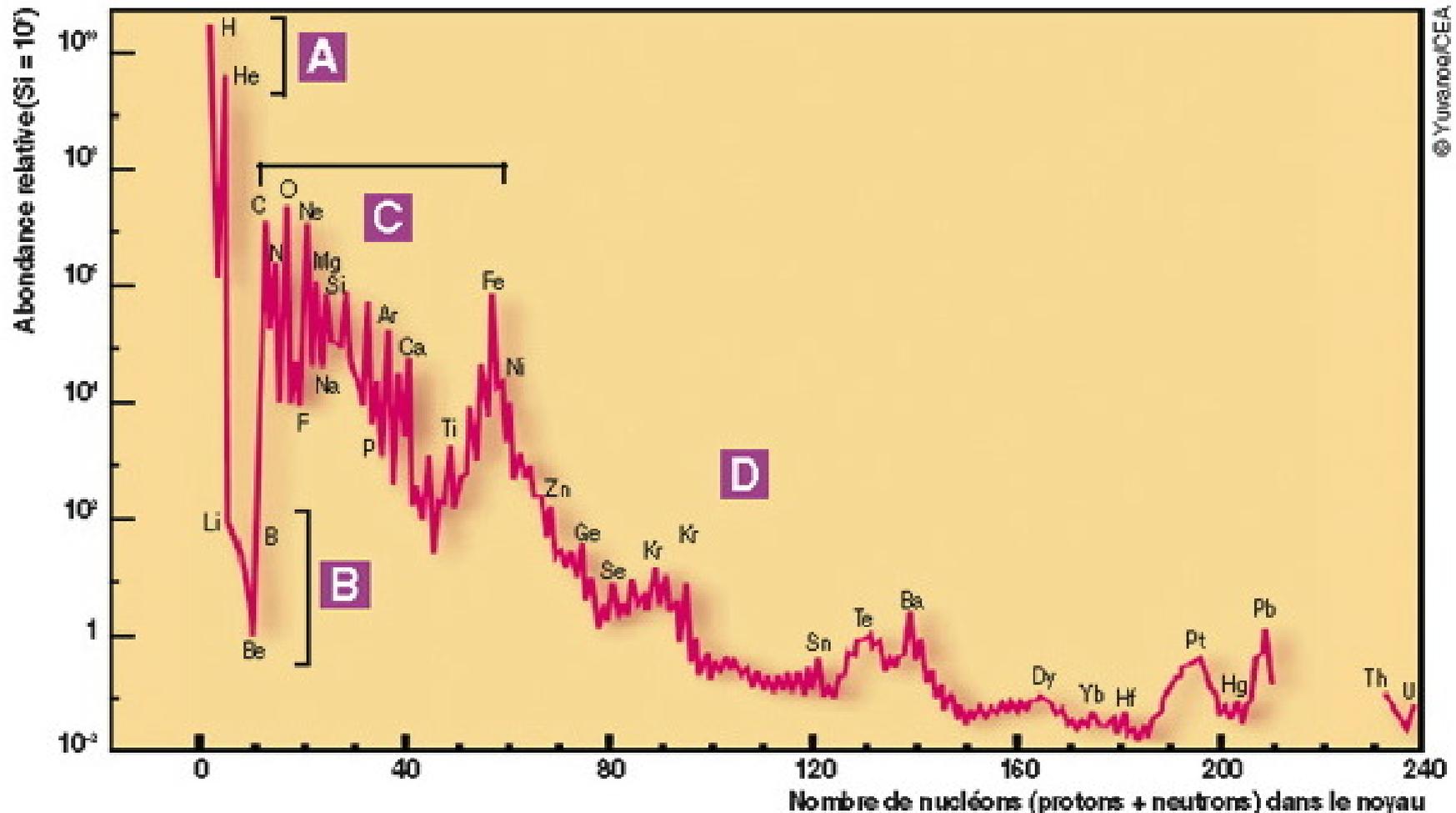


L'eau



# Les éléments les plus abondants dans le système solaire

Table d'abondance des éléments



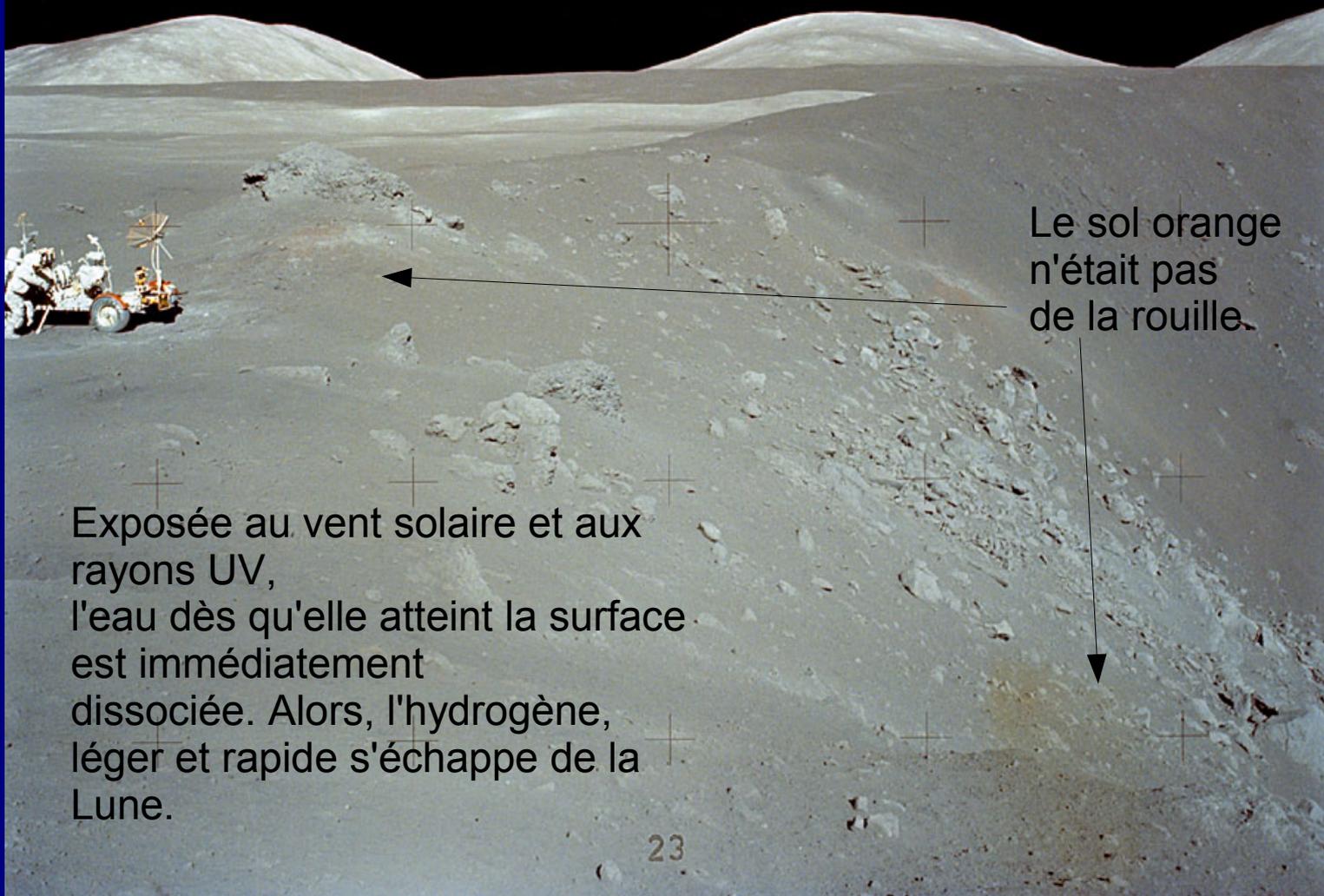
L'hydrogène et l'oxygène sont les éléments (réactifs) les plus abondants. L'eau doit donc être la molécule la plus facile à fabriquer, si les conditions physiques s'y prêtent.

Sur Terre, l'eau signifie « vie »...  
tant qu'elle est liquide.



qu'en est-il sur les autres planètes ?

# Mercure, Lune : pas d'eau...



Le sol orange  
n'était pas  
de la rouille.

Exposée au vent solaire et aux  
rayons UV,  
l'eau dès qu'elle atteint la surface  
est immédiatement  
dissociée. Alors, l'hydrogène,  
léger et rapide s'échappe de la  
Lune.

# Comment perdre de l'eau : La dissociation de l'eau par les UV solaire

Une molécule d'eau (vapeur) monte assez haut pour être exposée aux rayons UV du soleil.



Le gaz est assez chaud : l'agitation thermique des atomes est assez grande.

La vitesse d'agitation thermique est grande pour les atomes plus légers.

L'atome le plus léger de tous est l'hydrogène.

Sa vitesse d'agitation est comparable à la vitesse d'échappement gravitationnel : la planète perd son hydrogène.

On ne peut plus former d'eau.

L'oxygène peut se combiner à d'autres constituants, dans l'atmosphère ou au sol. Du CO<sub>2</sub> par exemple.

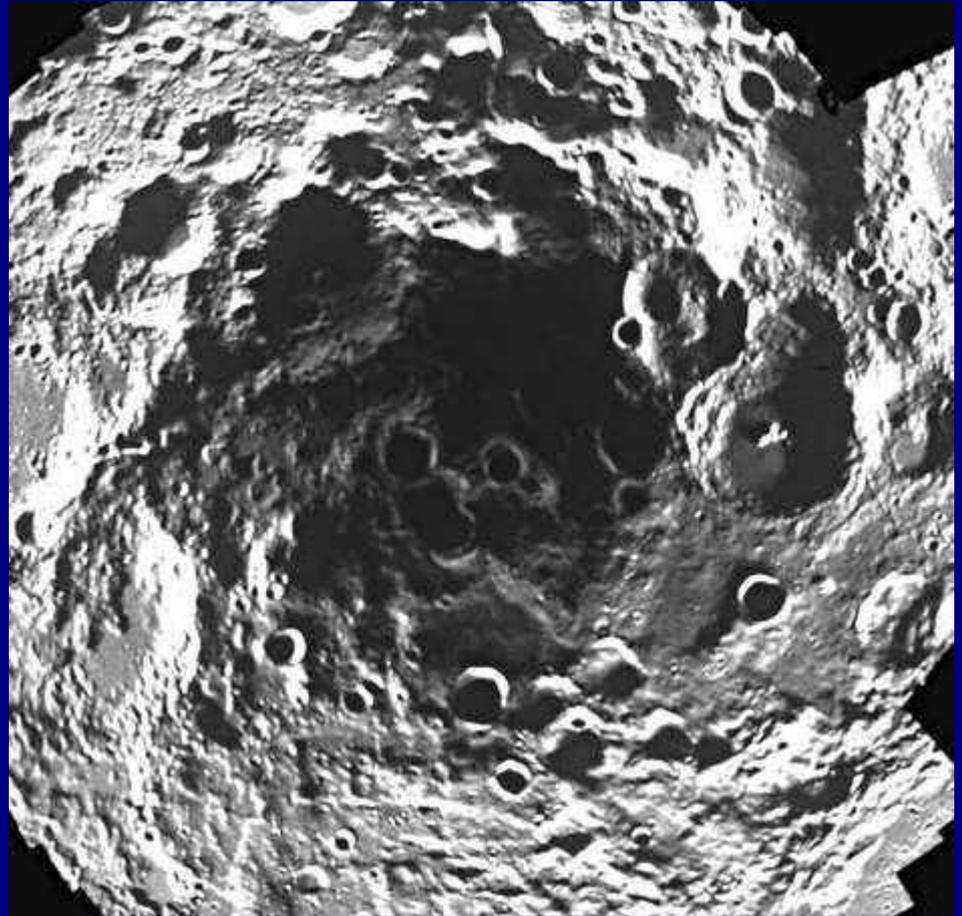
Plus on est **près du Soleil** : plus il y a d'UV, et plus il fait chaud, moins il y a d'eau. Plus la **planète est petite**, moins il y a d'eau.

Cas de **Mercure, Vénus, la Lune**.

# ...à moins de chercher à l'ombre

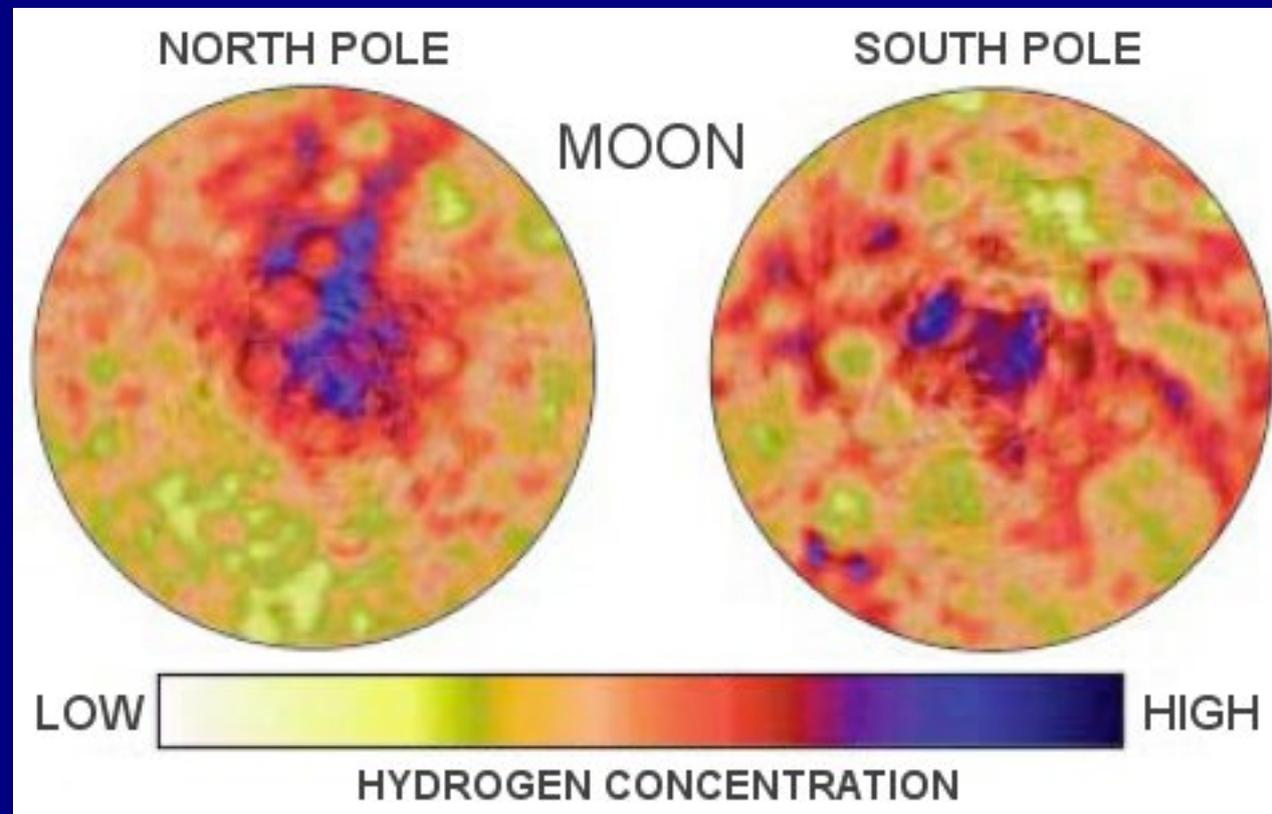
Le satellite Clémentine a cherché de l'eau (reflexion d'un faisceau radar) dans les cratères près des pôles : certains sont toujours à l'ombre, depuis des milliards d'années.

De l'eau (glace) y a été trouvée... mais pas de détection chimique. La détection était fondée sur la texture du sol (la glace ne réfléchit pas les ondes radio comme le régolithe). [1994]



# chercher à l'ombre sur la Lune

Recherche par Lunar Prospector :  
détecte hydrogène avec  
spectromètre à neutrons. H de  
H<sub>2</sub>O ?  
Crash de LP sur la Lune pour  
soulever de la matière et  
observer depuis la Terre : pas vu  
d'eau. [1998]



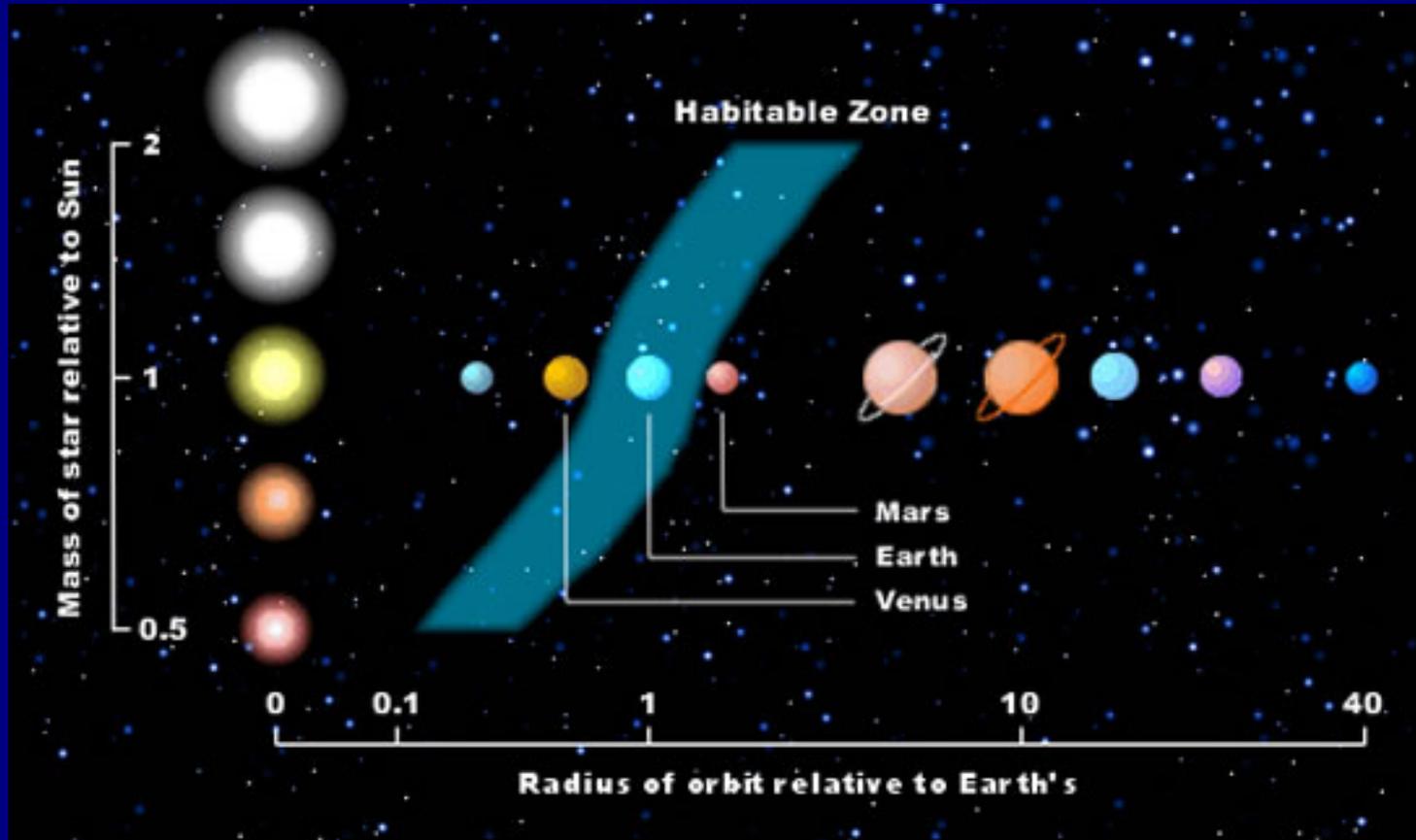
# Vénus

Aucune trace d'eau dans la basse atmosphère.

De l'eau en altitude, qui se combine avec le dioxyde de soufre pour faire de l'acide sulfurique : pluies acides.

(Comme les pluies acides sur Terre mais en pire, car il n'y a que de l'acide qui tombe.)

# Terre, de l'eau liquide.



Une propriété intéressante : les glaçons flottent.



# Une propriété intéressante : les glaçons flottent.

Pour les autres éléments, la forme solide est plus dense : les glaçons coulent.

Si les glaçons d'eau coulaient...

si l'air se refroidit, la surface des océans (exposée à ce froid) gèle. Il se forme des glaçons qui coulent. Sous l'océan, il fait froid aussi et les glaçons y restent. Comme les glaçons ont coulé, de l'eau liquide se retrouve en surface, gèle etc. La mer se remplit de glace, les océans se solidifient.

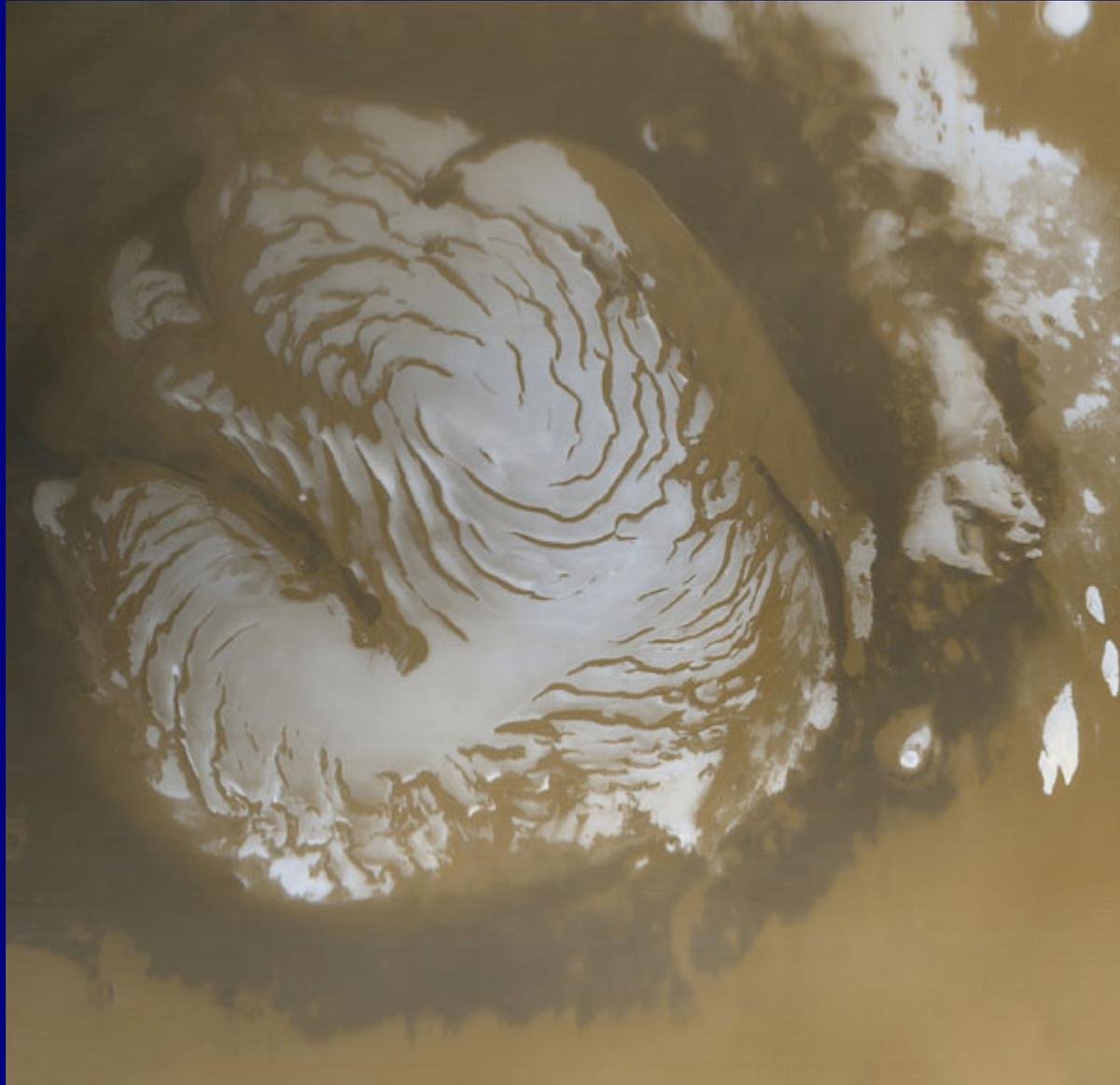
Puisque les glaçons flottent :

Lorsqu'il gèle au fond des océans, les glaçons remontent. Là où il ne fait pas froid (zones tropicales par exemple) ils fondent. Ailleurs (calottes polaires) ils flottent, prêt à fondre (en partie) lorsqu'il y a un peu de soleil.

Les océans sont liquides, éventuellement recouverts de glace.

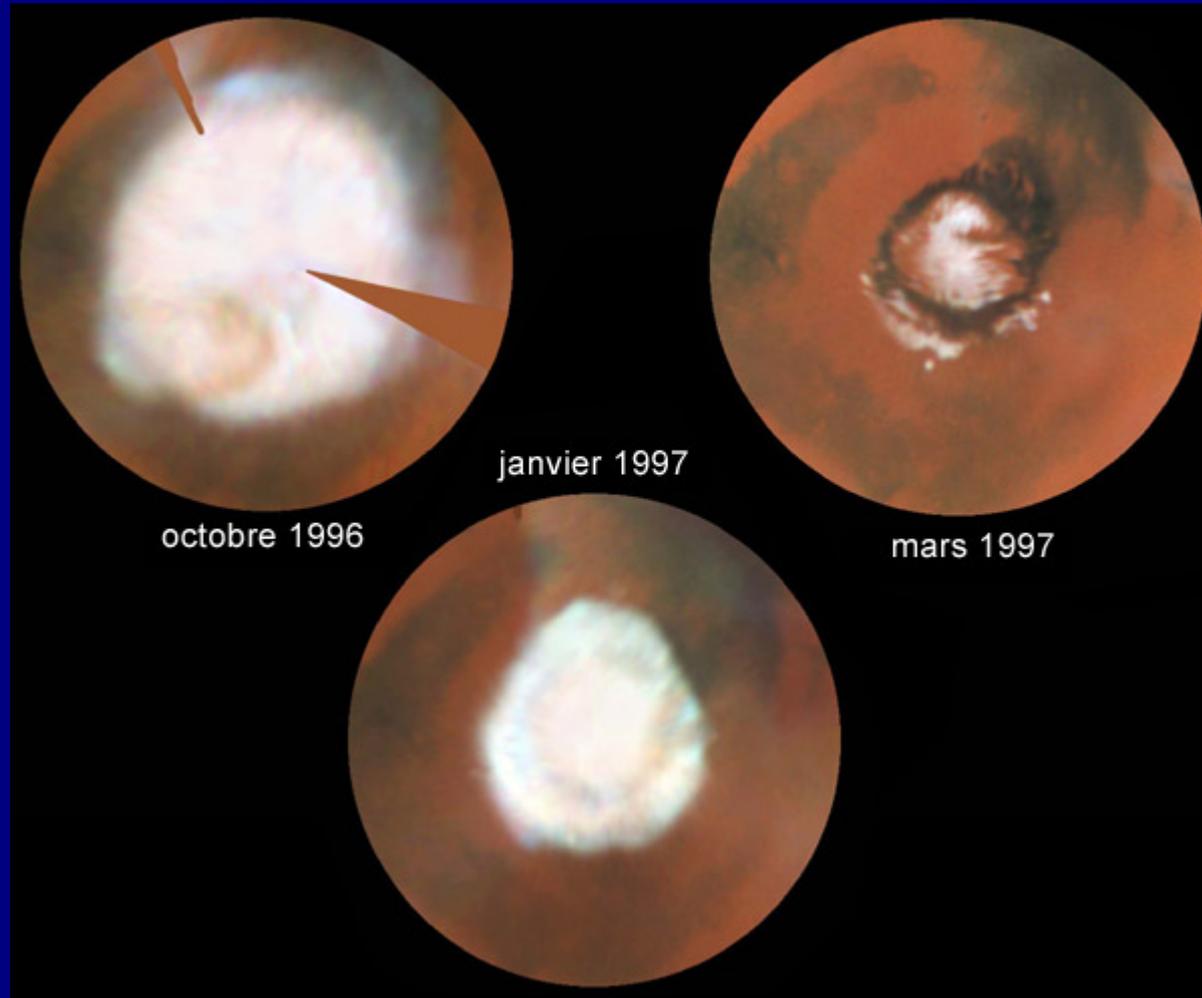
Cette capacité de glaçons d'eau de flotter est favorable à la vie, puisque celle-ci a besoin d'eau liquide.

# Mars, de la glace d'eau



Les calottes (ici nord) renferment de la glace d'eau et de la glace de CO<sub>2</sub> (saisonnier)

# Mars, cycle condensation-évaporation



La quantité d'eau estimée à la surface de Mars pourrait la recouvrir d'une épaisseur de 15 à 20 mètres. Pour la Terre : 2700 mètres.

# Mars, cycle condensation-évaporation



Une falaise de 700 m de haut, avec des pentes jusqu'à 60 degrés, près du pôle nord de Mars, (latitude 84°) au début du printemps.

La glace est supposée contenir une forte proportion d'eau. (Quelle proportion de glace de CO<sub>2</sub> ?) La partie qui chute contiendrait plus de glace que de poussière.

[HiRise camera, Mars Reconnaissance Orbiter, NASA, février 2008]

# Plus loin plus du Soleil, l'eau abonde.

Satellites de Saturne  
et de Jupiter (sauf Io) :

densité < 2

Mélange de glace et de roches ?

**TABLE 4.1**

Densities of Some Common Planet-Forming Materials (in g/cm<sup>3</sup>)

Water ice	0.94
Water liquid	1.0
Carbonaceous chondrite	2.5
Plagioclase	2.7
Pyroxene	3.3
Ordinary chondrite	3.5
Olivine	3.3
Iron sulfide	4.8
Iron	7.9

**TABLE 4.2**

Compressed and Uncompressed Densities of the Terrestrial Planets (in g/cm<sup>3</sup>)

<i>Planet</i>	$\rho_{comp}$	$\rho_{uncomp}$
Mercury	5.43	5.3
Venus	5.24	4.0
Earth	5.515	4.1
Moon	3.36	3.3
Mars	3.94	3.7

# Plus loin du Soleil, l'eau abonde.

Satellites de Saturne  
et de Jupiter (sauf Io) :

densité < 2

Mélange de glace et de roches ?

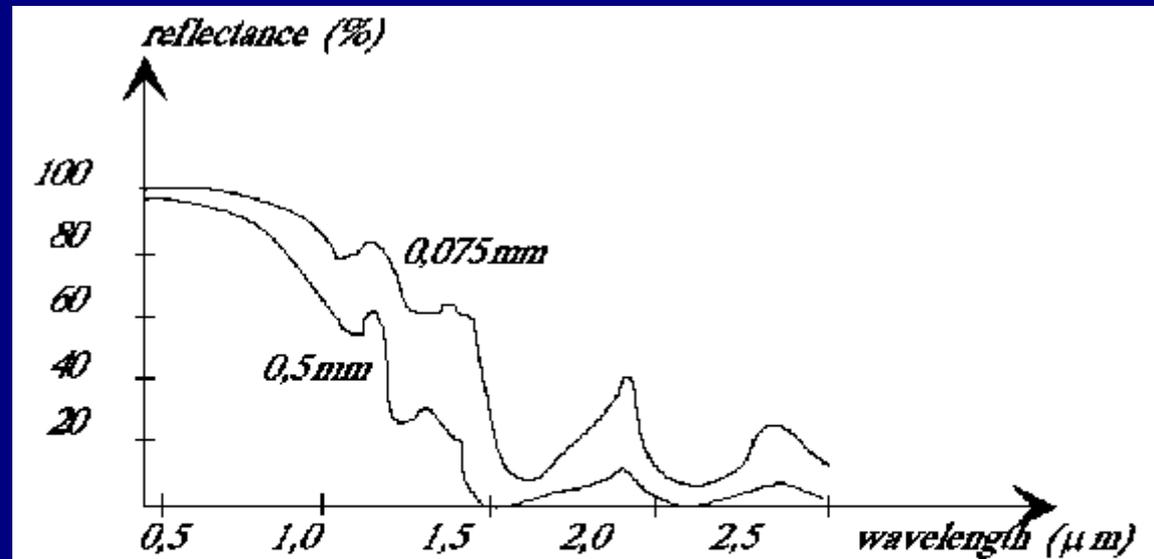
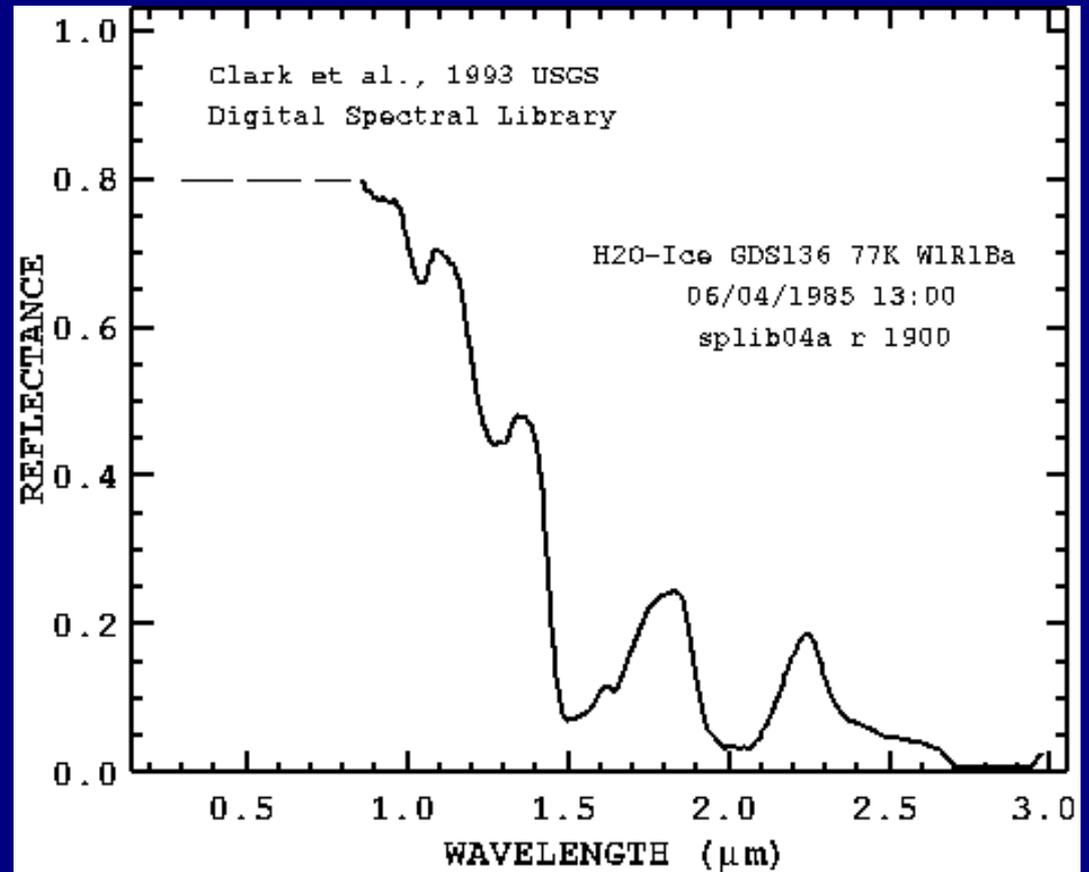


Figure 28. Reflectance spectrum of snow composed of crystals 0.075 mm in diameter (upper curve) compared to that of snow composed of crystals 0.5 mm in diameter (lower curve), according

Reflectance (en infrarouges) de la glace d'eau  
(en fonction de la taille des grains).

# Plus loin du Soleil, l'eau abonde.

Que donne l'analyse de la surface ?  
Montre-t-elle de l'eau ?



Autre exemple de reflectance  
(en infrarouges) de la glace d'eau.

# Plus loin du Soleil, l'eau abonde.

Que donne l'analyse de la surface ?  
Montre-t-elle de l'eau ?

Oui pour Europe, Ganymède, Callisto.

Les températures de surfaces sont de l'ordre de 100 K.

Pas pour Io (mais sa densité est plus grande). Le spectre de Io est analogue à celui de la glace de dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$ .

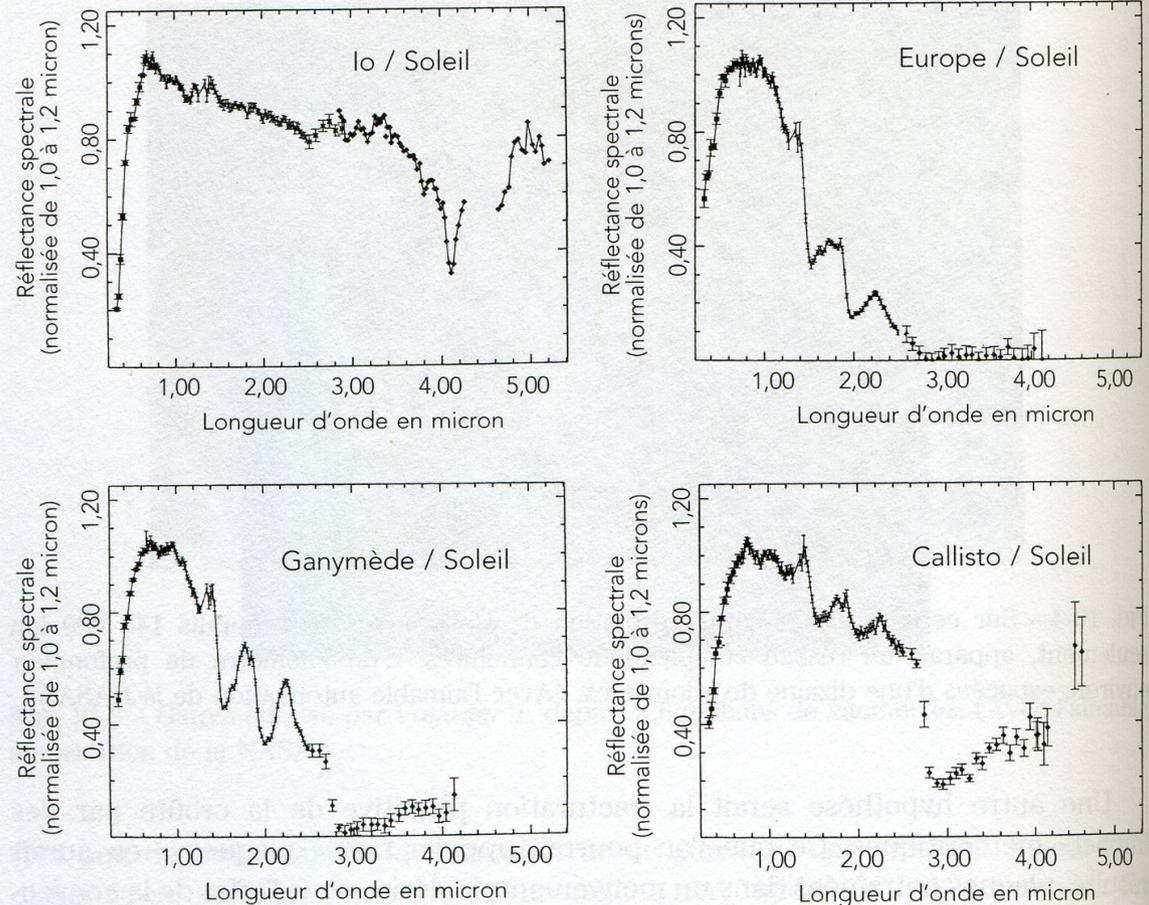


FIG. 10-5 – Le spectre composite des quatre satellites galiéliens de 0,35 à 5  $\mu\text{m}$ . On remarquera la signature due à la glace d'eau sur Europe, Ganymède et Callisto, tandis que le spectre d'Io montre la signature de la glace  $\text{SO}_2$ . (D'après T. Sill and R. N. Clark, « Satellites of Jupiter », D. Morrisson Éd., University of Arizona Press, 1982.)

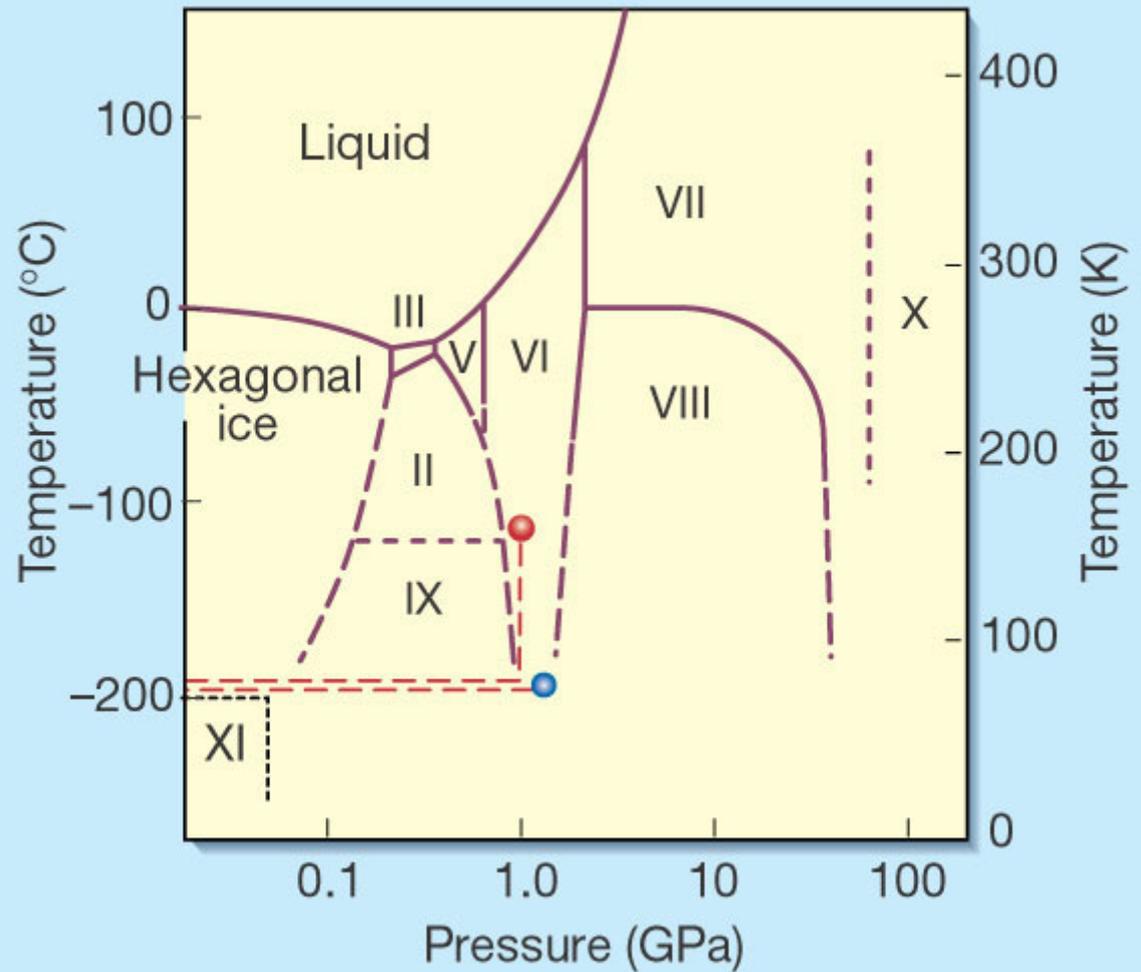
Reflectance (en infrarouges) de la glace d'eau  
(en fonction de la taille des grains). [CNES]

# Il existe plusieurs sortes de glace d'eau.

La glace à laquelle nous sommes habitués est la glace I. Les autres se rencontrent sous de très fortes pressions.

Ici l'échelle est en GPa. Au centre de la Terre,  $P=3,7$  GPa.

A la surface des satellites, la glace est de type I. A l'intérieur, on peut rencontrer d'autres type, suivant les pressions qu'il est possible d'y atteindre.



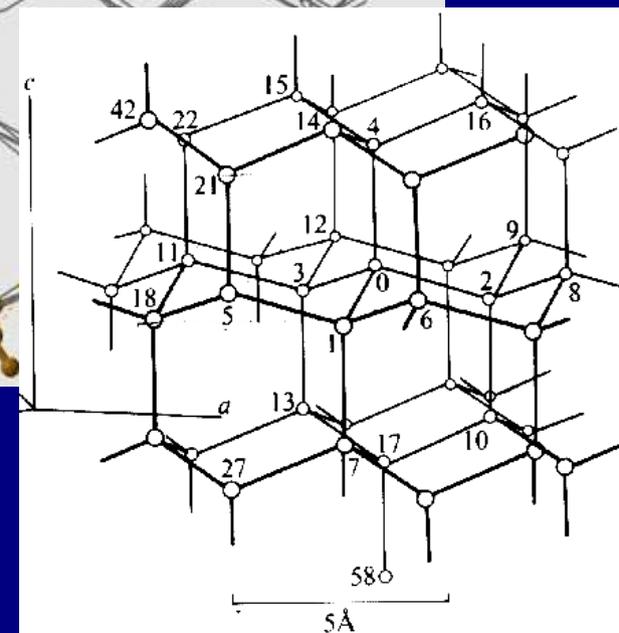
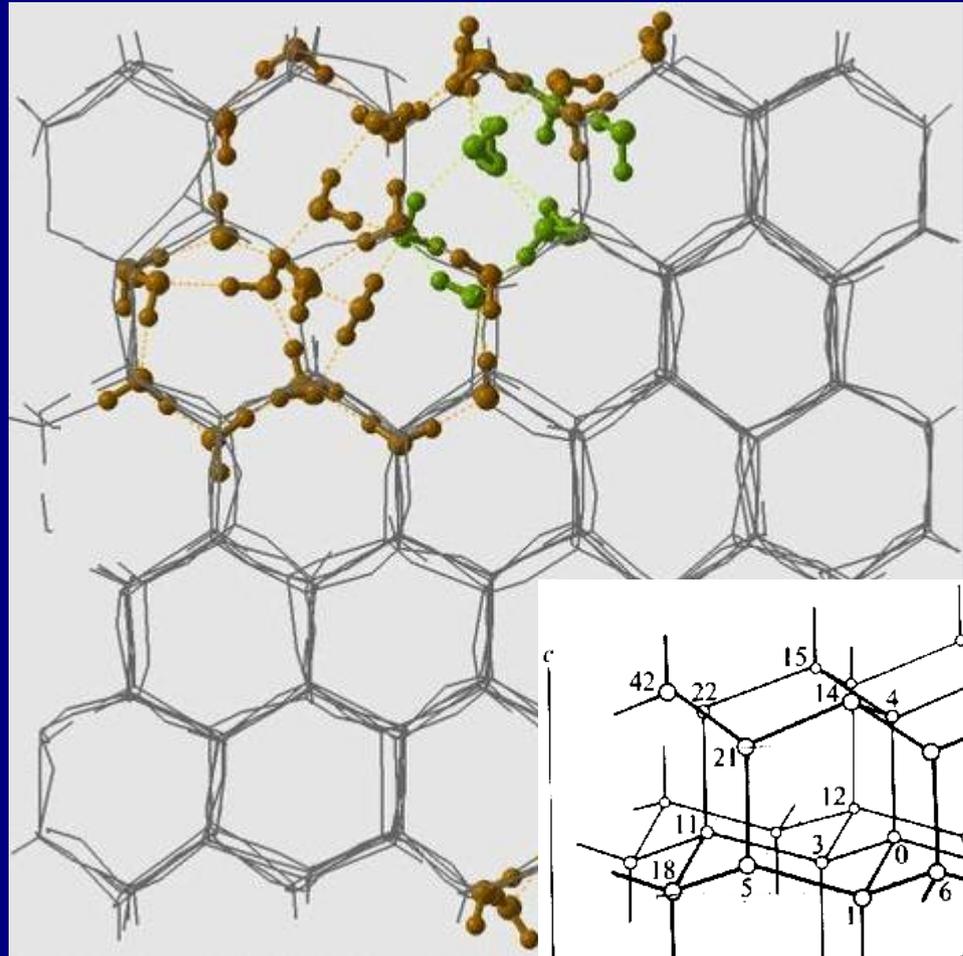
# Il existe plusieurs sortes de glace d'eau.

La glace à laquelle nous sommes habitués est la glace I. Les autres se rencontrent sous de très fortes pressions.

La glace I, de structure hexagonale, est moins dense que l'eau liquide.

La glace I flotte.

(Comme on l'a vu, c'est important pour le climat de la Terre.)



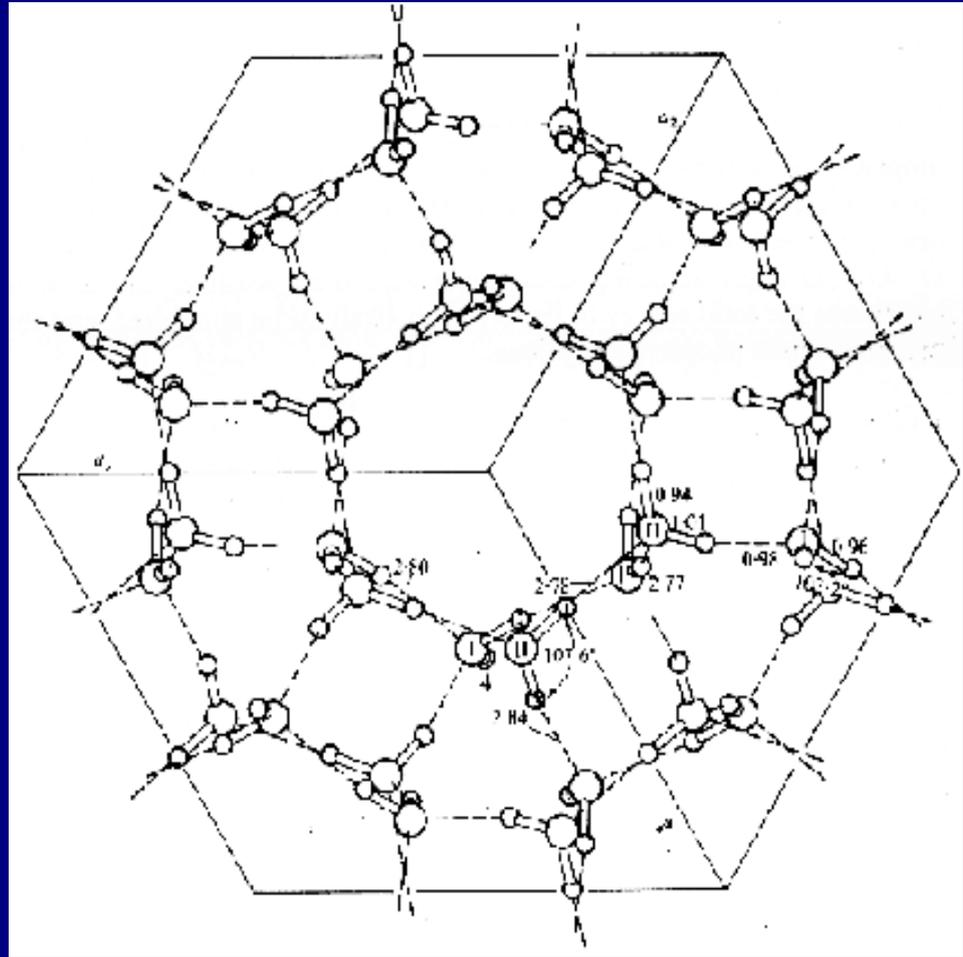
# Il existe plusieurs sortes de glace d'eau.

La glace à laquelle nous sommes habitués est la glace I. Les autres se rencontrent sous de très fortes pressions.

A l'intérieur des satellites de glace, on peut rencontrer de la glace II. Les molécules s'y arrangent différemment pour constituer un réseau. Celui-ci résiste à des compressions plus fortes.

La glace II est plus dense que l'eau liquide : 1,2.

En cristallographie, sa structure est dite orthorhombique.



# La glace des satellites de Jupiter et Saturne

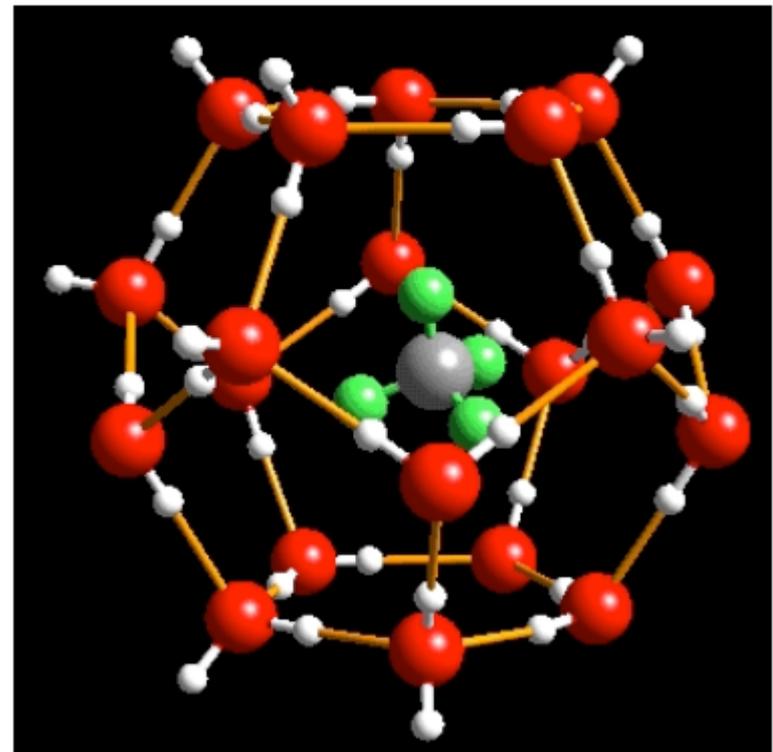
La température de surface est de l'ordre de 100 K.

Les glaces ne sont pas pures.

Un mélange de glace avec des roches, ou avec d'autres composants : ammoniac, azote, méthane CH<sub>4</sub>, silice SO<sub>2</sub>, sel.

Les propriétés changent : point de fusion, structure cristalline, clathrates, saumure...

CH<sub>4</sub> CLATHRATE HYDRATES



Dans les clathrates, des molécules, moins abondantes que l'eau sont piégées dans une structure cristalline comme dans une cage.

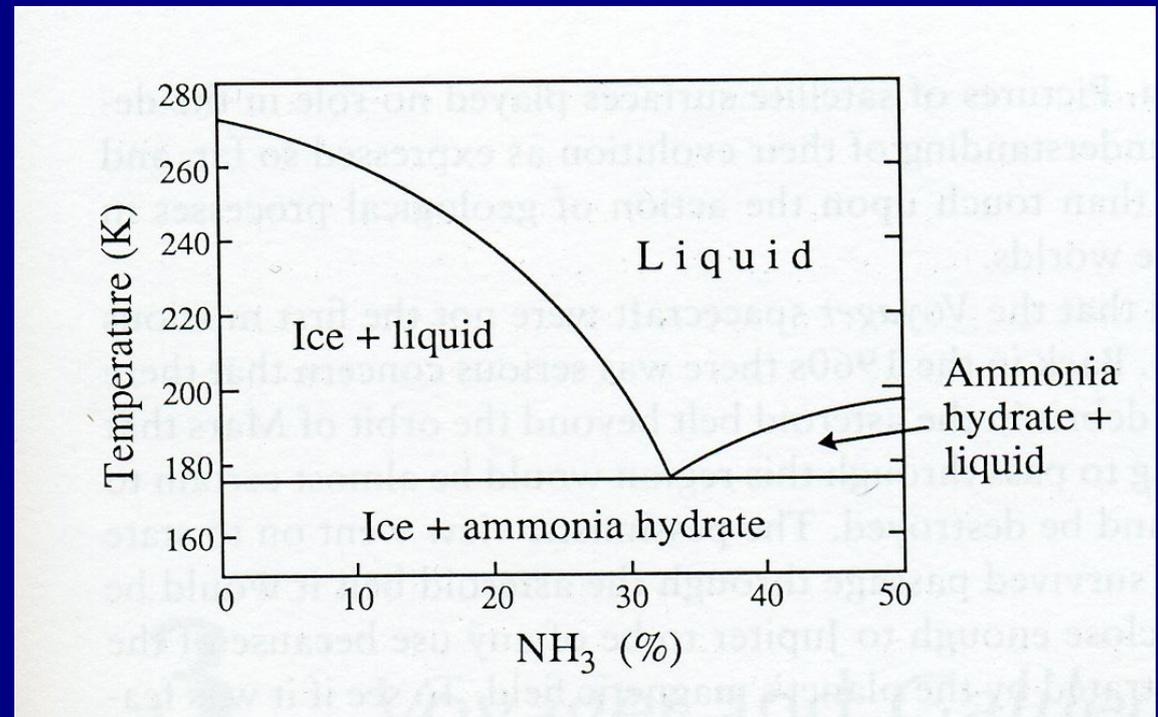
# La glace des satellites de Jupiter et Saturne

La température de surface est de l'ordre de 100 K.

Les glaces ne sont pas pures.

Un mélange de glace avec des roches, ou avec d'autres composants : ammoniac, azote, méthane CH<sub>4</sub>, silice SO<sub>2</sub>, sel.

Les propriétés changent : point de fusion, structure cristalline, clathrates, saumure...



A pression « ordinaire », points de fusion des mélanges de glace et d'ammoniac.

# La glace est-elle aussi dure que la pierre ?

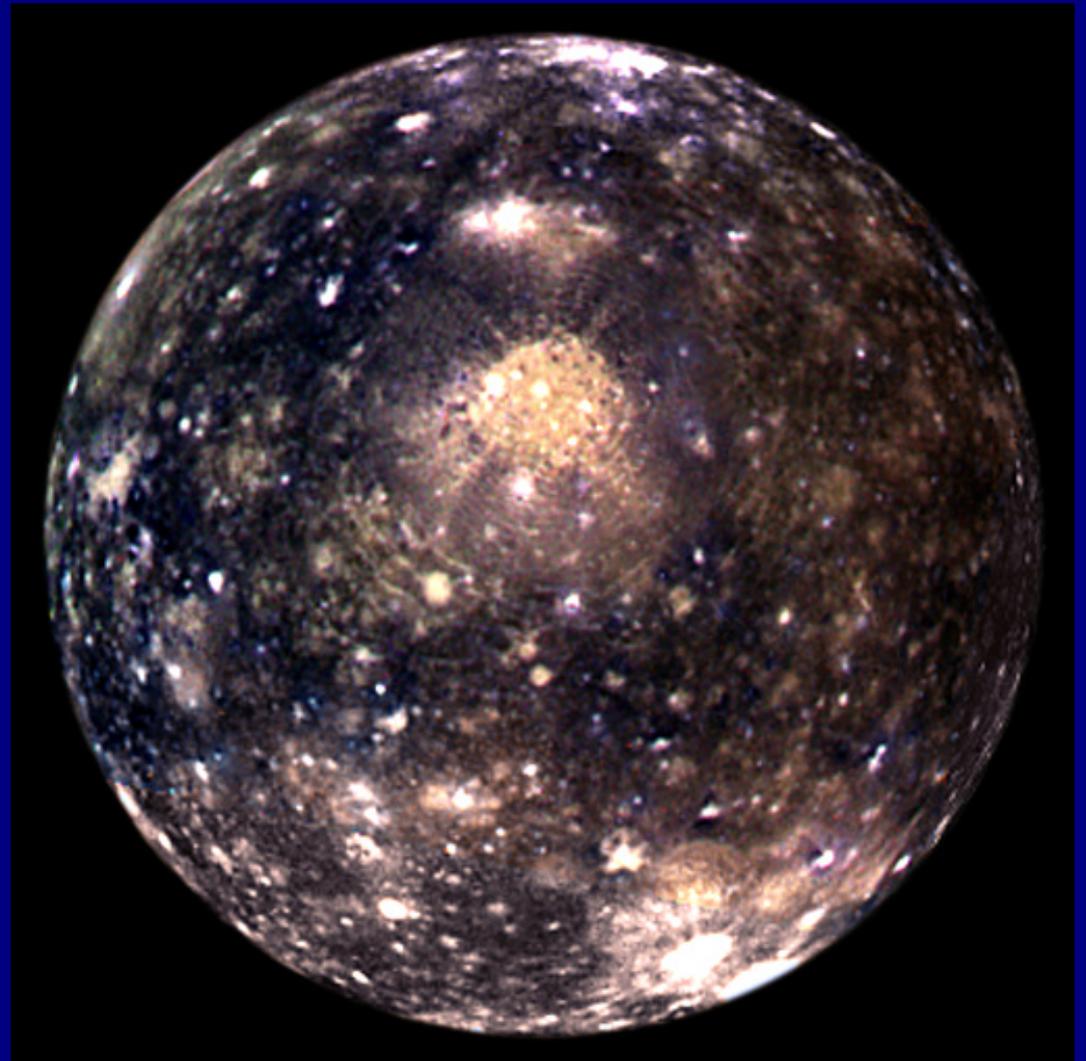
Le satellite Callisto est couvert de glace.  
La température de surface est de l'ordre  
de 100K.

Il est également couvert de cratère, et  
a plusieurs bassins... comme la lune, qui  
est pierreuse (basaltes, roches diverses).

La surface de Callisto est sombre, et  
certains cratères sont clairs.  
Cela suggère suggère une surface  
ancienne : « salie ».

Mais il y a aussi des cratères sombres...

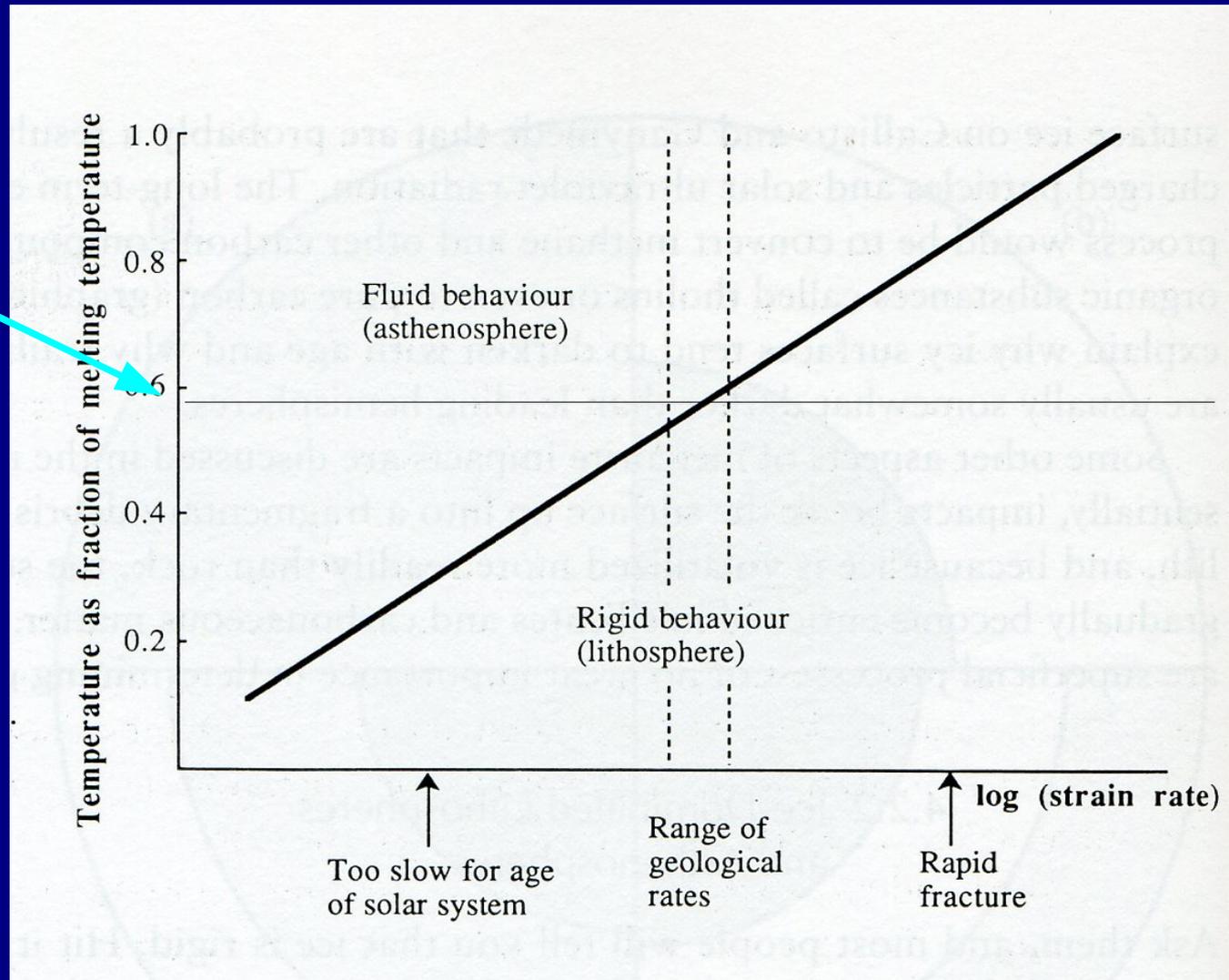
Seraient-ils très anciens ?



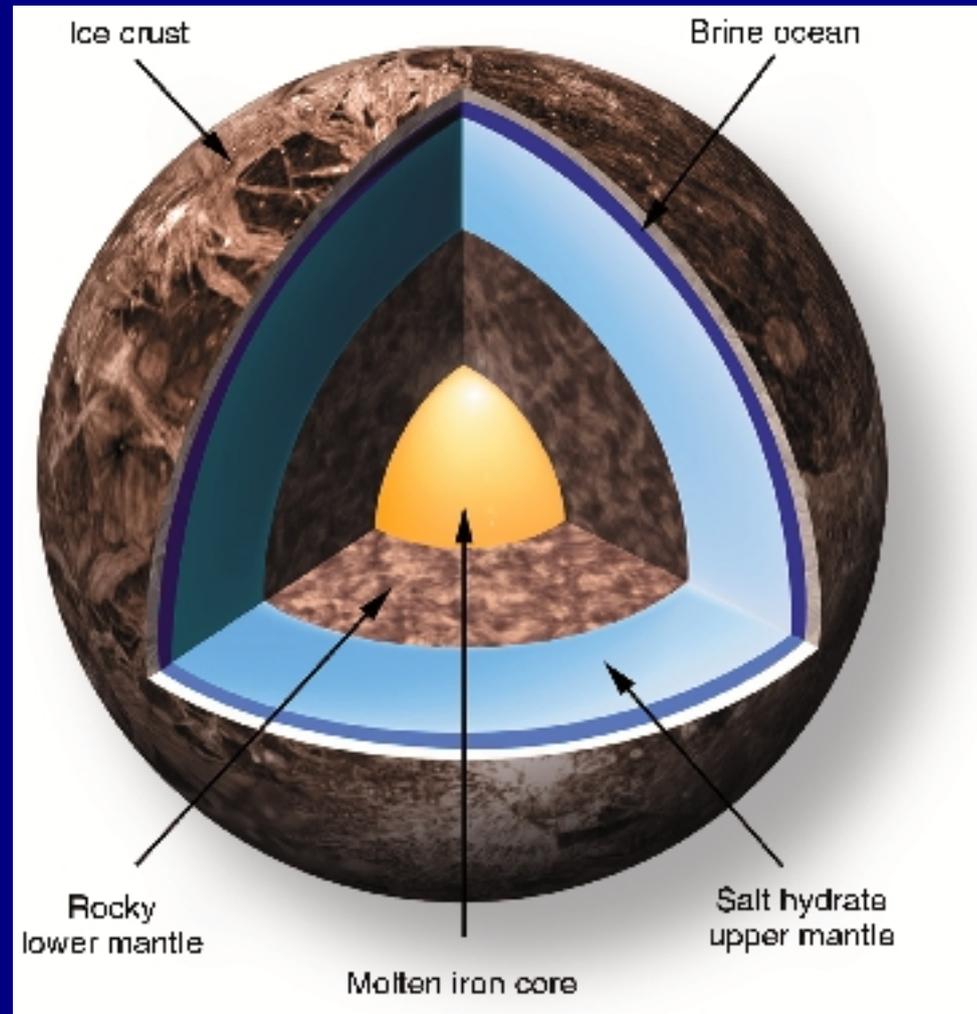
# La glace est-elle aussi dure que de la pierre ?

En dessous de 176 K, la glace I se comporte mécaniquement comme de la pierre.

Au dessus, elle se fissure plus facilement. Les fissures peuvent faciliter sa déformation, comme dans le cas des glaciers.

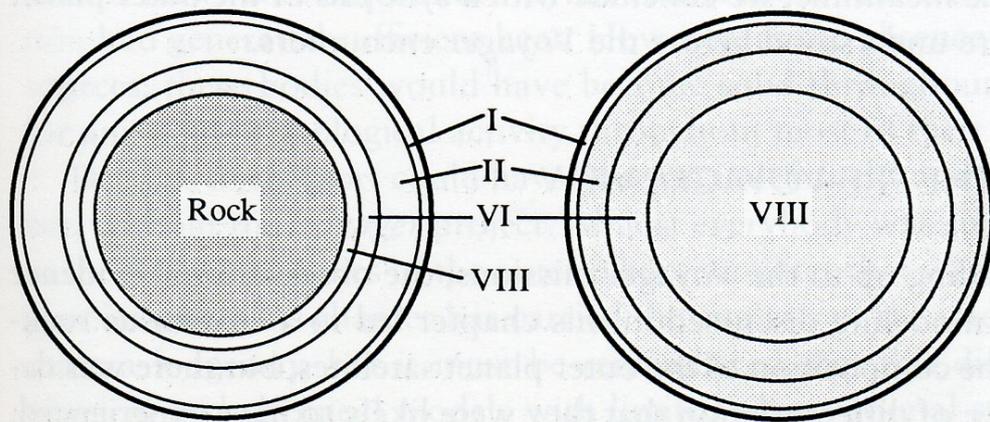


On peut concevoir une planète entièrement faite de glace, ou d'un mélange de glaces et de roches.

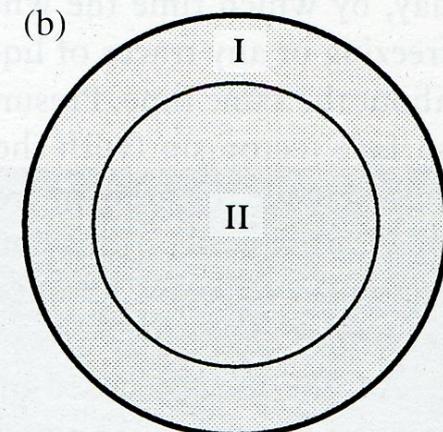
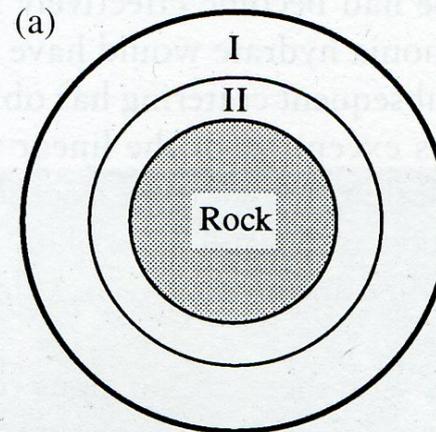


structure probable de Ganymède

On peut concevoir une planète  
entièrement faite de glace, ou d'un  
mélange de glaces et de roches.

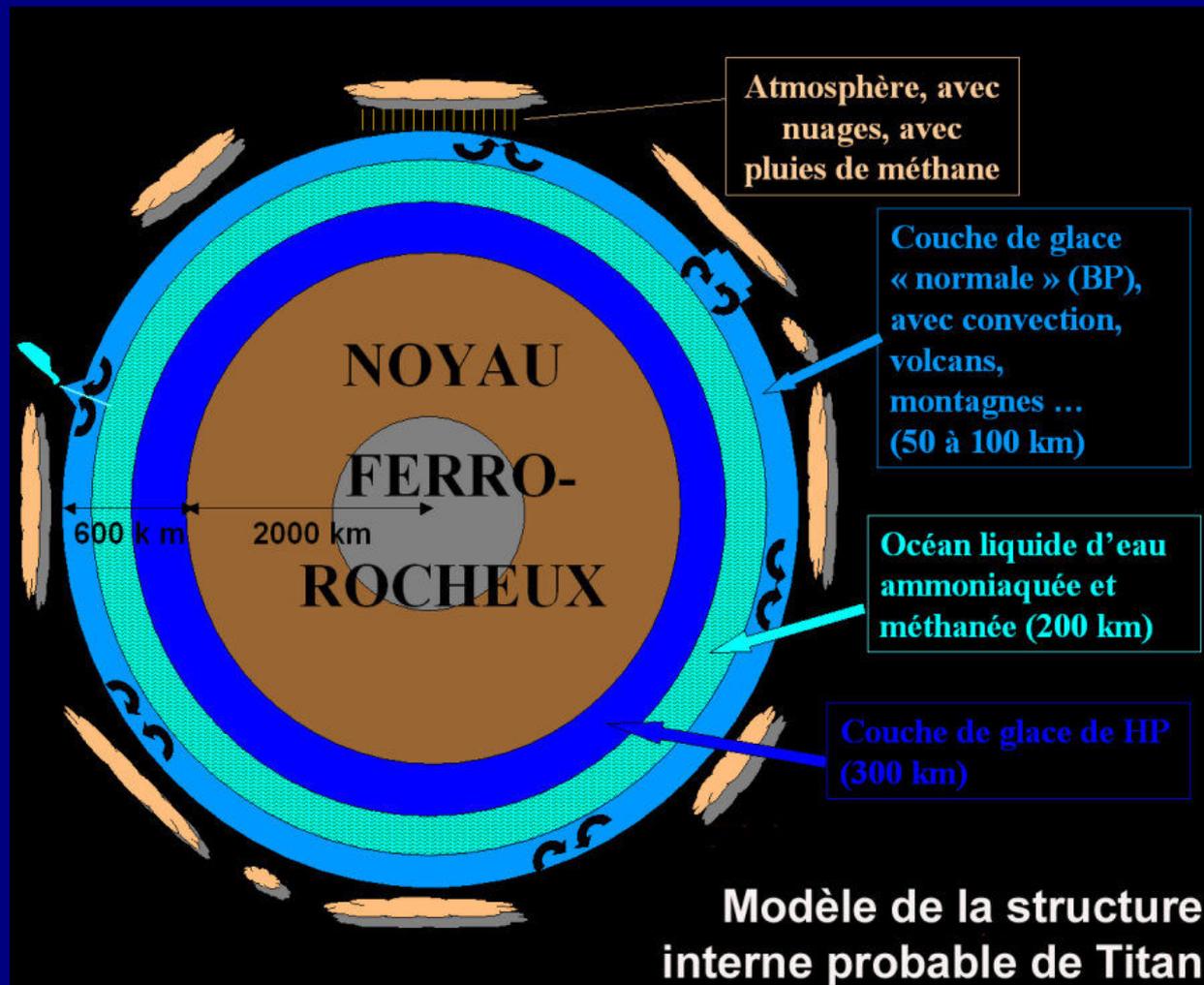


Deux structures probables de Callisto



Deux structures possibles du satellite Rhea.

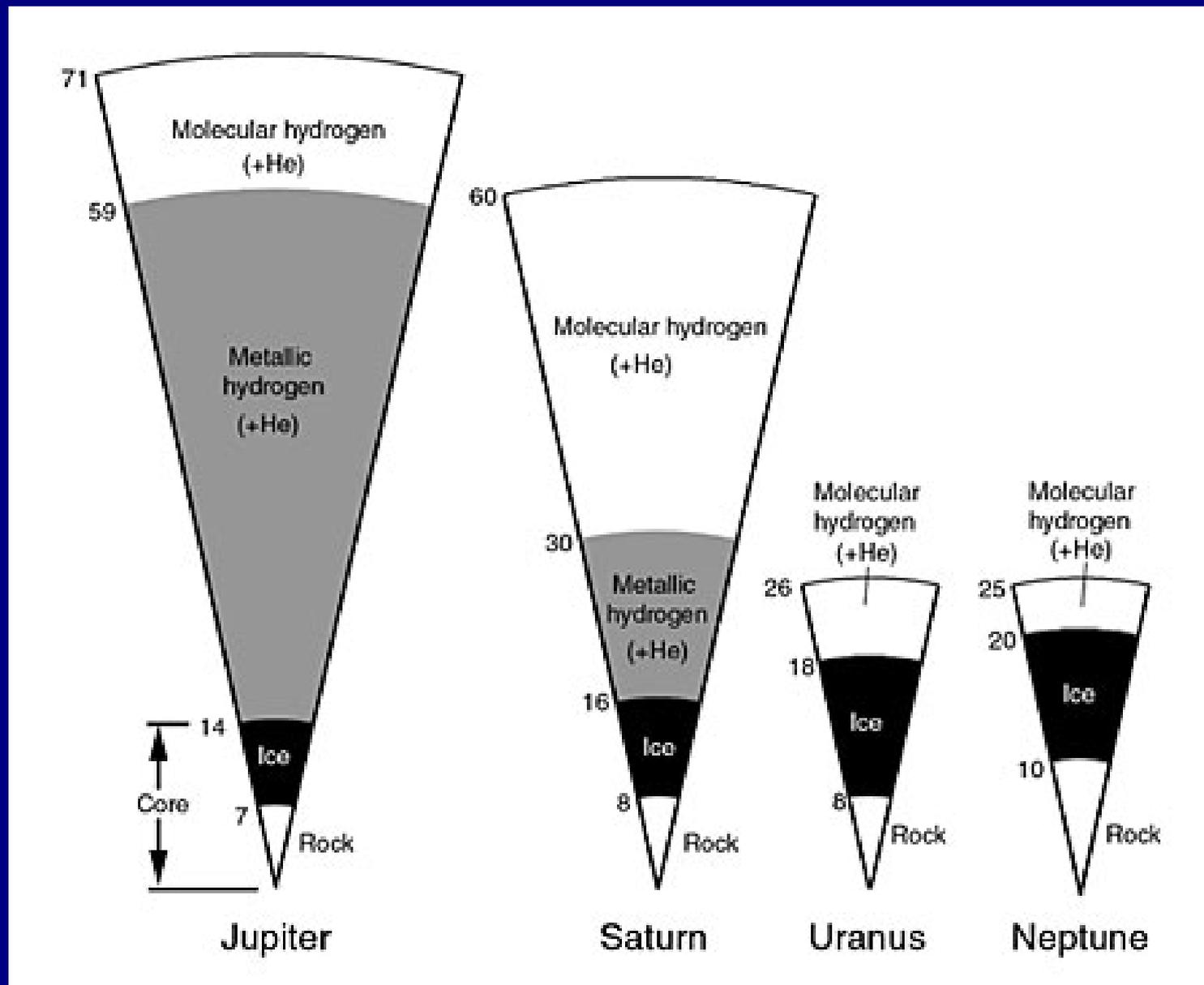
On peut concevoir une planète entièrement faite de glace, ou d'un mélange de glaces et de roches.



Modèle de la structure interne probable de Titan

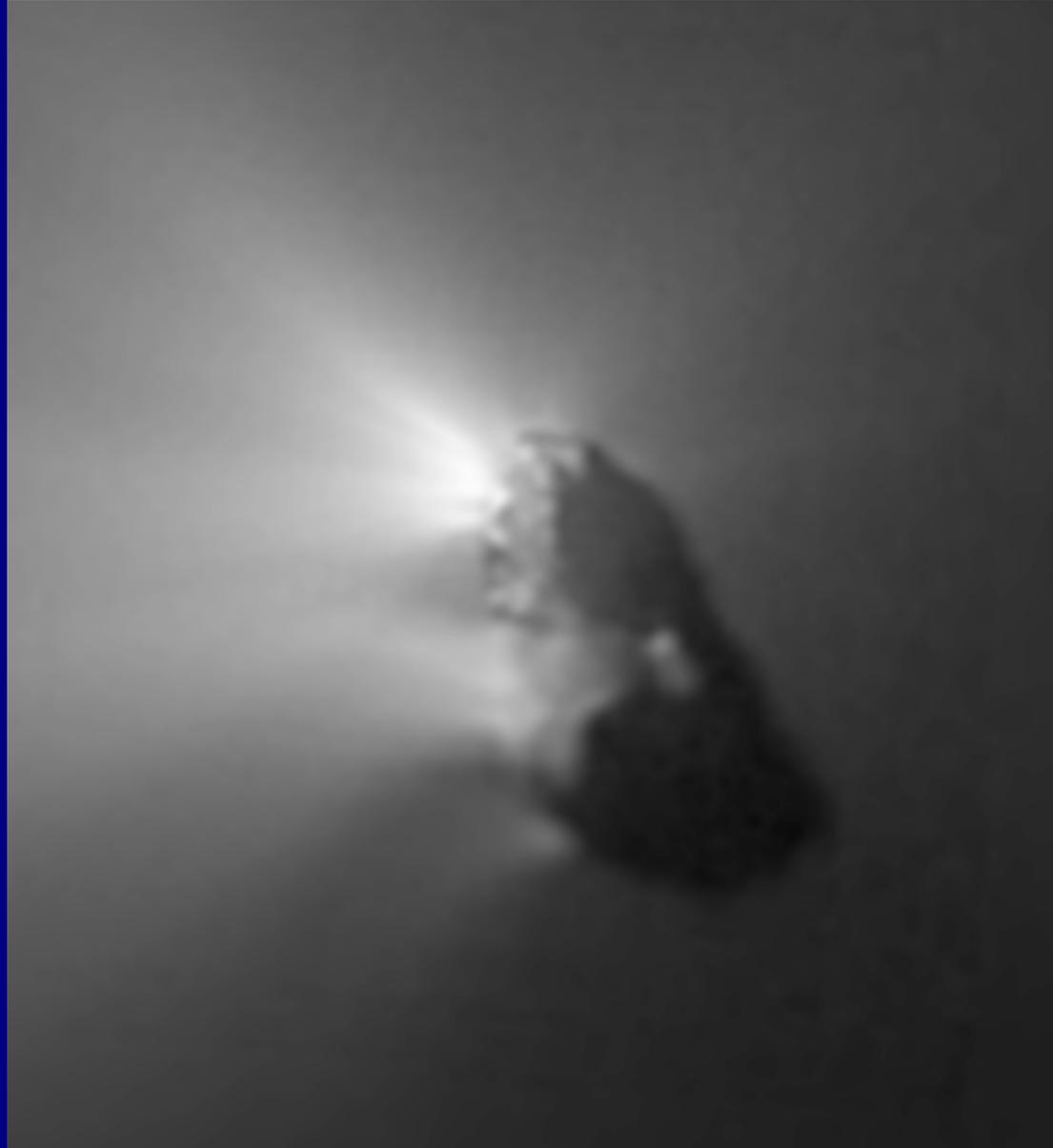
structure probable de Titan

# Encore plus d'eau



Structure interne possible des planètes géantes.

# Encore plus d'eau : les comètes

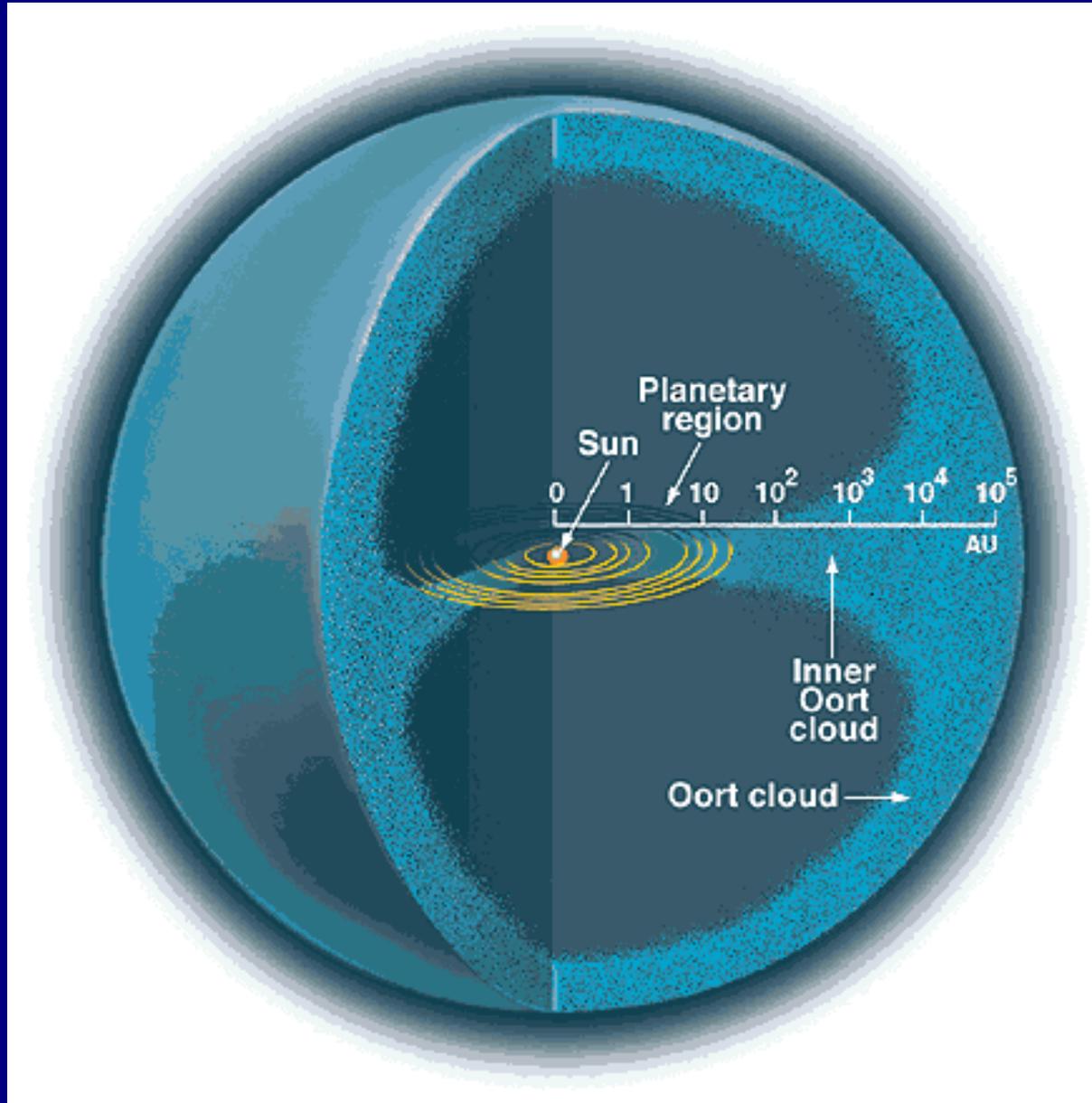


Noyau de la  
comète de Halley

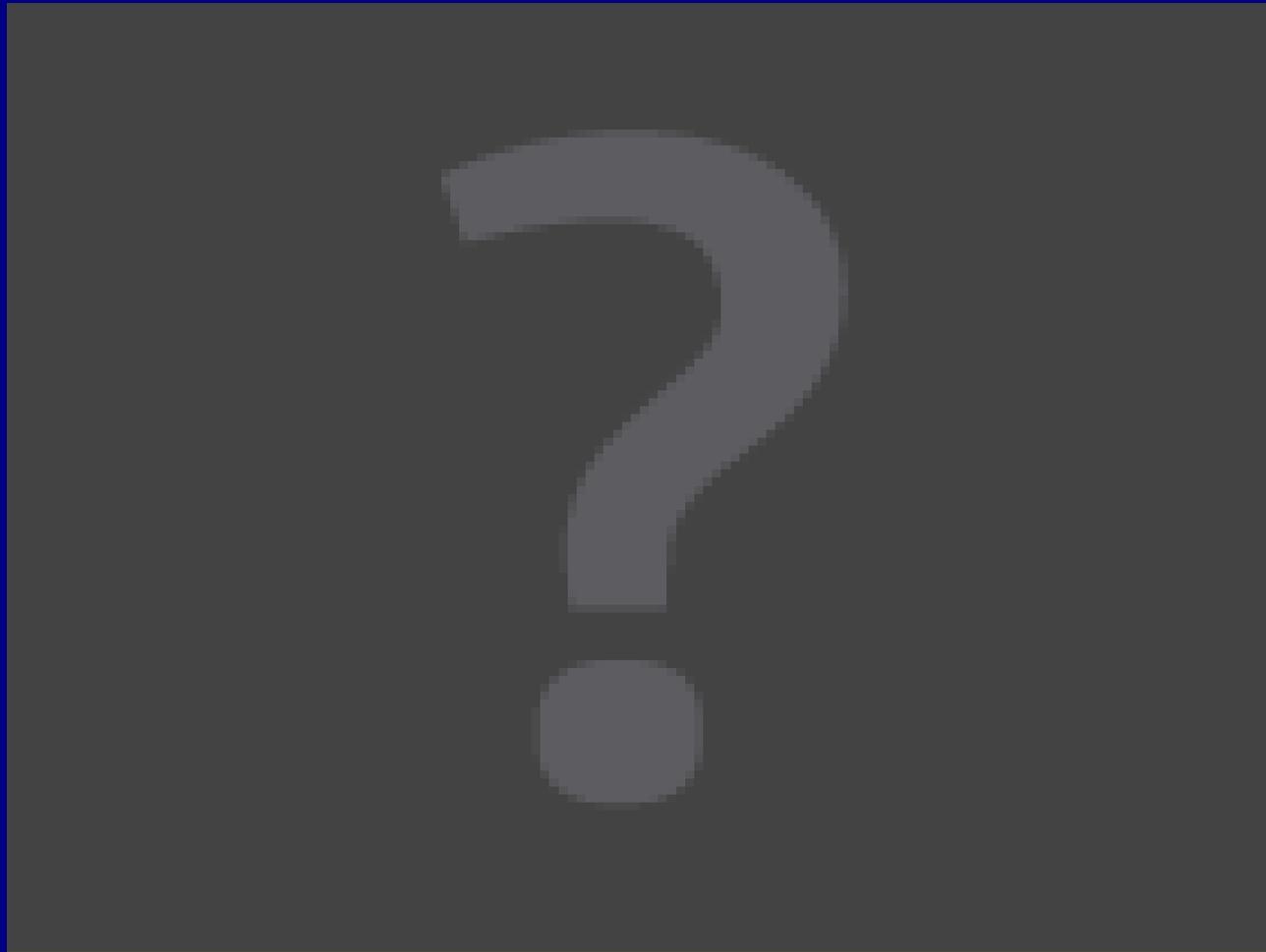
[sonde Giotto, ESA]

# Encore plus d'eau : le nuage de Oort

Des milliards de comètes, au frais.



# Le nuage de Oort se vide de moitié en 3 Md années



Deux comètes tombant dans le Soleil vues par le coronographe Lasco de la sonde SOHO [ESA]

# Comment l'eau est venue.

- Dès l'origine, lors de l'accrétion, elle était là, sous forme de glace (petits cristaux). Pour des distances à partir de Jupiter.
- Plus près : plus difficile car à l'état gazeux... et les UV solaires ont pu dissocier les molécules d'eau en O et H et H. Et l'hydrogène H a du être chassé par le vent solaire.
- Mais peut-être pas...
- Lors de la différenciation, l'eau (légère) est remontée près de la surface.
- A pu « sortir » grâce au volcanisme.
- A pu arriver après, avec les comètes très nombreuses qui ont du tomber sur les planètes, dans les 800 premiers millions d'années.

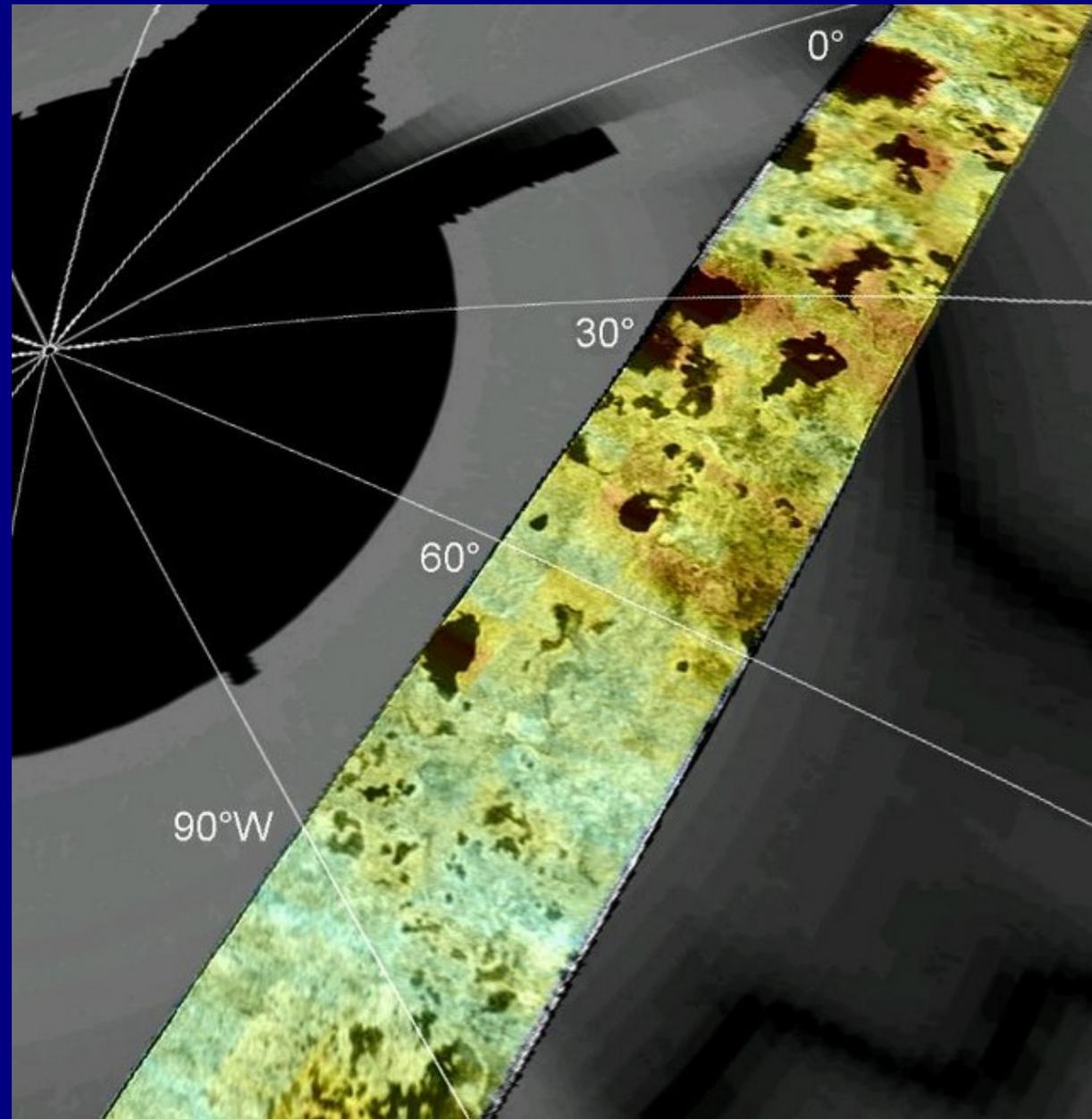
# D'autres liquides à la surface des planètes.

Carte de réflexion radar de la surface de Titan.  
En noir des surfaces lisses :  
des lacs sur Titan ?

Pas de mesure directe de leur  
composition chimique.

Mais on a mesuré celle de  
l'atmosphère, et dans les  
régions froides (polaires) le  
méthane et l'éthane (moins  
abondant que le méthane)  
peuvent se condenser, c'est à  
dire « pleuvoir » et former des  
lacs.

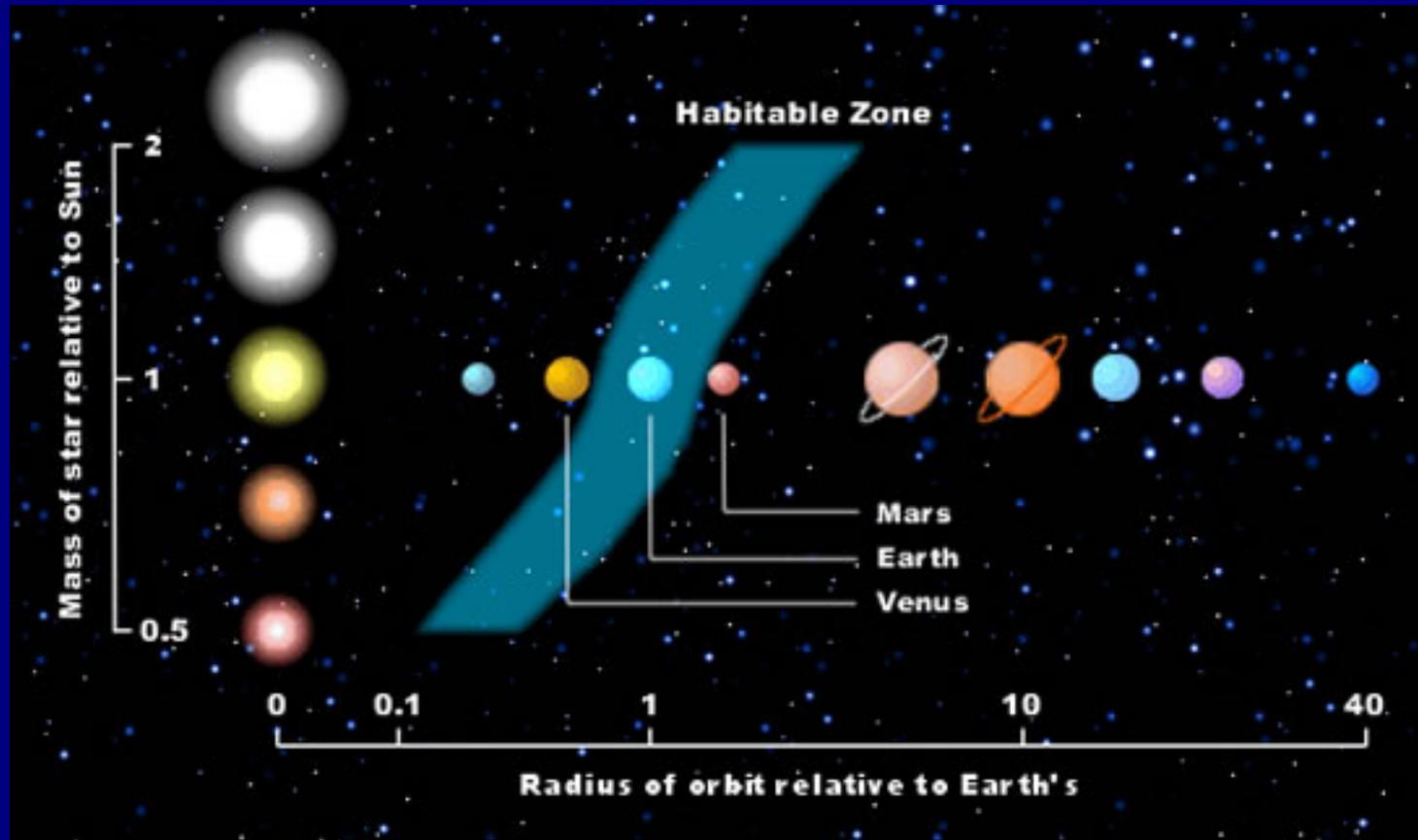
A part les cas de la Terre et  
Titan, on ne connaît pas de  
liquide actuellement sur  
d'autres planètes.



# L'eau et la vie

- Ce n'est plus un problème de trouver de l'eau (pas trop près du Soleil quand même).
- Le problème est de la trouver à l'état liquide.
- L'eau est importante car c'est un bon solvant : des tas de réactions chimiques peuvent s'y produire. Elle ne détruit pas les molécules organiques.
- Rôle mécanique : les éléments chimiques peuvent être transportés/mélangés grâce à elle.

# L'eau et la vie



Un résumé du problème... mais ce diagramme suppose un effet de serre ad-hoc. Sans effet de serre, Vénus serait dans la zone habitable, et la Terre n'aurait (quasiment) pas d'eau liquide.