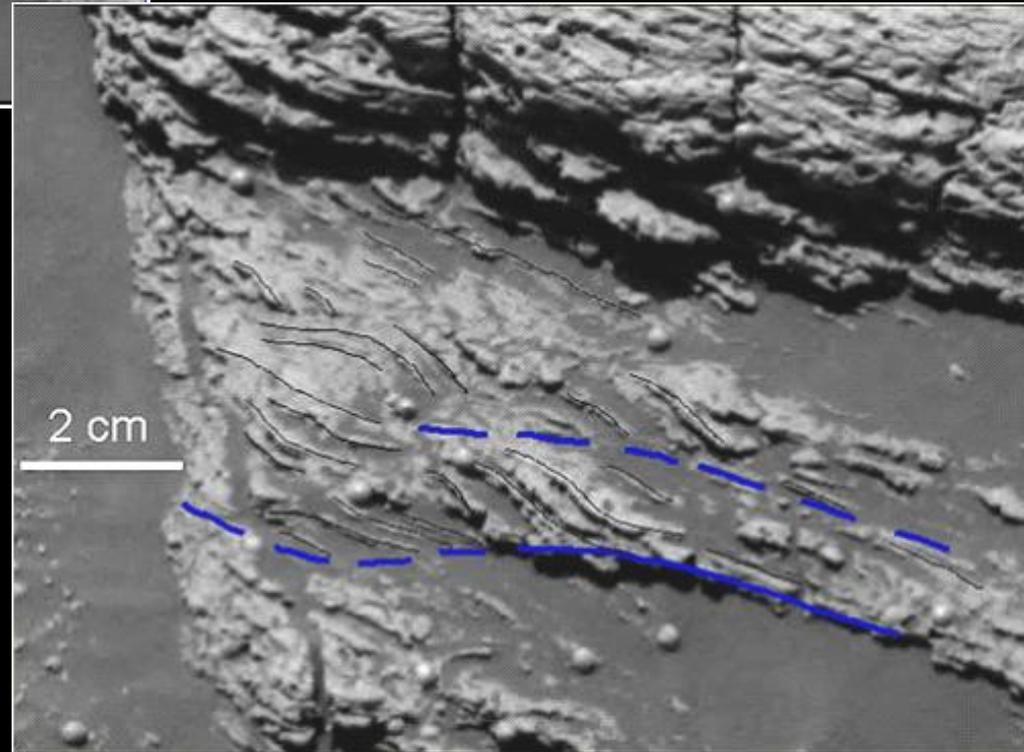
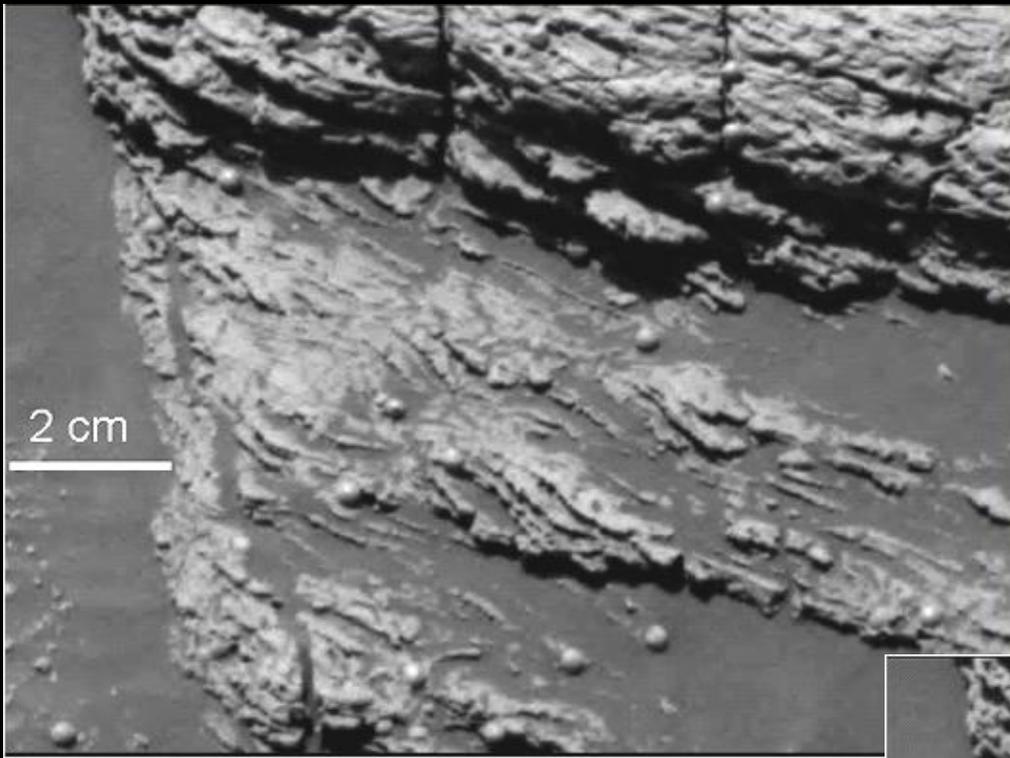
**La plaine « Méridiani », le petit cratère Eagle (d = 20m, profondeur de 2 m) dans lequel s'est posé Opportunity, et les traces qu'il a fait pour en sortir au bout de 2 mois.**



↑  
«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 » ... ?**

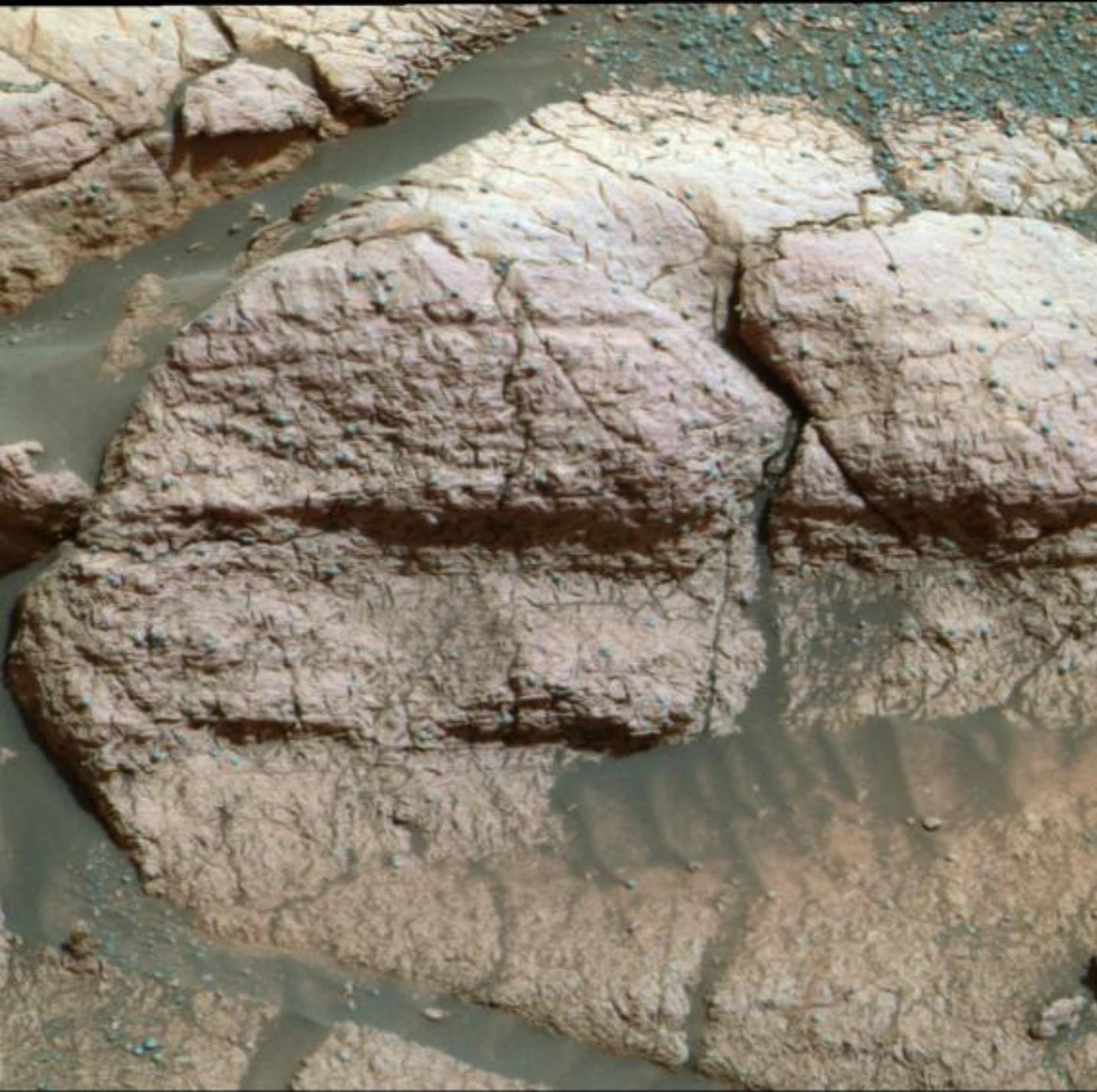
**Et en regardant le détail des stratifications, Opportunity découvre des stratifications obliques !**



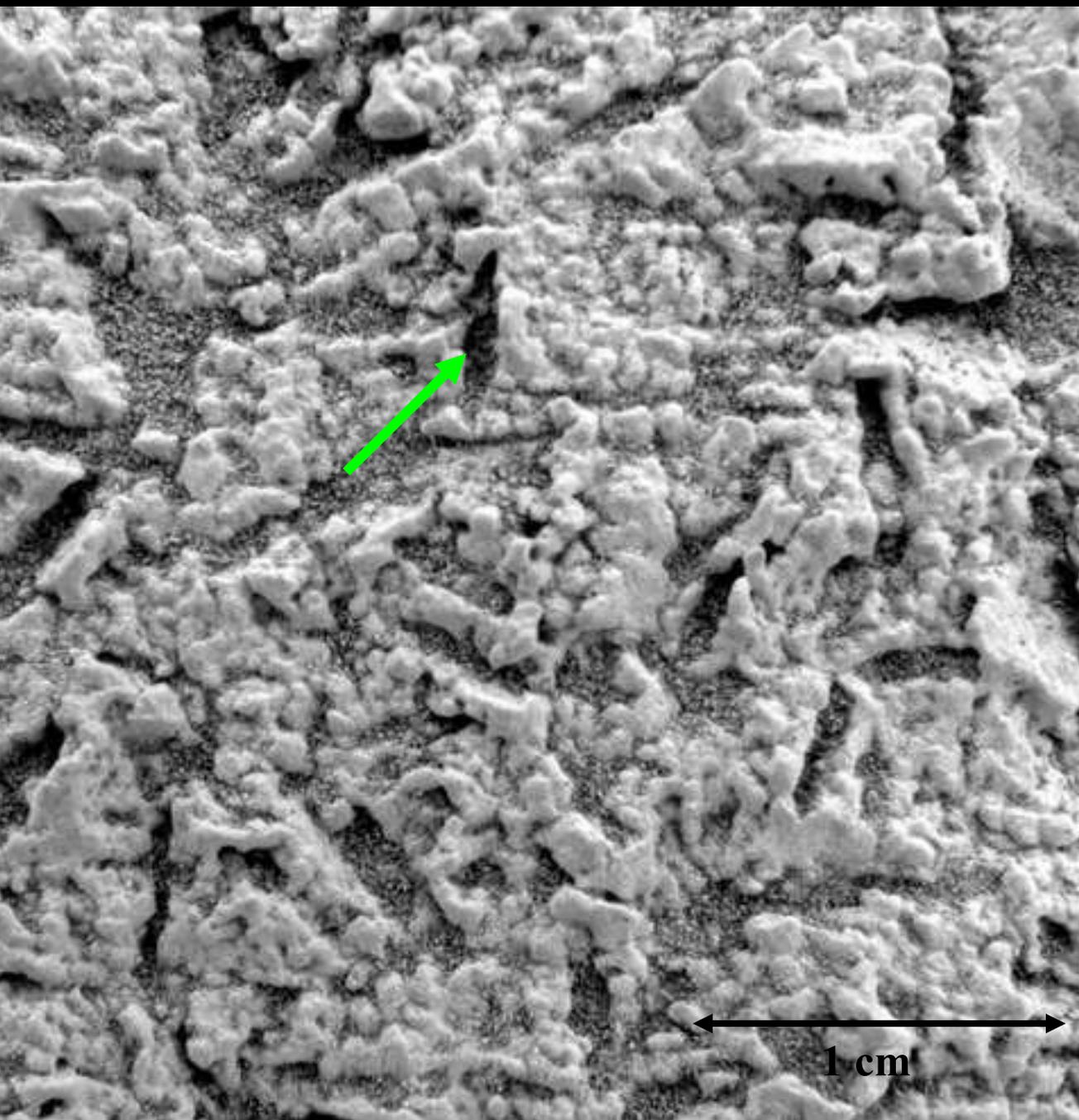
**Et des sédimentologues patentés nous affirment que se sont des stratifications faites sous un courant d'eau**



**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), en  
forme de  
coup de  
couteau**



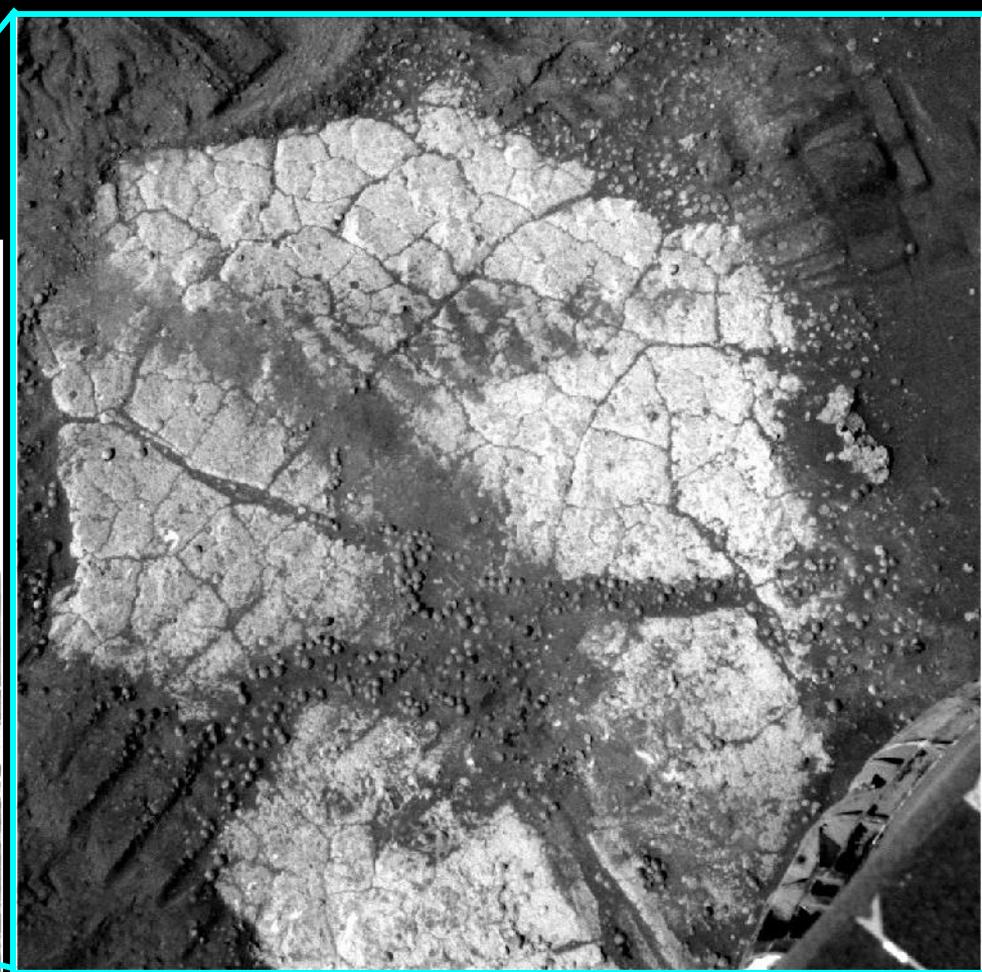
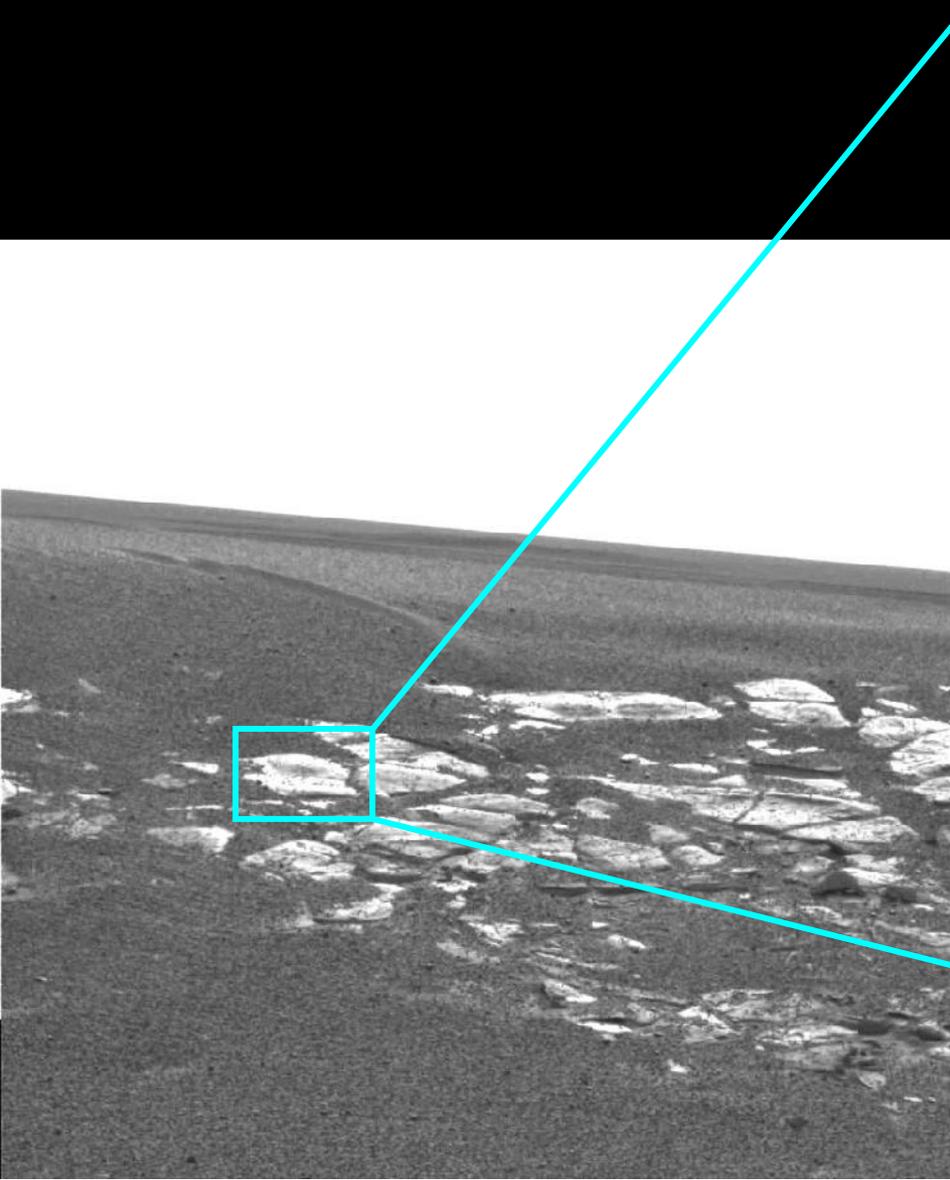
**Les « vugs » ?**  
**Parfois ils ont**  
**des formes**  
**«géométriques»**  
**rappelant**  
**furieusement la**  
**forme des**  
**cristaux de**  
**gypse (roche se**  
**formant par**  
**évaporation**  
**d'une mer ou**  
**d'un lac salé)**



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

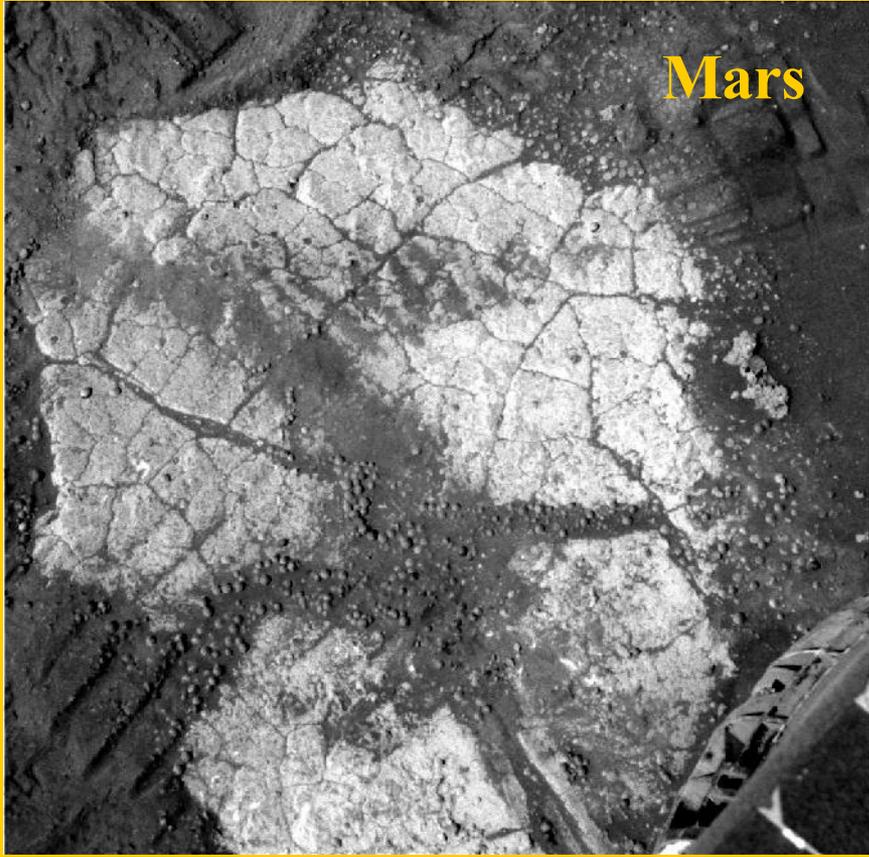


**Gypse, et autres sels,  
ça se dépose dans des  
lacs salés, des lagunes  
en bord de mer ...**



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

**Mars**



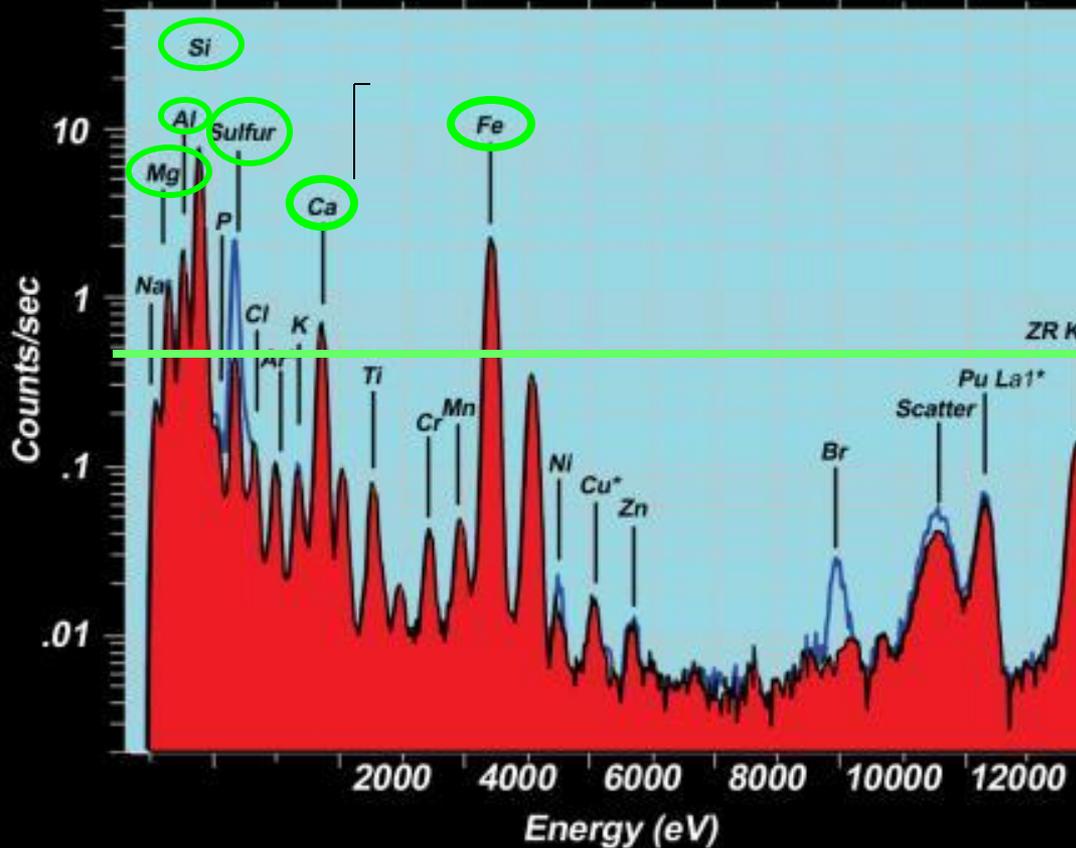
**Terre**



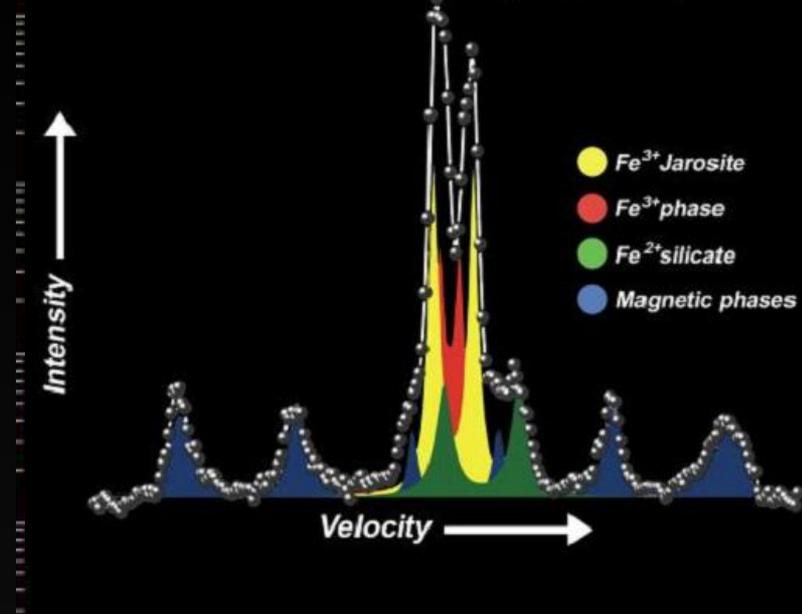
Photo Pierre Thomas

**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

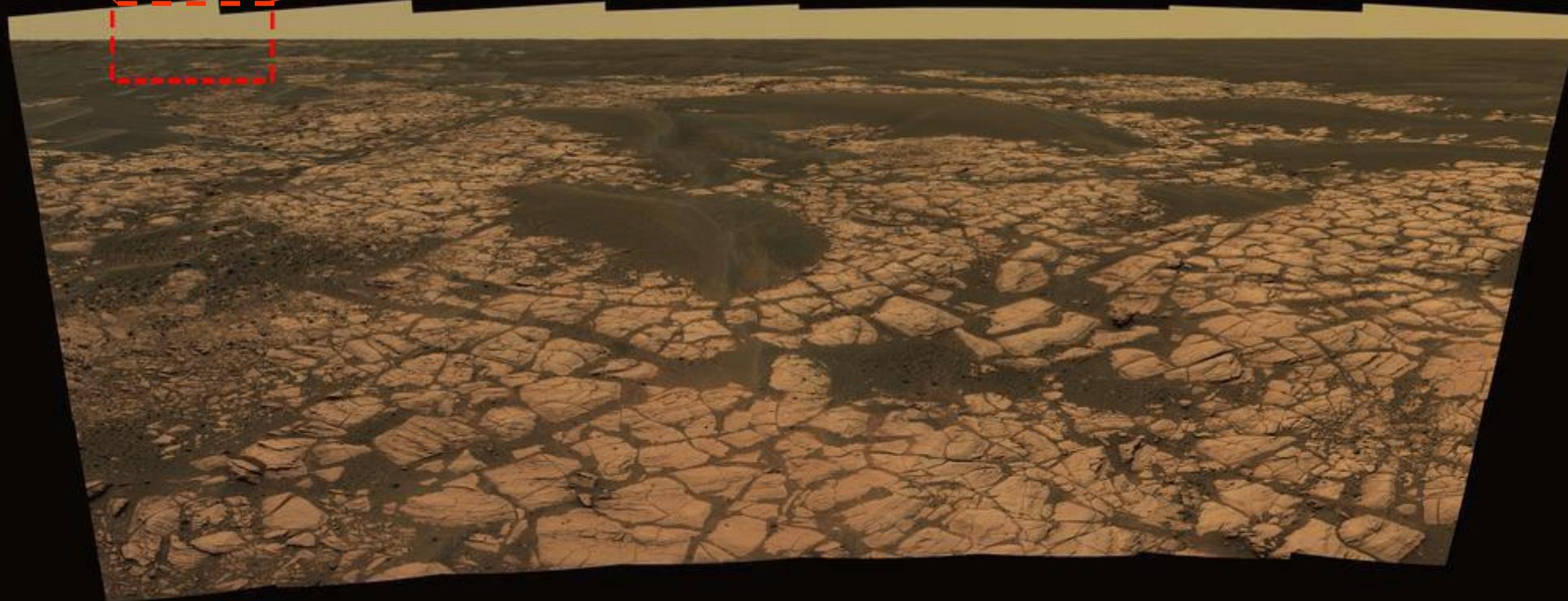


Mossbauer Spectrum of El Capitan: Meridiani Planum  
Jarosite:  $(K, Na, X^{+1})Fe_3(SO_4)(OH)_6$



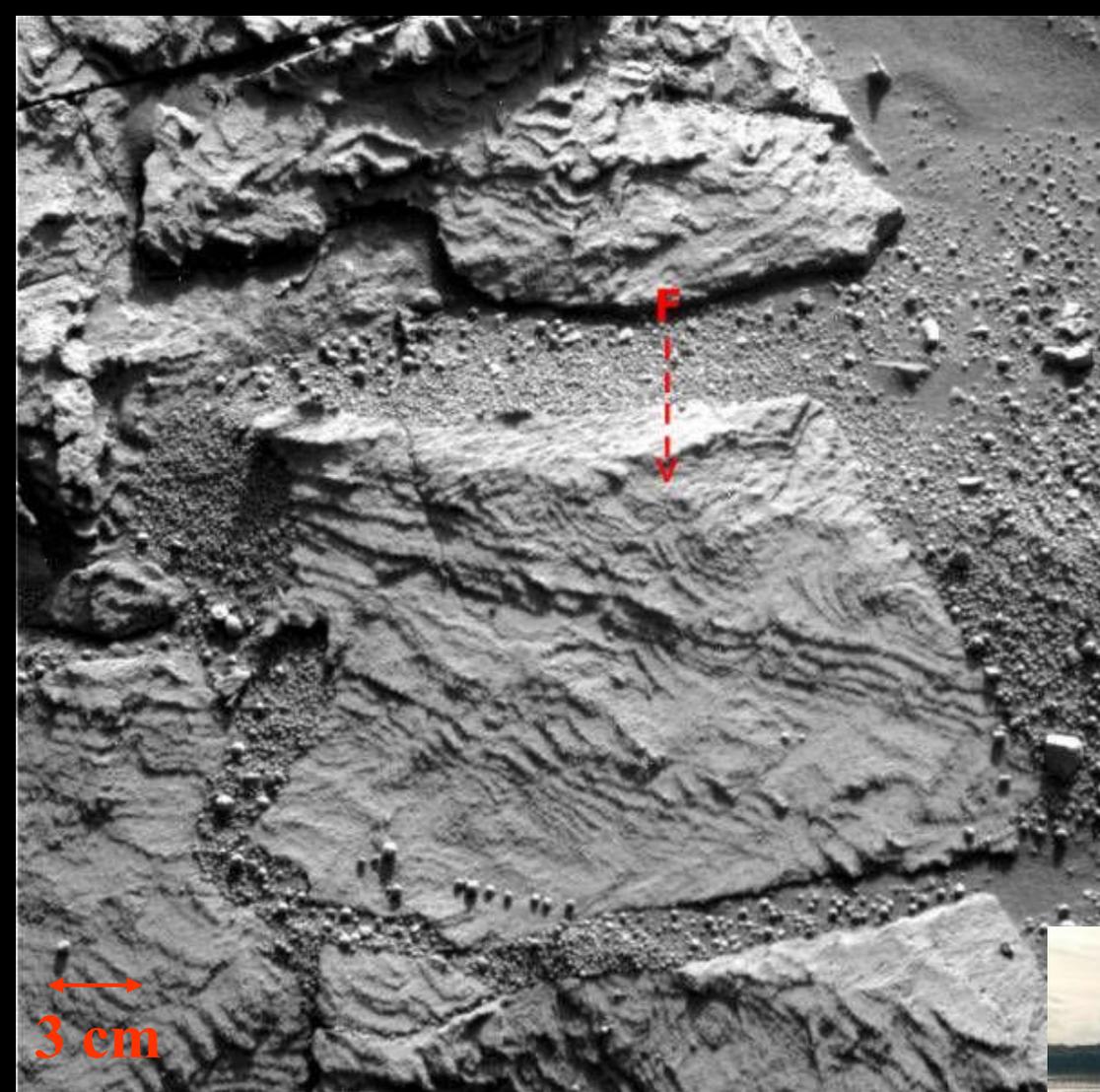
**Analyse chimique globale : des aluminosilicates hydratés (argiles probables) riches en Fe, Mg, Ca et S. Analyse minéralogique : la roche « globale » contient de l'hématite ( $Fe_2O_3 \pm$  hydraté), un sulfate potasse-ferrique hydraté ...**

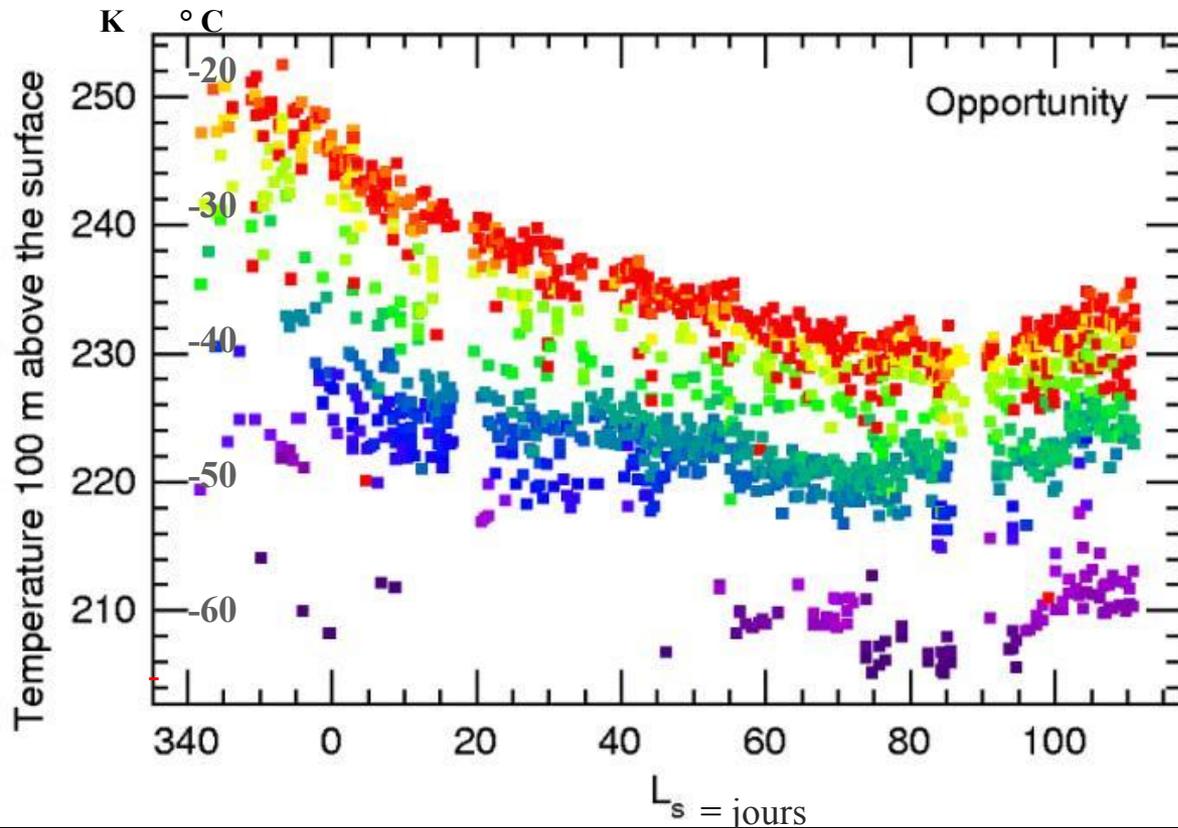
**Après avoir quitté le cratère, Opportunity roule dans une plaine où les fentes de retrait (dessiccation ?) semblent être la règle.**



**Dans ce secteur, vues en section, les strates sont parfois « 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**



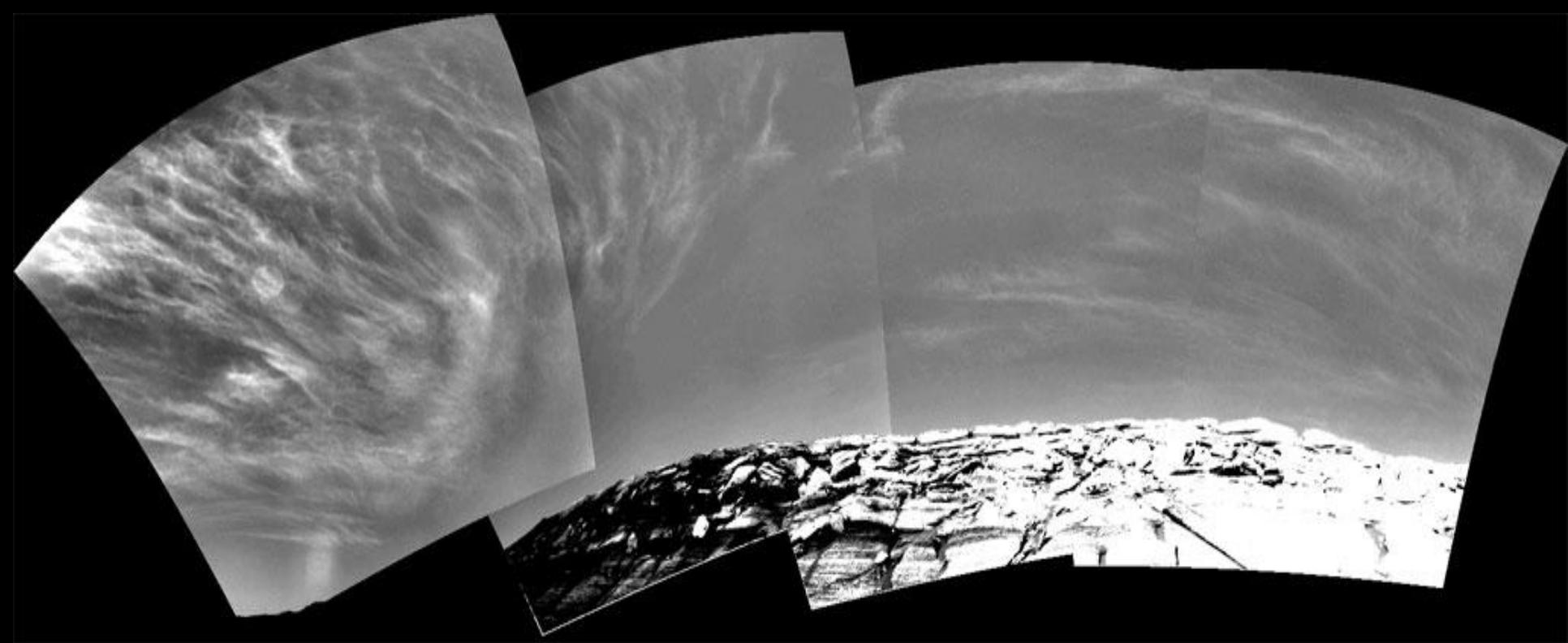


**Opportunity  
fait également  
de la météo.**

**A gauche, les  
variations de  
température,  
sur 6 mois**

**La nuit, le robot  
se recouvre de  
givre d'H<sub>2</sub>O ; le  
matin, ce givre se  
sublime**





**En général, il fait beau ; mais il arrive qu'il y ait des nuages, qui ressemblent à des cirrus (nuages formés de micro-cristaux de glace).**

**Et maintenant, Opportunity commence à descendre dans un cratère de 80 m de profondeur .**

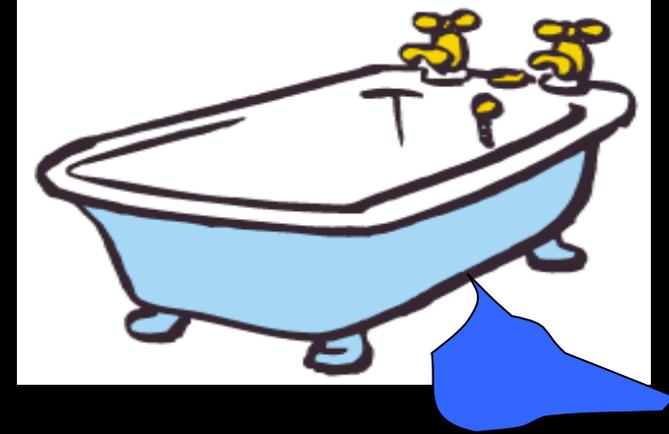
**Attendons des nouvelles !**



**On se posait la question de l'eau pérenne sur Mars. La réponse est : il y en a eu, un certain temps ... et peut-être même plus encore ! Suite dans les années qui viennent !**

**Pourquoi n'y en a t'il plus d'H<sub>2</sub>O liquide en surface aujourd'hui ? La faible gravité et l'absence de champ magnétique fait que Mars perd lentement son atmosphère. Mars « fuit ». Pression, effet de serre et température baissent.**

**\*De 4,5 à 3,8-3,5 Ga, il y avait de l'eau liquide pérenne à la surface de Mars.**



**\*Entre 3,5 et 3, période de transition.**

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

**\*Depuis 3 Ga, il n'y en a plus, sauf exceptionnellement quand le soleil tape dure sur les pentes bien exposées.**

**\*Mais il en reste beaucoup dans le sous-sol, gelée près de**

# Après Mars, les astéroïdes, dont les météorites sont des fragments.



Itokawa

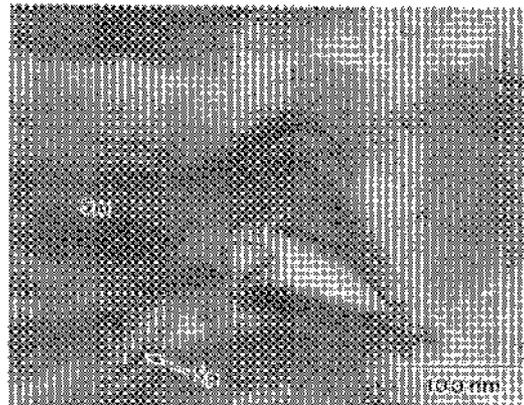
500 m

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



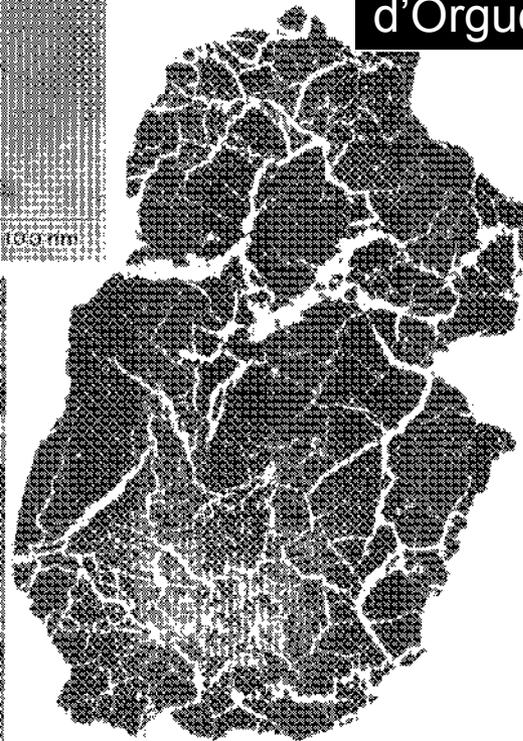
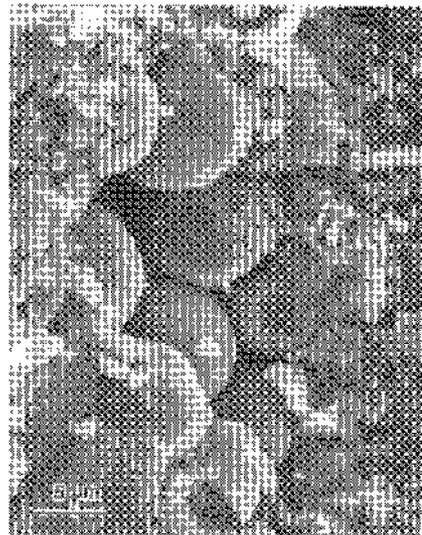
# L'eau dans les météorites C. Il y en a jusqu'à 10%, inclus dans des minéraux hydroxylés. Ces météorites se sont formées (ou ont été altérées) en présence d'H<sub>2</sub>O, à T < 300°C

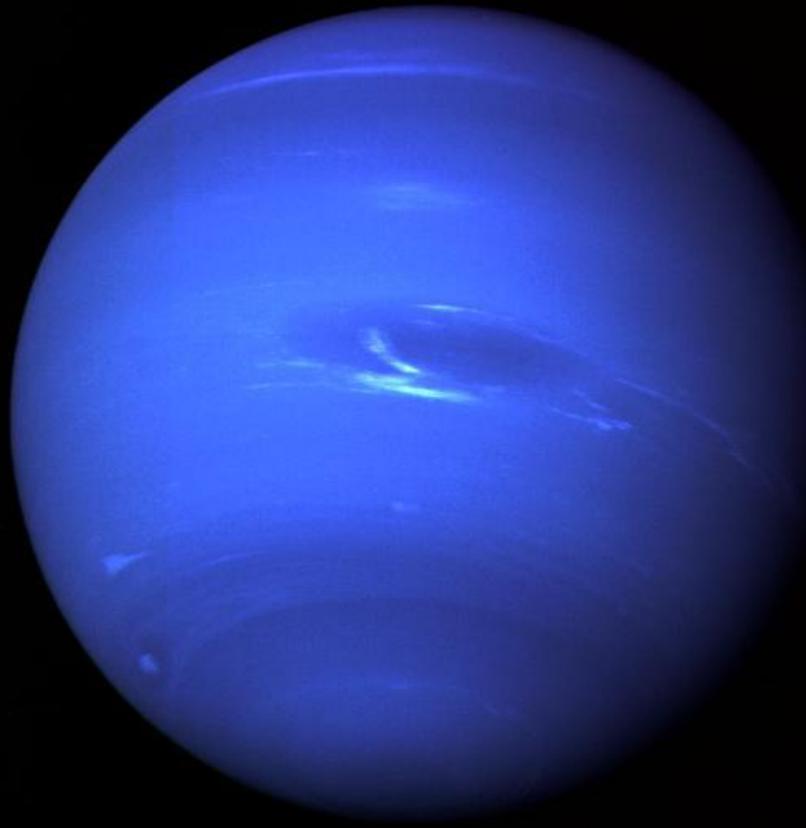
Image TEM:  
Smectite (argile) et  
serpentine



Veines de phosphates  
dans la chondrite  
d'Orgueil

Spherules de  
magnetite,  
oxyde de fer





## Au delà des astéroïdes, les 4 planètes géantes

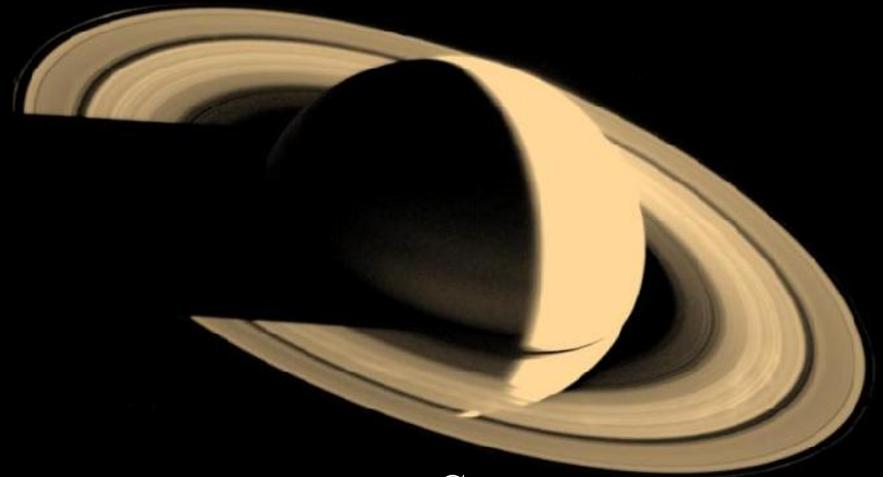
### Caractéristiques de la surface supérieure des nuages

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

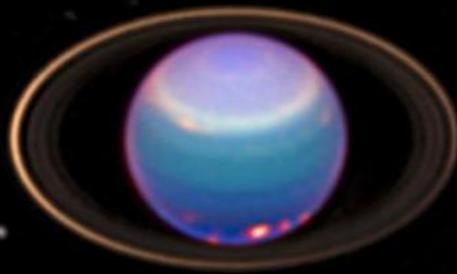
Elles sont faites majoritairement d'H et He (99% dans le cas de Jupiter et Saturne). Mais en leur cœur, il y a un noyau gros comme plusieurs Terres, fait de fer + silicates + glaces. Je n'en parlerai pas plus que cela.



**Jupiter**



**Saturne**

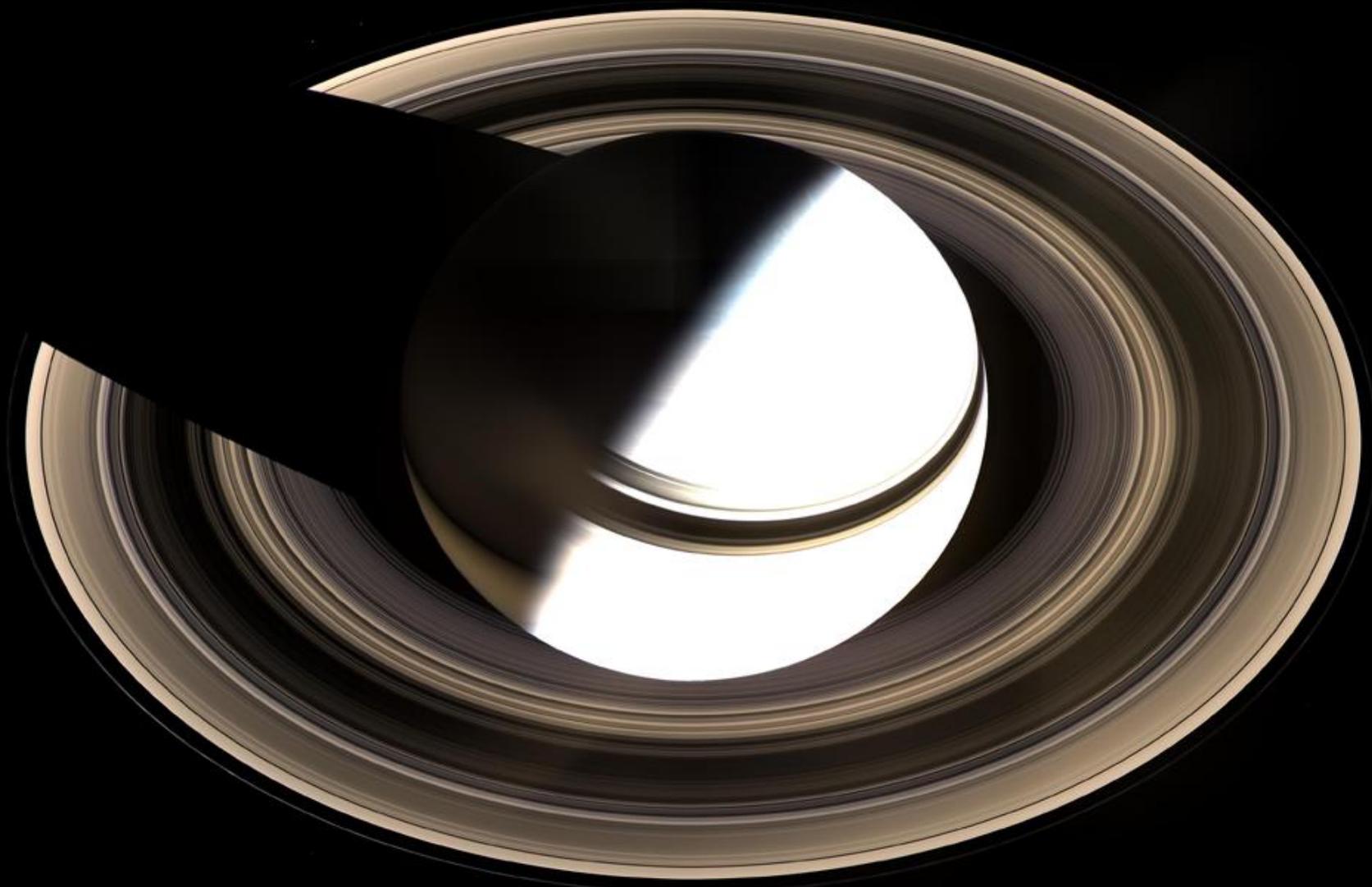


**Uranus**



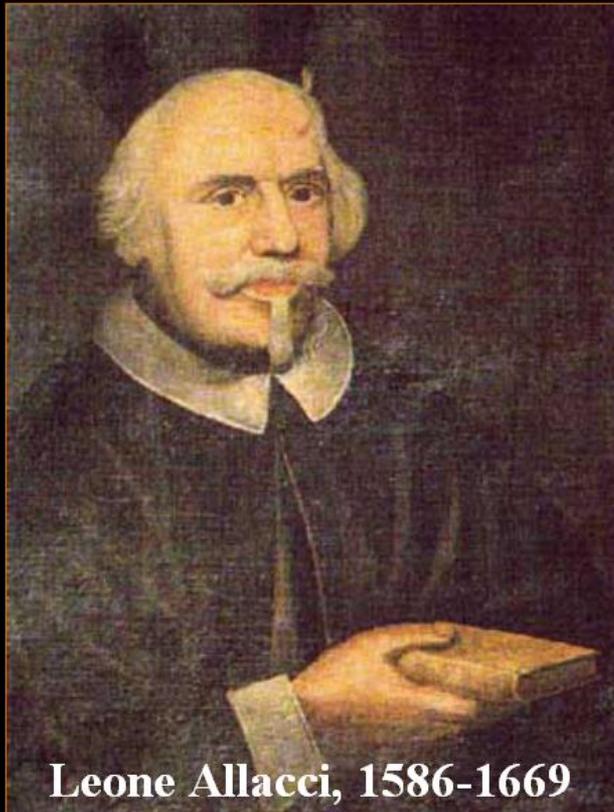
**Neptune**

**Les planètes géantes ont toutes des anneaux.  
Regardons rapidement les plus beaux,  
ceux de Saturne, découverts en 1669.**

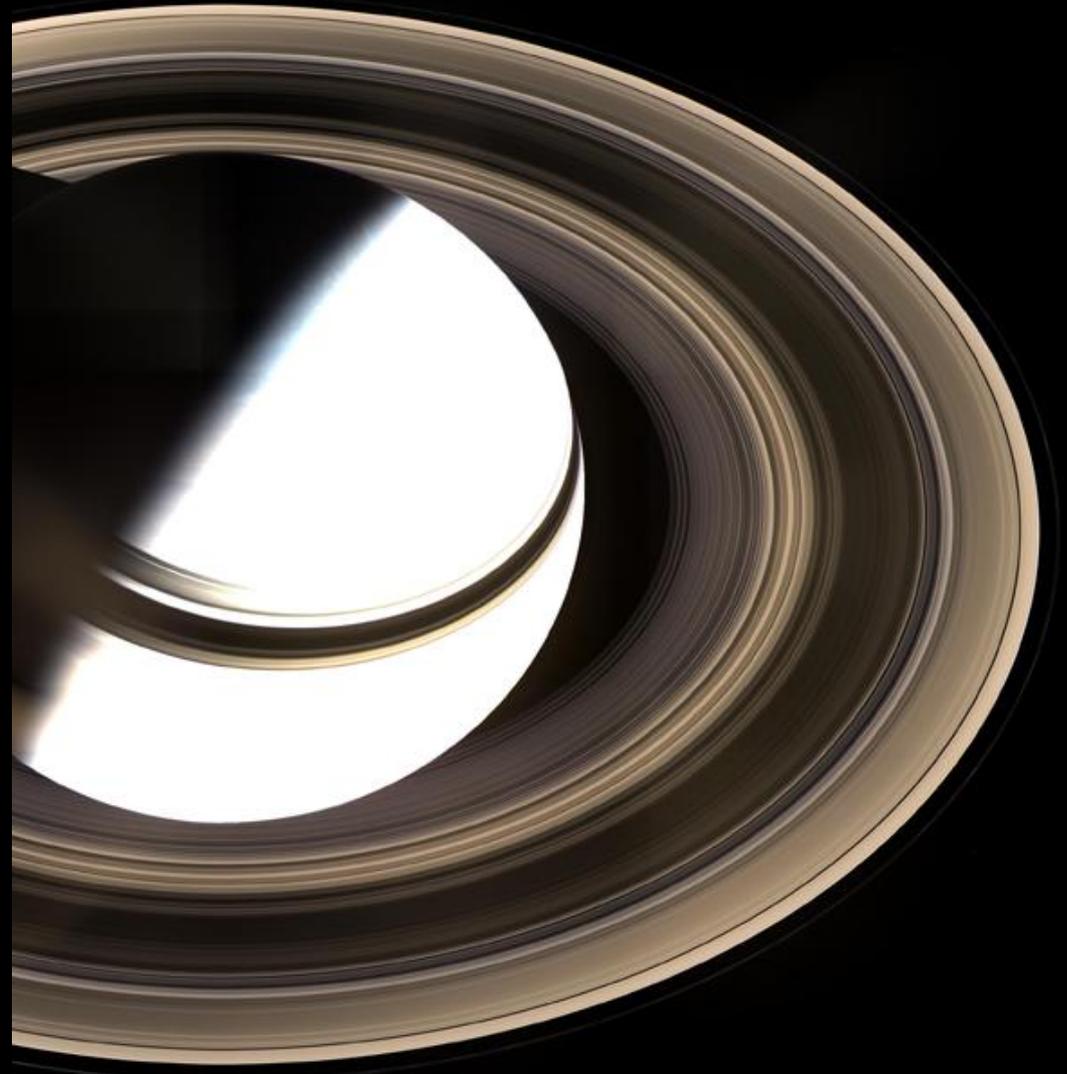


**Les anneaux de Saturne  
dans toute leur majesté**

**Une proposition  
originale quand à  
l'origine des  
anneaux de  
Saturne**

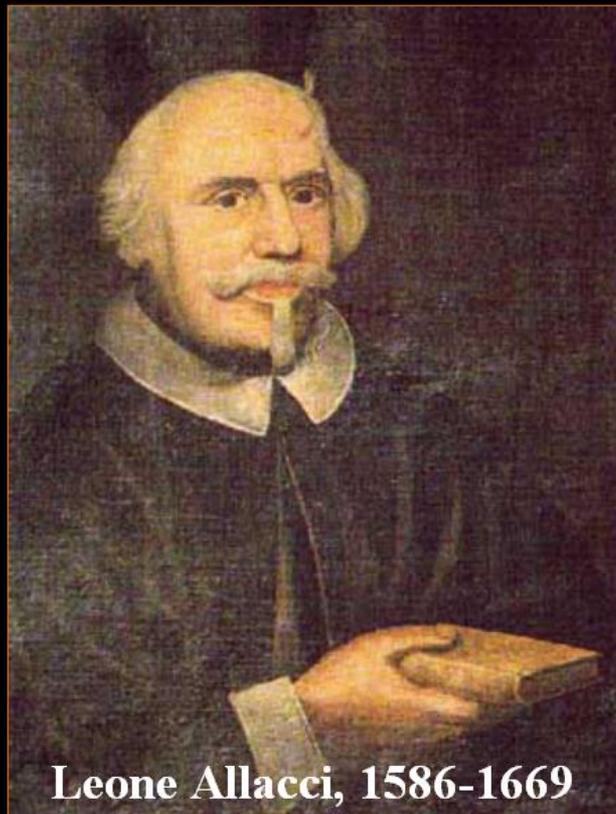


**Leone Allacci, 1586-1669**



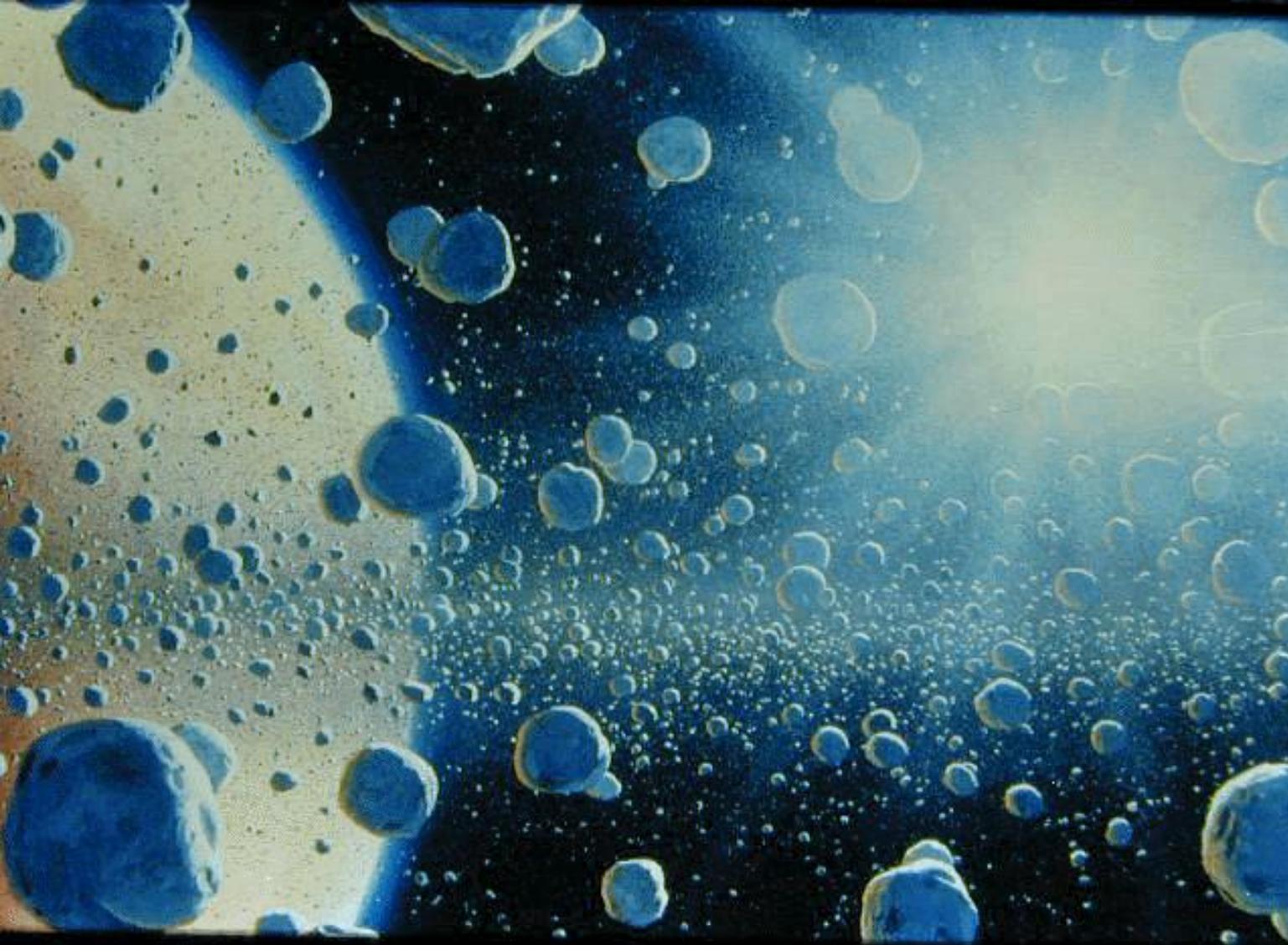
**Les anneaux de Saturne  
dans toute leur majesté**

**Une proposition  
originale quand à  
l'origine des  
anneaux de  
Saturne**



Of all his works, however, perhaps his most famous today is a minor essay *De Praeputio Domini Nostri Jesu Christi Diatriba* ("Discussion concerning the Prepuce of our Lord Jesus Christ"), which appears humorous to many modern readers. In this essay he speculated that the Holy Prepuce (Foreskin) may have ascended into Heaven at the same time as Jesus himself and might have become the rings of Saturn (then-recently observed).

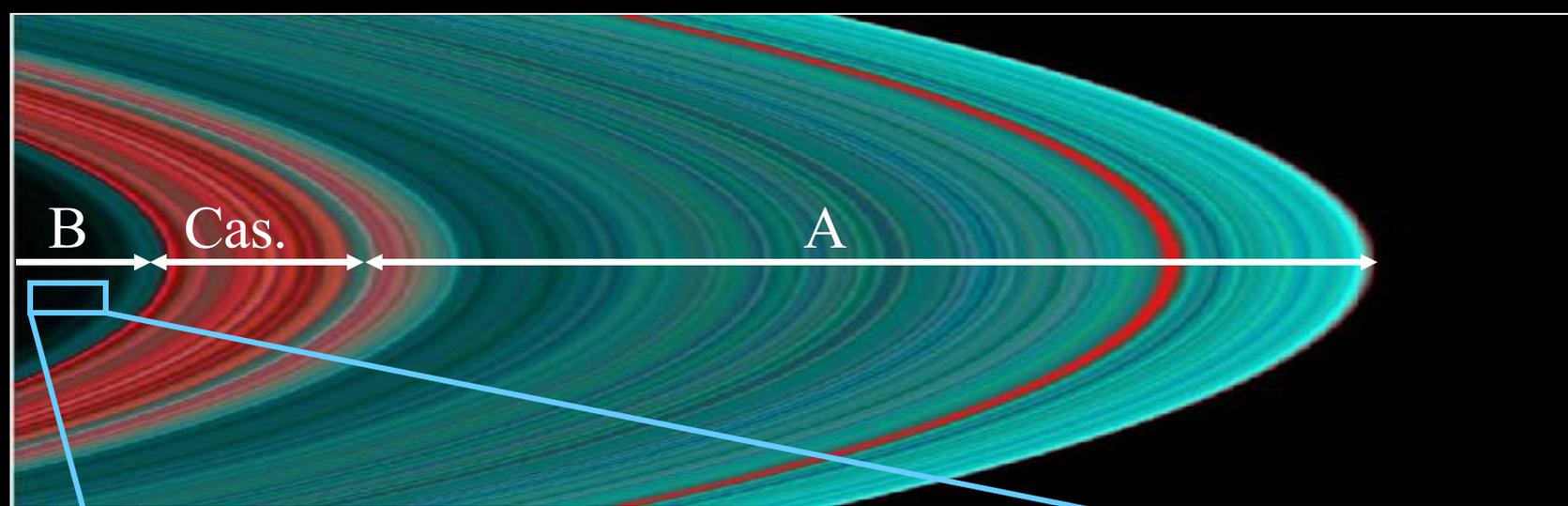




Dessin d'artiste  
représentant les  
anneaux vus de  
l'intérieur

$T = -200^{\circ}\text{C}$

**Ce qu'on pense maintenant des anneaux de Saturne : une multitude de blocs et poussières, chaque bloc et chaque poussière se comportant comme un satellite**



**Cassini a pu analyser spectralement la composition chimique des anneaux : c'est de la glace d'H<sub>2</sub>O, sale. Mais quelle est l'origine de ce « non mélange » extraordinaire ??**

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

**T = - 150°C  
à - 200 °C**



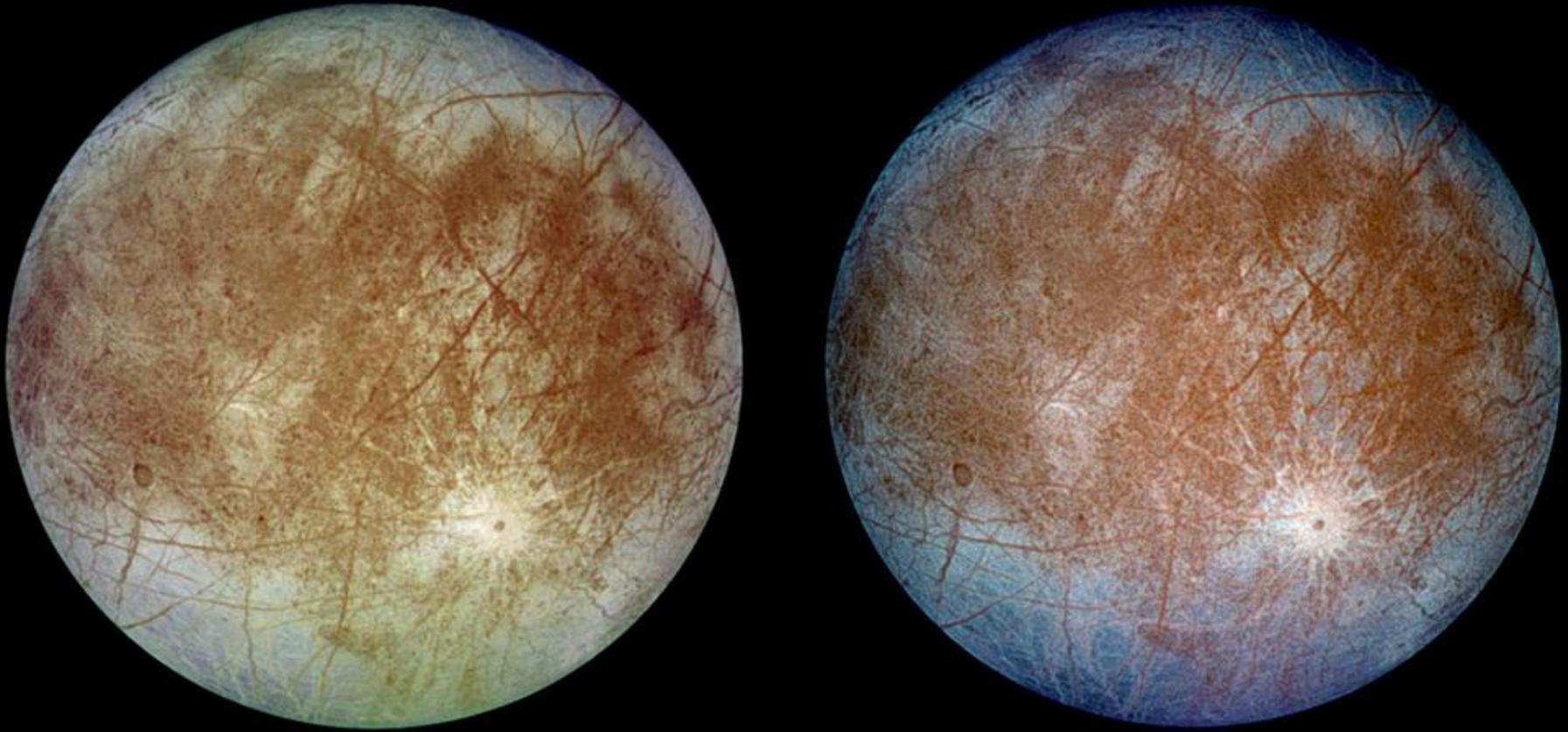
**Europe  
(taille de la  
Lune)**

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



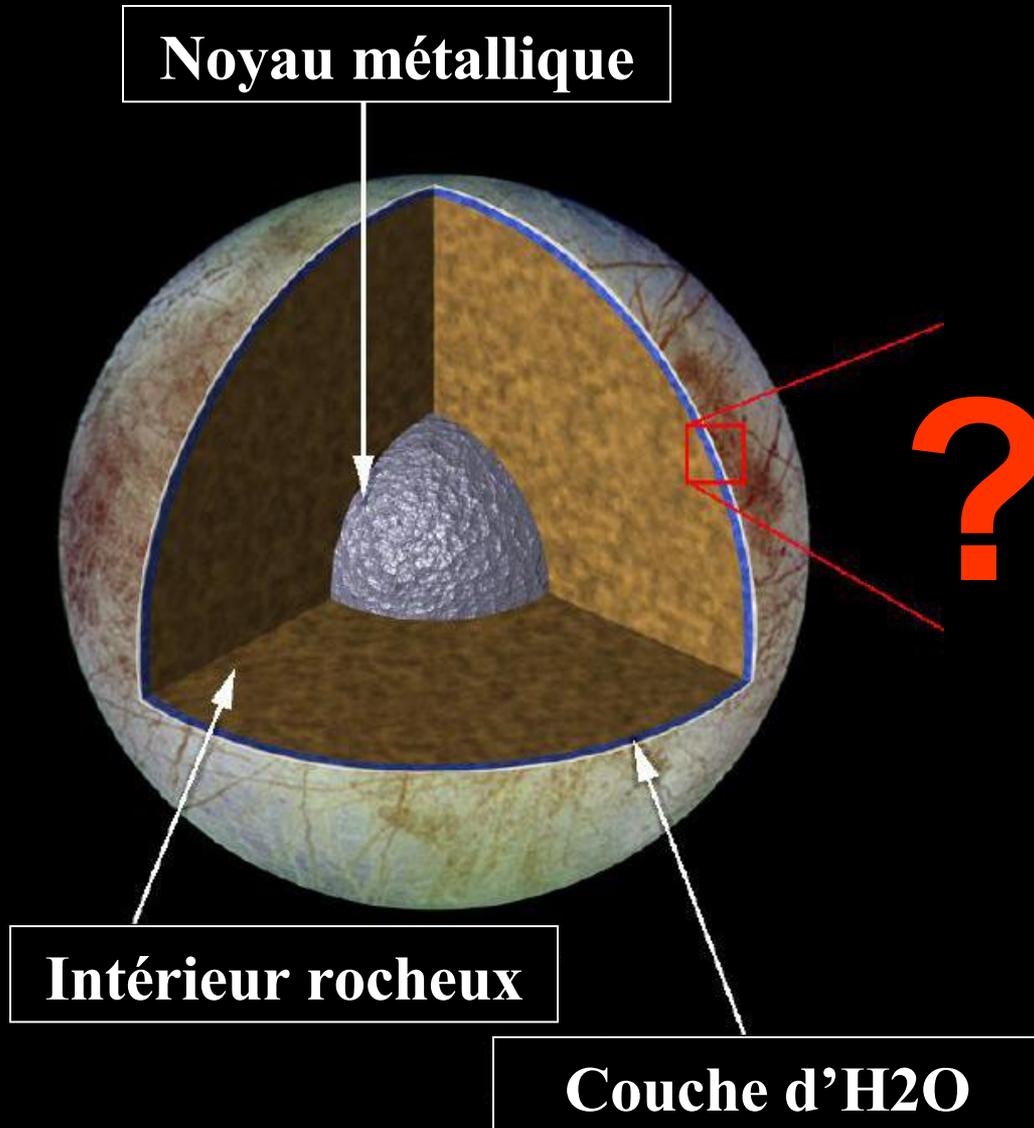
**Les planètes géantes  
ont des satellites, 17  
« gros » et des  
dizaines de  
« petits ». Parmi  
leurs 17 satellites  
principaux, un n'est  
constitué que de  
roches (Io), un autre  
est constitué de  
roches recouvertes  
de glaces (Europe)  
et les 15 autres sont  
constitués  
majoritairement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

**D'abord, Europe,  
satellite de Jupiter, vu par Galiléo.**



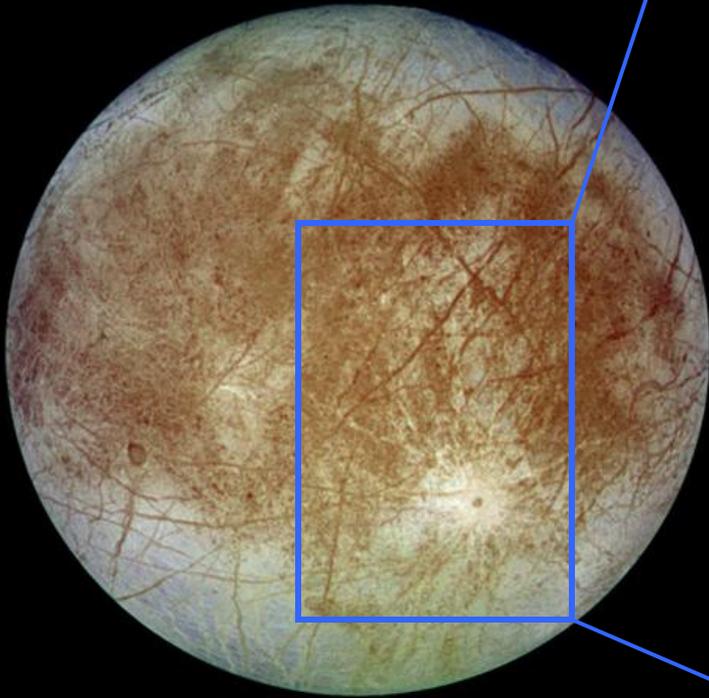
← 3000 km →

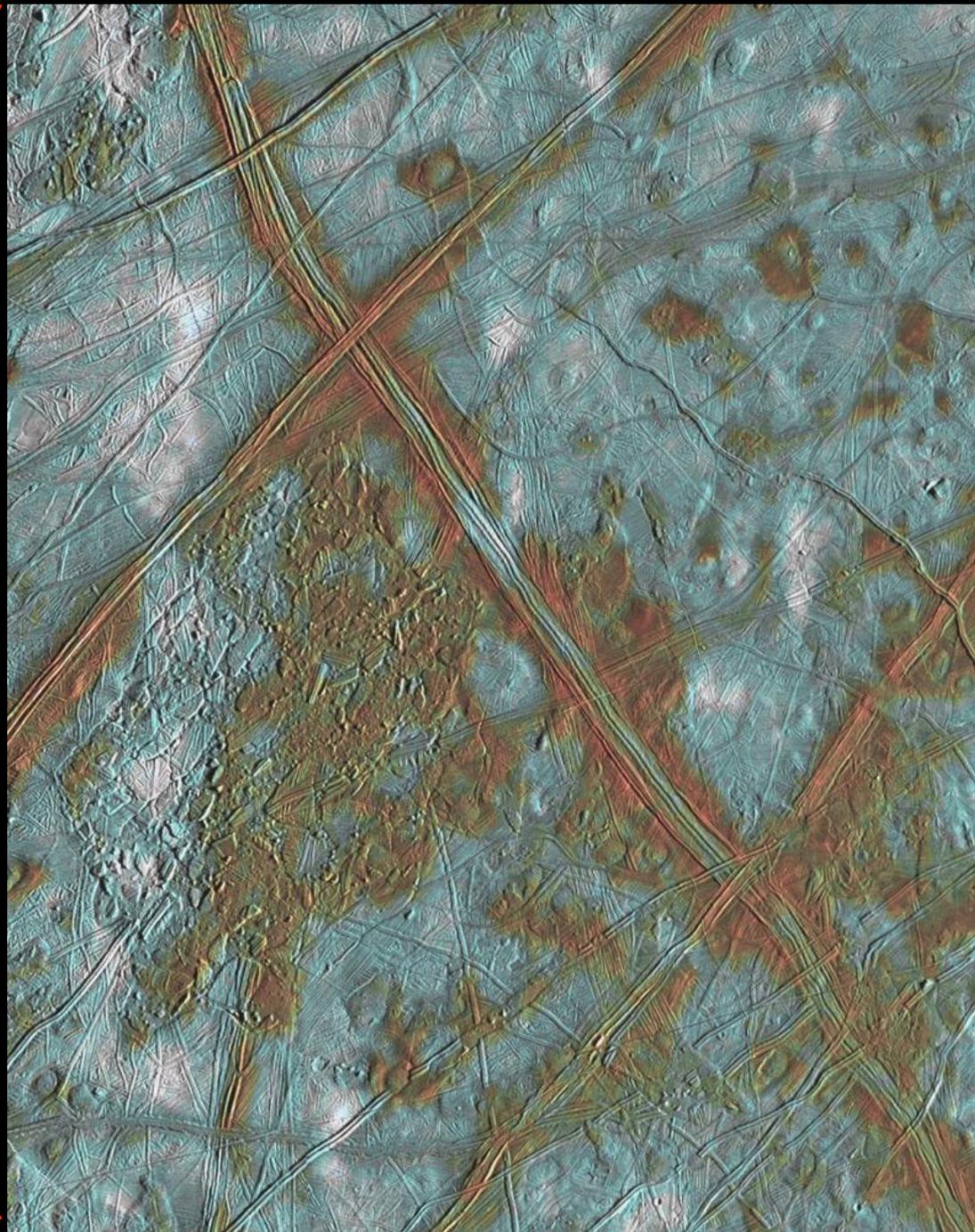
## Europe.



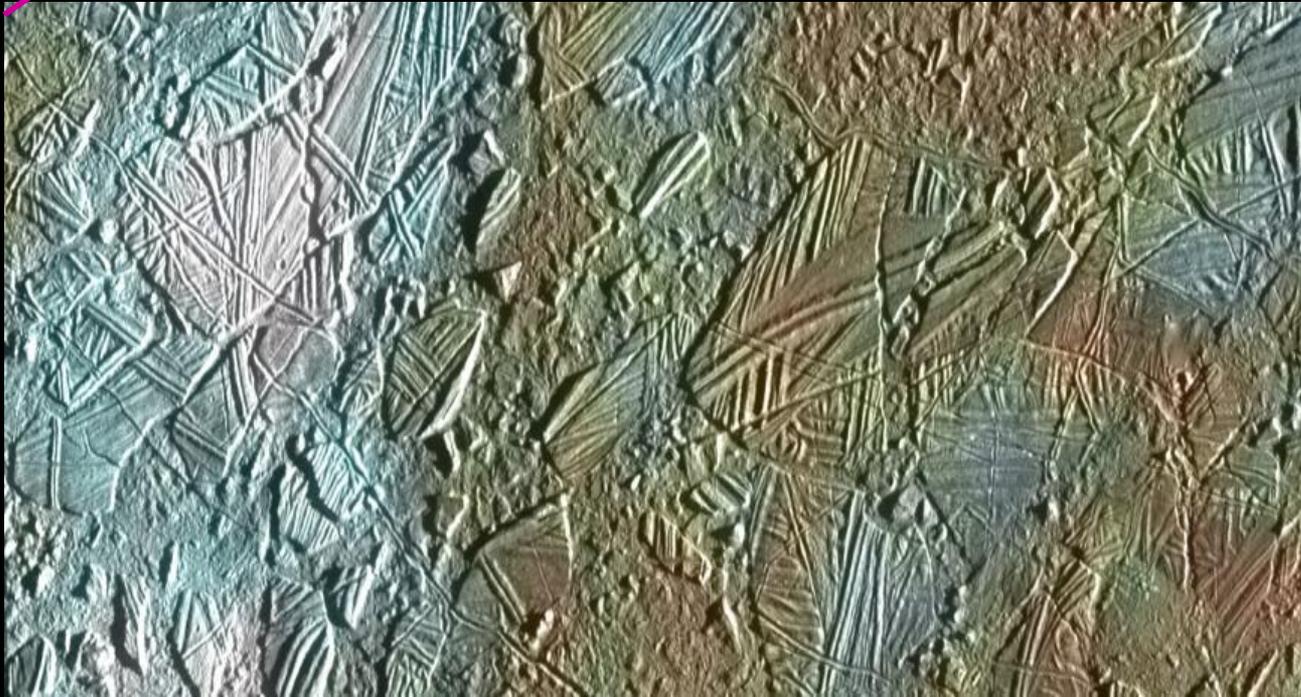
La masse volumique ( $3 \text{ g/cm}^3$ ) indique que c'est un corps identique à la Terre, recouvert d'un océan de 100 km d'épaisseur (Terre 3 km), mais cet océan est gelé, car il fait  $-150^\circ\text{C}$  en été au soleil)

**Faisons une  
série de zooms  
sur Europe**



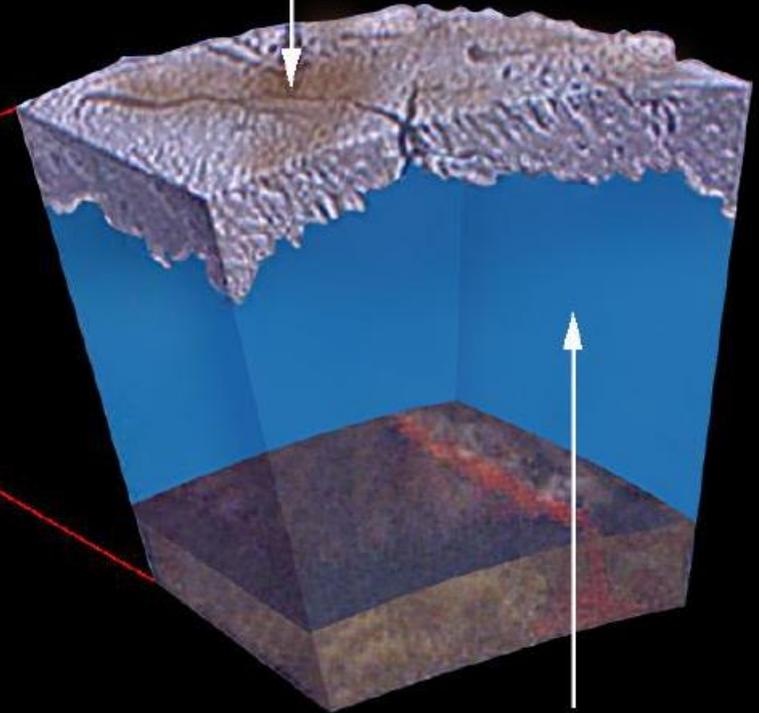
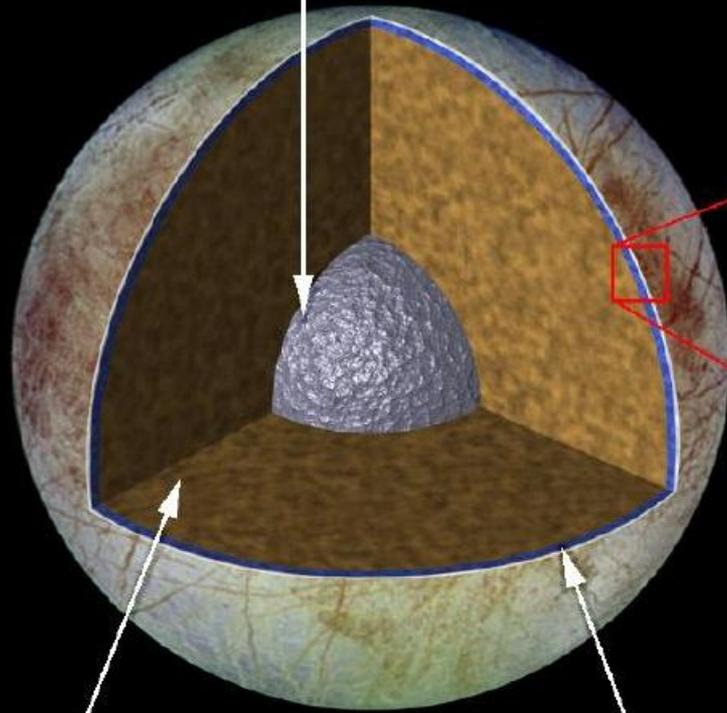


**Avouez que ça  
ressemble !**



**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 cousins les plus probables dans le Système Solaire, ce serait des ... « Européens »**

**En simplifiant, il y a trois types de satellites de glaces  
autour de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune :**



**Des boules de  
glaces sans  
histoire  
géologique, ici  
Rhéa**



**Des boules de glaces  
avec une histoire  
géologique complexe,  
ici Ganymède**



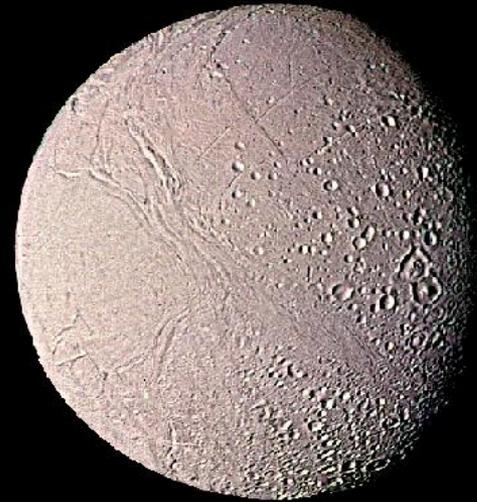
**Une boule de  
glaces avec  
atmosphère :  
Titan**

**On va étudier 1 seul exemple pour chacun de ces 3  
types de satellite, choisi parmi les satellites de Saturne**

**Terre**



**Satellite de glaces**

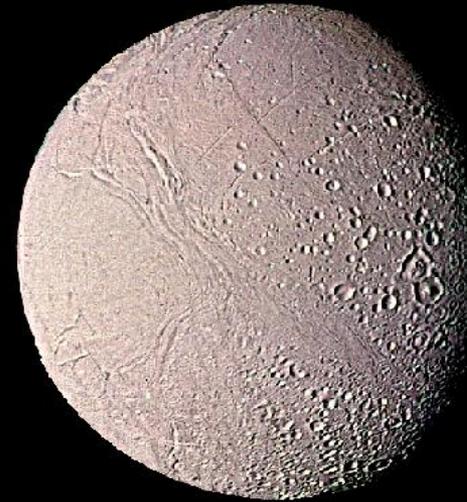


# Terre

# Satellite de glaces

Température externe :  $15^{\circ}$

Température externe :  $\sim -200^{\circ}$



# Terre

Température externe :  $15^{\circ}$

Température interne :  $> 1000^{\circ}$



# Satellite de glaces

Température externe :  $\sim -200^{\circ}$

Température interne :  $< 0^{\circ}$

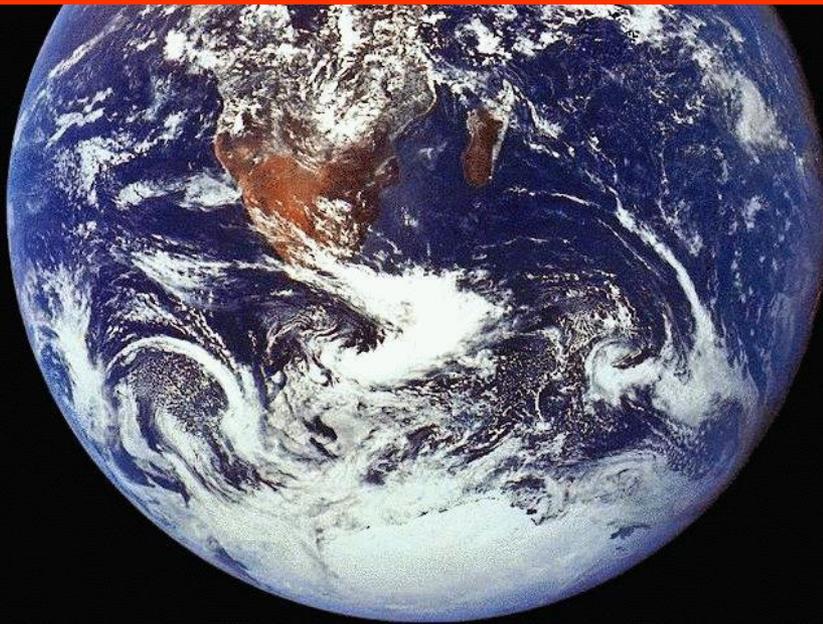


## Terre

Température externe :  $15^{\circ}$

Température interne :  $> 1000^{\circ}$

En surface : cailloux

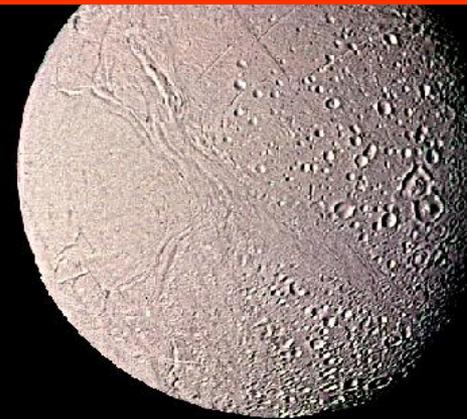


## Satellite de glaces

Température externe :  $\sim -200^{\circ}$

Température interne :  $< 0^{\circ}$

En surface : glaces



## Terre

Température externe :  $15^{\circ}$

Température interne :  $> 1000^{\circ}$

En surface : cailloux

Intérieur = cailloux, roche ...



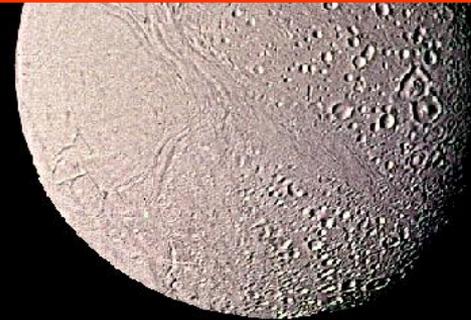
## Satellite de glaces

Température externe :  $\sim -200^{\circ}$

Température interne :  $< 0^{\circ}$

En surface : glaces

Intérieur = glaces



## Terre

Température externe :  $15^{\circ}$

Température interne :  $> 1000^{\circ}$

En surface : cailloux

Intérieur = cailloux, roche ...

Volcan  $\rightarrow$  lave = roche fondue

## Satellite de glaces

Température externe :  $\sim -200^{\circ}$

Température interne :  $< 0^{\circ}$

En surface : glaces

Intérieur = glaces

Volcan  $\rightarrow$  lave = glace fondue  
= eau liquide



## Terre

Température externe :  $15^{\circ}$

Température interne :  $> 1000^{\circ}$

En surface : cailloux

Intérieur = cailloux, roche ...

Volcan  $\rightarrow$  lave = roche fondue

Gaz volcaniques : vapeur d'eau, gaz carbonique ...

## Satellite de glaces

Température externe :  $\sim -200^{\circ}$

Température interne :  $< 0^{\circ}$

En surface : glaces

Intérieur = glaces

Volcan  $\rightarrow$  lave = glace fondue  
= eau liquide

Gaz volcaniques : méthane, hydrocarbures ...



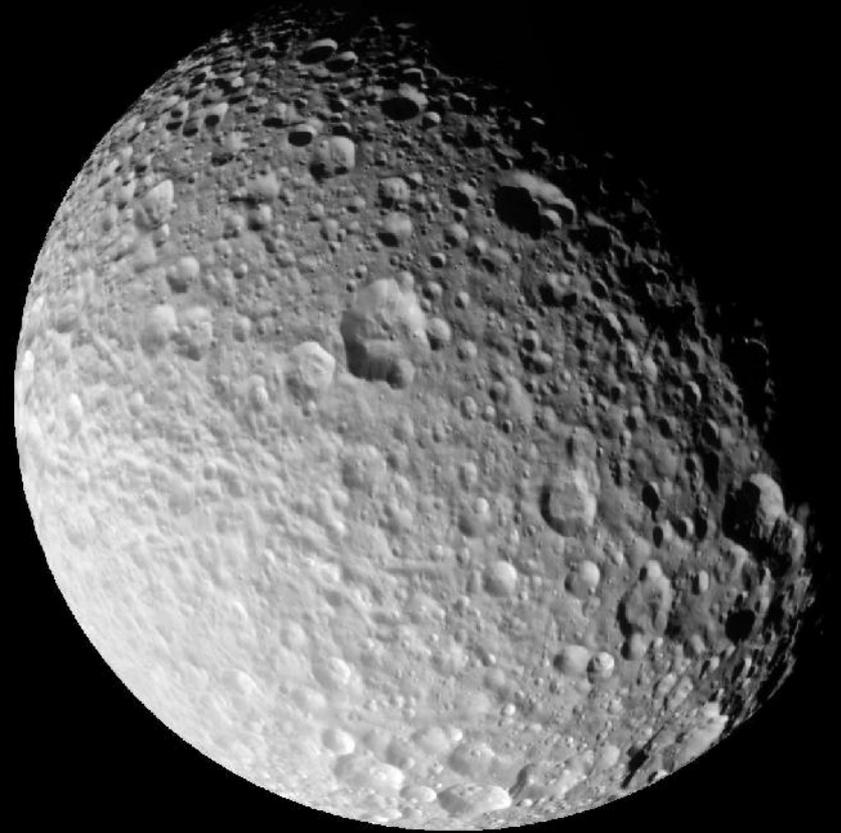
<b>Terre</b>	<b>Satellite de glaces</b>
<b>Température externe : 15°</b>	<b>Température externe : ~ -200°</b>
<b>Température interne : &gt; 1000°</b>	<b>Température interne : &lt; 0°</b>
<b>En surface : cailloux</b>	<b>En surface : glaces</b>
<b>Intérieur = cailloux, roche ...</b>	<b>Intérieur = glaces</b>
<b>Volcan → lave = roche fondue</b>	<b>Volcan → lave = glace fondue = eau liquide</b>
<b>Gaz volcaniques : vapeur d'eau, gaz carbonique ...</b>	<b>Gaz volcaniques : méthane, hydrocarbures ...</b>
<b>Liquide de surface (pluie, rivières, lacs, mers) : eau liquide</b>	<b>Liquide de surface (pluie, rivières, lacs, mers) : méthane (et hydrocarbures) liquide</b>

**Un exemple de satellite de glaces sans histoire :  
Mimas, satellite de Saturne, vu par Cassini.**



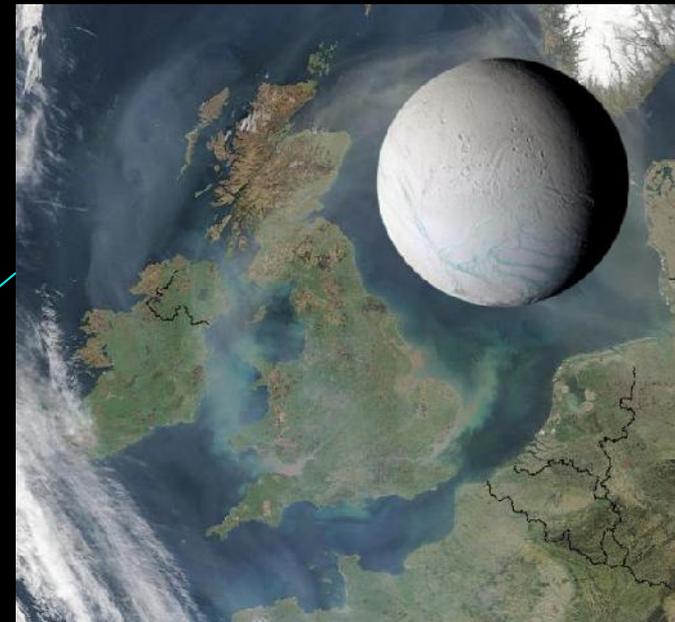
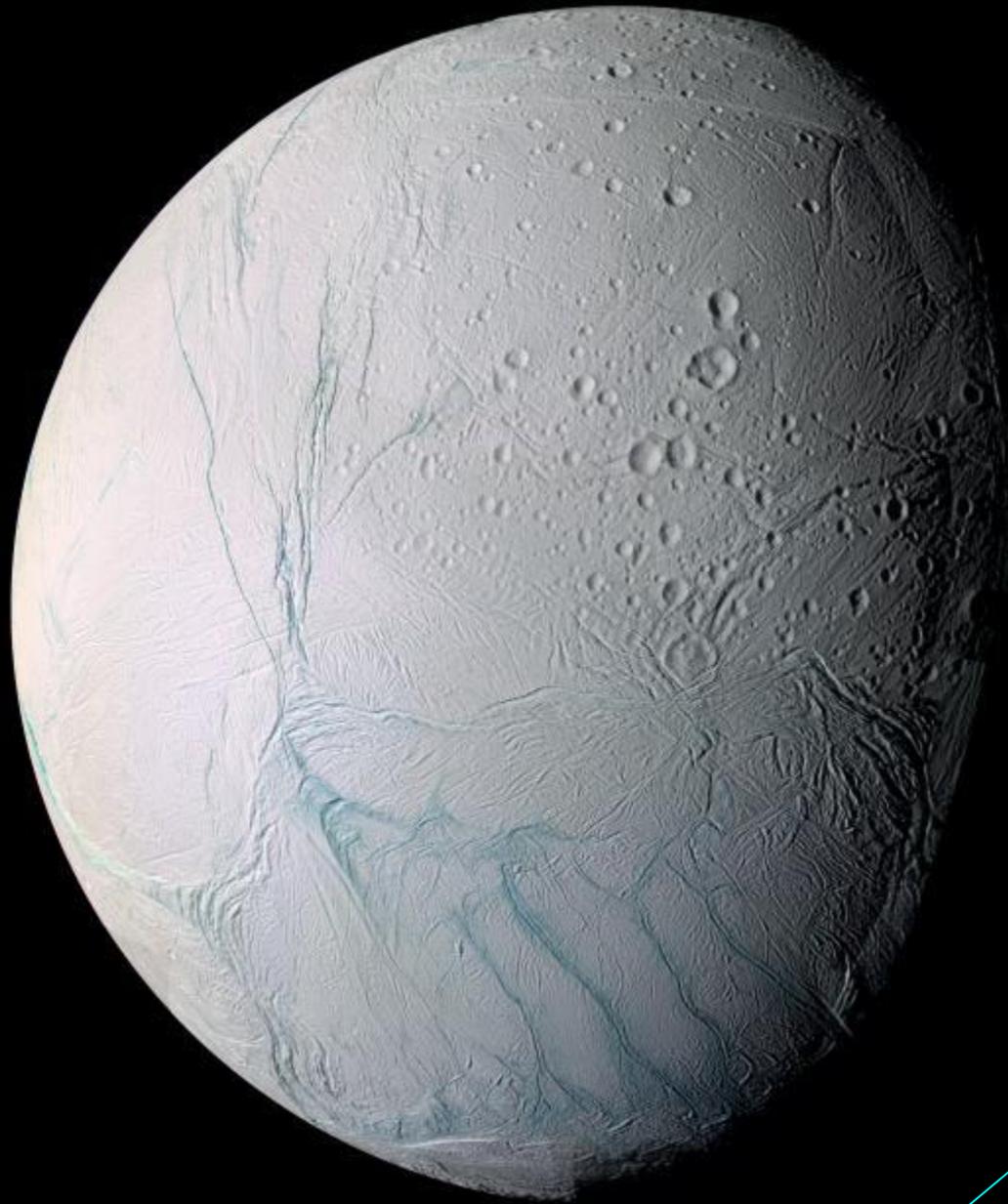
**Mimas par devant**

400 km

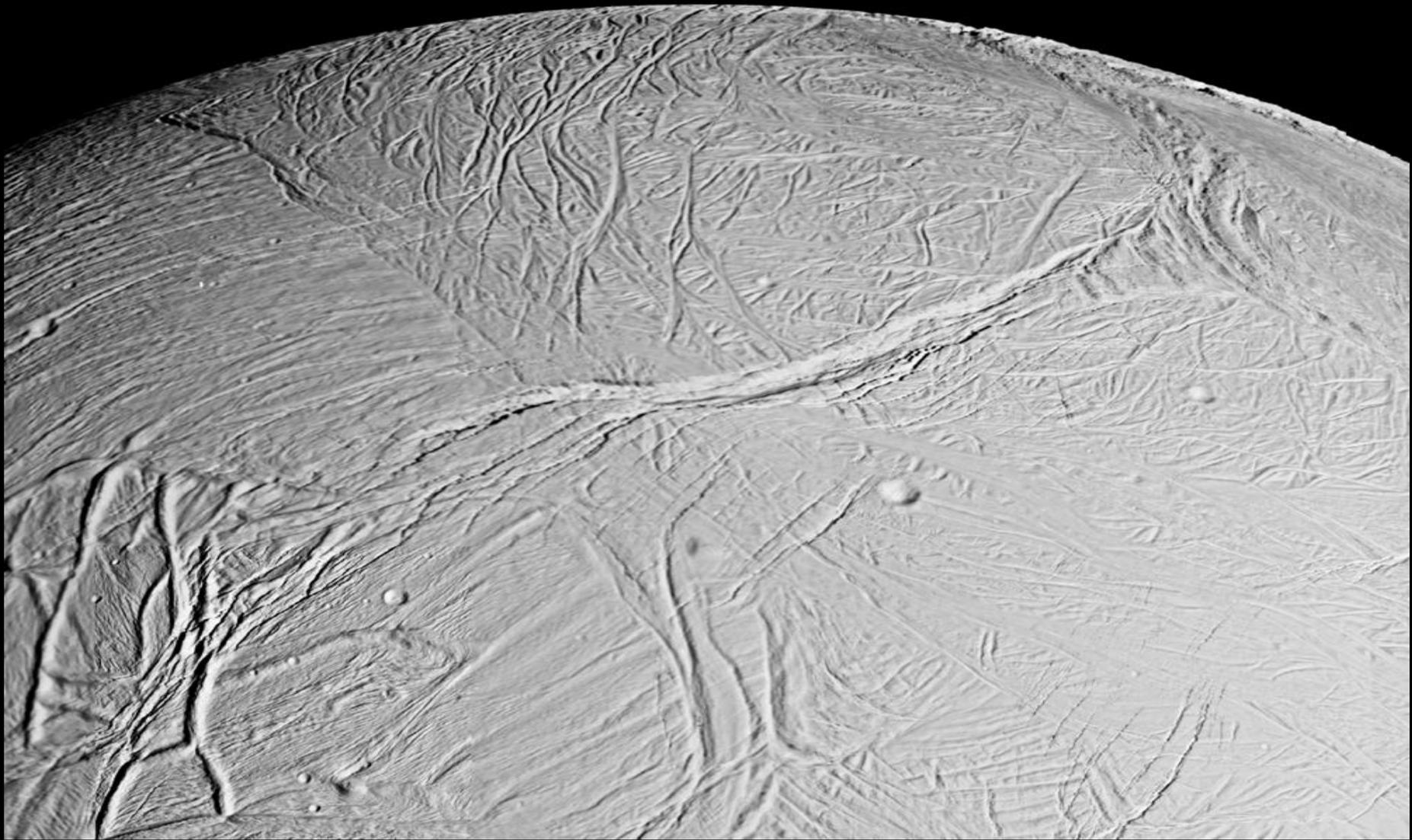


**Mimas par derrière**

**Le prototype des  
satellites de glaces  
actifs, Encelade,  
également un satellite  
de Saturne,  
quasiment de la  
même taille que  
Mimas**

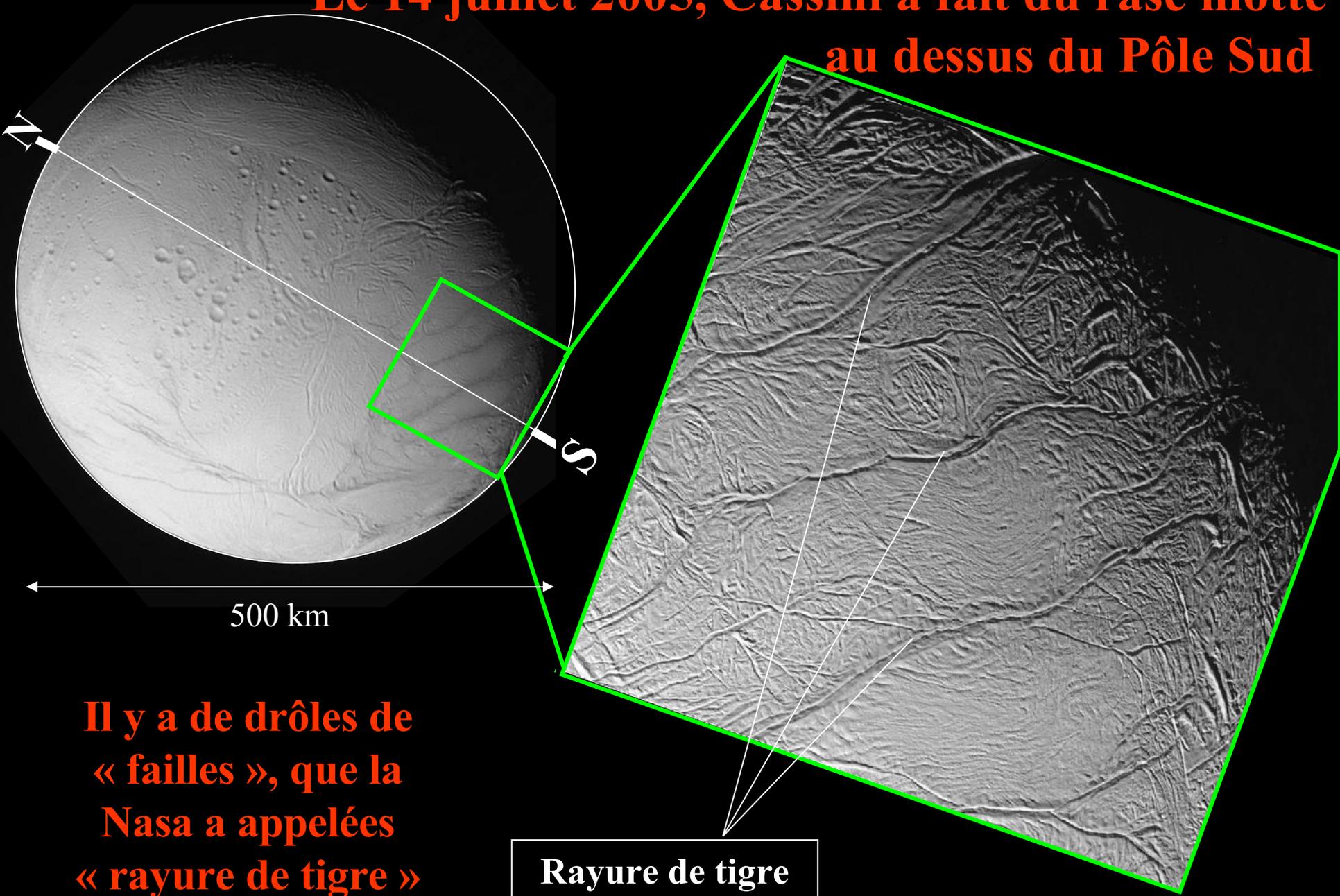


Pour vous rappeler la petite taille d'Encelade



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

# Le 14 juillet 2005, Cassini a fait du rase motte au dessus du Pôle Sud

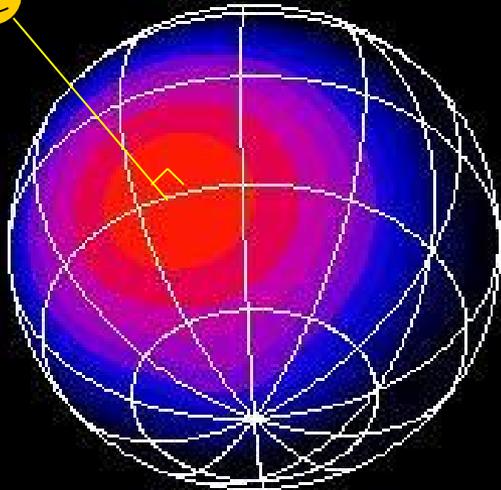


Il y a de drôles de  
« failles », que la  
Nasa a appelées  
« rayure de tigre »

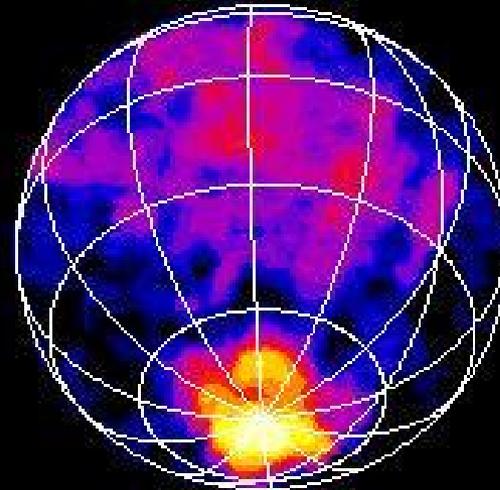
Rayure de tigre

# Enceladus Temperature Map

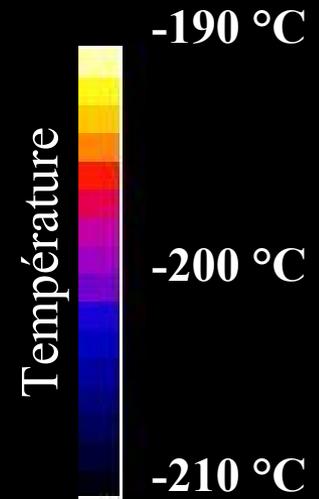
Soleil  
au  
zénith



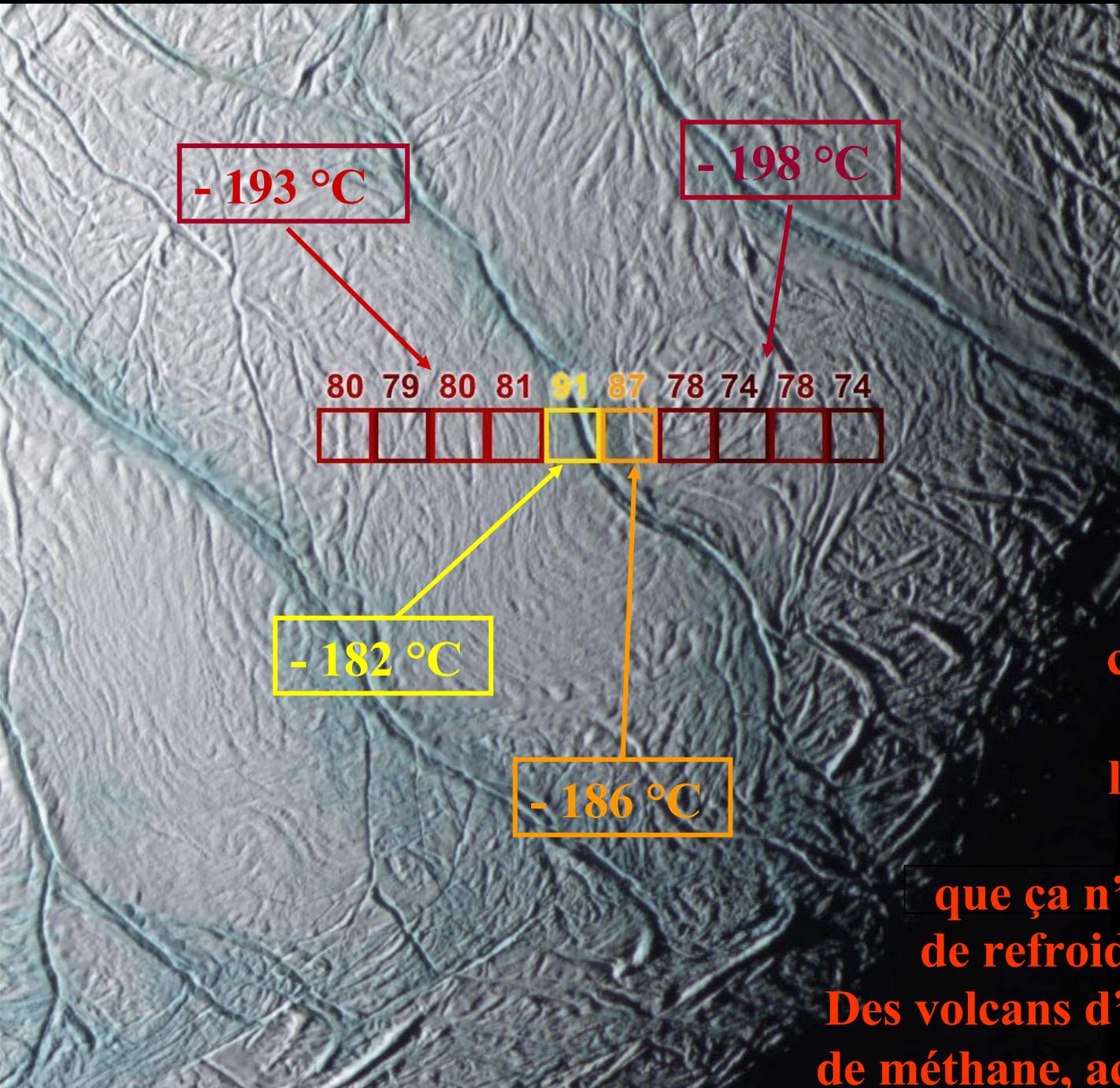
Predicted  
Temperatures



Observed  
Temperatures



**En survolant le Pôle Sud, Cassini découvre qu'il y fait 20° de plus qu'il ne devrait**

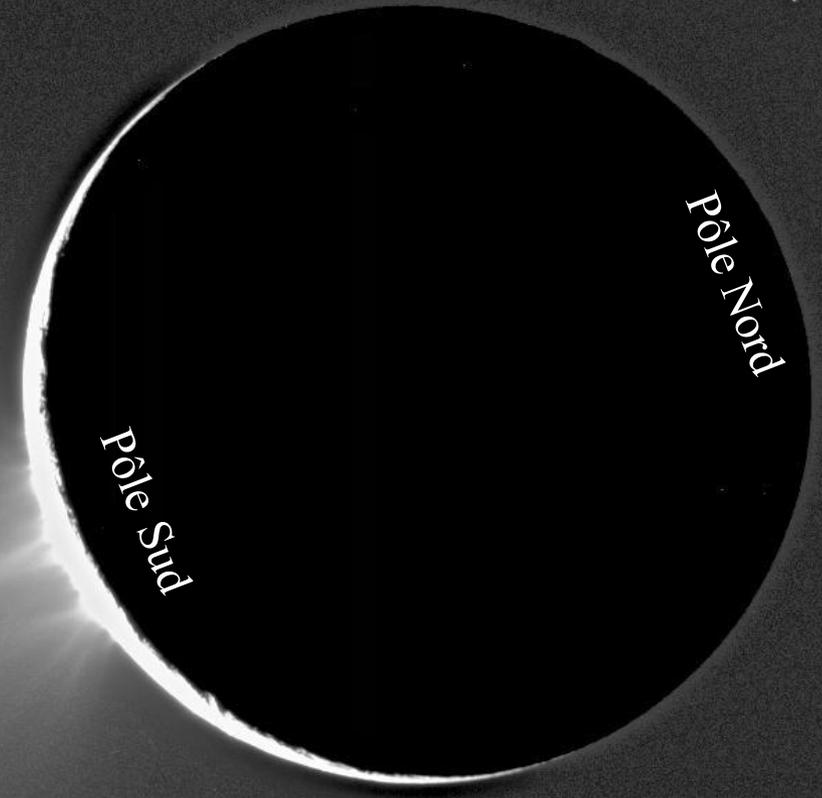


C'est au niveau des rayures de tigre que se situent les zones « chaudes », de 15 ° de plus (en moyenne) que les zones environnantes ... Cela signifie que quelque chose de chaud sort (ou est sorti il n'y a pas longtemps) et que c'est chaud (ou que ça n'a pas eu le temps de refroidir complètement). Des volcans d'eau, des geysers de méthane, actifs ou récents ??

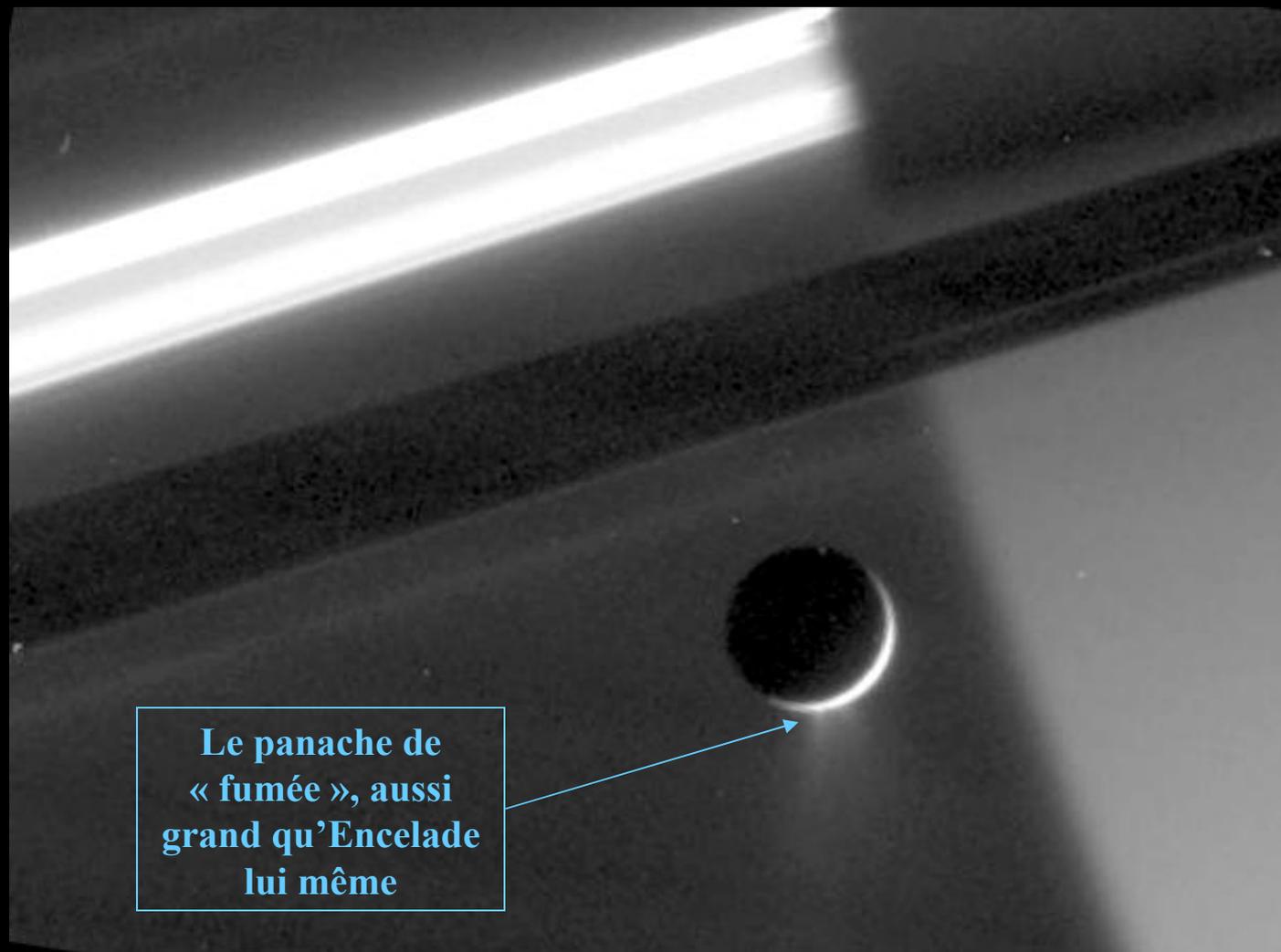
**La réponse est  
arrivée le 27  
novembre 2005.**

**Cassini a surpris des  
dégagements gazeux  
au-dessus du Pôle  
Sud. Il y a des jets de  
micro-particules (de  
givre d'H<sub>2</sub>O) qui  
diffusent la lumière  
solaire. Il s'agit de  
volcans actifs,  
crachant de la  
vapeur d'eau qui  
gèle instantanément  
dans le froid du  
vide spatial.**

**Encelade à contre-jour**

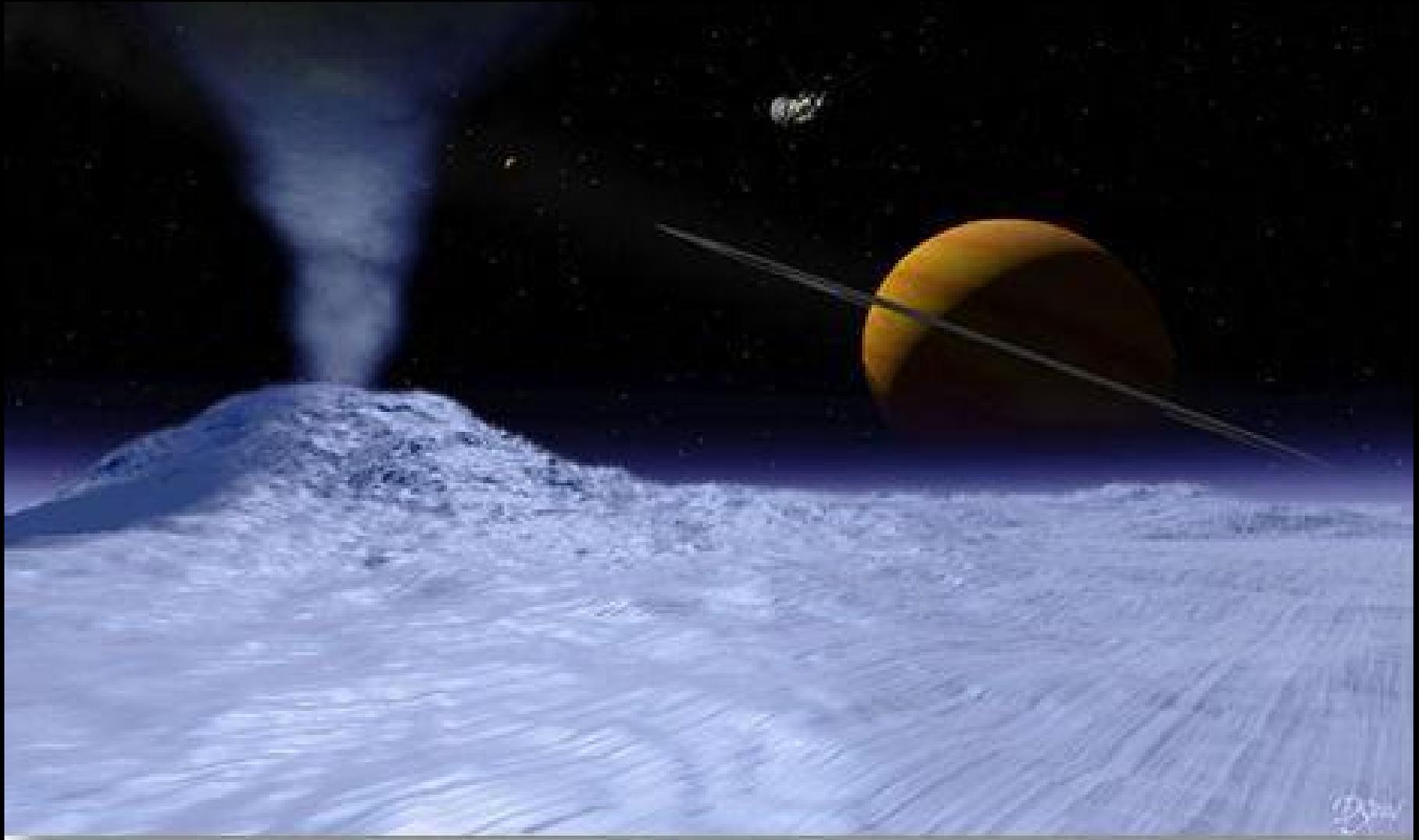


**27 Novembre 2005**



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

**La même « éruption » 6 mois plus tard, le 4 mai 2006. Ce qui sort a été analysé : de la « fumée » de fines particules de glace**



**Encelade comme si vous y étiez !**

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

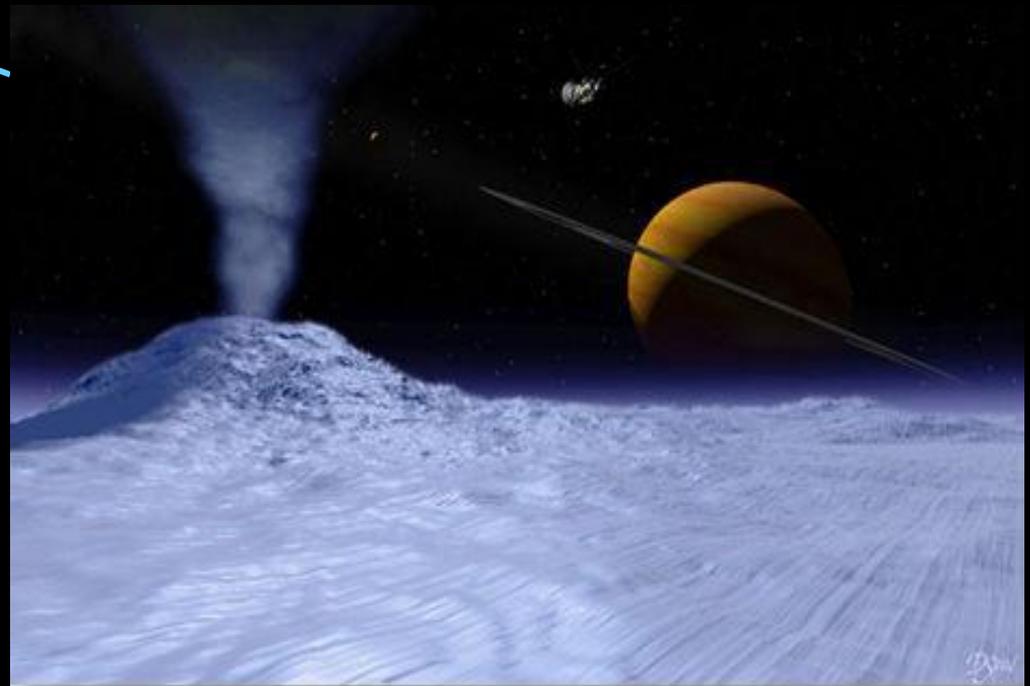
**Un peu d'ammoniaque dans la glace, ce qui facilite sa fusion,**

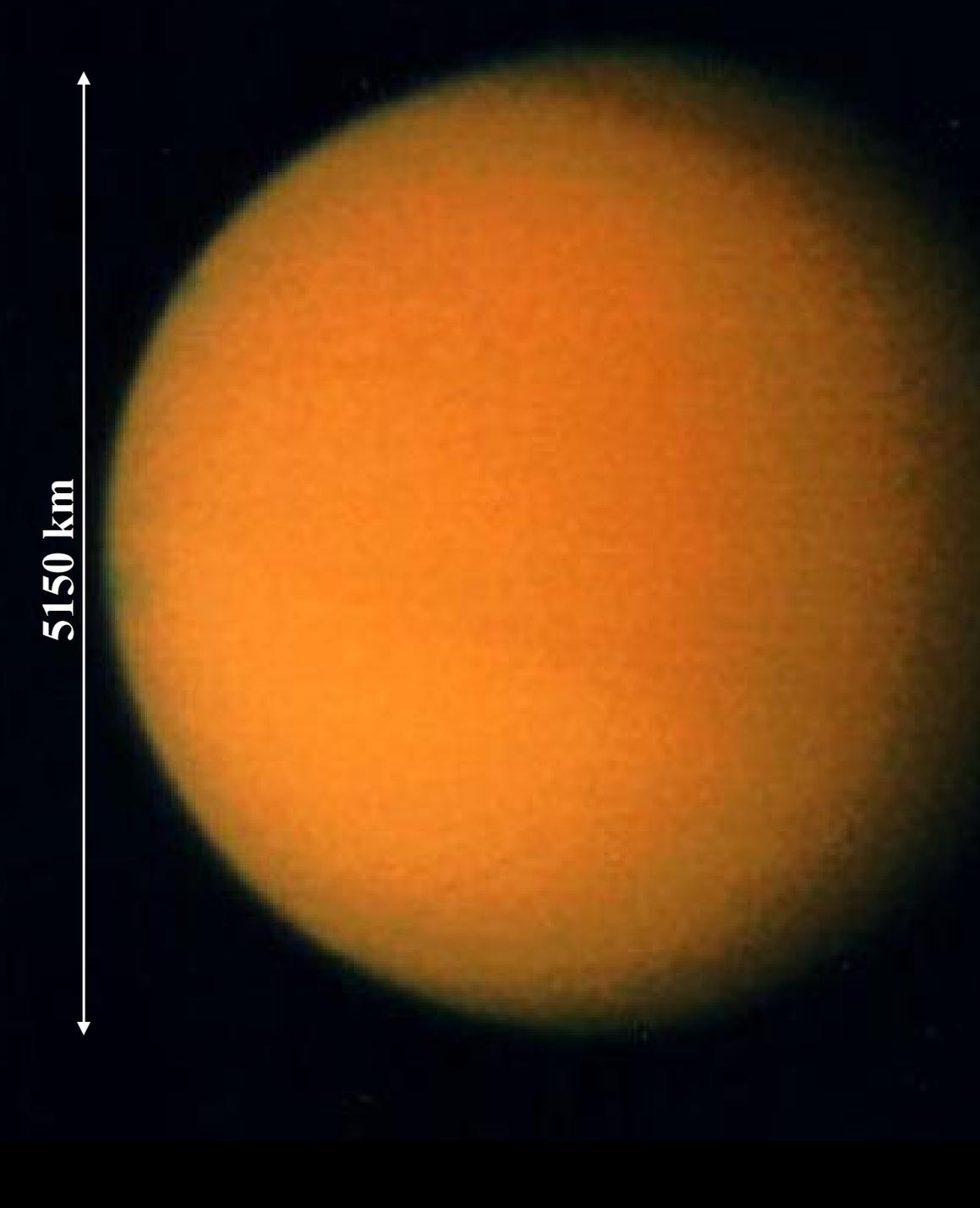
**des marées qui déforment et réchauffent l'intérieur,**

**et le tour est (presque) joué !**

**On a maintenant des résultats sur la chimie de ces gaz volcaniques : H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> ...**

**Et vivement le prochain survol rapproché, le ... 12 mars 2008 !**





5150 km

**Titan, vu par  
Voyager.  
C'est le seul  
satellite du  
Système Solaire  
avec nuages et  
atmosphère  
dense. Comment  
voir sous ces  
nuages ? C'est le  
but principal de  
la mission  
Cassini-Huygens**

Le site d'atterrissage  
de Huygens en  
janvier 2005

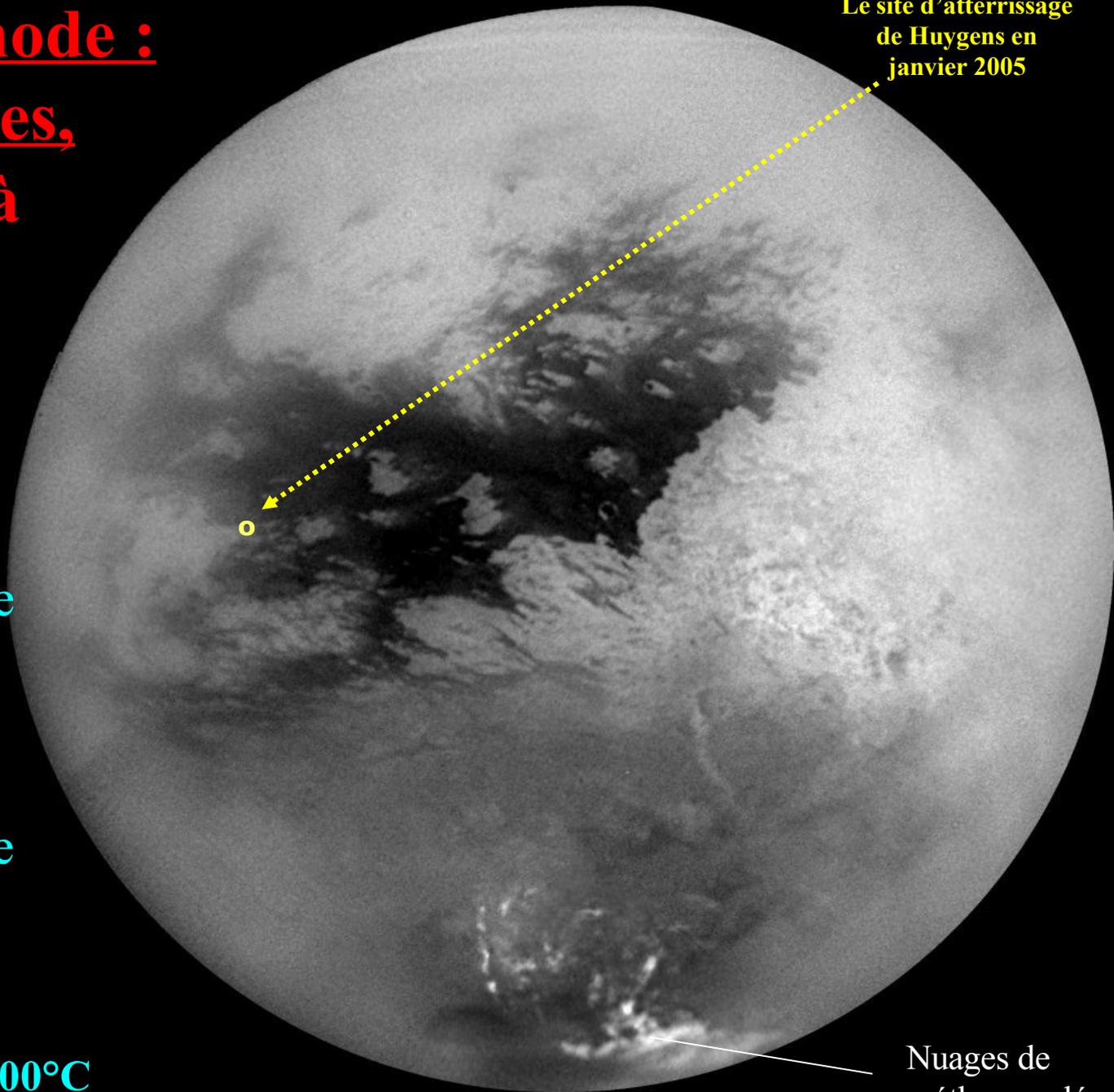
**Première méthode :**  
**les Infra-Rouges,**  
**qui « voient » à**  
**travers**  
**l'atmosphère**

**Sombre** = riche en  
hydrocarbures lourds  
ou en méthane liquide  
(les IR ne permettent  
pas de trancher)

**Clair** = riche en glace  
d'H<sub>2</sub>O

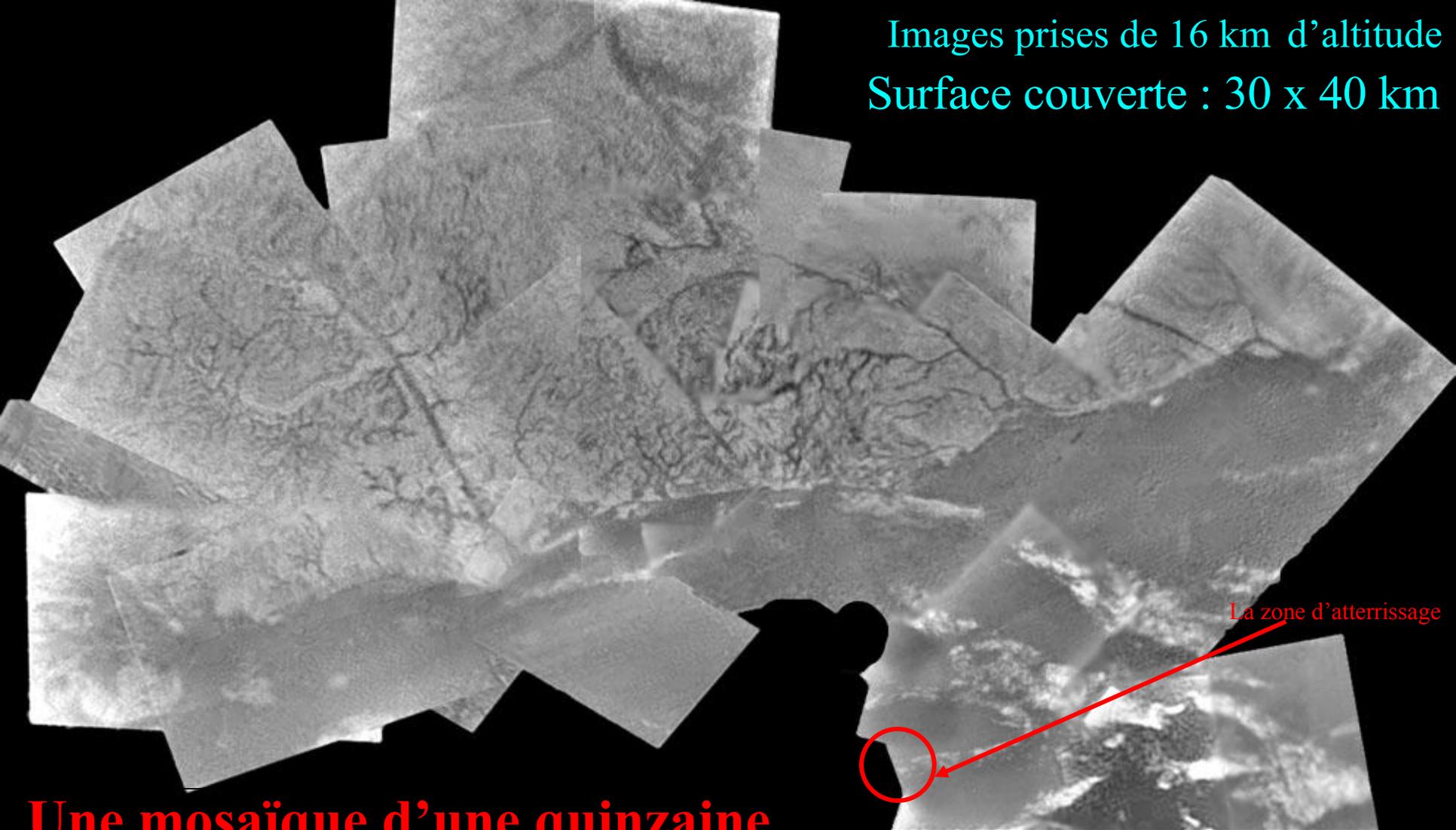
A l'équateur, -180°C.

Au pôle, de -190° à -200°C



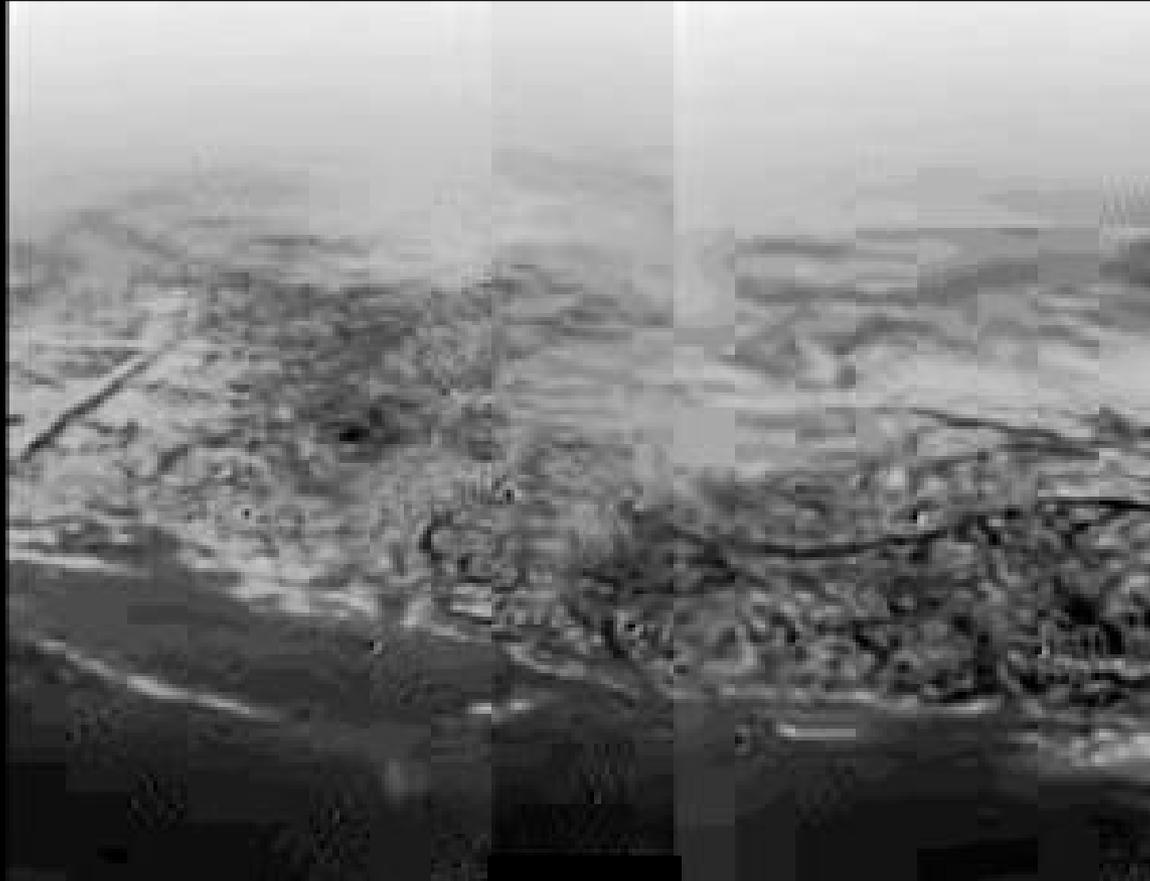
Nuages de  
méthane gelé

Images prises de 16 km d'altitude  
Surface couverte : 30 x 40 km



La zone d'atterrissage

**Une mosaïque d'une quinzaine d'images. Ça ressemble à une « terre » et une « mer », avec des « rivières », une « côte », des « estuaires », un « delta », des « îles » avec bancs de brumes...**



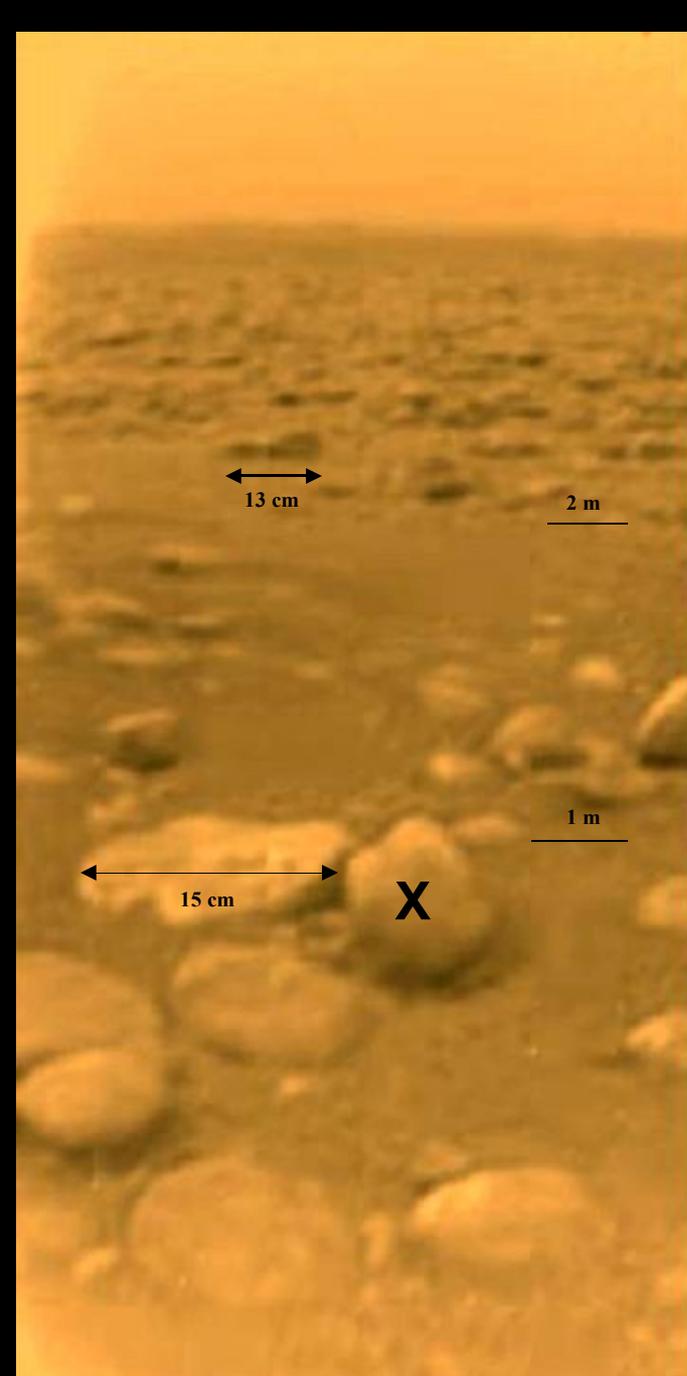
**Une vue oblique prise de 8 km d'altitude,  
avec « terre », « mer », « côtes » ...**

**Longueur de la cote : environ 3 km**

**Voici la « vue du sol » : du sable et des « galets » (de glace d'H<sub>2</sub>O probablement). Le sable était « mouillé » de méthane liquide. Les galets sont arrondis, comme ceux d'une plage ou d'un torrent (de méthane). Autour du galet **X**, sillon en creux, comme ce qui est dégagé par un courant.**

**Ce qu'on pense, c'est qu'il pleut parfois du méthane, que le méthane liquide coule en « nettoyant » les continents de glace, et en emmenant avec lui galets de glace et composés organiques sombres (genre goudron).**

**Les « mers » seraient donc plus des « marécages » peu profonds que de véritables mers, marécages provisoirement asséchés sur le site d'atterrissage lors de cet été équatorial.**



JPL

# CASSINI RADAR

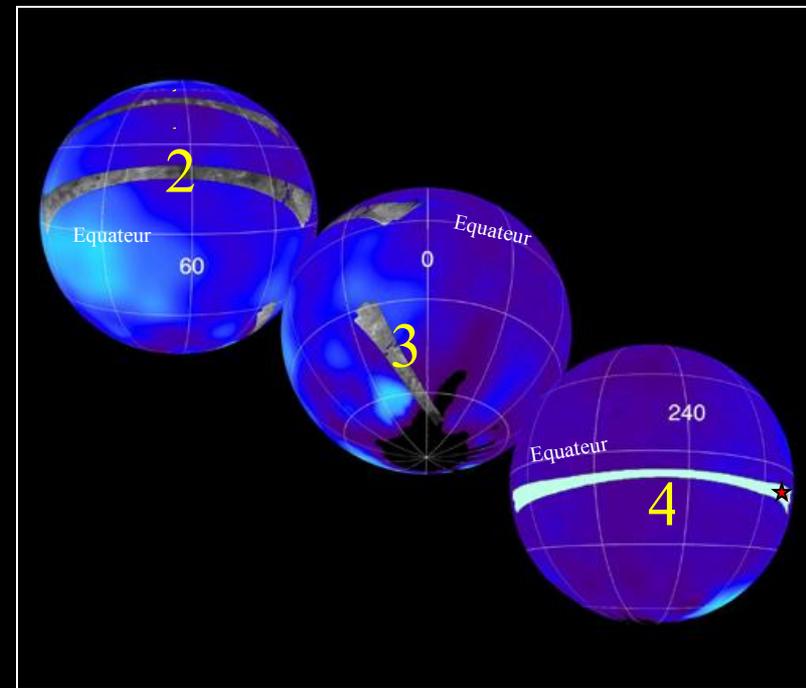


## CAPAI

SURFACE  
ALTIMETRY  
RADIOMETRY  
SCATTEROMETRY

## TARGETS

TITAN  
ICY SATS  
SATURN

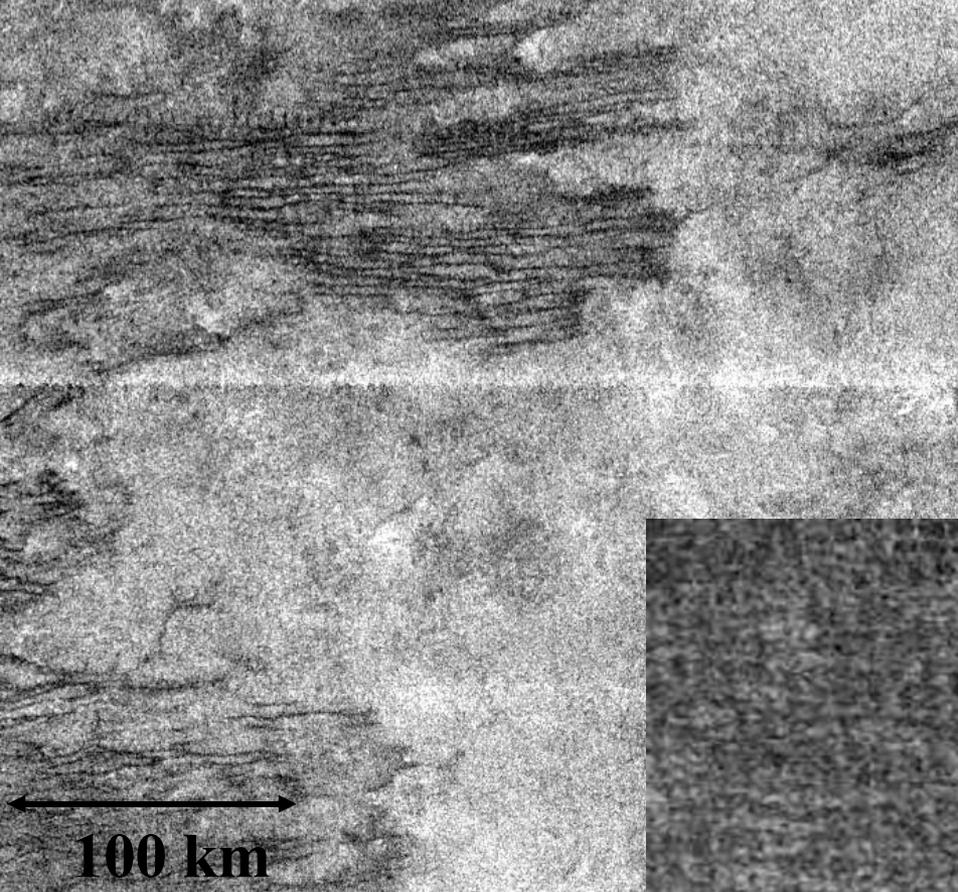


## Troisième méthode : le radar

Cinq passages jusqu'à présent, octobre 2004, février, septembre et octobre 2005, et enfin le 22 juillet 2006, il y a 3 semaines. Qu'est-ce qu'on voit ?

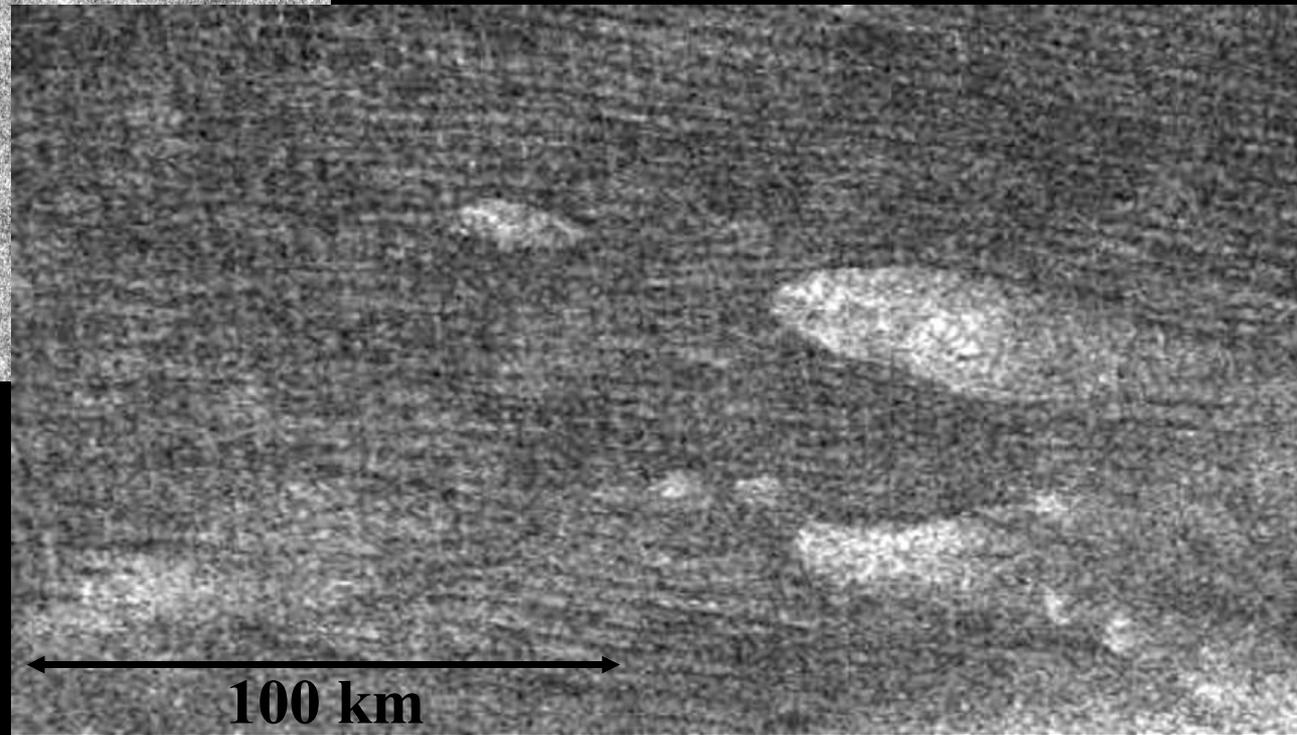


**Loin du pôle, sur les « terres », un réseau hydrographique ou plutôt « méthanographique », a priori à sec. Le site d'atterrissage d'Huygens n'était pas une exception ! Et les réseaux peuvent faire jusqu'à 200 km de long !**



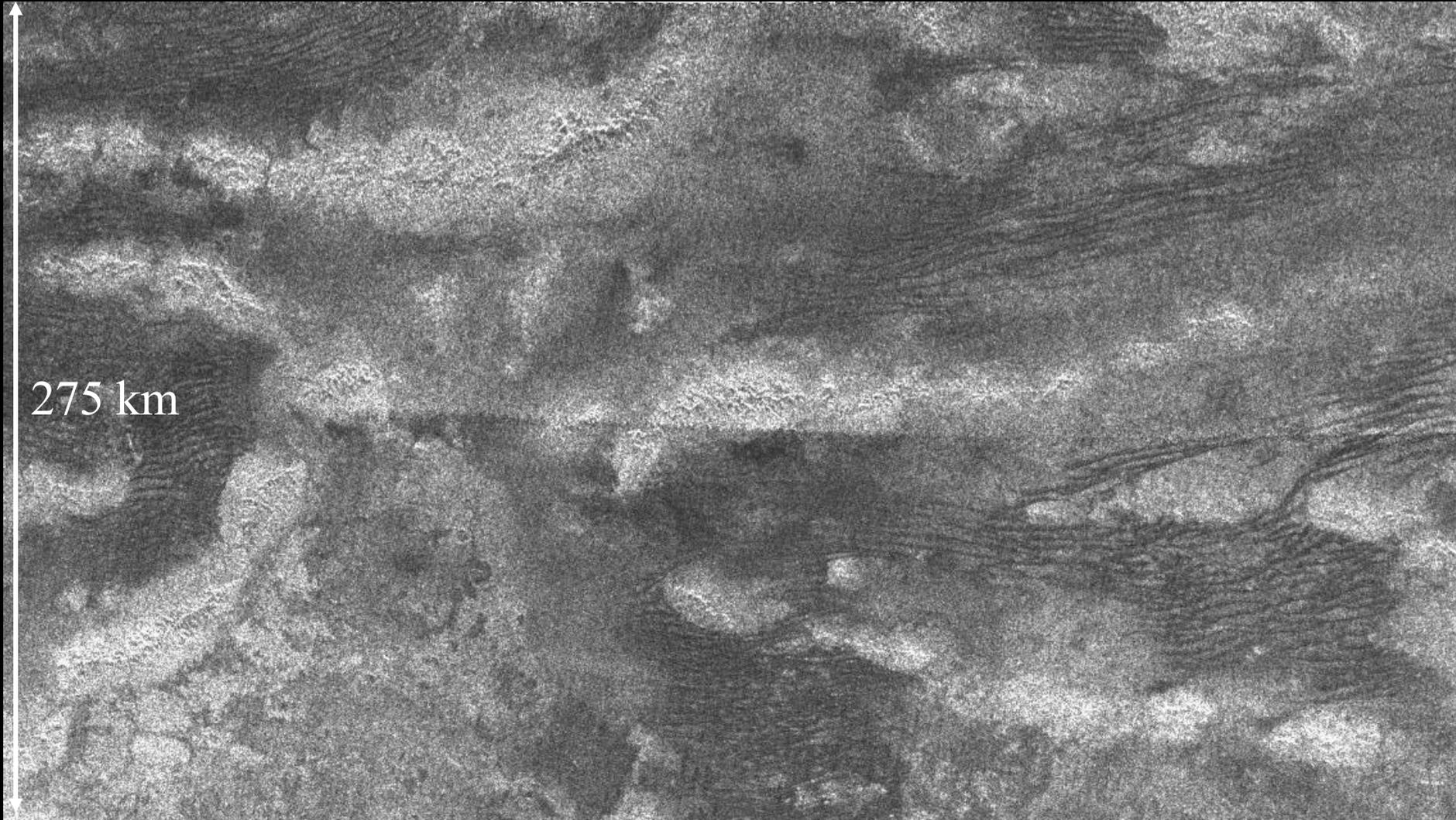
**Et dans les plaines sombres  
qui ressemblent à des  
« mers », voici ce que la  
NASA a appelé des « Cat  
Scratches »  
(griffures de chat).**

**Les griffures de  
chat semblent bien  
être des structures  
éoliennes (dunes).**



**Ce serait des mers de sables.**

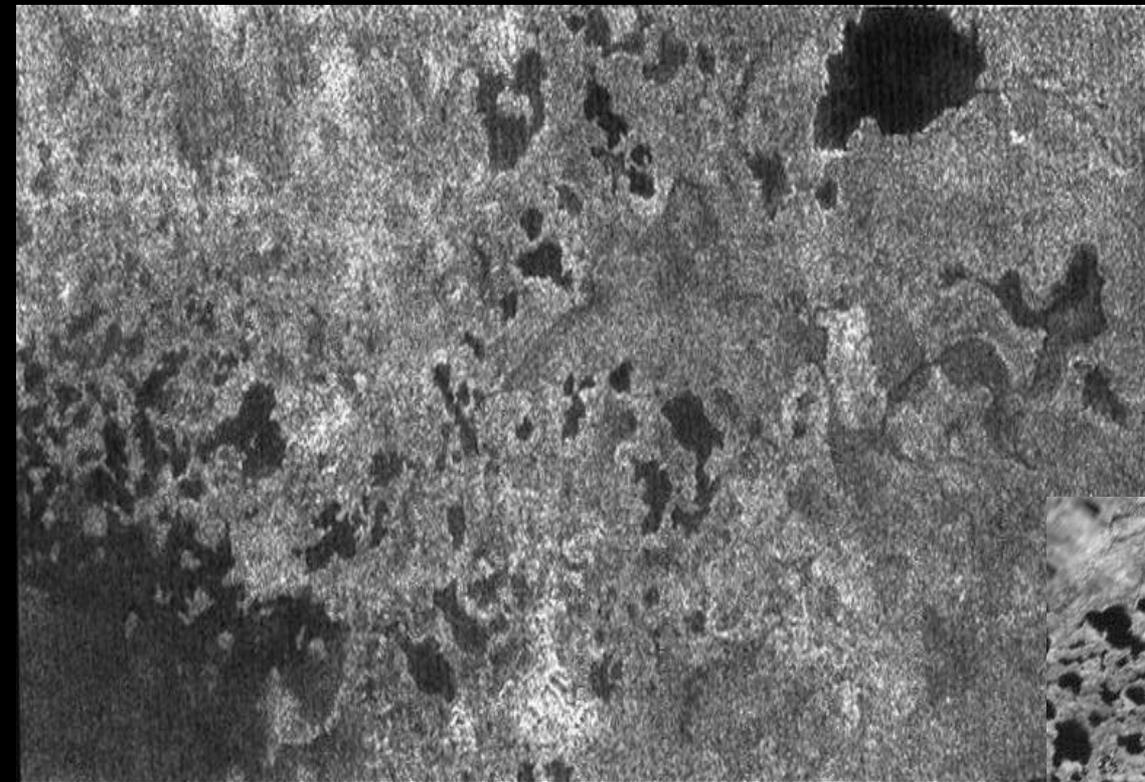
**Mais le sable, ce serait du sable de glace d'H<sub>2</sub>O**



275 km

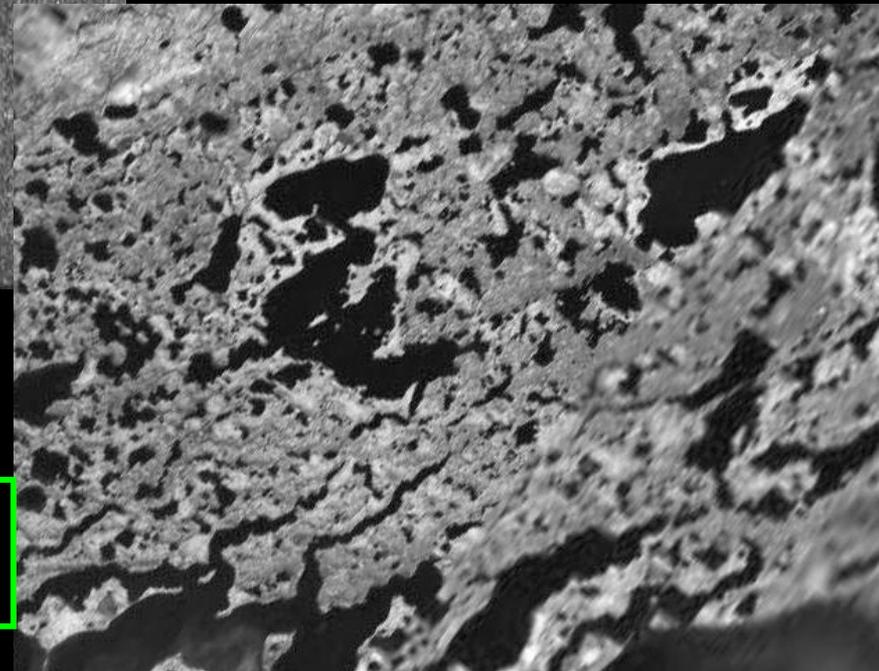
**Entre les champs de dunes (de sable de glace),  
des montagnes (de glace)**

**Et le survol radar de juillet 2006, au dessus du Pôle Nord plongé dans la nuit polaire, montre de très probables lacs, lacs de méthane liquide à - 190°C, dont les vagues déferlent sur la côte rocheuse faite de glace d'eau**

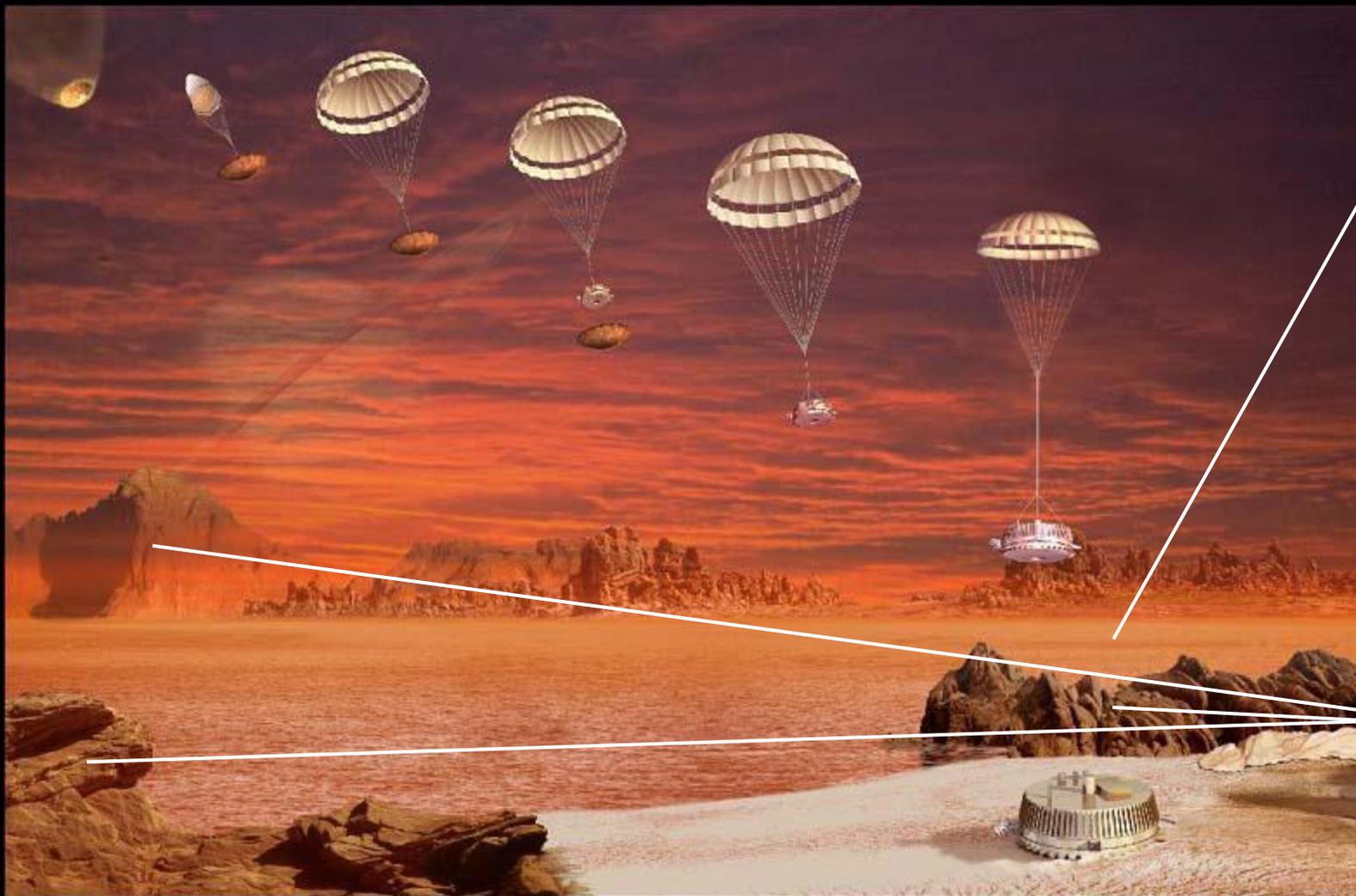


**Des « lacs » près du Pôle Nord de Titan**

100 km



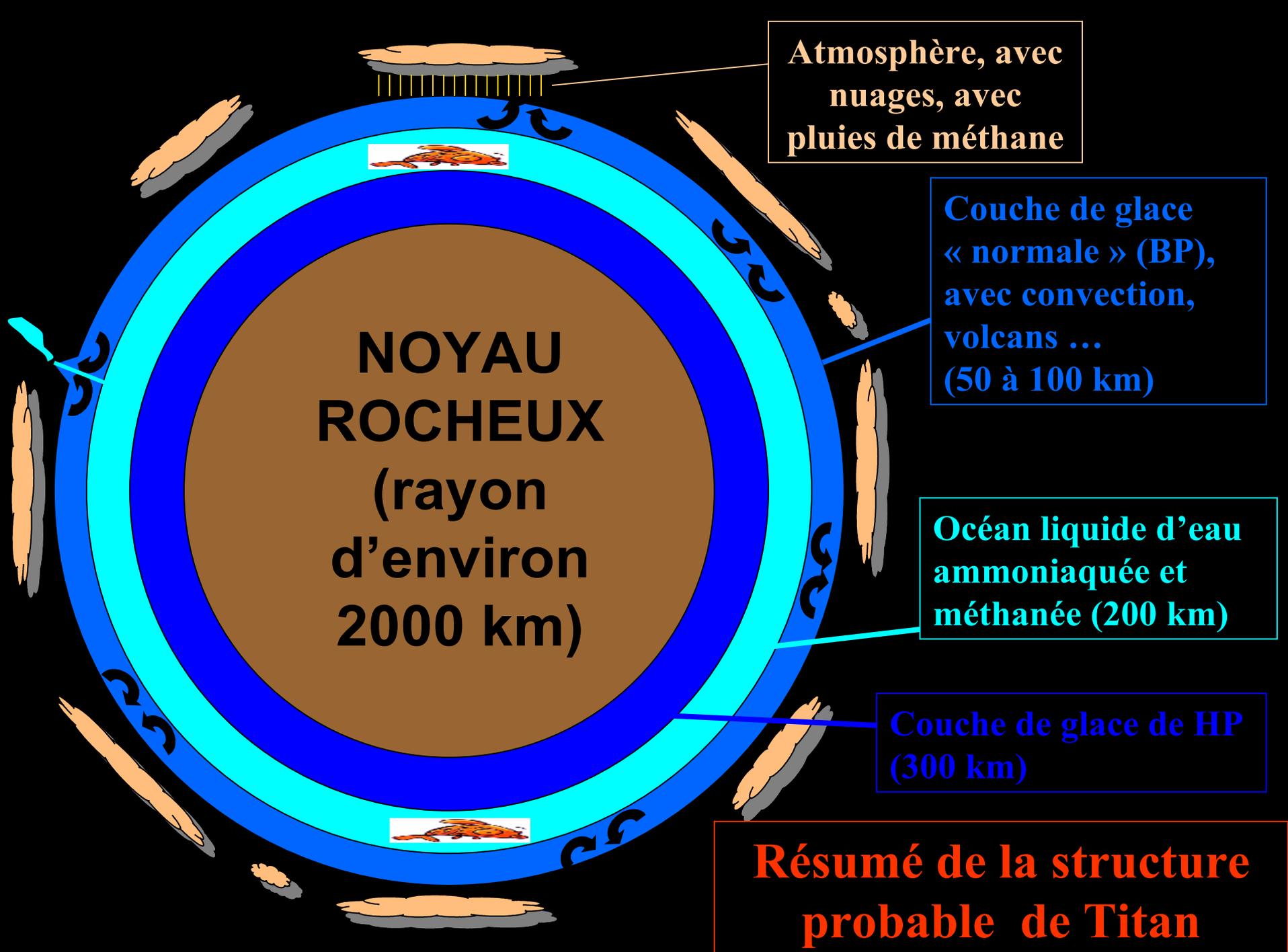
**Des lacs au nord de l'Alaska**



Mer de méthane liquide

Rochers et montagnes de glace d'eau

**Dessin d'artiste montrant ce que pourrait être un paysage près du pôle nord de Titan**



**Atmosphère, avec nuages, avec pluies de méthane**

**Couche de glace « normale » (BP), avec convection, volcans ... (50 à 100 km)**

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

**Couche de glace de HP (300 km)**

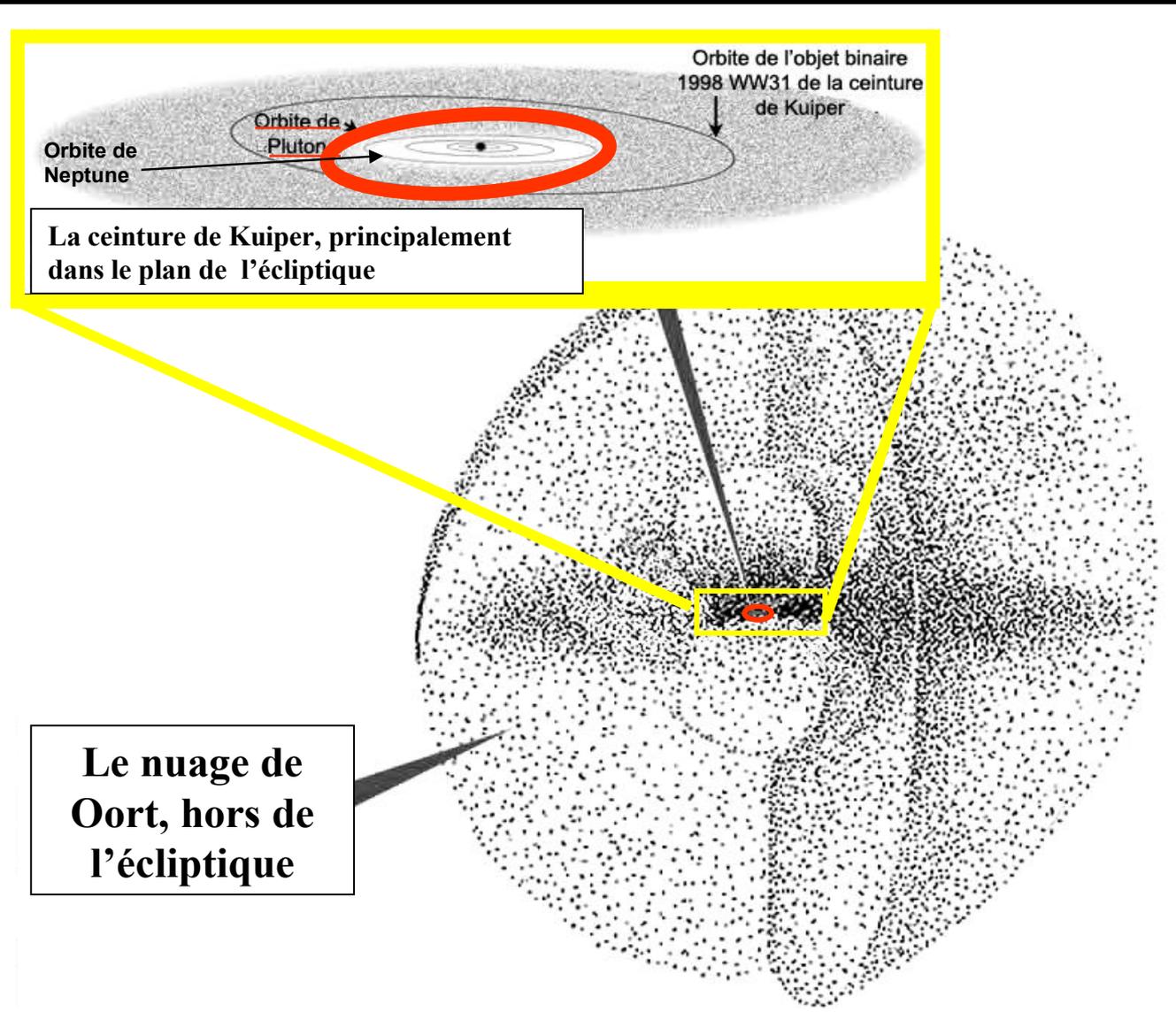
**NOYAU ROCHEUX (rayon d'environ 2000 km)**

**Résumé de la structure probable de Titan**



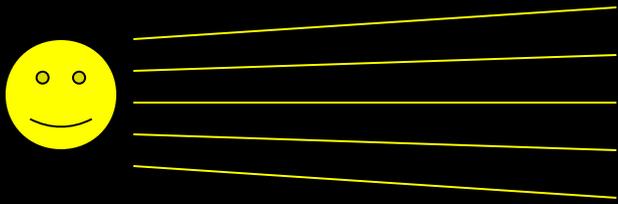
**Et au-delà des  
planètes  
géantes, la  
Ceinture de  
Kuiper et le  
Nuage de Oort,  
avec les  
comètes qui en  
viennent et qui  
parfois nous  
visitent.**

# Les comètes viennent parfois de la Ceinture de Kuiper, le plus souvent du Nuage de Oort

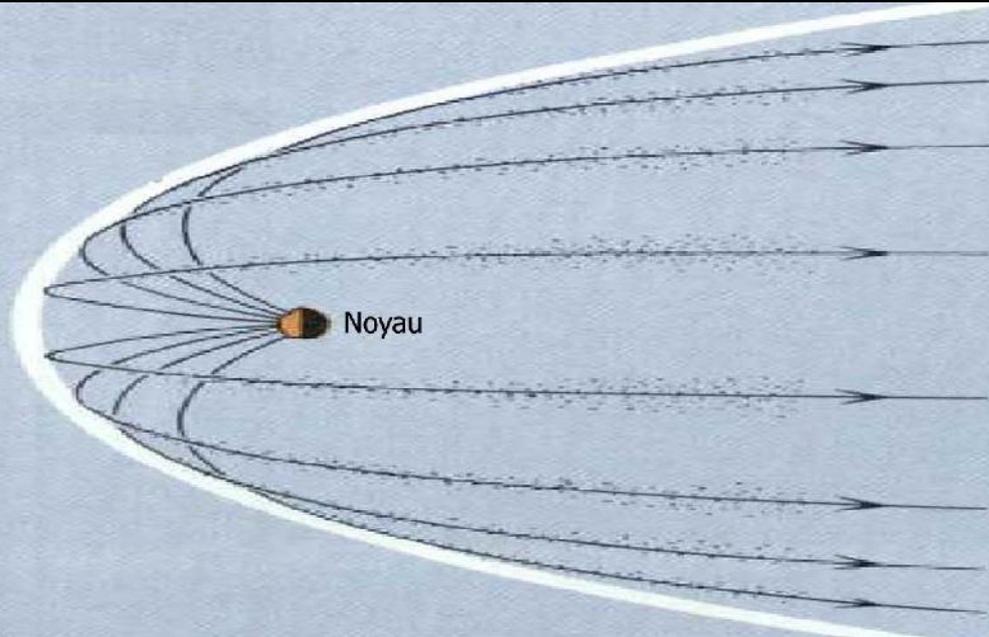
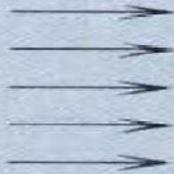


Des perturbations orbitales font que, parfois, certains de ces objets s'approchent du soleil et deviennent des comètes

# 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



Photons et  
vent solaire

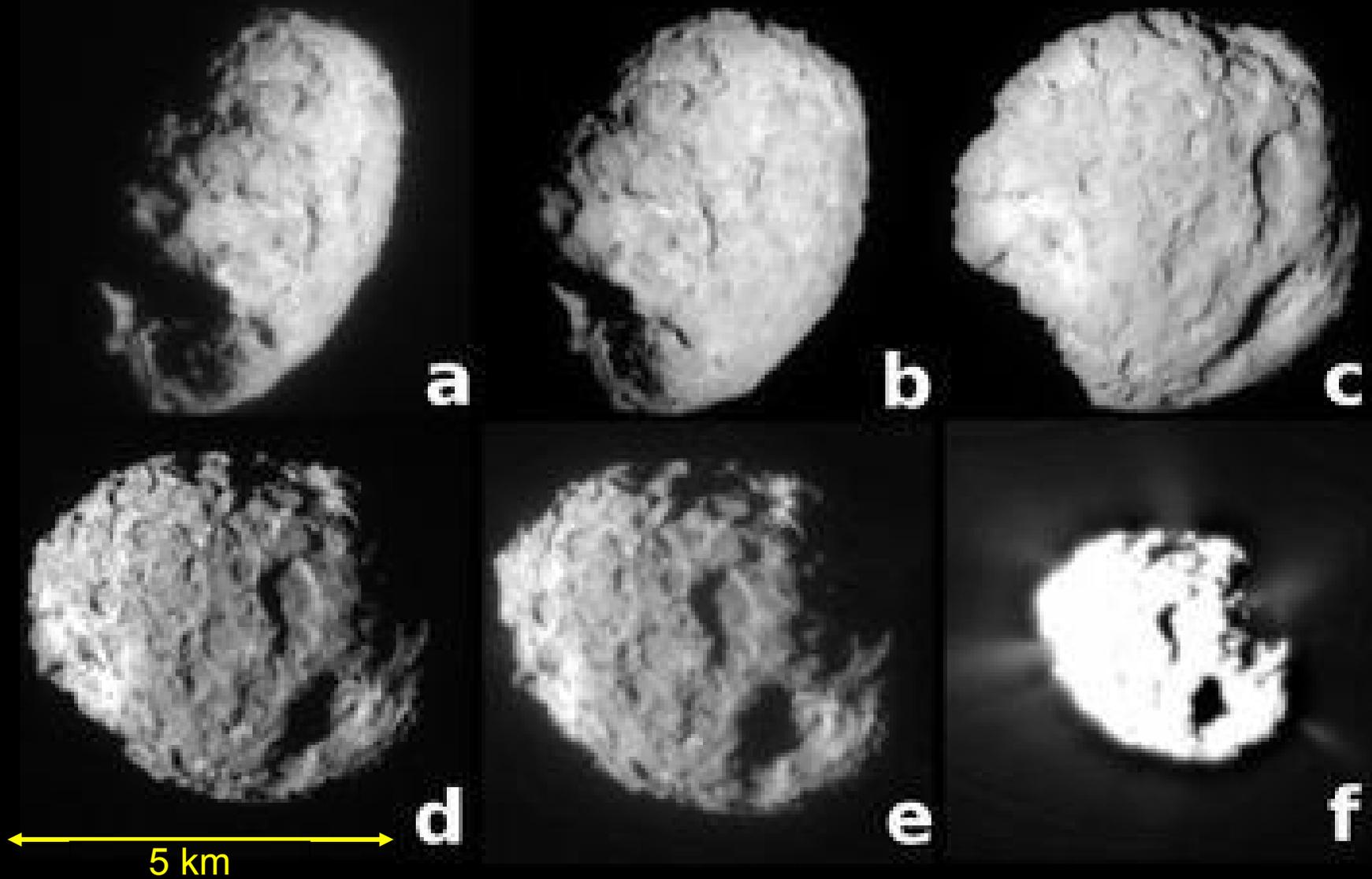


Déviations des  
poussières  
par les photons  
et le vent solaire  
dans la direction  
opposée au soleil  
--> formation de  
la queue

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



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



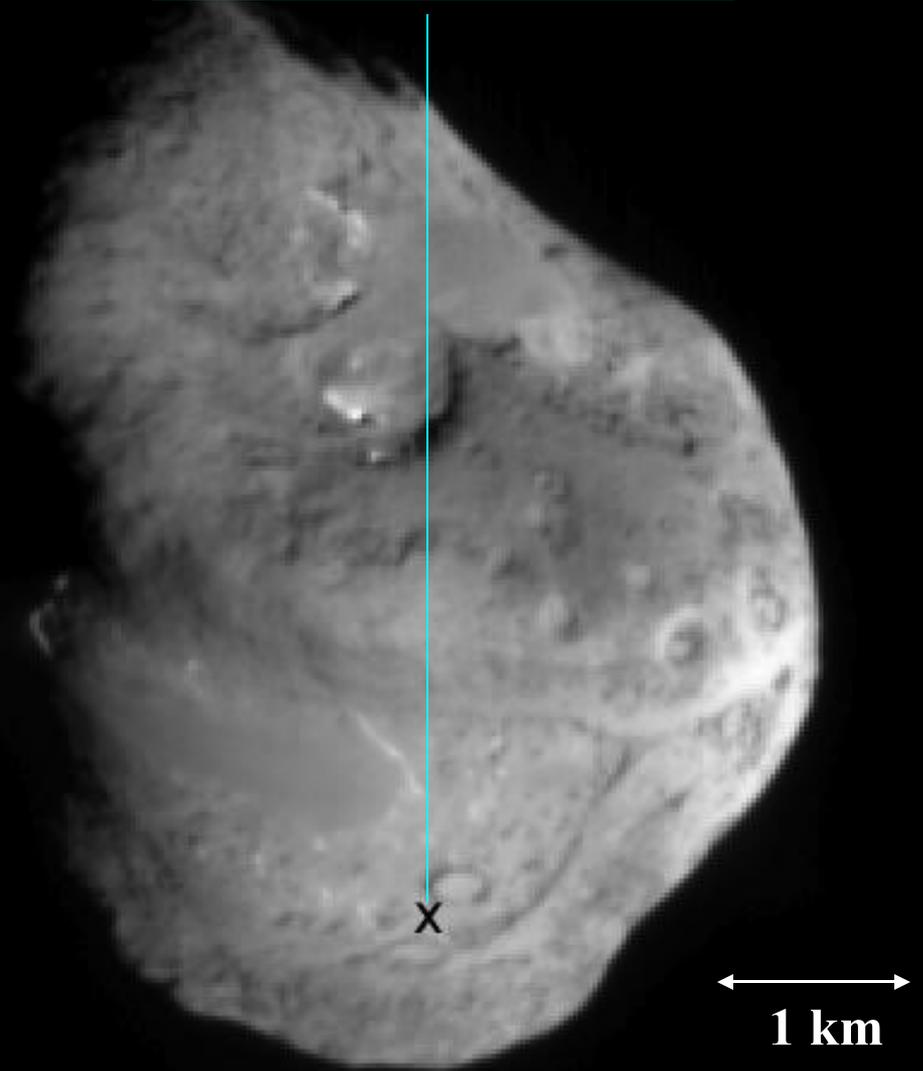
**Voici un noyau cométaire, celui de la comète Wild 2 (2004, Nasa) : un bloc de neige sale !**

**Les bords de Wild 2 sont hérissés de « pinacles »  
(100 m de haut). Cela fait irrésistiblement penser  
aux « pénitents »**

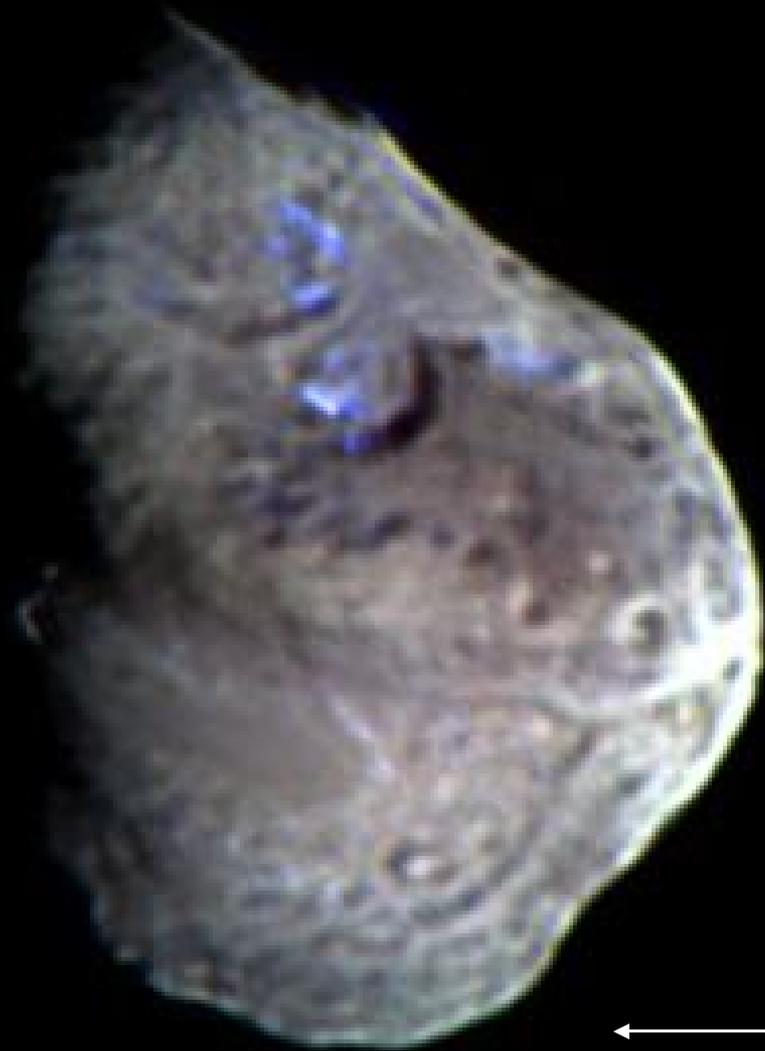


**Le site de l'impact**

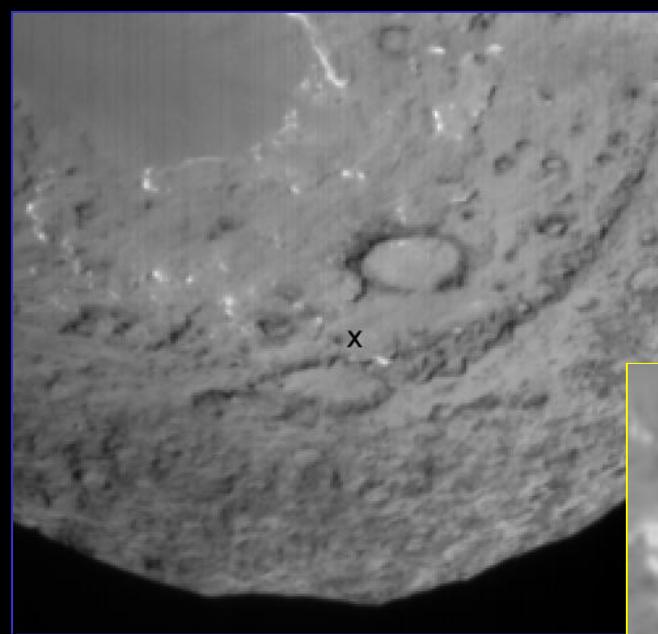
**Et voici le noyau  
de la comète  
Temple 1 (2005,  
Nasa), héroïne  
malgré elle du  
vrai Deep Impact**



**Avant l'impact, de la spectroscopie. En bleu, les surface de « glace vive » d'H<sub>2</sub>O. Ne recouvre qu'un faible % de la surface. En surface de cette comète là (au moins) la glace est minoritaire.**



←→  
1 km

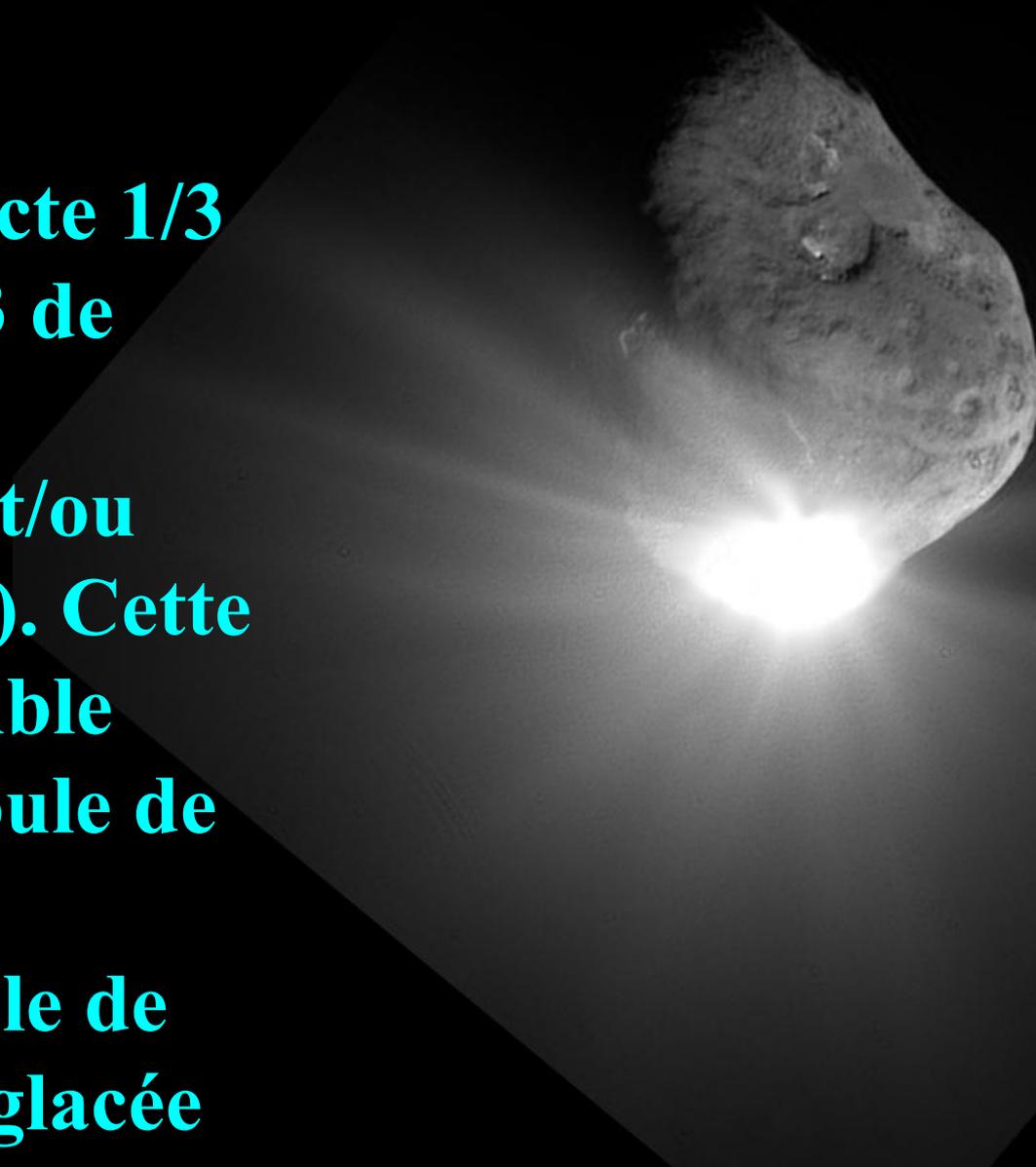


**Un « boulet »  
quitte la sonde  
principale.**

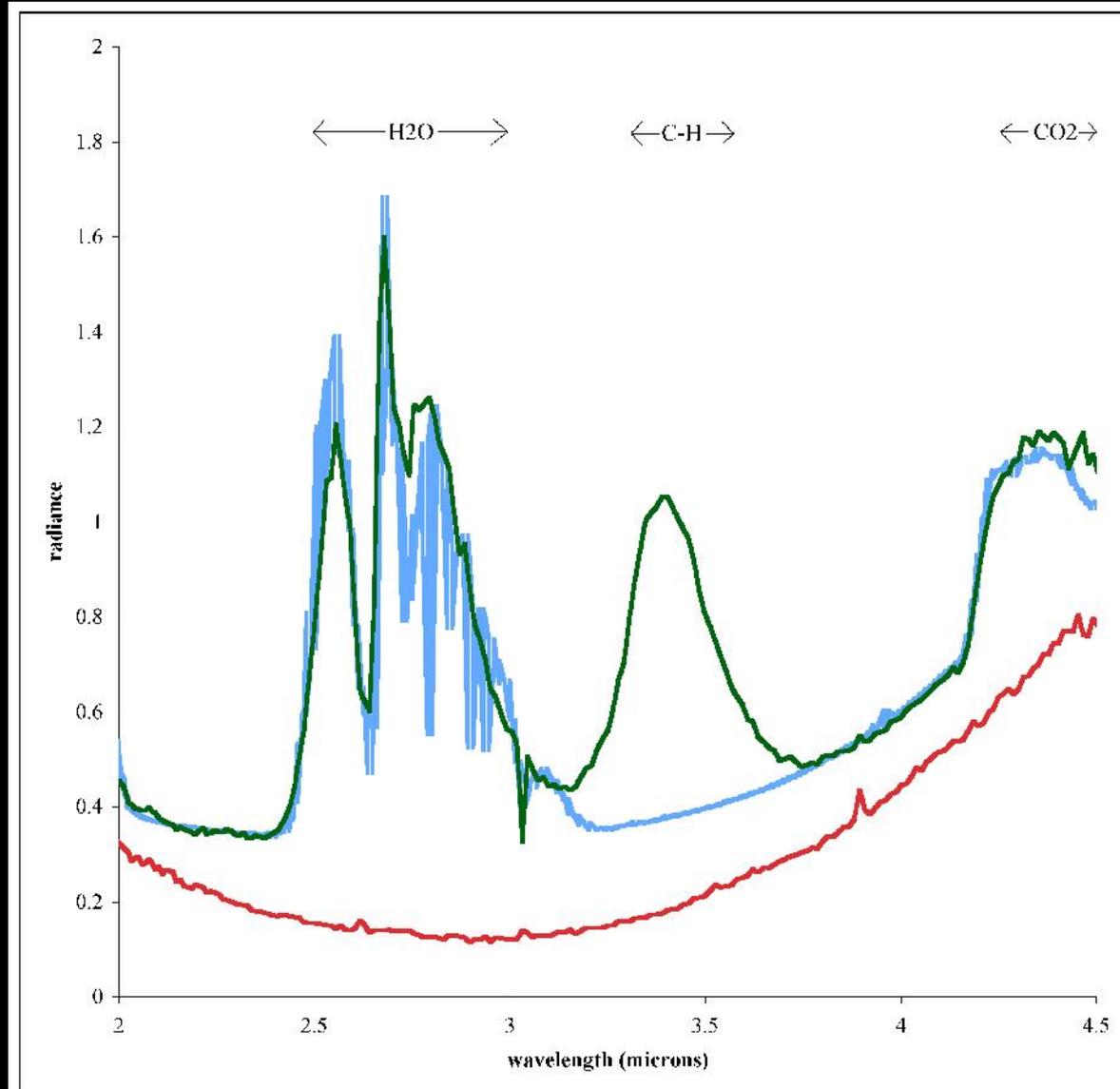
**Il s'approche de ce bloc  
de glaces et autres  
substances.**

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

**Le choc éjecte 1/3  
d'eau et 2/3 de  
poussières  
(silicatées et/ou  
organiques). Cette  
comète semble  
plus une boule de  
glaces sales  
qu'une boule de  
poussières glacée**



# Le spectre IR des « gaz d'échappement » : CO<sub>2</sub>, hydrocarbures, et H<sub>2</sub>O



**139 diapos ! Il est temps de s'arrêter. Et on pourrait continuer à discuter autour d'un verre, forcément composé de 50 à 100% d'eau, surtout si « on a gagné » !**

