

UE 10 - Climat de la planète Mars



Cycle de l'eau et
paléoclimat

Jean-Baptiste Madeleine

(jmadeleine@lmd.ipsl.fr)

Sorbonne Université

Labo. de Météo. Dynamique

Avec les contributions de

François Forget

(CNRS/LMD) et

Aymeric Spiga

(SU/LMD)



June 28, 2001



September 4, 2001

Un système climatique riche



Trois cycles principaux :

- **Cycle des poussières :** fort contrôle de la température. Tempêtes locales et globales. Couplage avec le cycle de l'eau (noyaux de condensation des nuages) ;
- **Cycle de l'eau :** Calottes permanentes et saisonnières, nuages de glace d'eau, ères glaciaires dans le passé ;
- **Cycle du CO₂ :** Composé principal de l'atmosphère, peut condenser aux pôles en hiver (cycle saisonnier).

Partie 1 : Localisation et propriétés des réservoirs d'eau

Partie 2 : Le cycle de l'eau actuel de Mars

Partie 3 : Le cycle de l'eau des dernières centaines de Ma

Partie 4 : Le cycle passé du CO₂

PSP 007338 2640

**Partie 1 :
Localisation et
propriétés des
réservoirs d'eau**

**"Ingrid's
Avalanches" 2008 Feb 19**

83.7N 235.8E

L'eau sur Mars de nos jours

Pole nord

Équateur

Pole sud

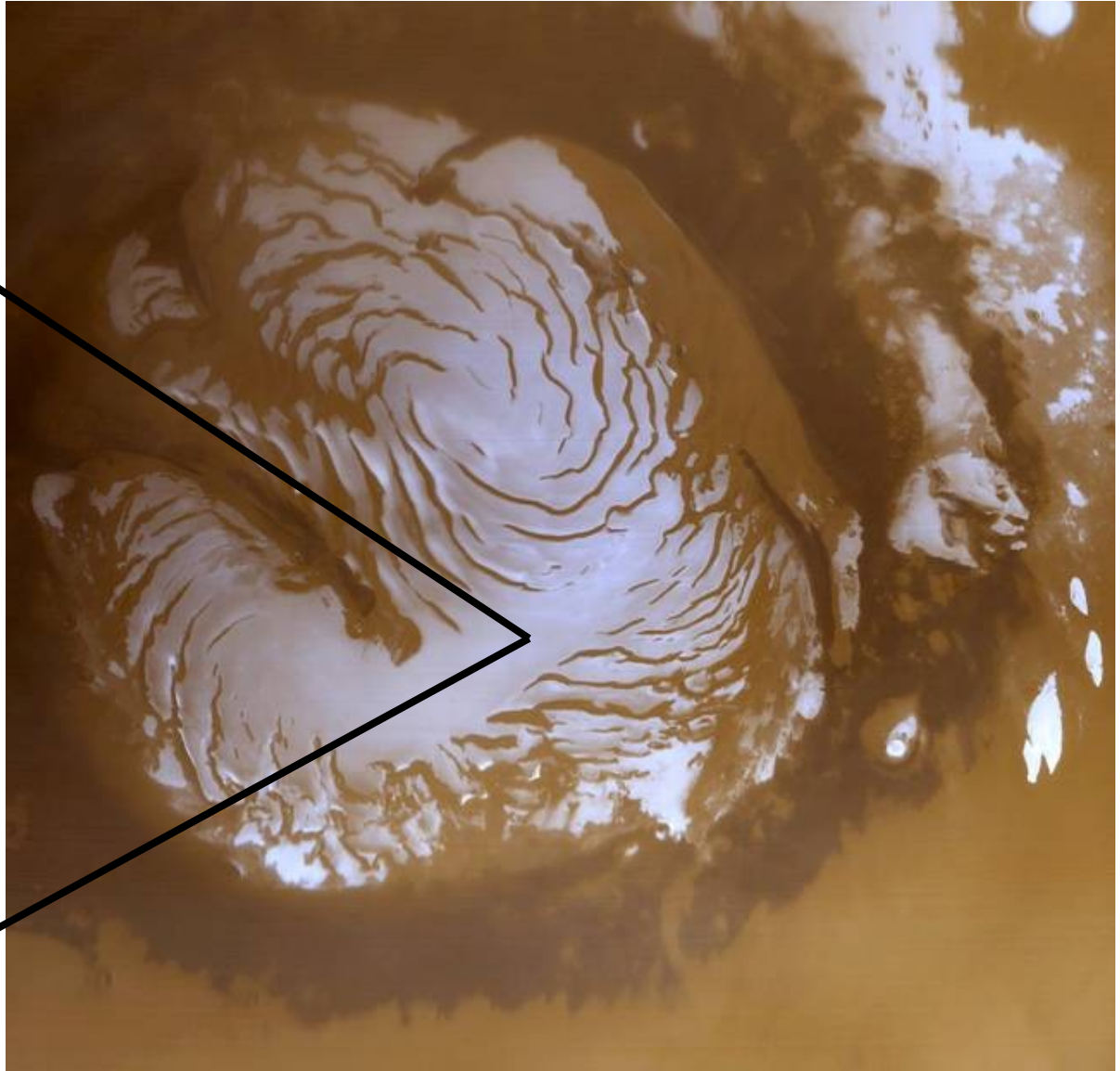
Glace en interaction avec l'atmosphère

CO₂

Regolite sec en contact diffusif avec l'atmosphère

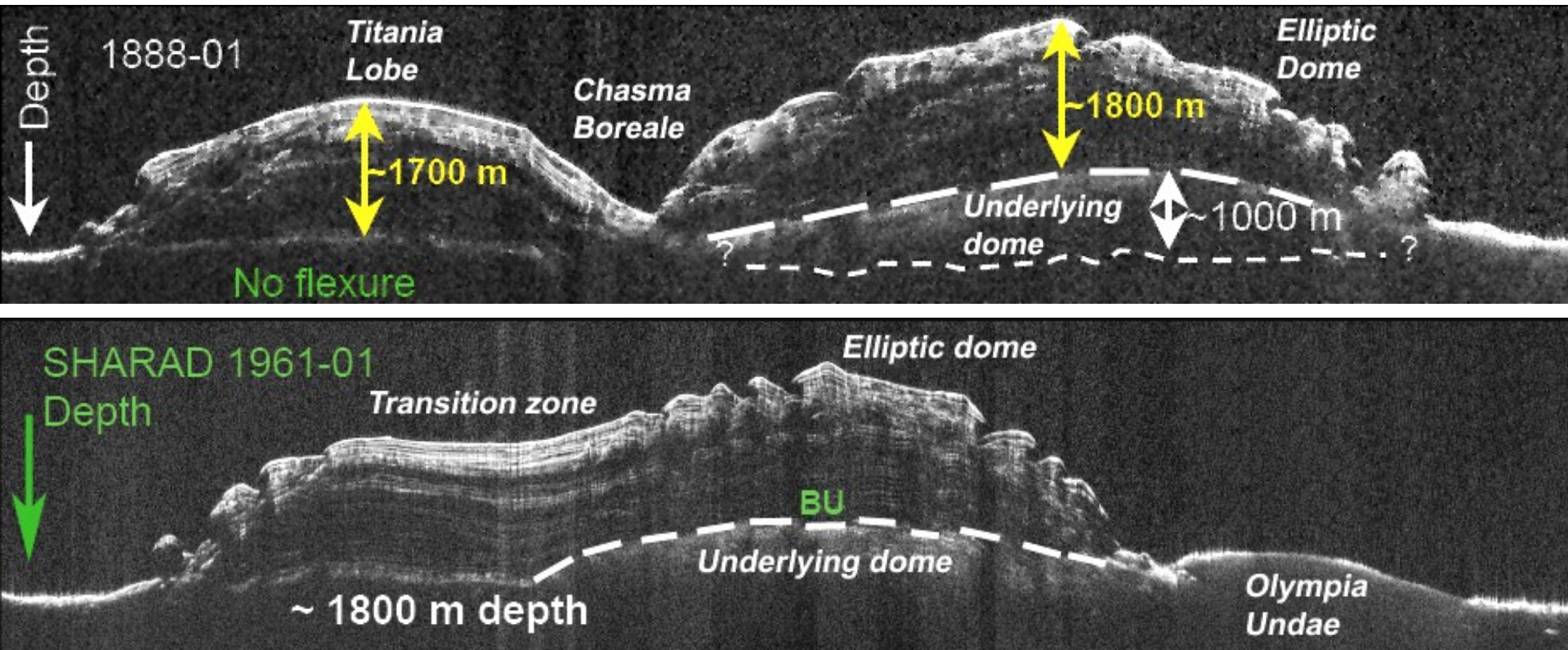
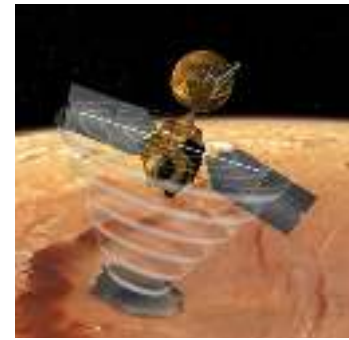
Calotte permanente Nord

Au pôle nord : couche de
glace “fraîche” et
relativement pure en
interaction avec
l’atmosphère (diamètre :
1000 km)



Stratigraphie de la calotte Nord

Radars MARSIS sur Mars Express et SHARAD sur Mars Reconnaissance Orbiter



L'eau sur Mars de nos jours

Pole nord

Equateur

Pole sud

Glace en interaction avec l'atmosphère

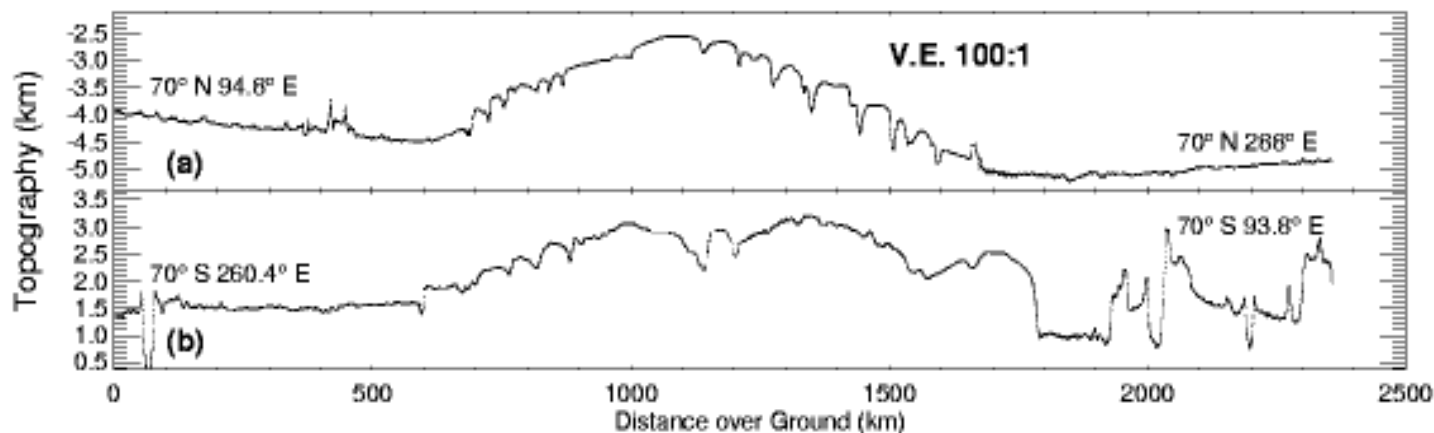
Sédiments polaires : glace + poussière

NPLD : $\rho \sim 1000 \text{ kg/m}^3$ (5% dust 95% H₂O-ice) [Malin, 1986]

BU : $\rho \sim 2000 \text{ kg/m}^3$ (55 $\pm$ 25% H₂O-ice, $\sim 1.5\text{-m}$ global equivalent layer of water) [Ojha, 2019]

Regolite sec en contact diffusif avec l'atmosphère

CO₂



Calotte Nord

Calotte Sud

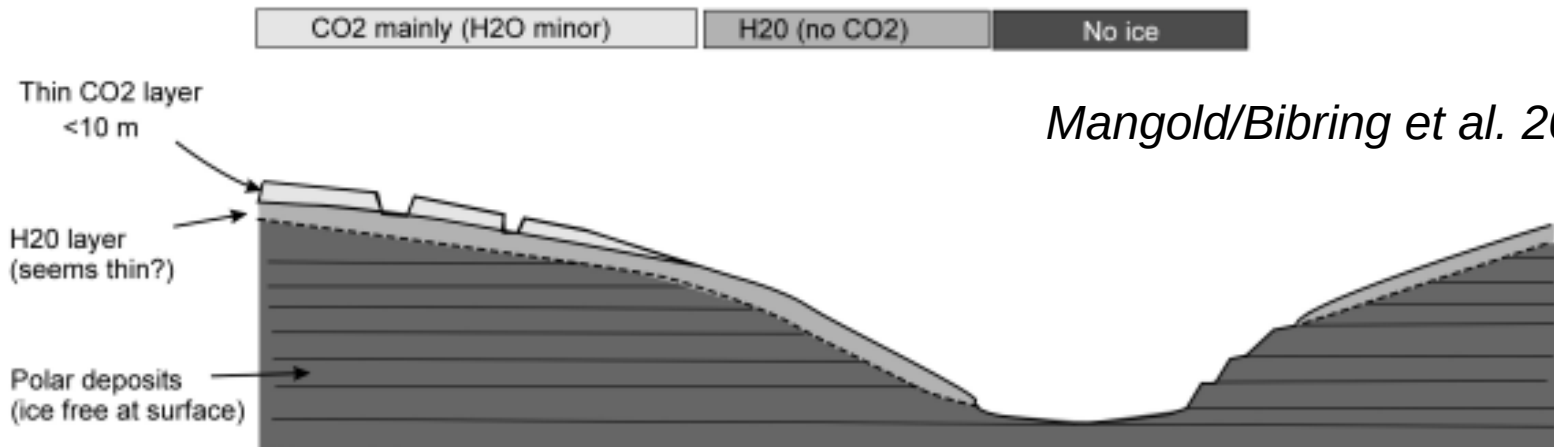
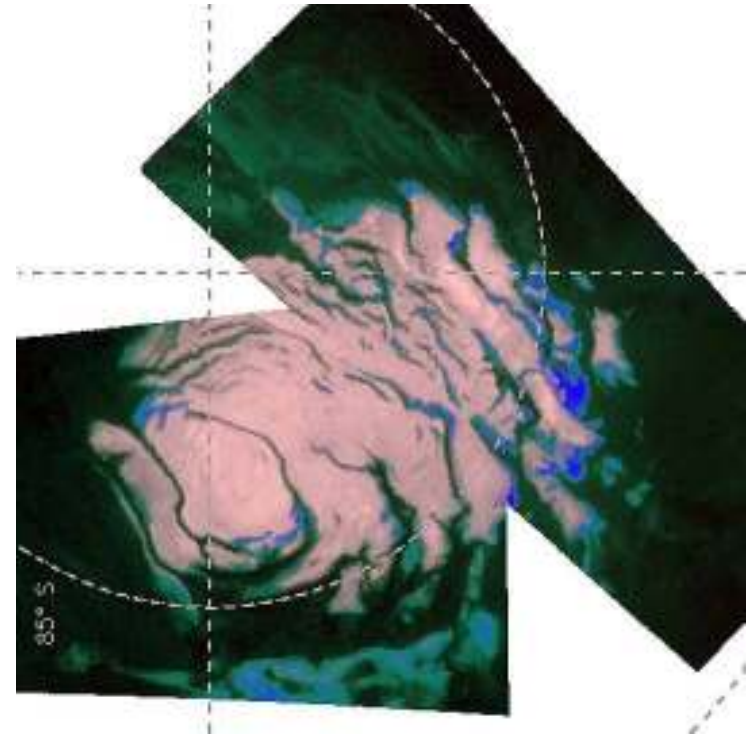
Différences pôle Nord / pôle Sud

Au pôle Sud, de la glace d'eau permanente est recouverte par quelques mètres de glace carbonique

Blue: Perennial H_2O ice

White Perennial CO_2 ice

Bibring et al. 2004



Mangold/Bibring et al. 2004

L'eau sur Mars de nos jours

Pole nord

Equateur

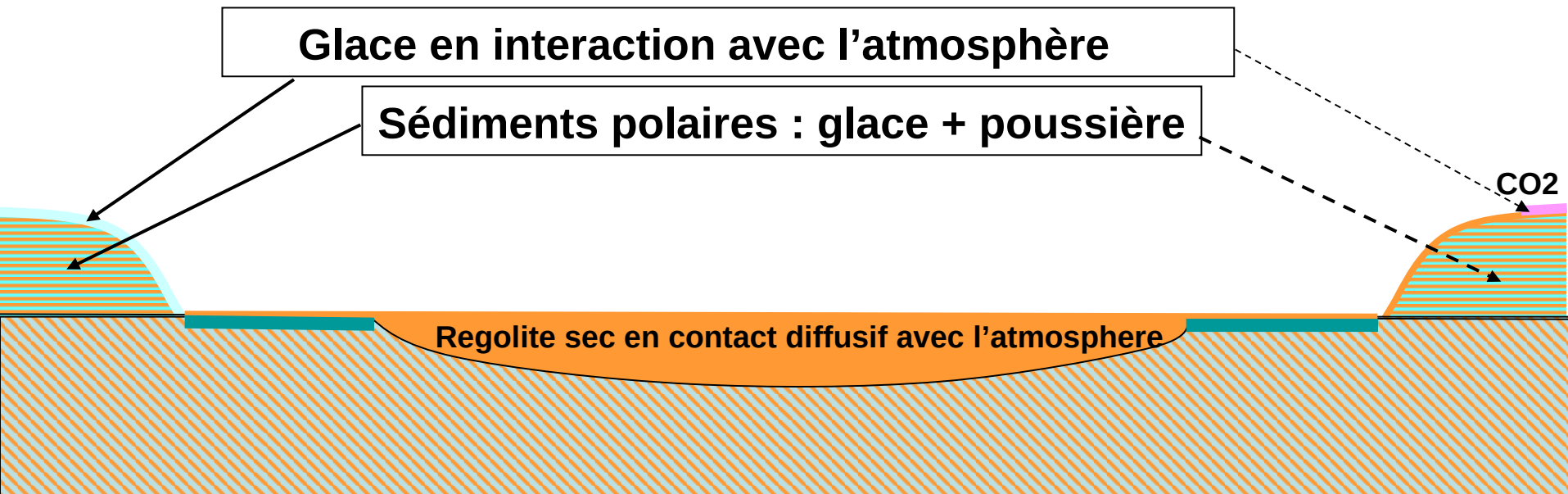
Pole sud

Glace en interaction avec l'atmosphère

Sédiments polaires : glace + poussière

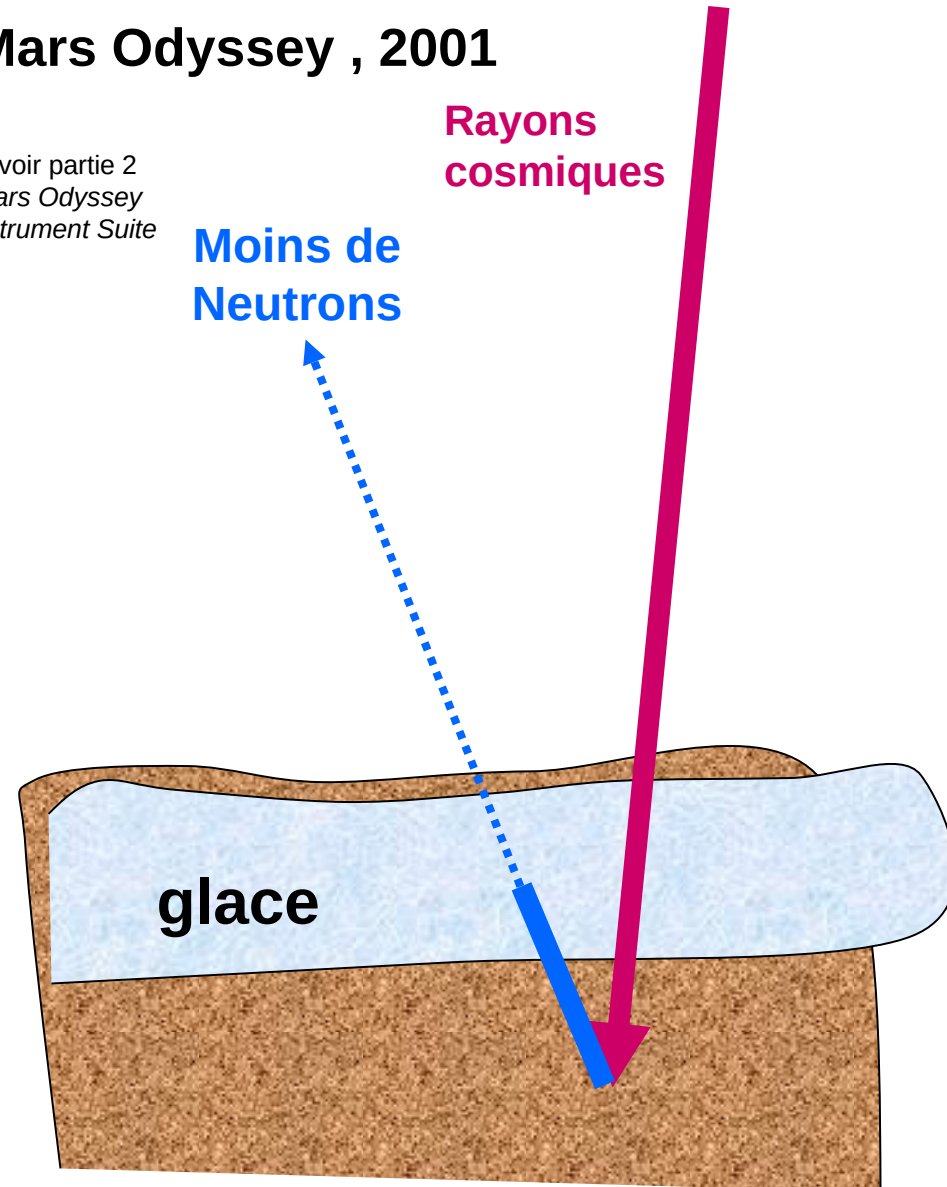
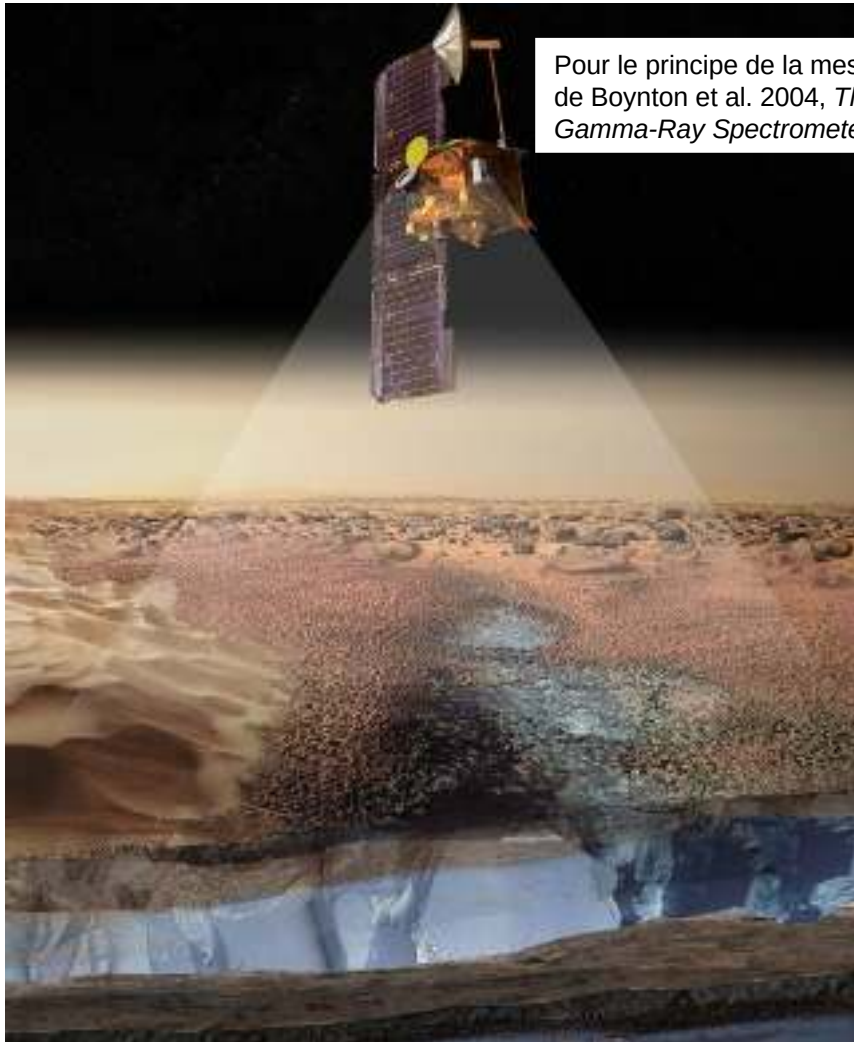
CO₂

Regolite sec en contact diffusif avec l'atmosphère



Cartographie du pergélisol

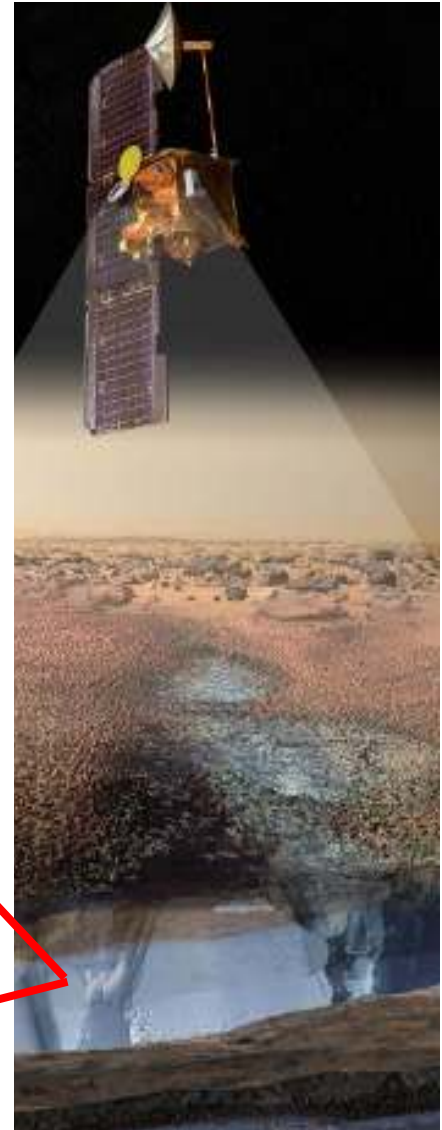
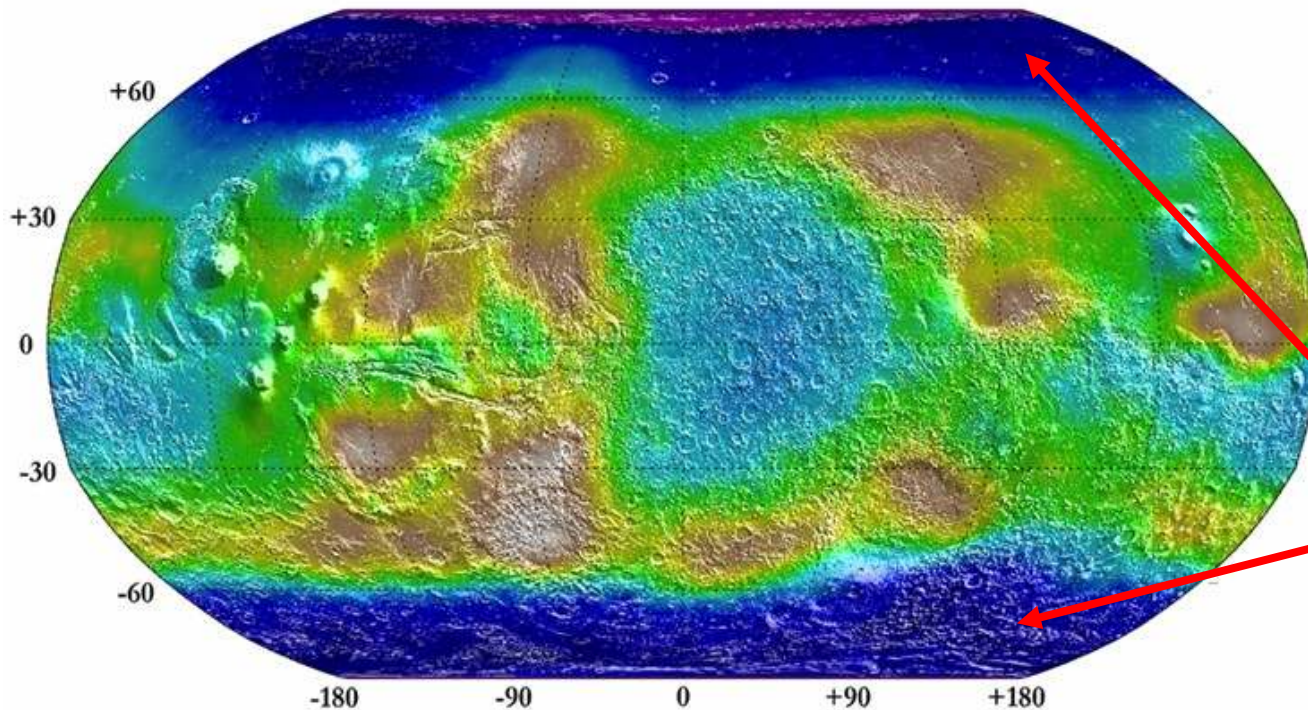
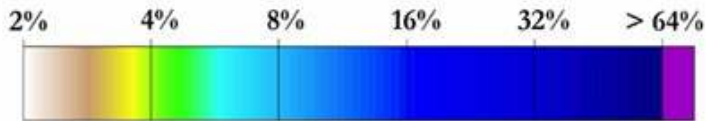
Spectromètre Neutron, NASA Mars Odyssey , 2001



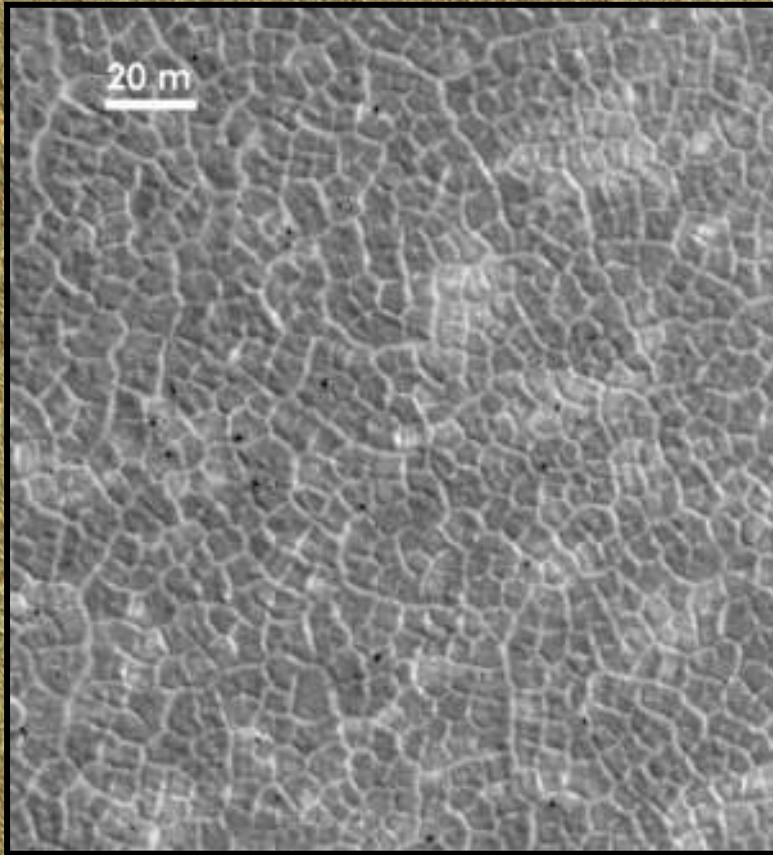
Glace d'eau dans le sous-sol

Couche de “glace sale” découverte par Mars Odyssey (GRS) sous 10 à 30 cm de sédiment sec

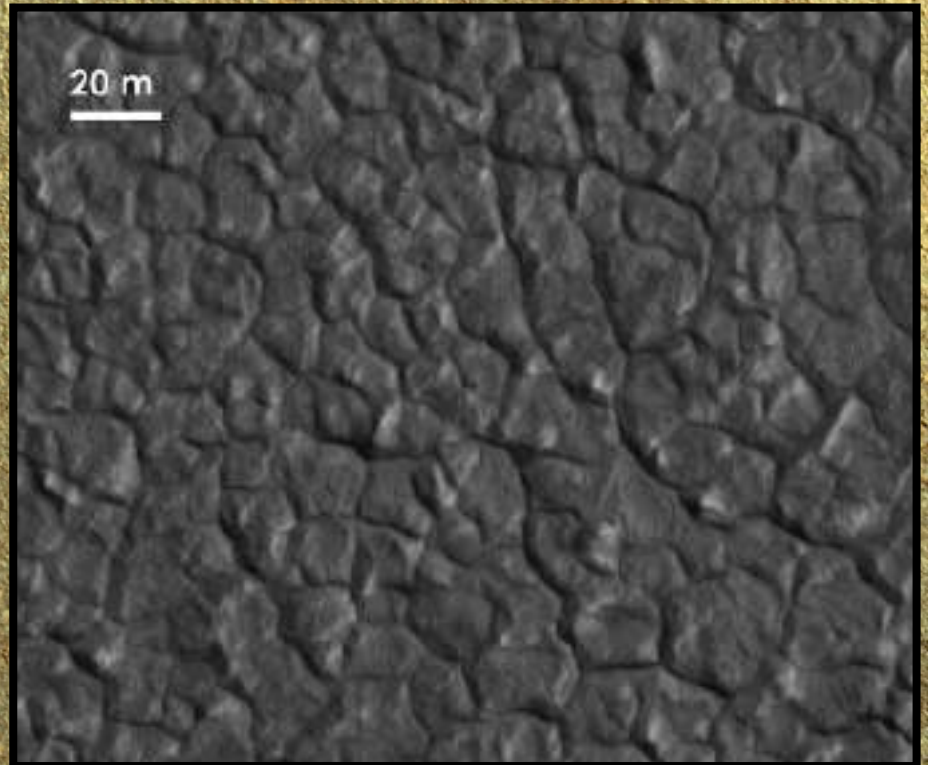
Minimum water equivalent hydrogen abundance
(weight percent) deduced from Neutron flux
(*Boynton et al. 2002 , Feldman et al. 2004*)



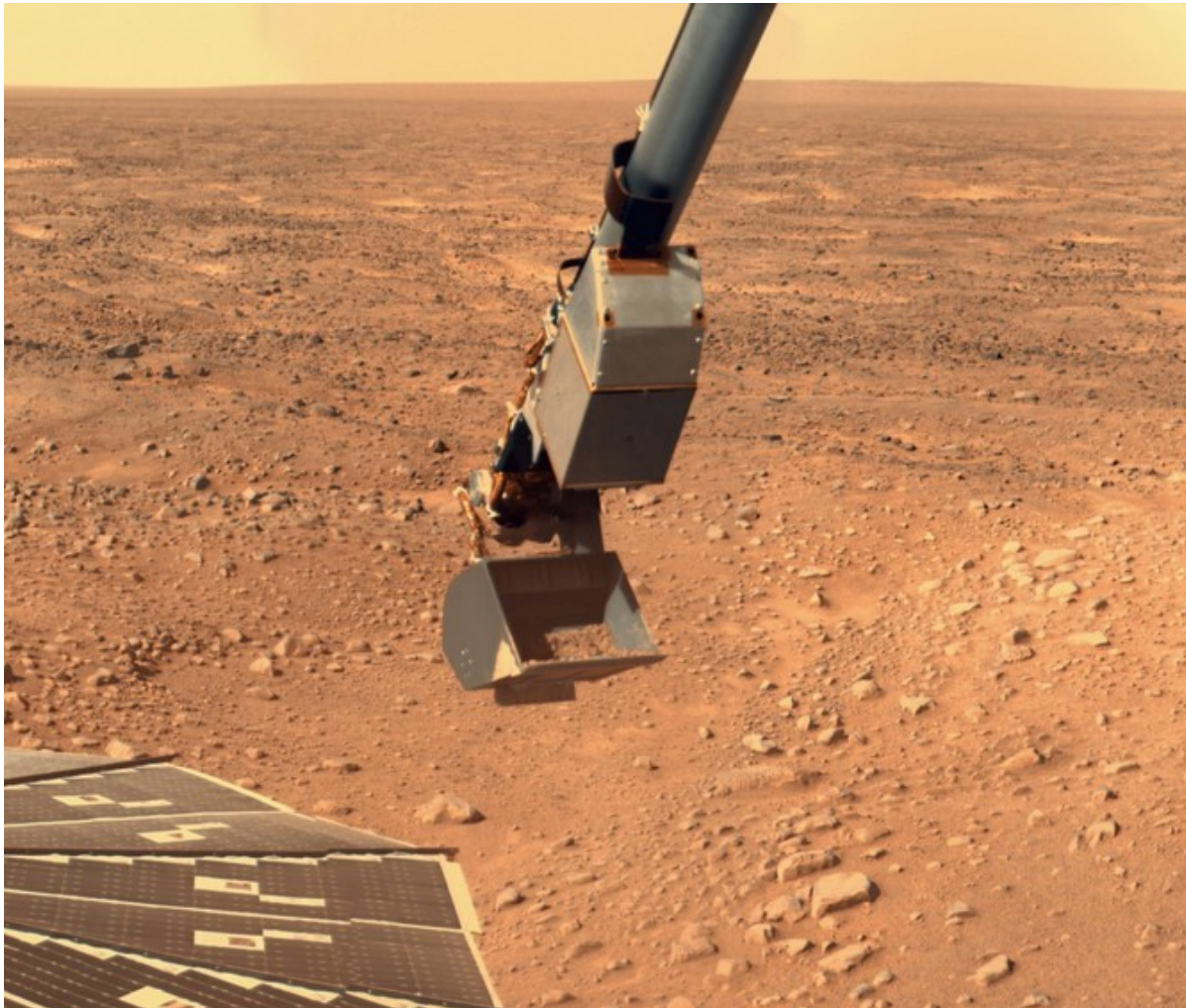
Polygones de sublimation



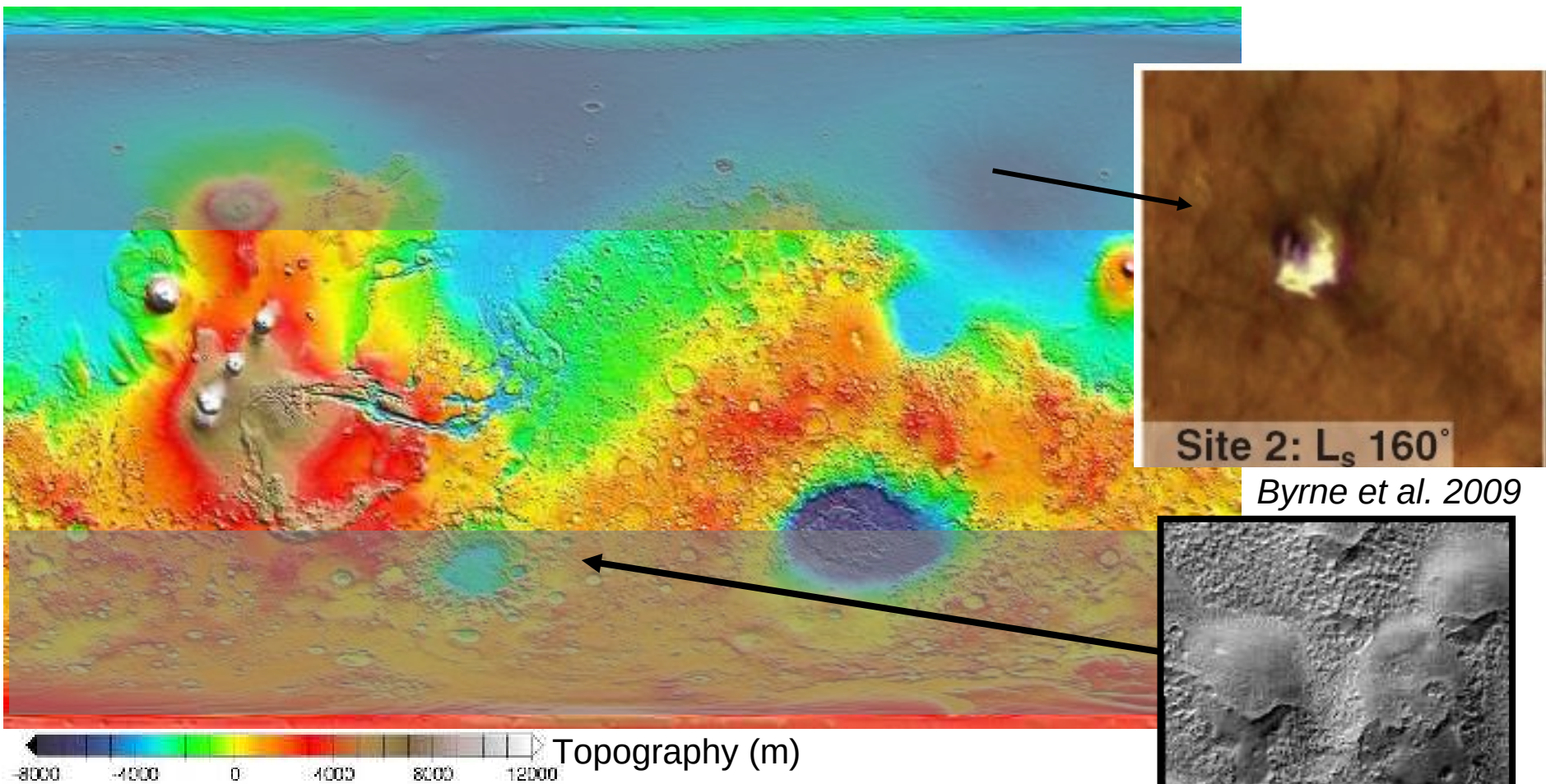
Géomorphologie façonnée par la glace
(60°-90° latitude)
(cf. cours A. Séjourné)



Glace d'eau observée par Phoenix

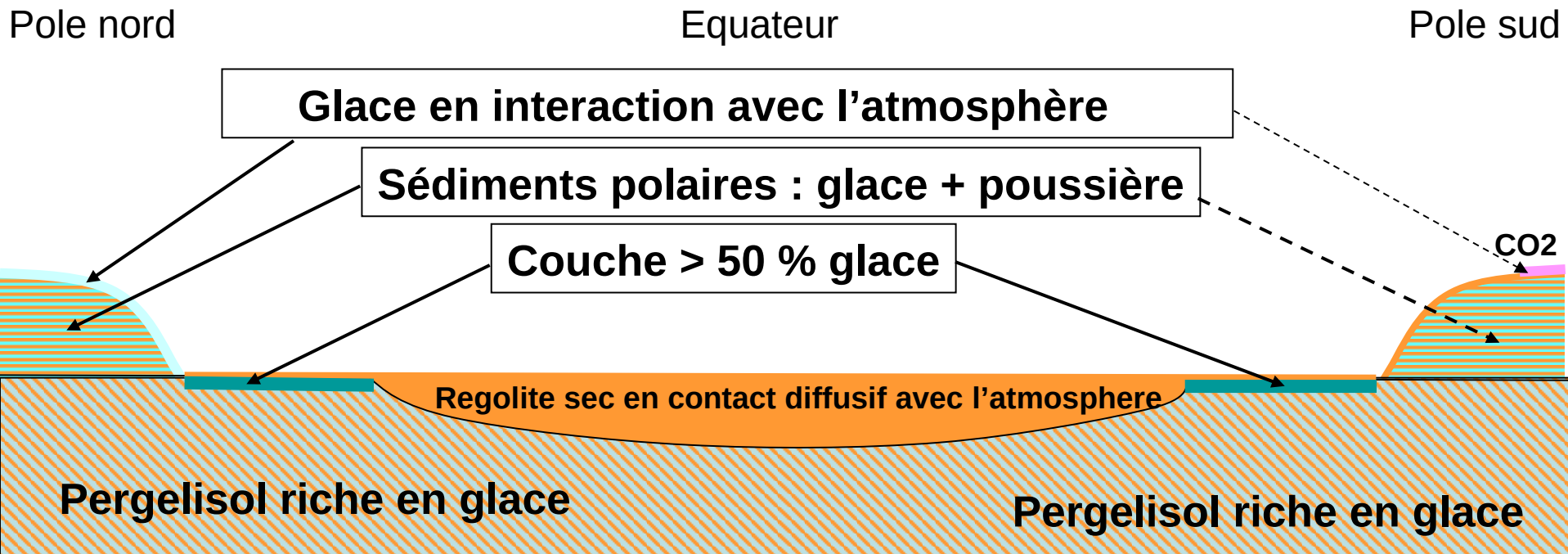


Un vaste manteau de ice / dust



Plusieurs indices suggèrent que le manteau de glace est présent jusqu'à 40° voire 30° latitude

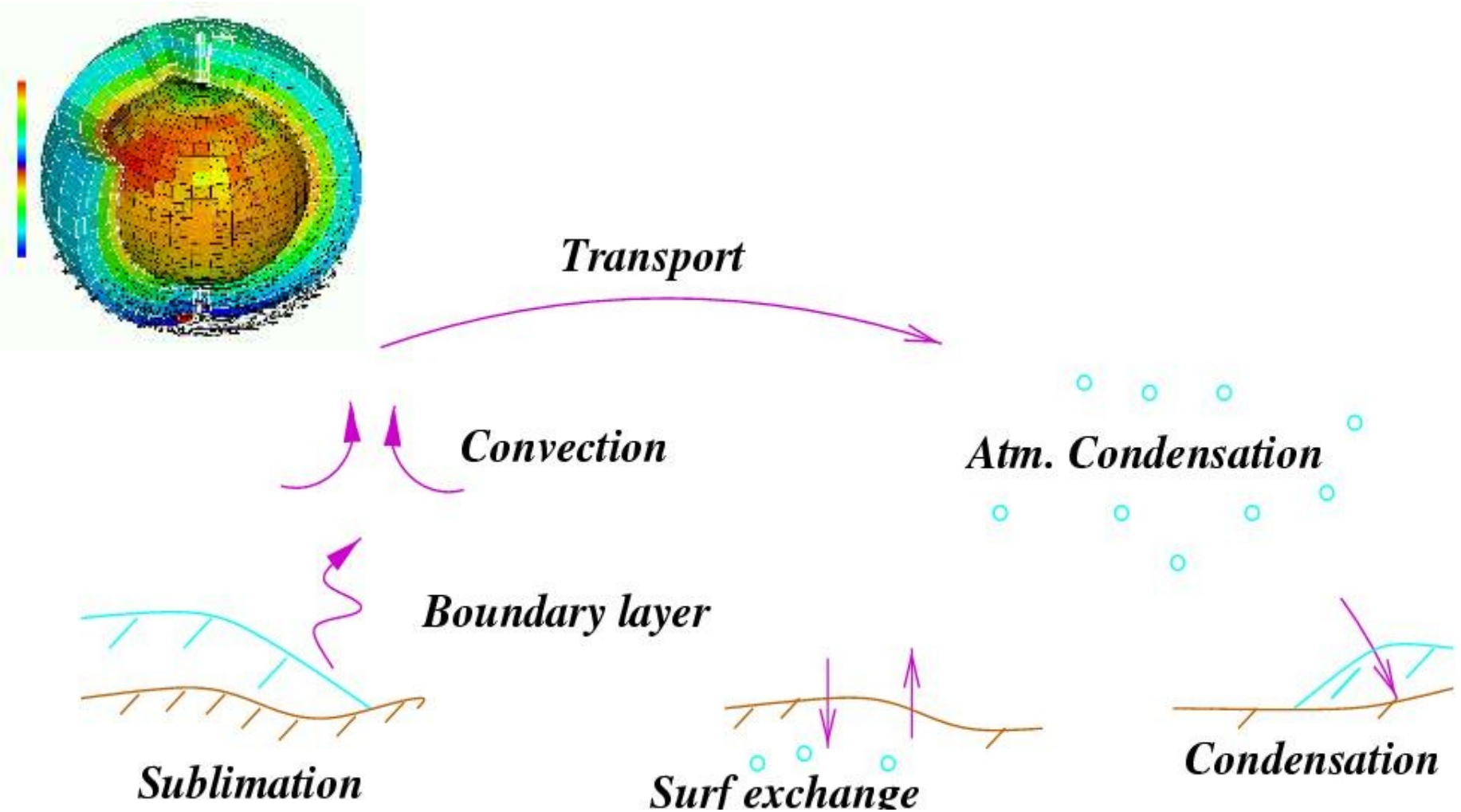
L'eau sur Mars de nos jours





Partie 2 :
Le cycle de l'eau
actuel de Mars

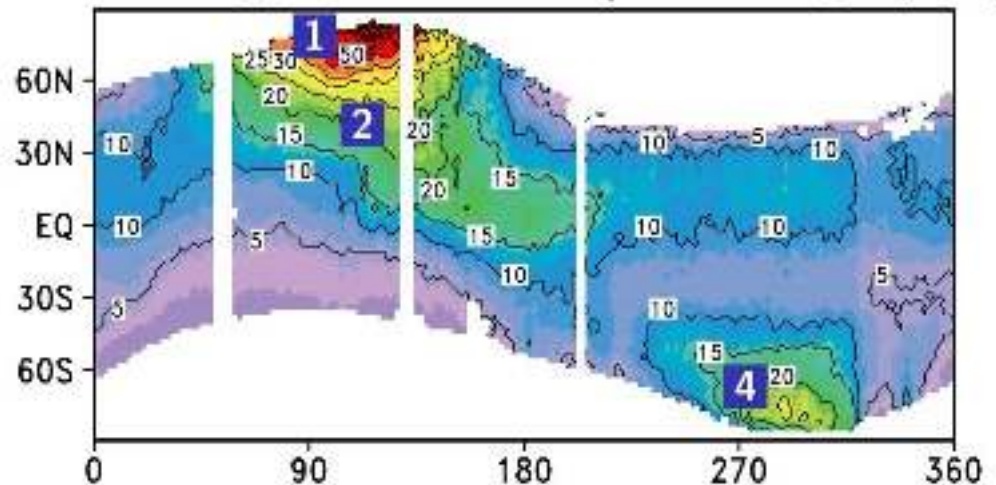
Modèle de climat global



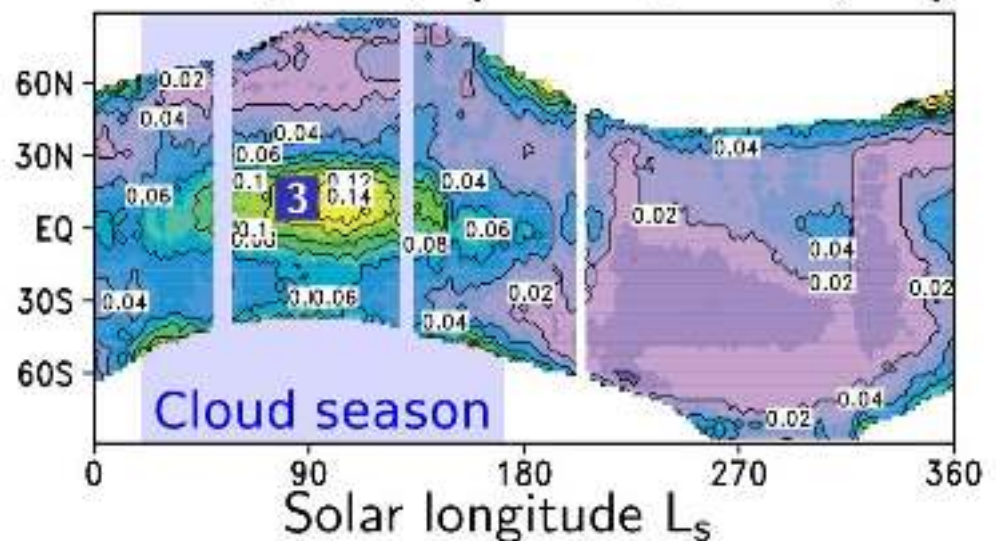
Mécanismes à l'oeuvre

- 1** Sublimation of the north polar cap during northern summer;
- 2** Advection into the overturning Hadley cell;
- 3** Formation of the aphelion cloud belt;
- 4** Beginning of southern summer, formation of the north polar hood.

Water vapor column (2 PM, $\text{pr.}\mu\text{m}$)



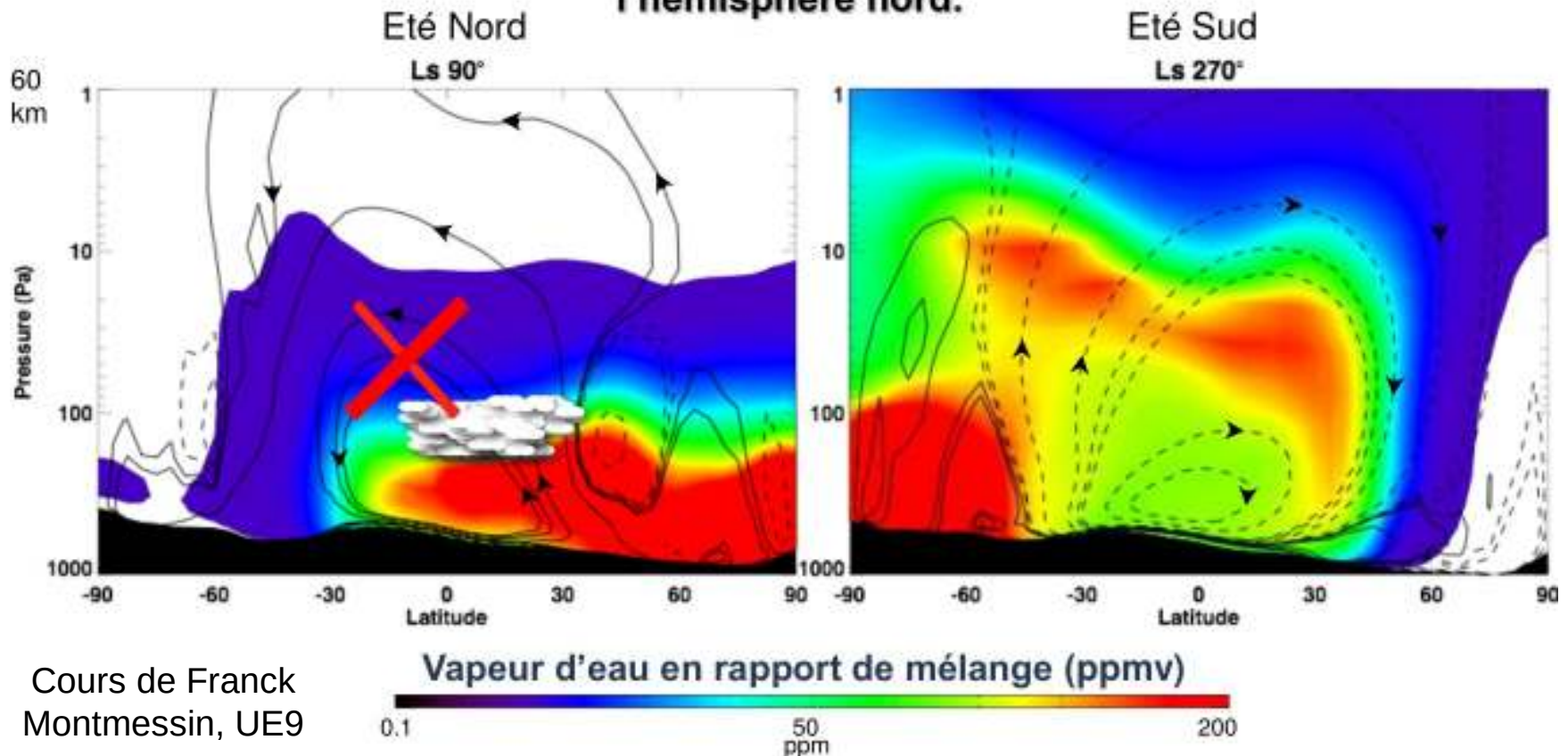
Cloud opacity (2 PM, $12.1\ \mu\text{m}$)



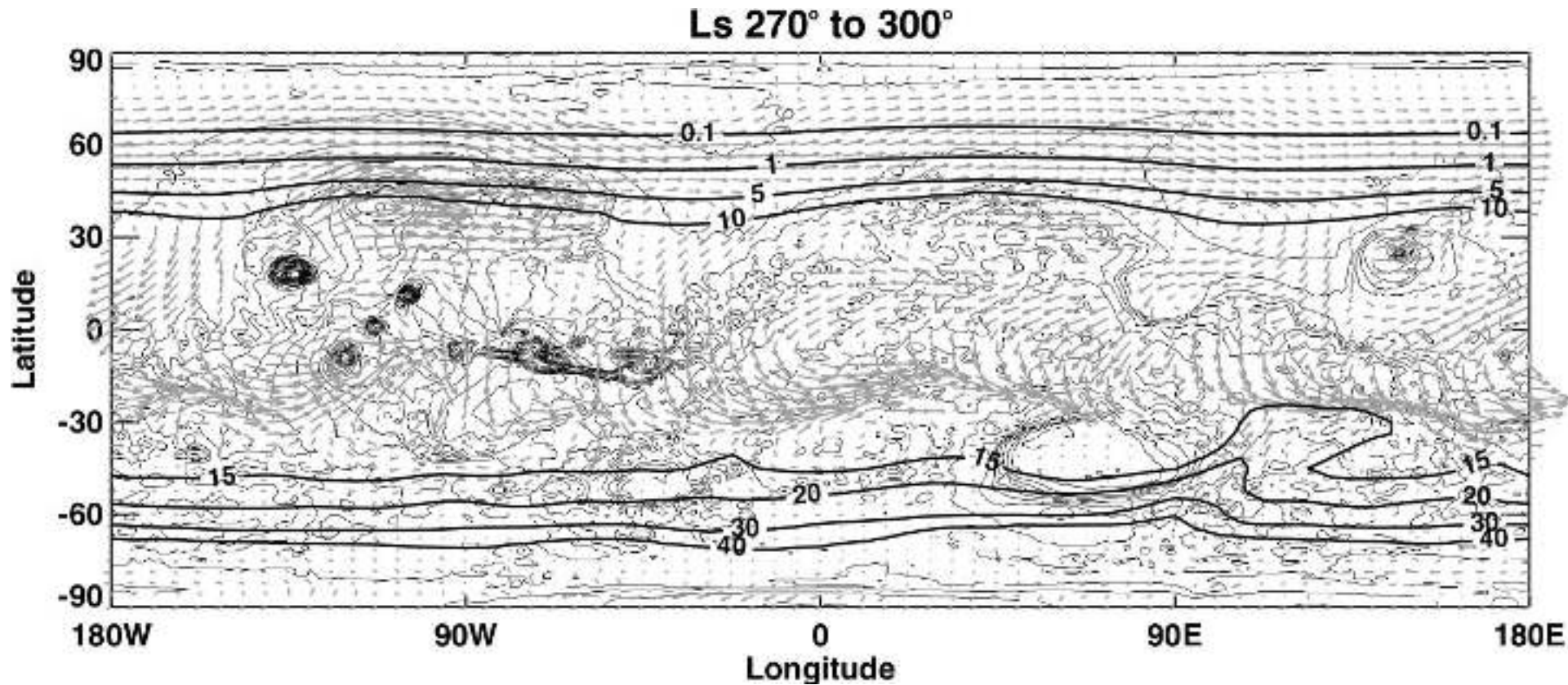
Dissymétrie Nord-Sud (effet « Clancy »)

En moyenne annuelle, le transport de l'eau entre les deux hémisphères sur Mars est dissymétrique. La ceinture équatoriale de nuages impose des phénomènes de sédimentation/évaporation localisés aux tropiques s'opposant au transport de la vapeur d'eau vers l'hémisphère sud.

Ainsi, les nuages induisent une rétention forte de la vapeur d'eau dans l'hémisphère nord.



Distribution spatiale de la vapeur d'eau



Colonne précipitable de vapeur d'eau (pr.um, contours) et vents à 3 km
Valeurs moyennées sur 30° de Ls

Propriétés des nuages « grande échelle »

Clouds form when saturated air is cooled

2 Major cloud structure :

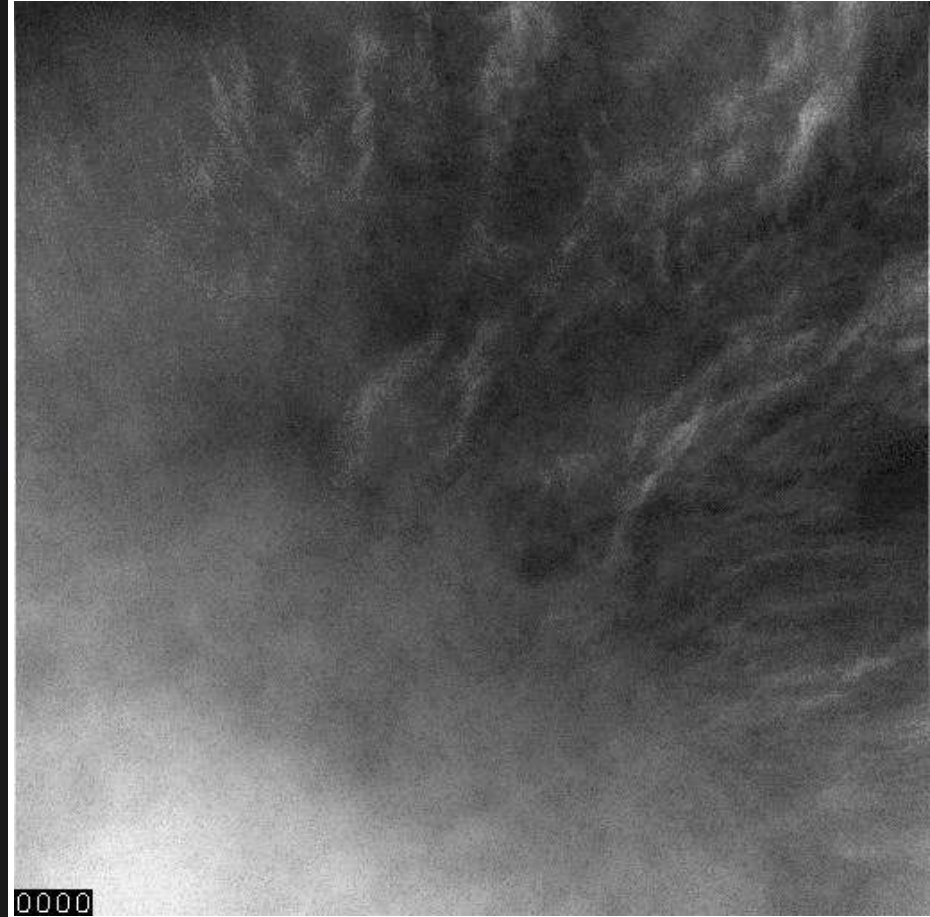
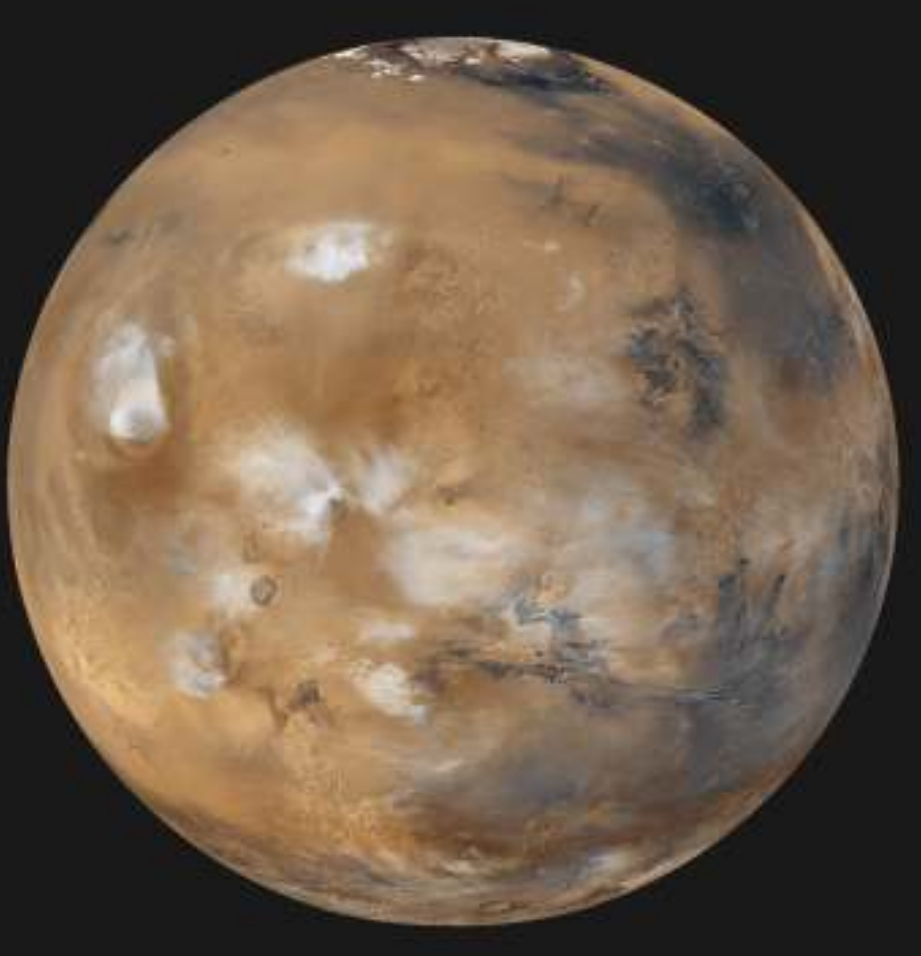
The “aphelion cloud belt”

- Air cooled in the ascending branch of the Hadley cell.
- Locally air cooled on large volcanoes
- *Ice particle radius ~ 5-8 microns (Clancy and Wolff, TES data)*

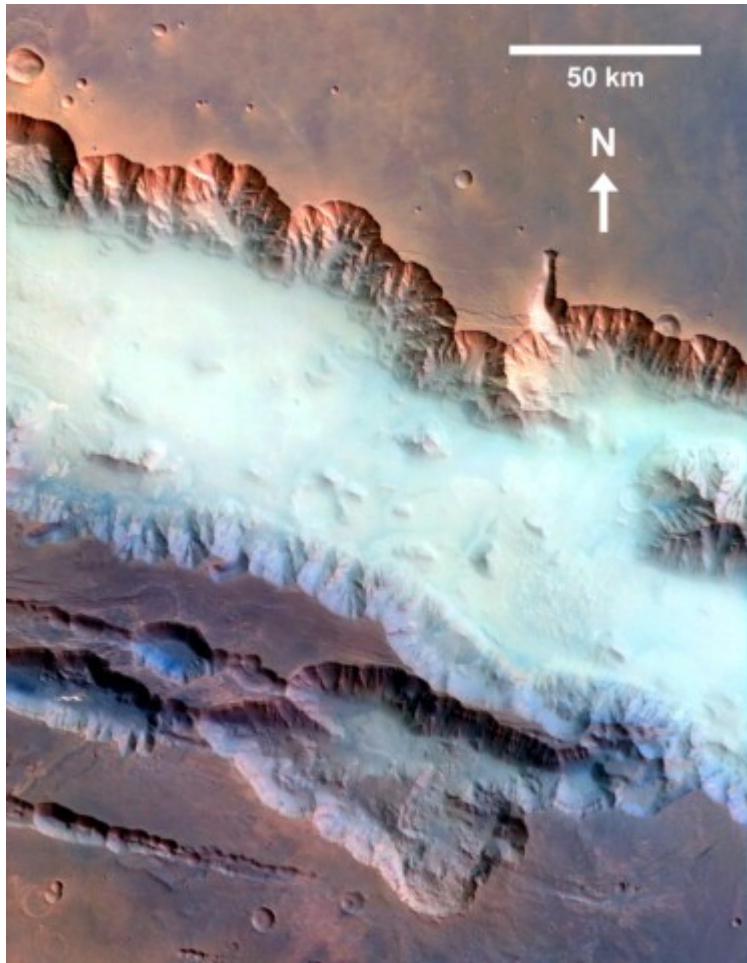
The “polar hood”

- Warm air meet cold polar air
- *Ice particle radii ~ 2-3 microns*

Ceinture de nuages d'aphélie

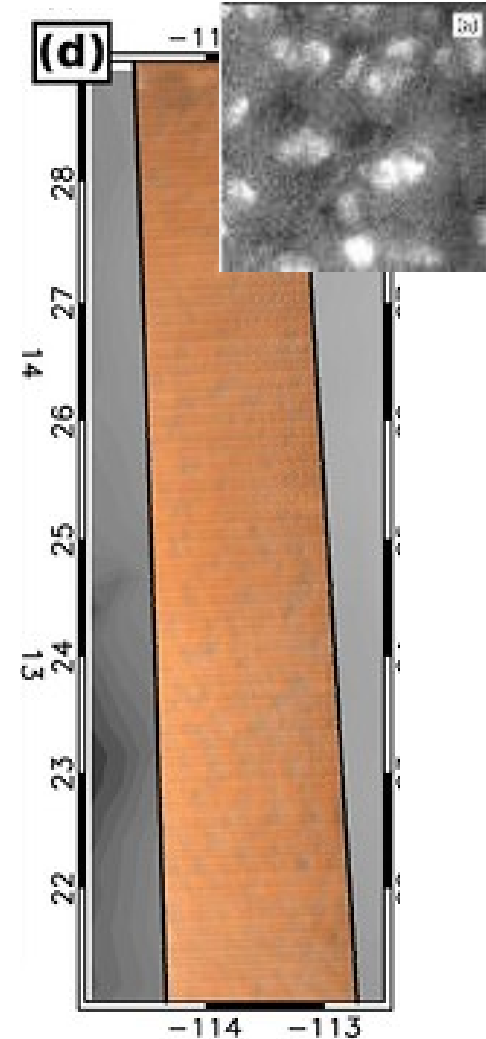
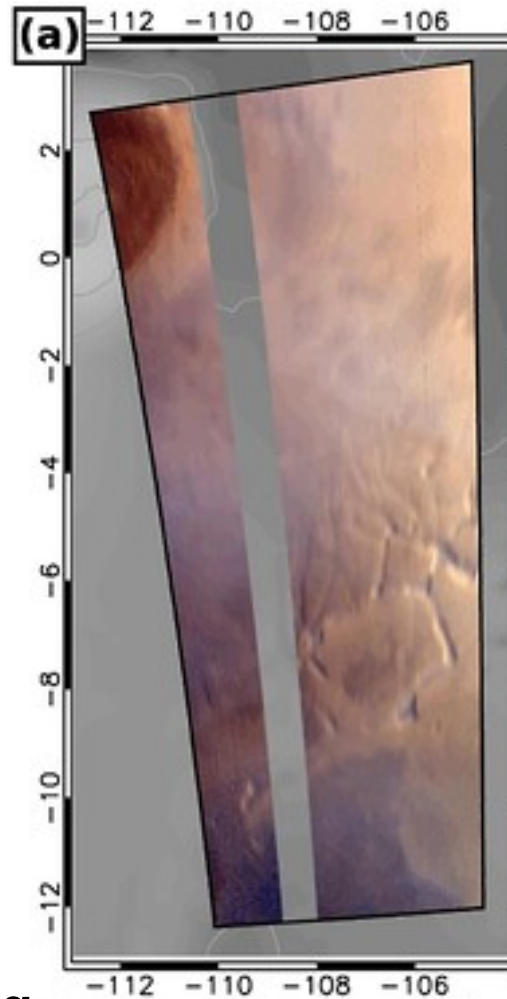


Nuages locaux



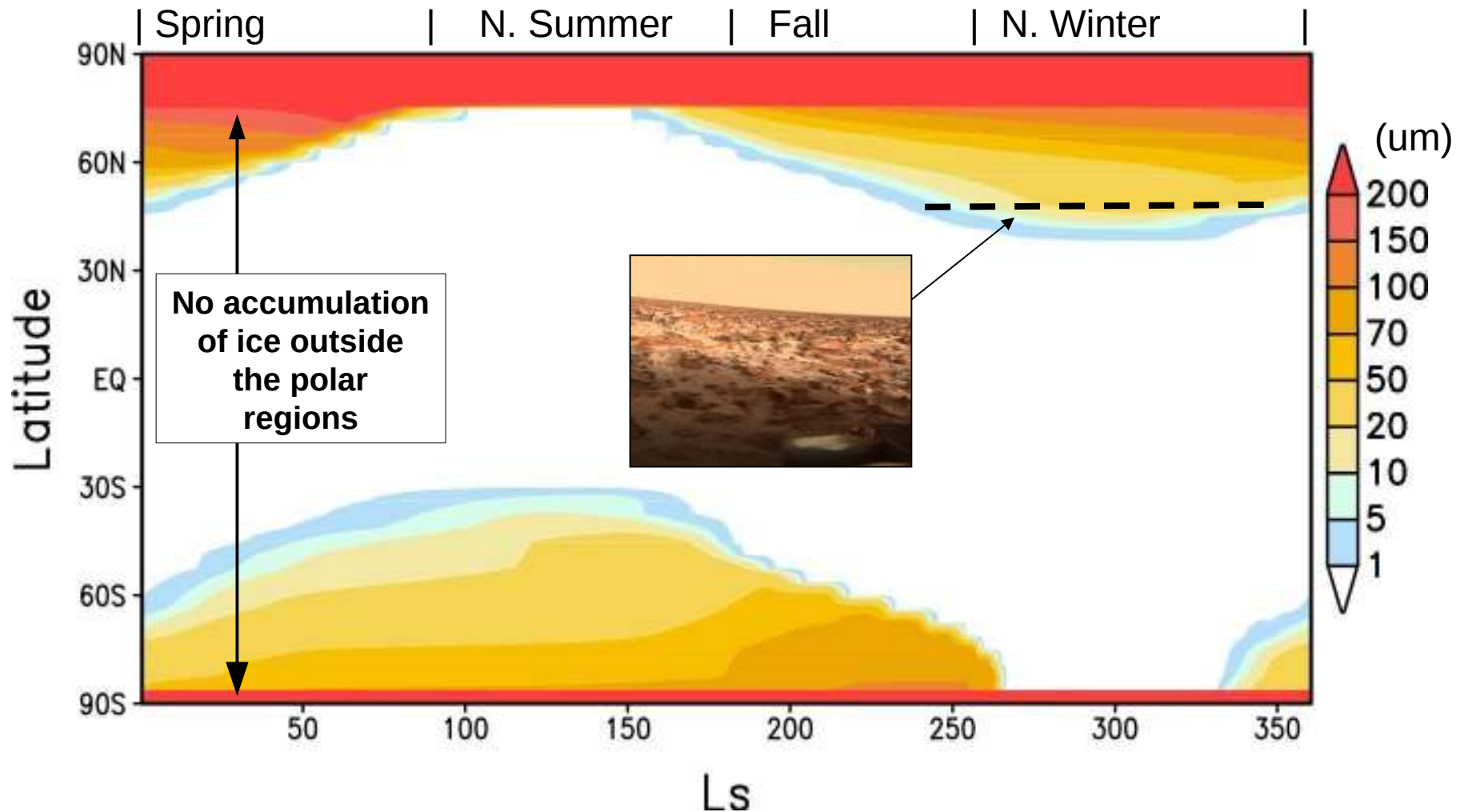
Nighttime and morning fog

[Möhlmann et al. 2009, Madeleine et al. 2012, Michaels et al. 2004]

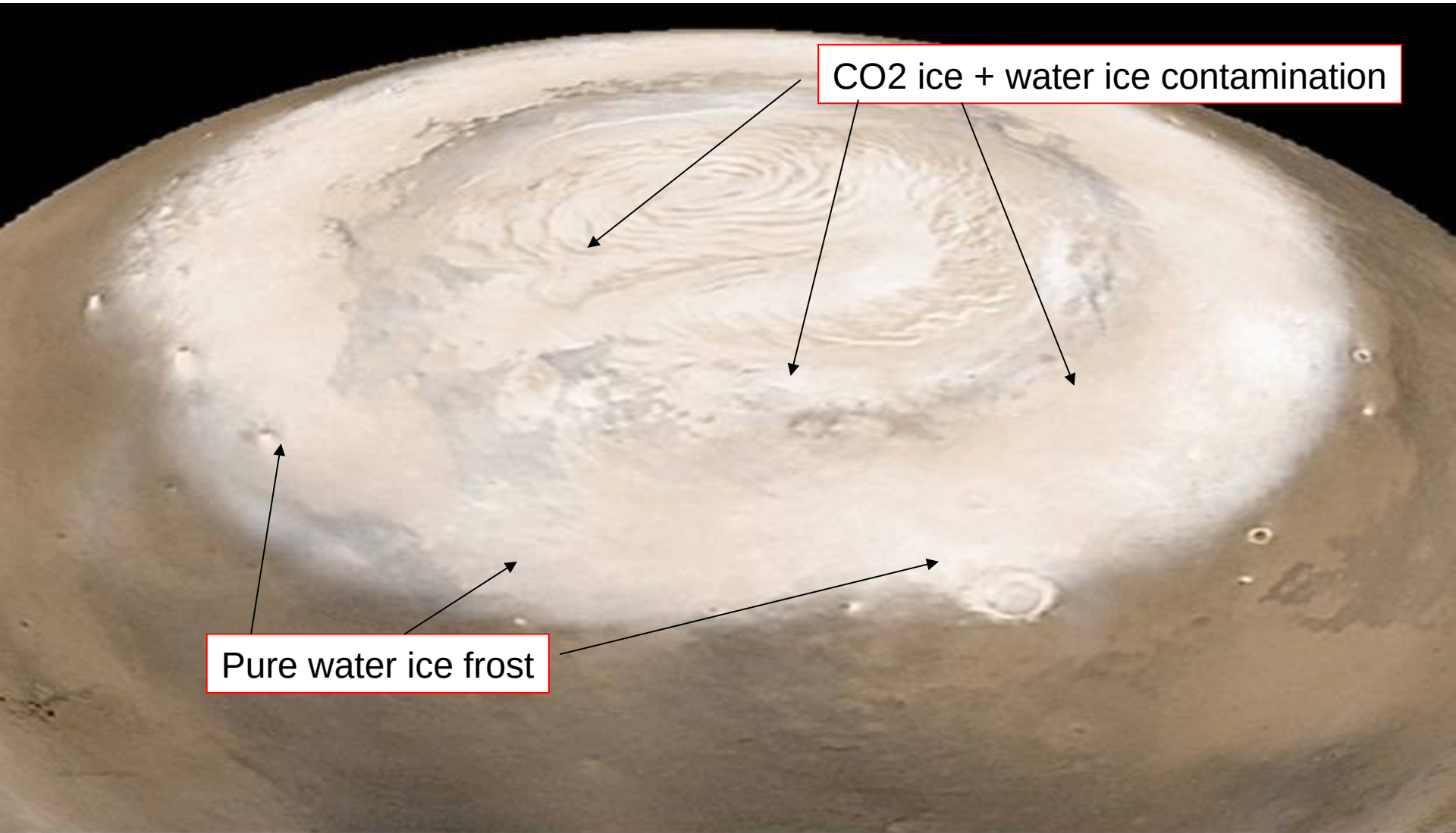


Cumulus clouds

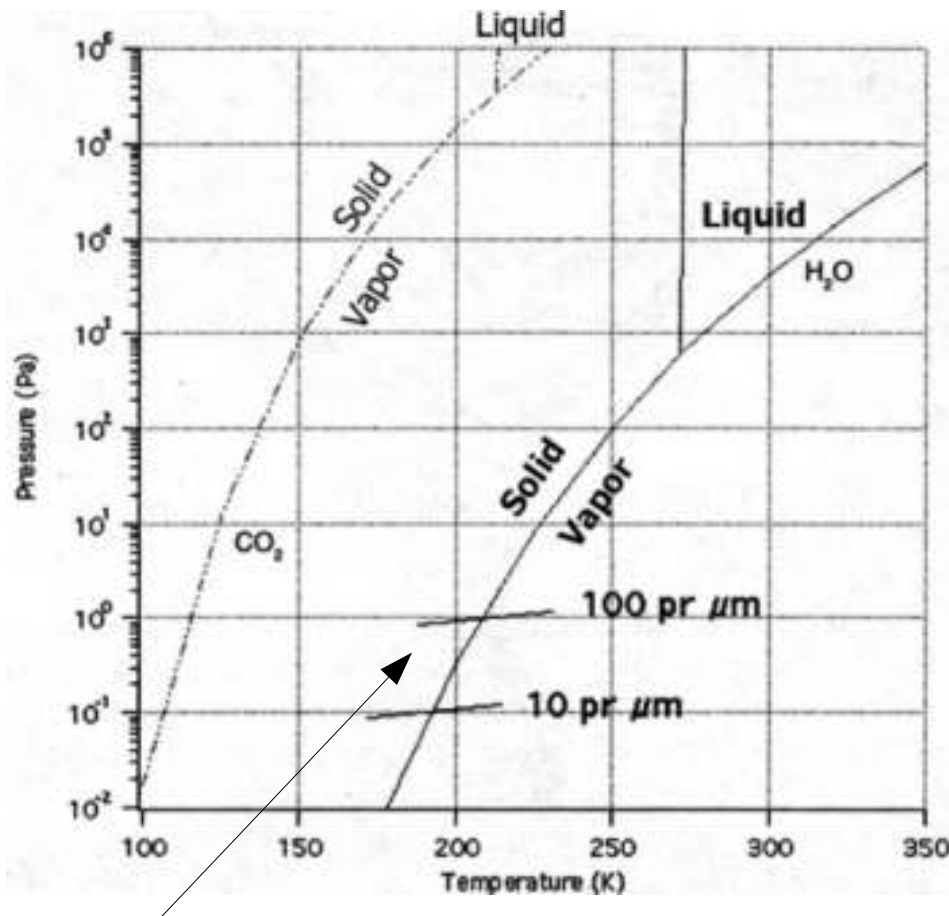
Givre de glace d'eau en surface



Calotte saisonnière au printemps



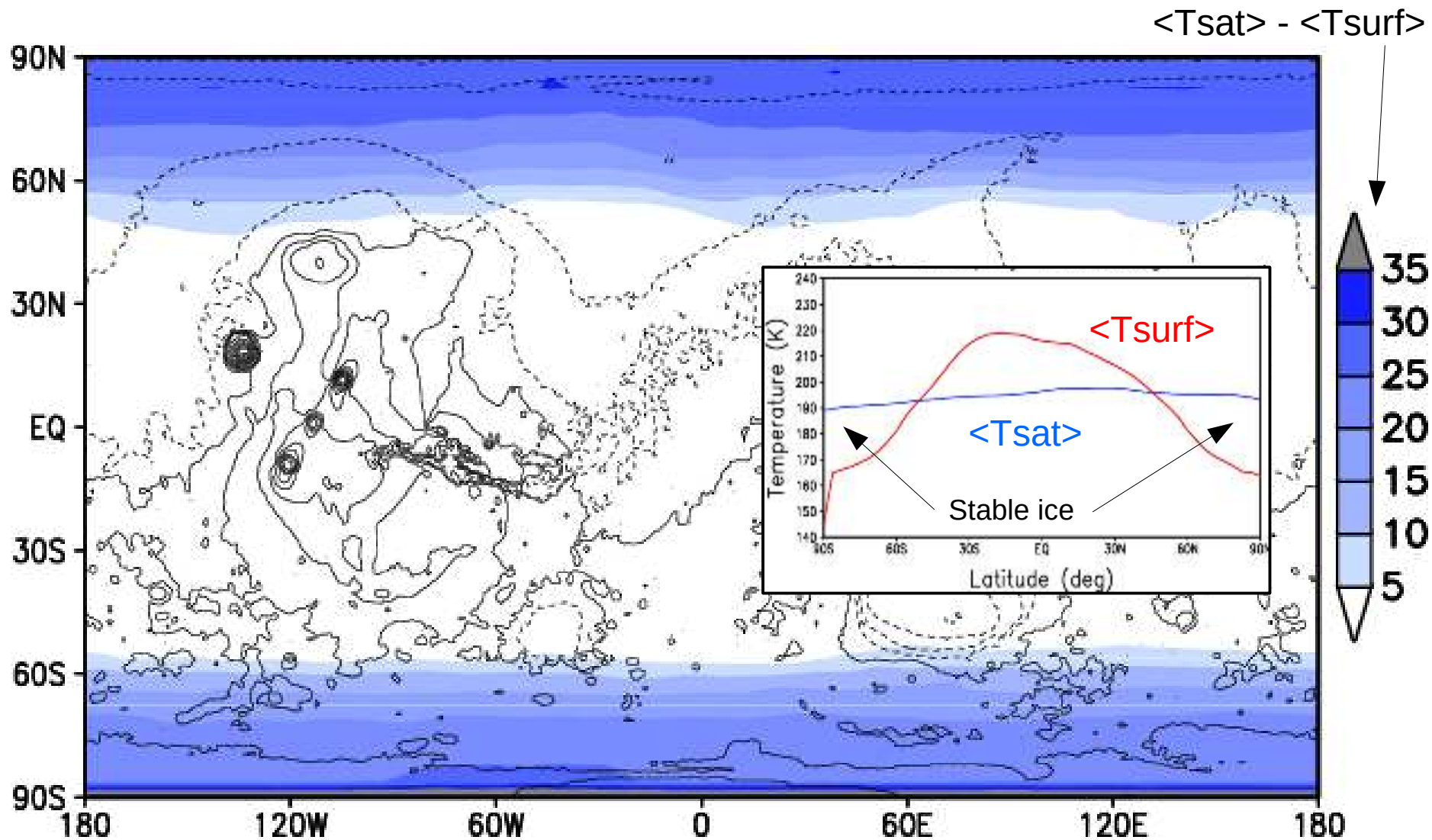
Stabilité de la glace en surface



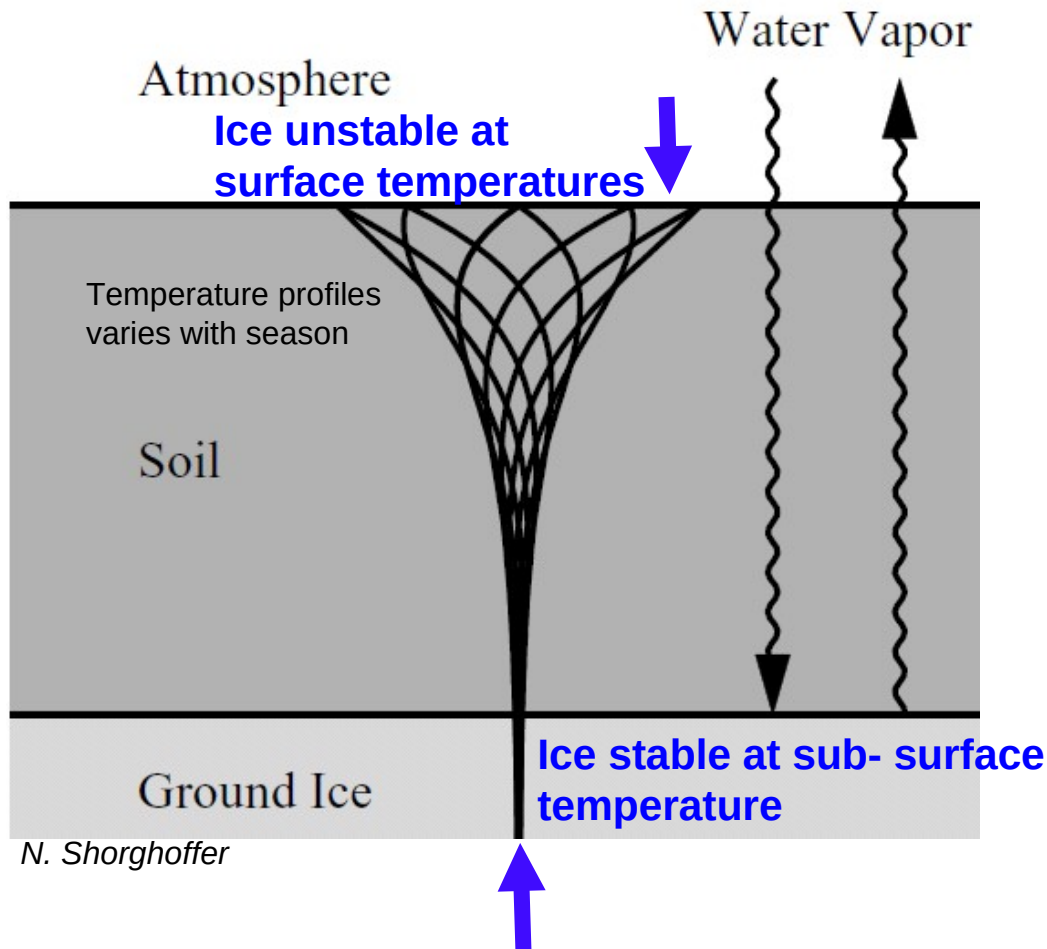
Gamme de pressions partielles de vapeur d'eau typique actuelle (équilibre liquide-vapeur autour de 200 K)

- Le diagramme de phase de l'eau montre **toujours** la pression **partielle** de vapeur d'eau en ordonnée et la température **de la surface d'eau** liquide (solide) à évaporer (sublimer)
- La sublimation est contrôlée par l'écart entre la pression de vapeur saturante à la température du condensat et la **pression de vapeur de l'air environnant** (l'évaporation se moque de la pression totale !)
- **Exemple** : 100 μm précipitables de vapeur d'eau correspondent à 1 Pa de pression de vapeur. La température pour laquelle p_{sat} vaut 1 Pa est d'environ 210 K. Donc dans ces conditions, la glace n'est stable qu'en dessous de 210 K (appelée T_{sat}). 27

Stabilité de la glace du sous-sol



Stabilité de la glace du sous-sol



Subsurface Ice in equilibrium with the atmosphere

Stabilité de la glace du sous-sol

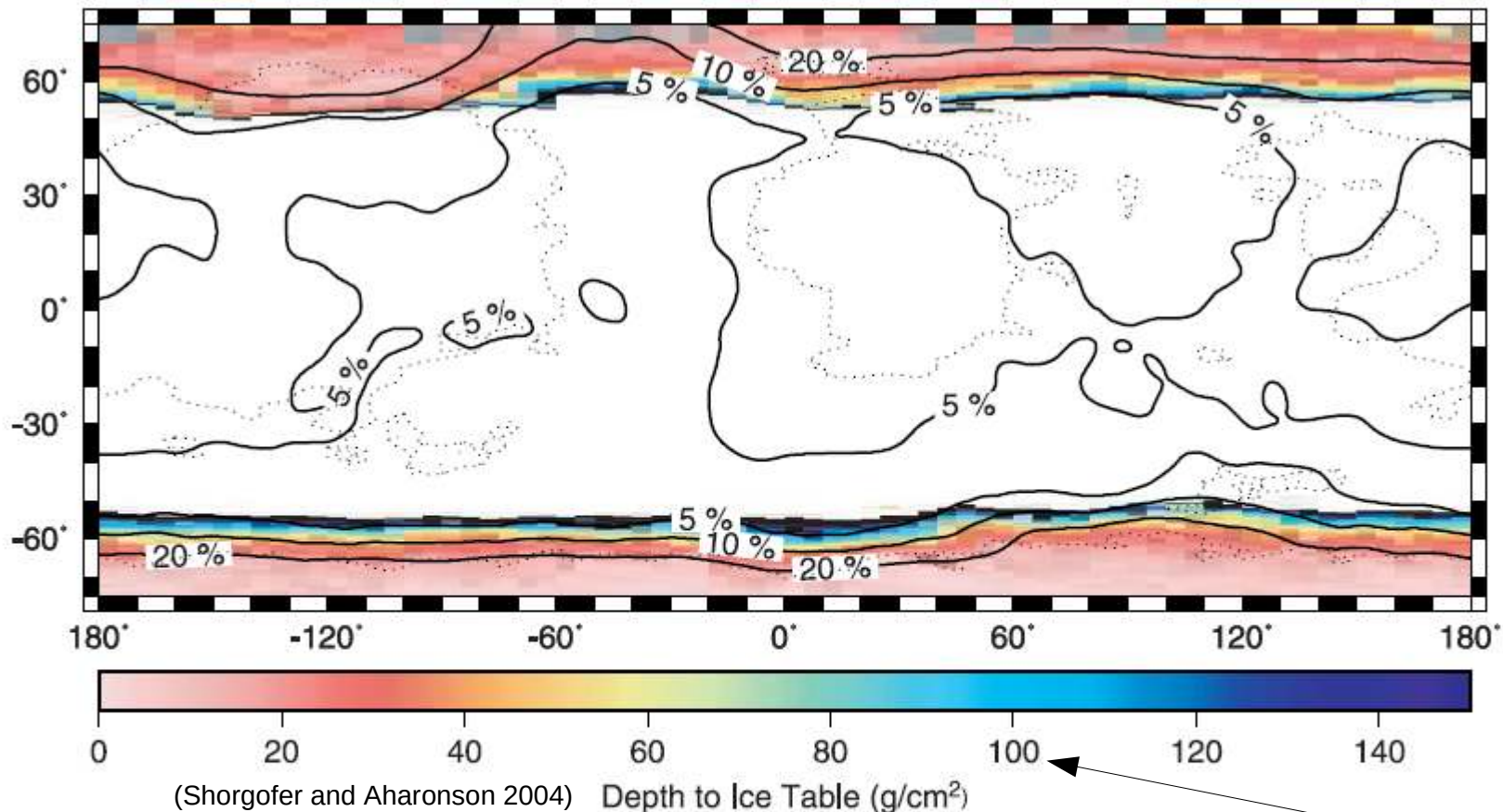


Figure 8. Color indicates depth to the ice table in g cm^{-2} when ice is in equilibrium with the atmospheric water vapor. Ground ice is unstable in the white area. Black segments indicate finite burial depths larger than 150 g cm^{-2} . Missing data points are shown in gray. Assumed volume fraction of ice is 40%, but the geographic boundary between icy and ice-free soil is independent of the ice fraction. Solid contours indicate water-equivalent hydrogen content in percent determined from neutron spectroscopy [Feldman *et al.*, 2004]. The dotted lines are $200 \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$ contours of thermal inertia.

Équiv.
à 1m

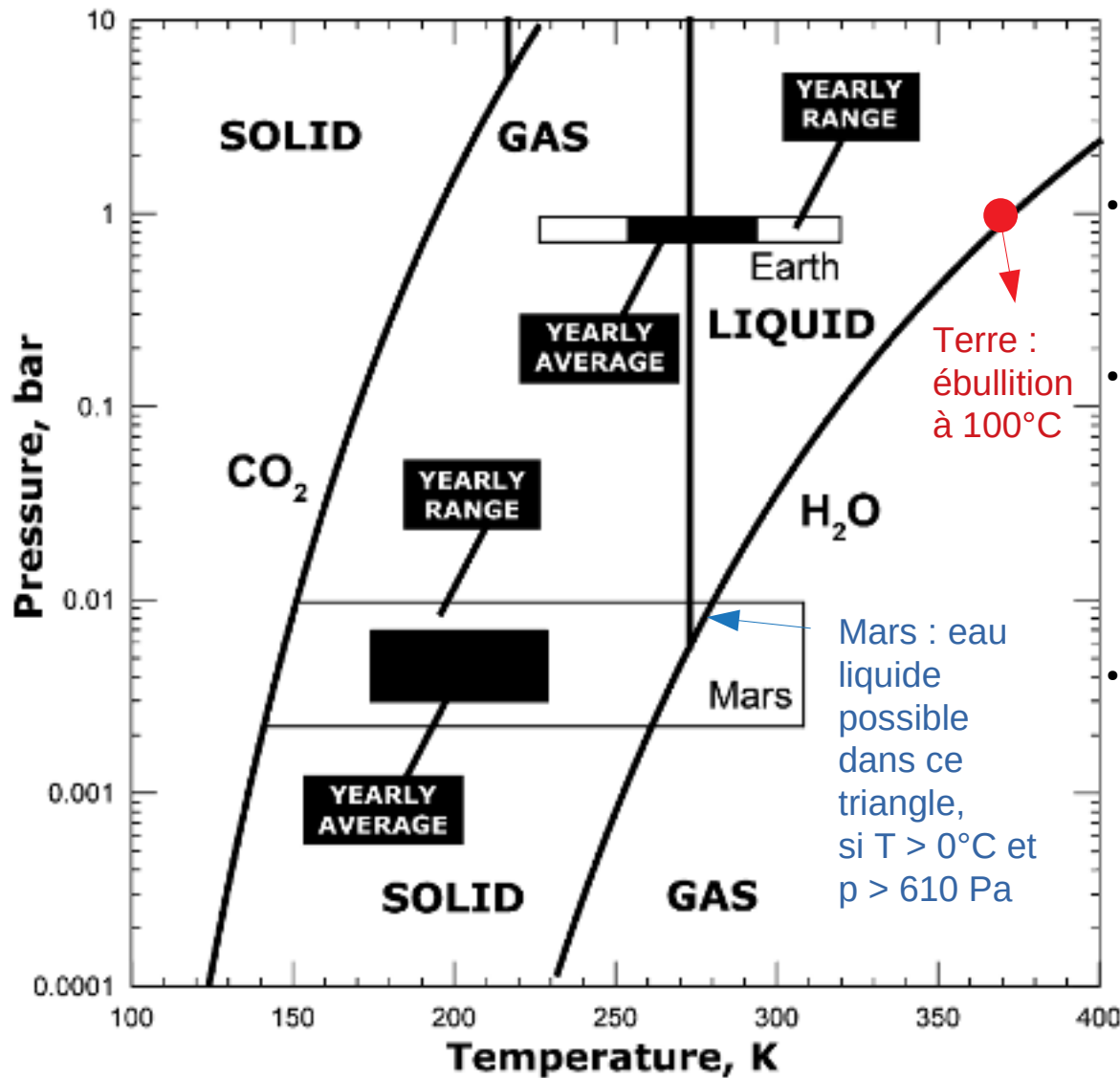
Résumé stabilité de la glace

Basic facts learned from present-day water cycle observations and modelling :

1. A « closed » water cycle
2. Surface water ice cannot accumulate outside the polar regions
3. Subsurface water ice can be stable down to $\sim 55^\circ$ latitude (on flat surface)

What about surface liquid water ?

Ne pas confondre évaporation et ébullition !



- L'ébullition est contrôlée par l'écart entre la pression de vapeur saturante à la température du liquide et la pression partielle **au sein du liquide**
- Cette pression partielle au sein du liquide est proche de la **pression atmosphérique**
- **Exemple sur Terre :** la pression partielle d'eau au sein d'une flaque est d'un bar. La température pour laquelle p_{sat} vaut 1 bar est de 100°C. Donc dans ces conditions, la flaque n'est stable qu'en dessous de 100°C.
- **Exemple sur Mars :** en-dessous de 610 Pa, l'eau liquide est impossible (point triple). Si la pression partielle de la flaque est de 800 Pa, la température pour laquelle p_{sat} vaut 800 Pa est de 4°C. Donc dans ces conditions, la flaque n'est stable qu'en dessous de 4°C. En dessous de 0°C elle gèle et se sublime. Maintenir de l'eau liquide (pure) sur Mars est donc quasi impossible

Recurring Slope Lineae



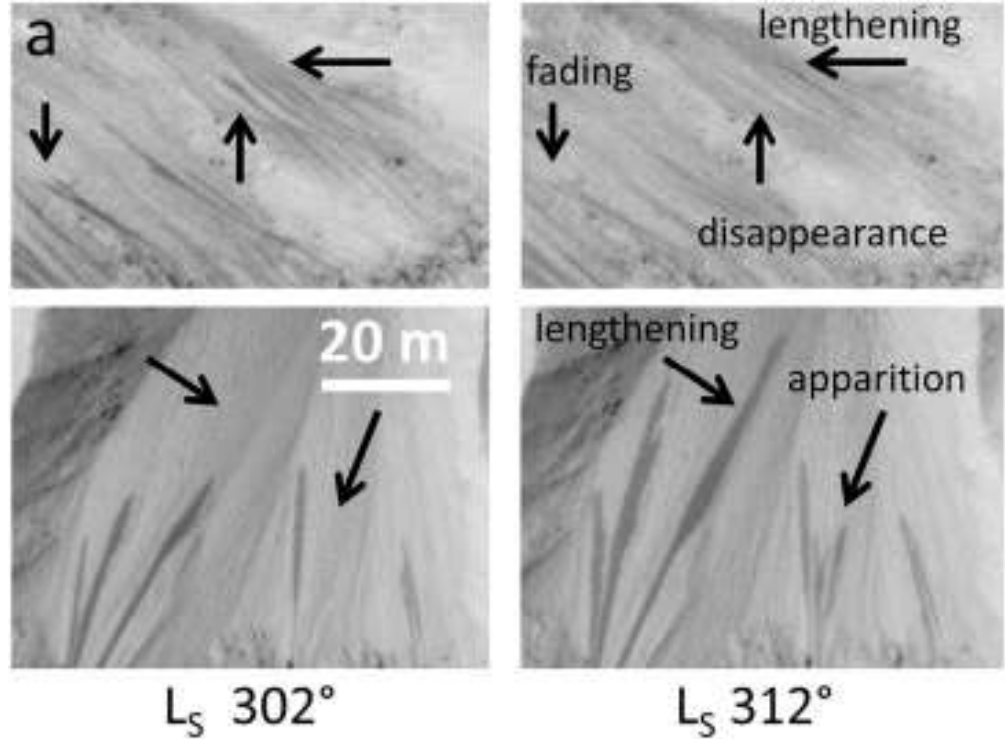
Warm slopes during southern spring and summer

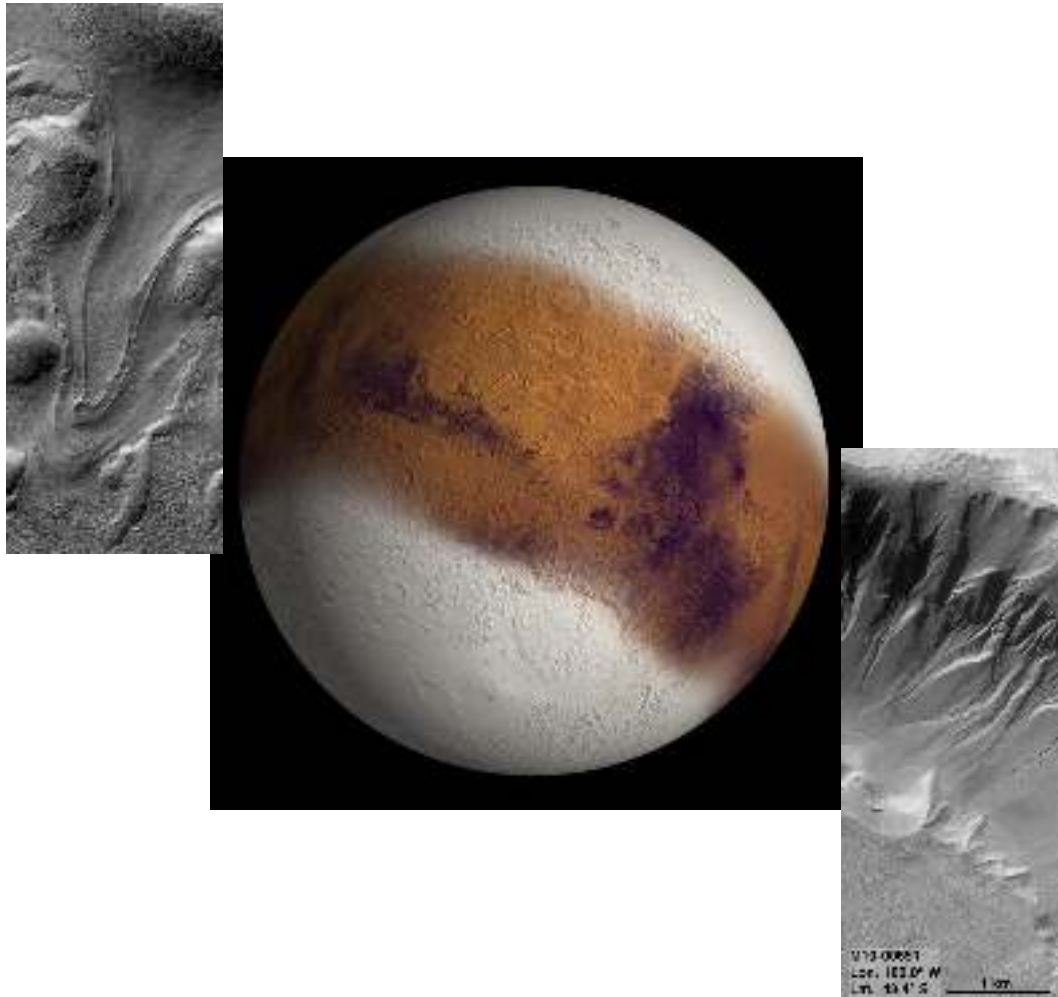
Flowing brines ?
(saumures)

McEwen et al., 2011
Ojha et al., 2015

OR

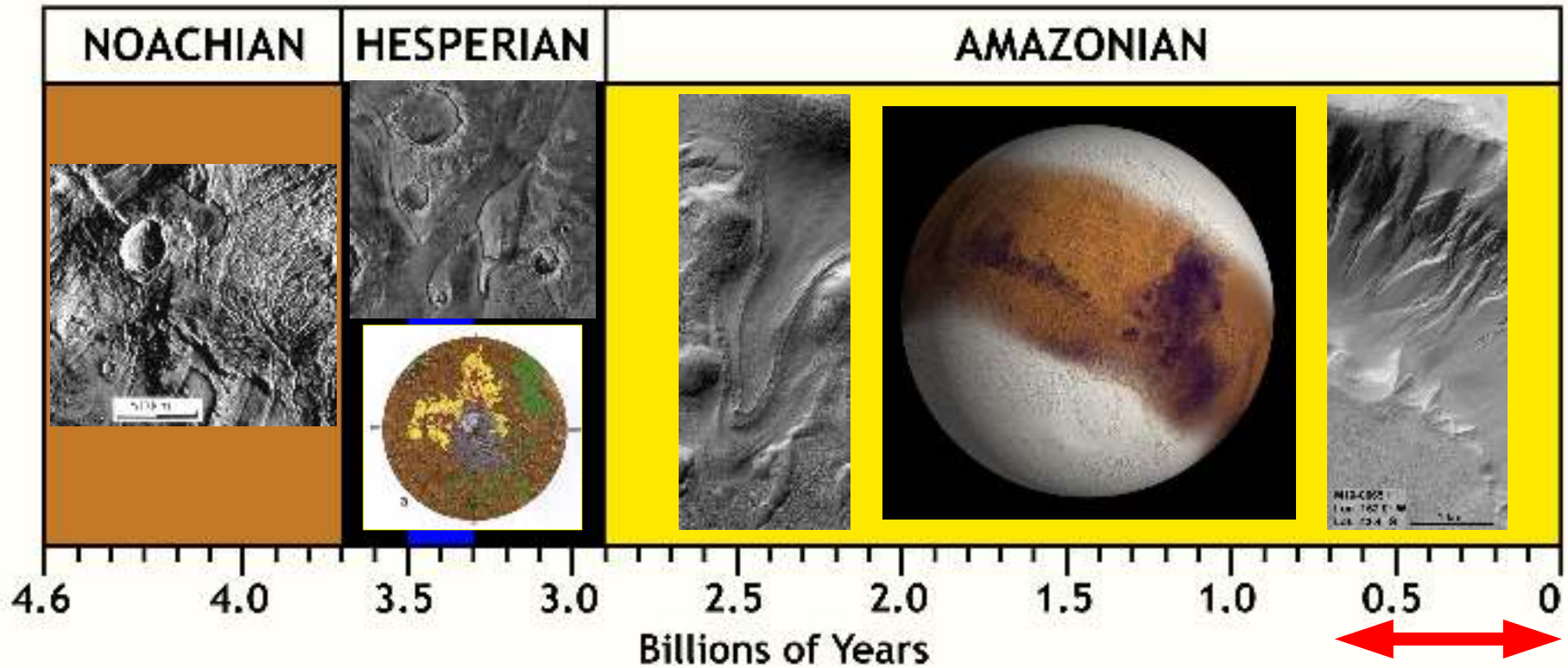
Dry dust-wind origin ?
(plus probable !)
Vincendon et al. 2019





Partie 3 :
Le cycle de l'eau
des dernières
centaines de Ma

Repères temporels



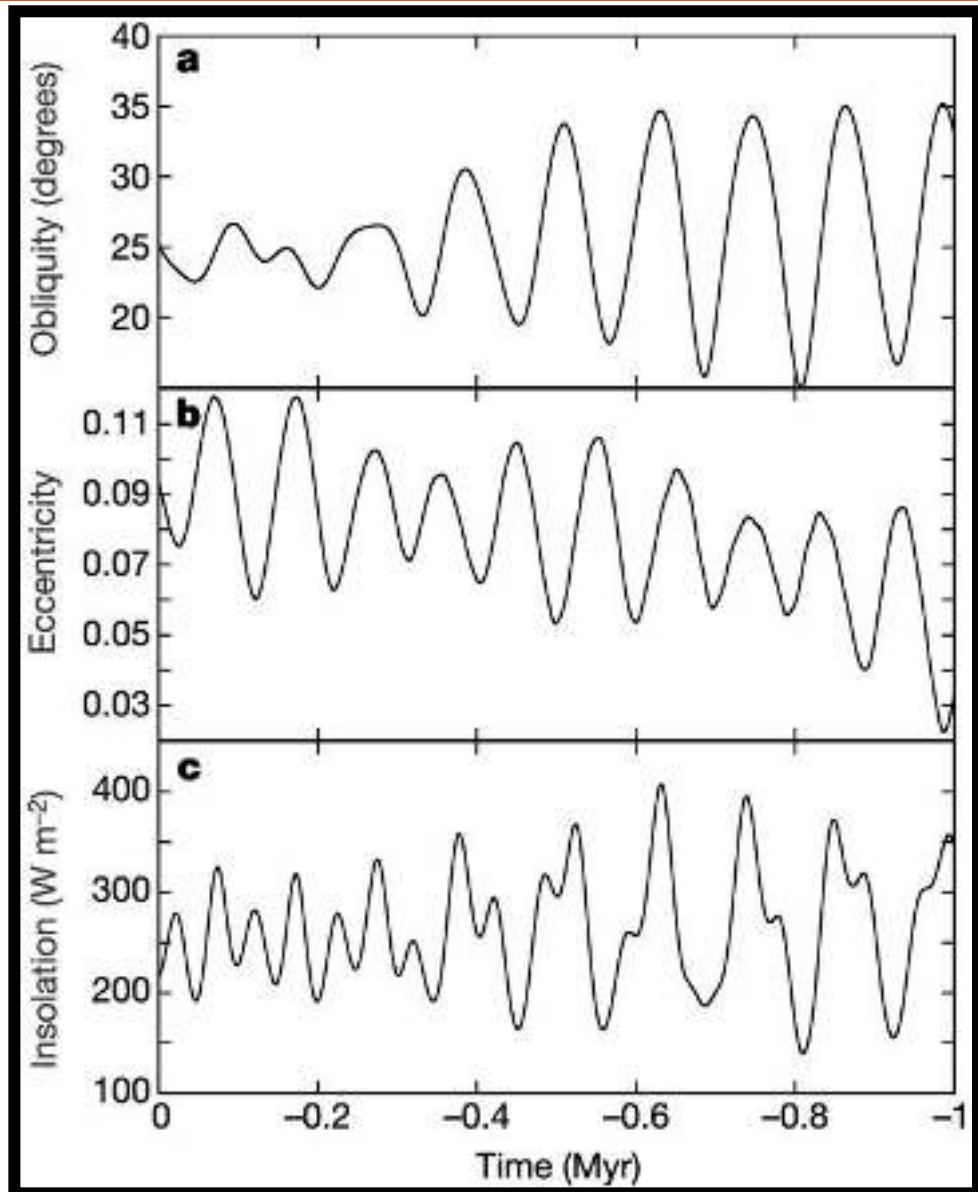
Définitions

- Obliquity (θ): angle between spin axis and ecliptic plane. (25.19°)
- Eccentricity (ε): the amount by which an orbit deviates from circularity. (0.093)
- Argument of Perihelion (L_{sp}): the orbital location at which Mars is closest to the Sun. (250.87°)

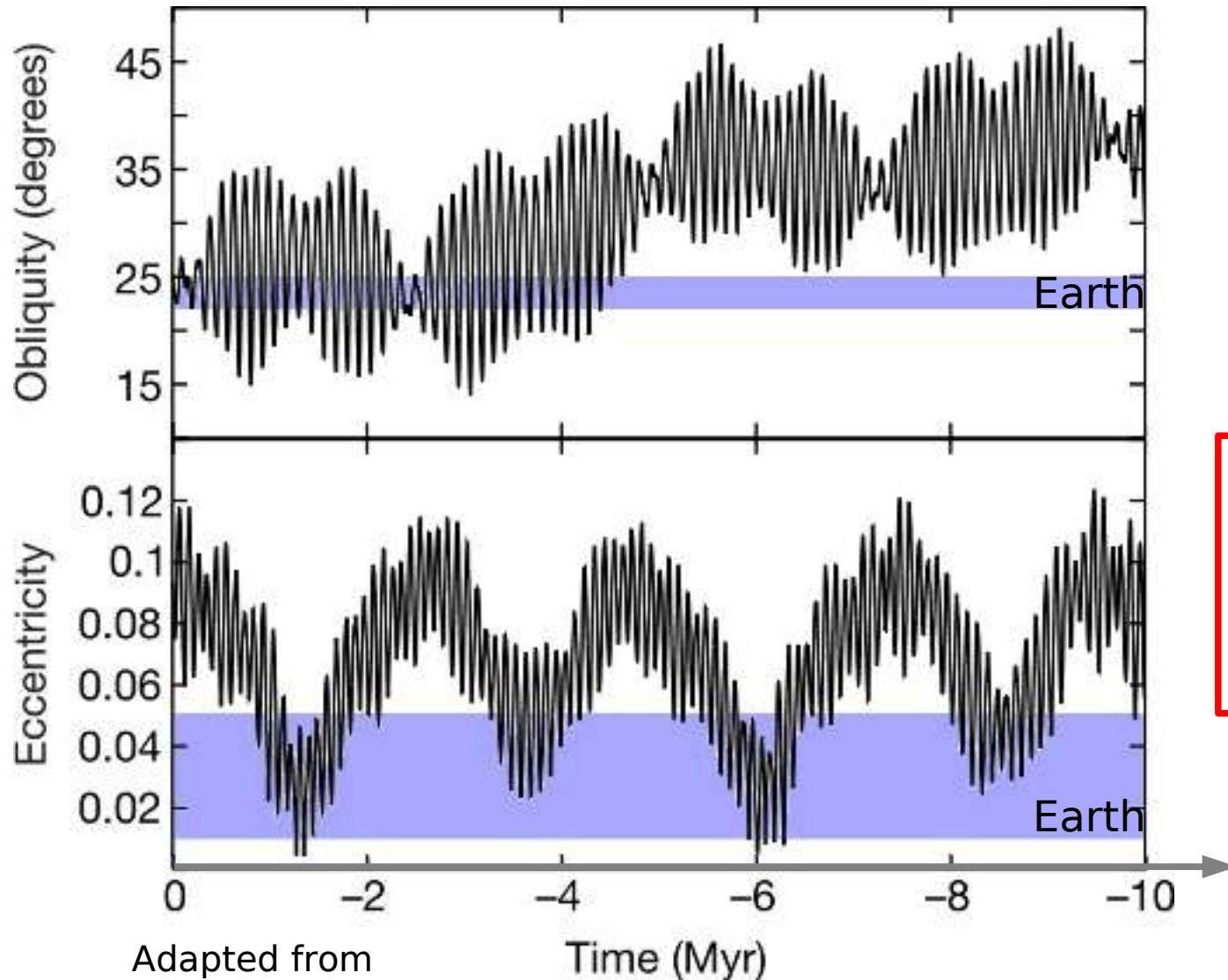
Evolution des paramètres orbitaux

0 - 1 Myr

Laskar et al. 2004



Evolution des paramètres orbitaux



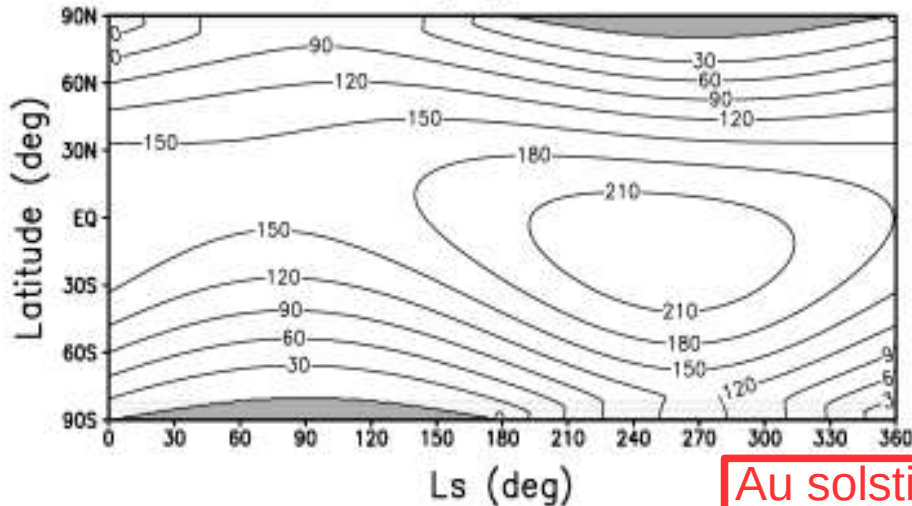
Today:
 $\theta = 25.2^\circ$
 $\varepsilon \sim 0.093$

Adapted from
Laskar et al. (2002)

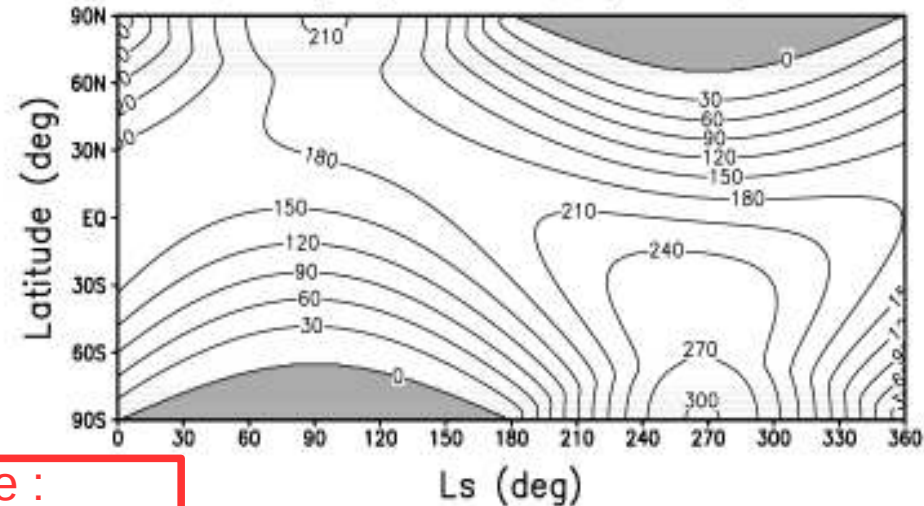
Mean insolation (W m^{-2})

To first order, obliquity does not change total insolation, only its distribution

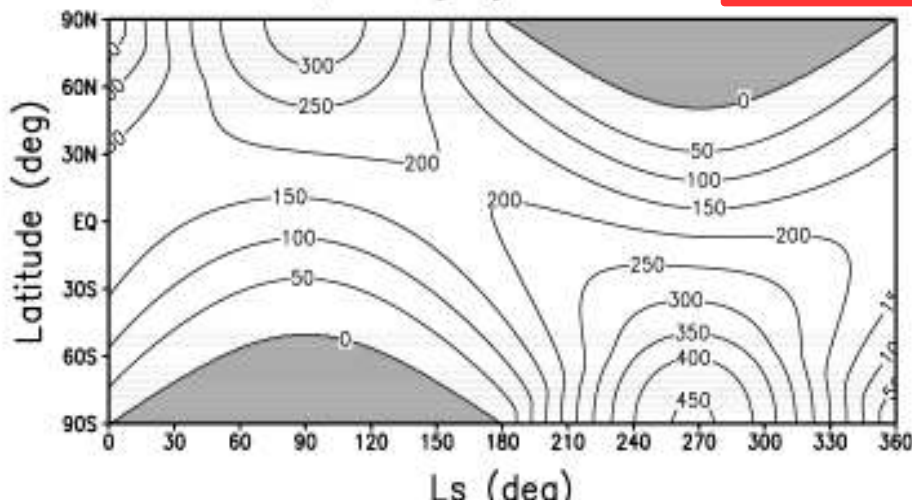
a) Obliquity = 10°



b) Obliquity = 25.2° (as present)



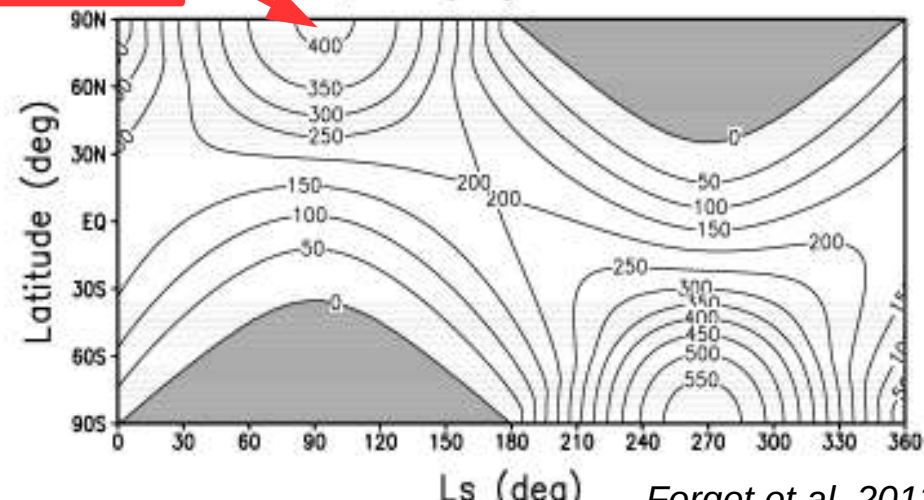
c) Obliquity = 40°



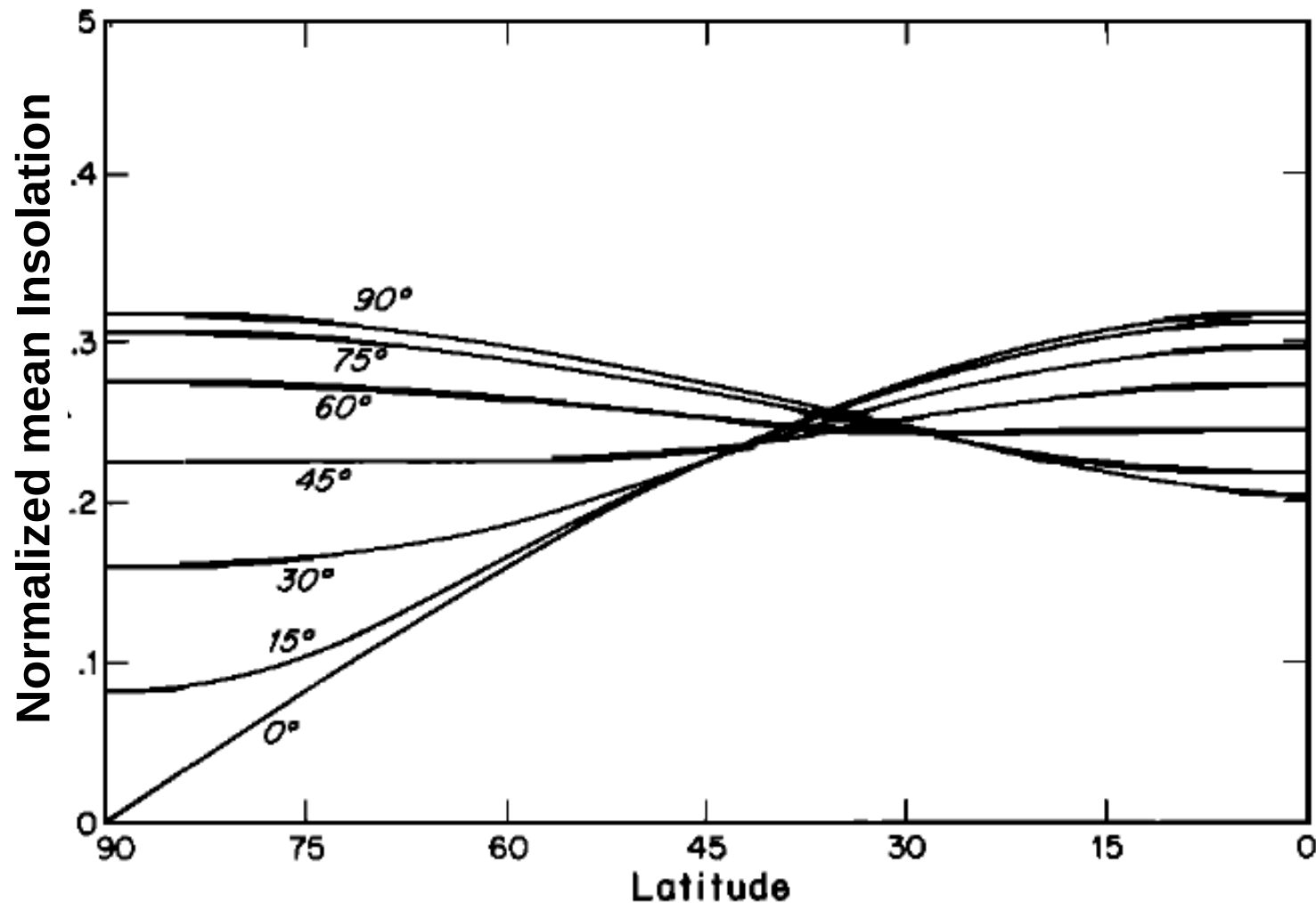
Au solstice :

$$\bar{I} = E^* \sin \theta$$

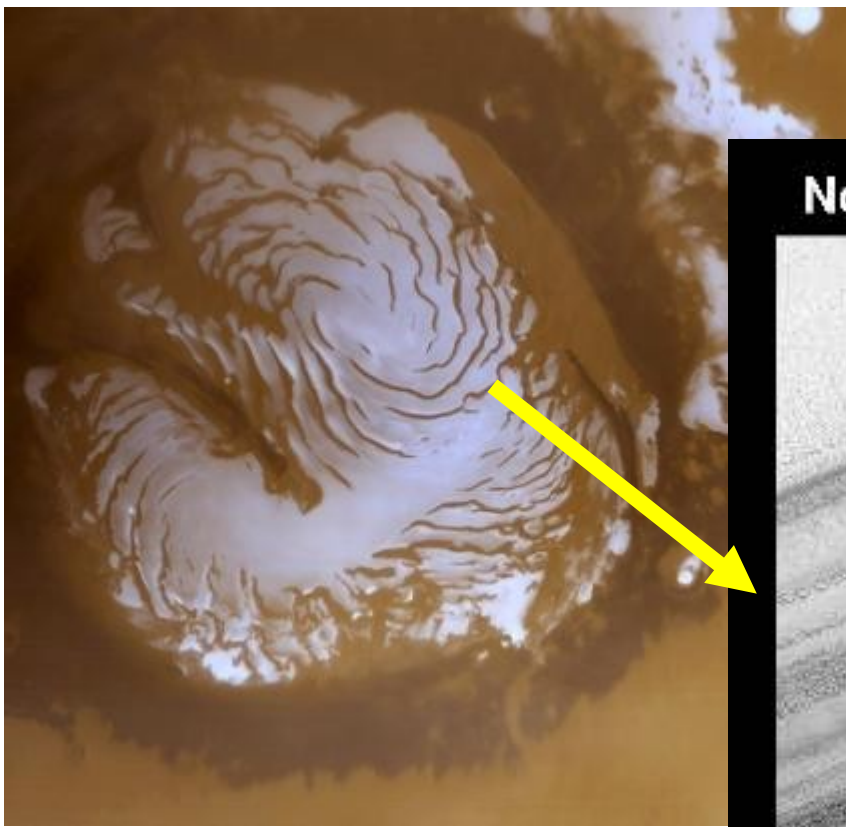
d) Obliquity = 55°



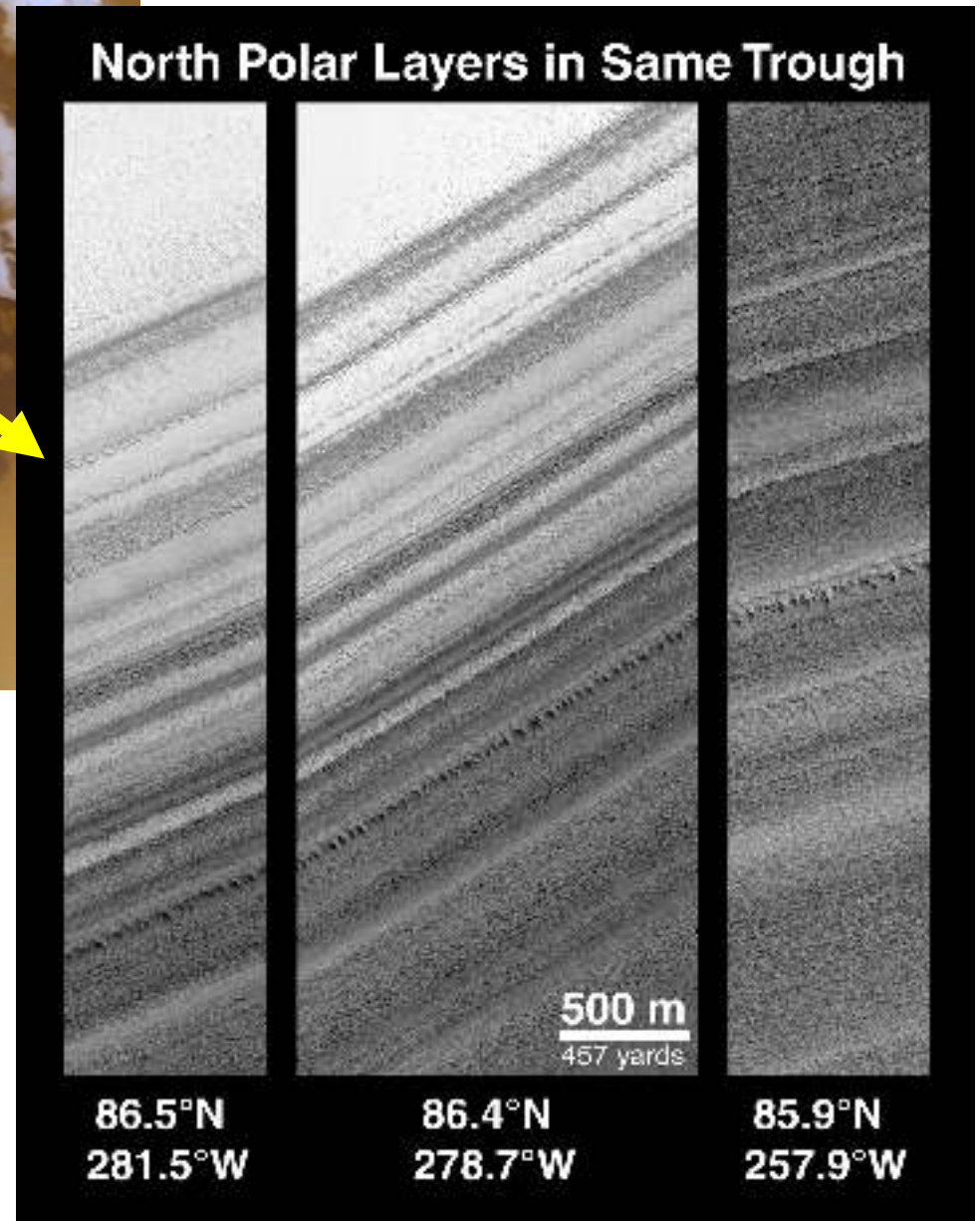
Moyenne annuelle de l'insolation



Insolation normalized to the solar constant at Mars mean distance from the Sun.



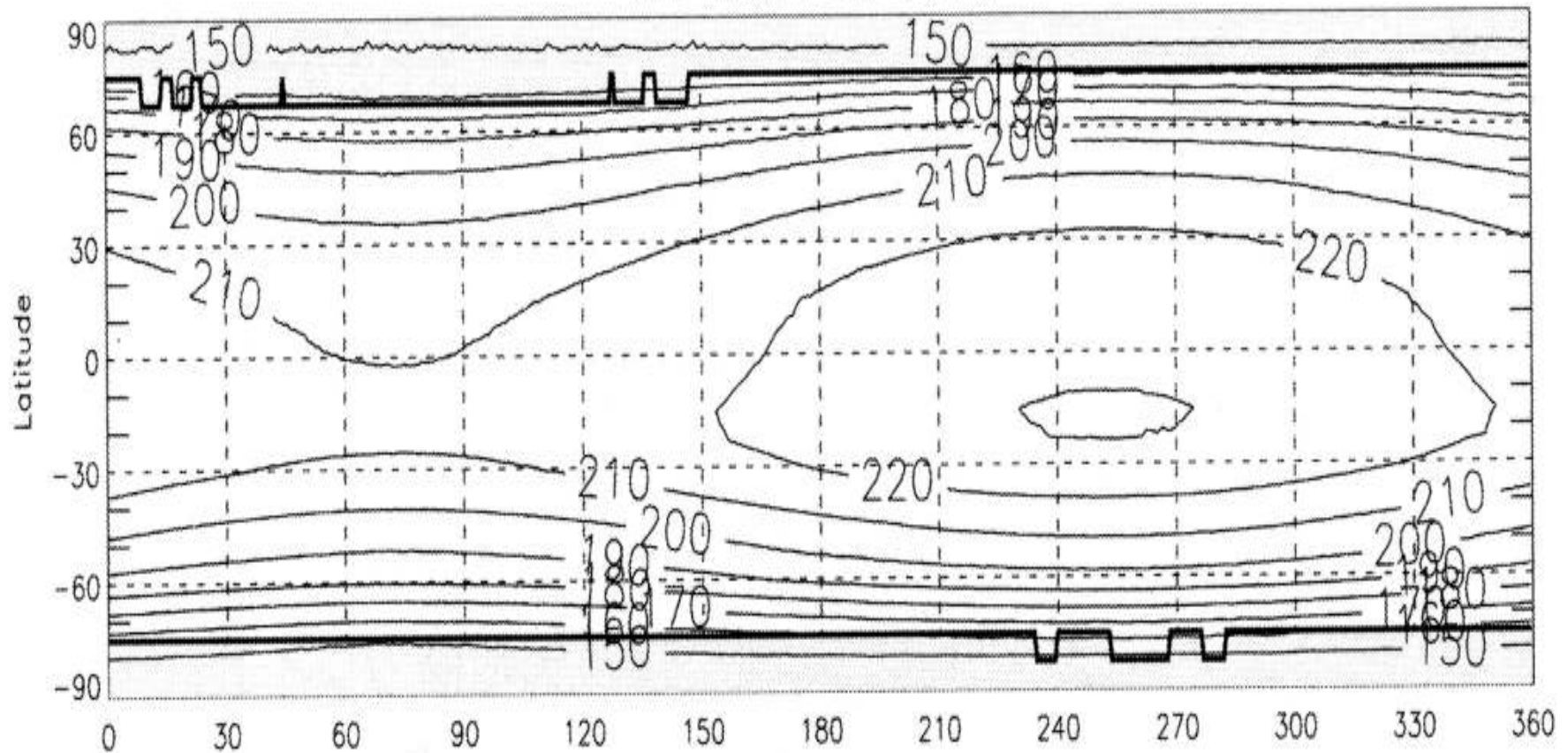
Record of climate variations in the polar layered terrain?



Zonal mean temperature (K) Obliquity = 0°

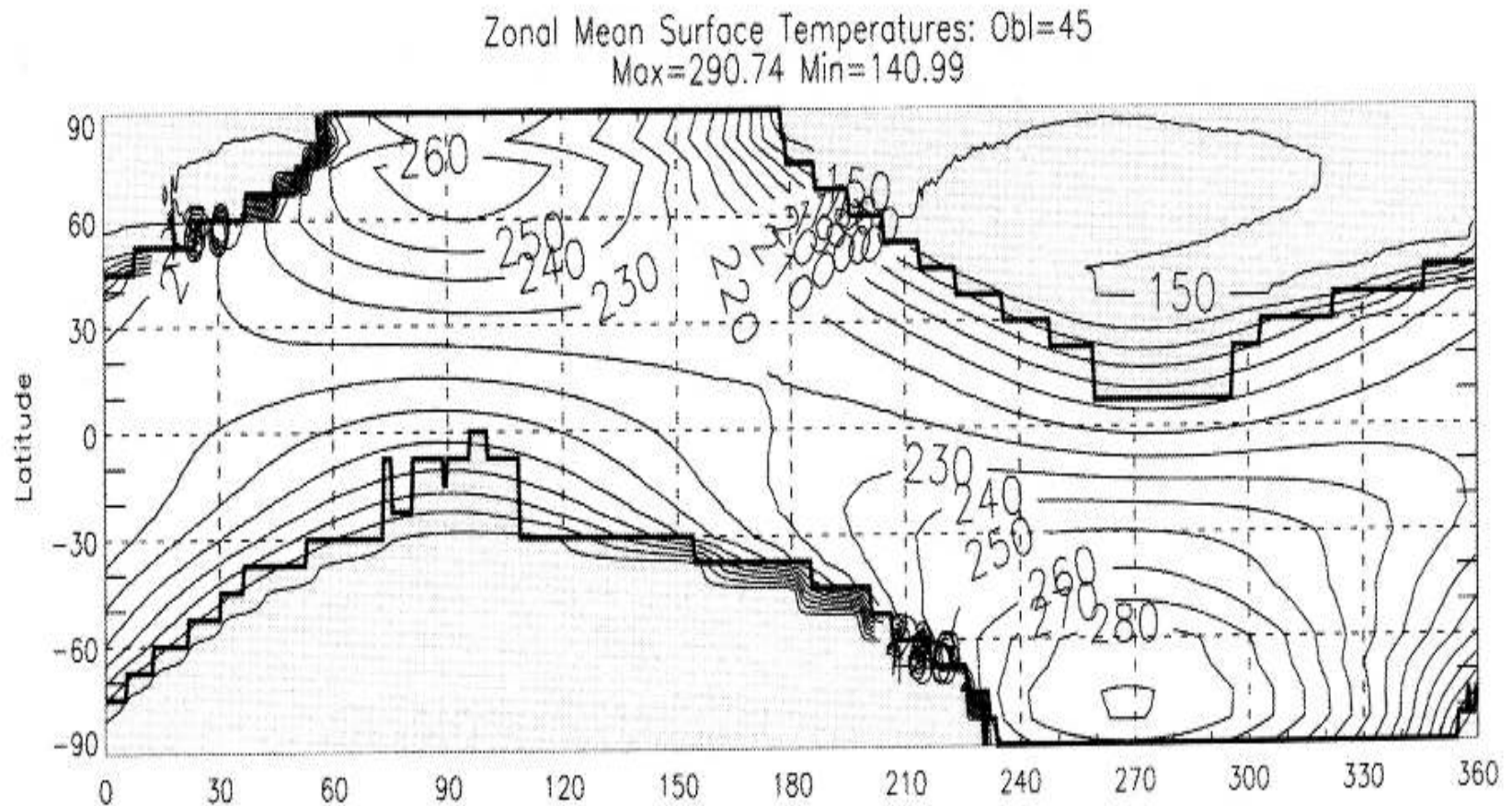
Haberle et al. 2003, NASA Ames model

Zonal Mean Surface Temperatures: Obl=00
Max=230.71 Min=144.40



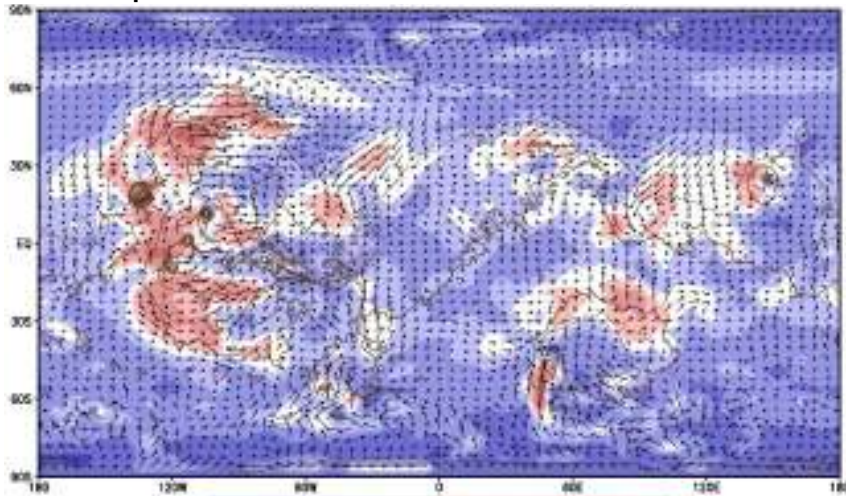
Zonal mean temperature (K) Obliquity = 45°

Haberle et al. 2003

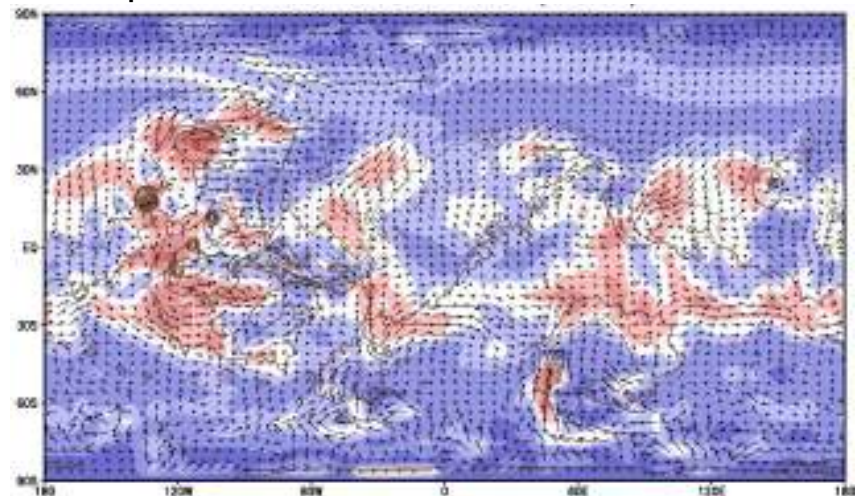


Impact de l'obliquité sur la dynamique

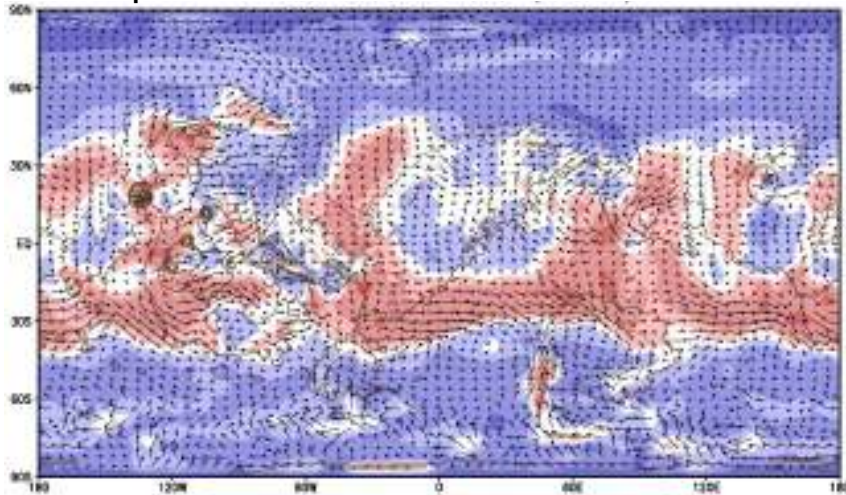
Obliquité de 15°



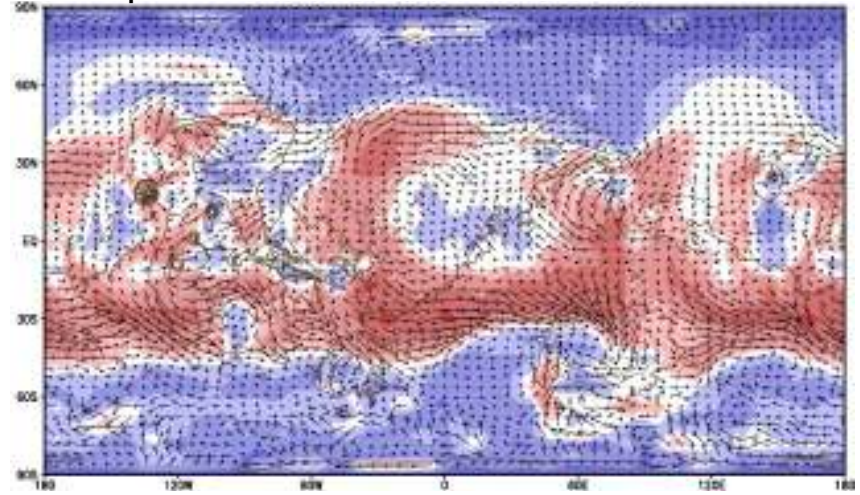
Obliquité de 25°



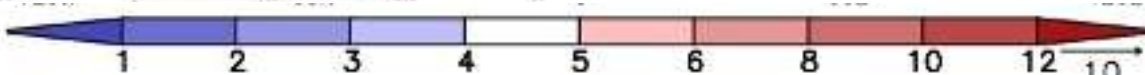
Obliquité de 35°



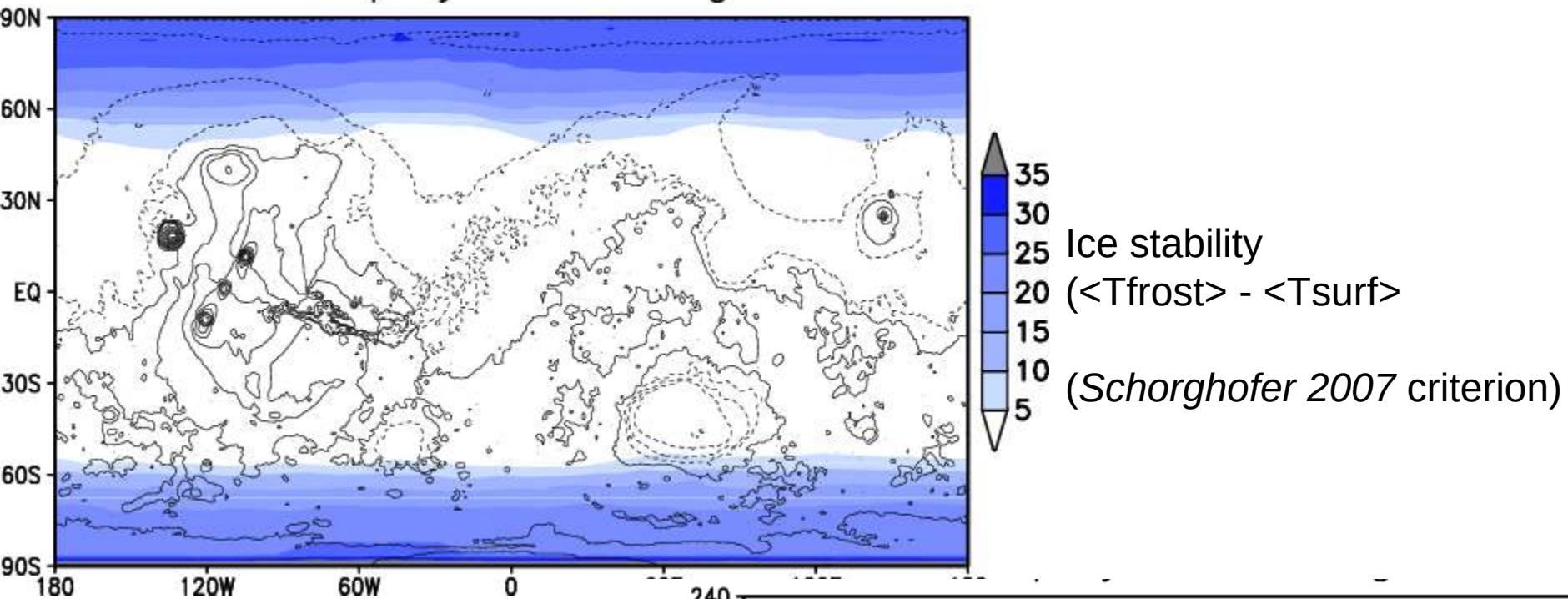
Obliquité de 45°



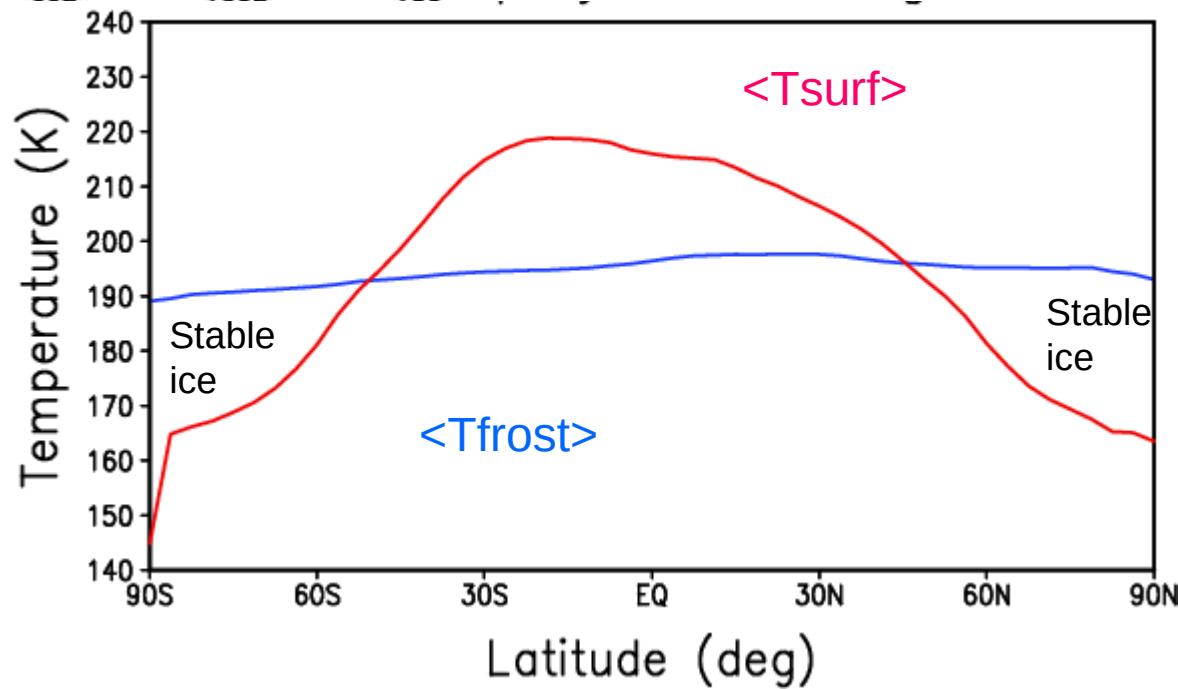
Vents moyens
annuels à 10m (m/s)



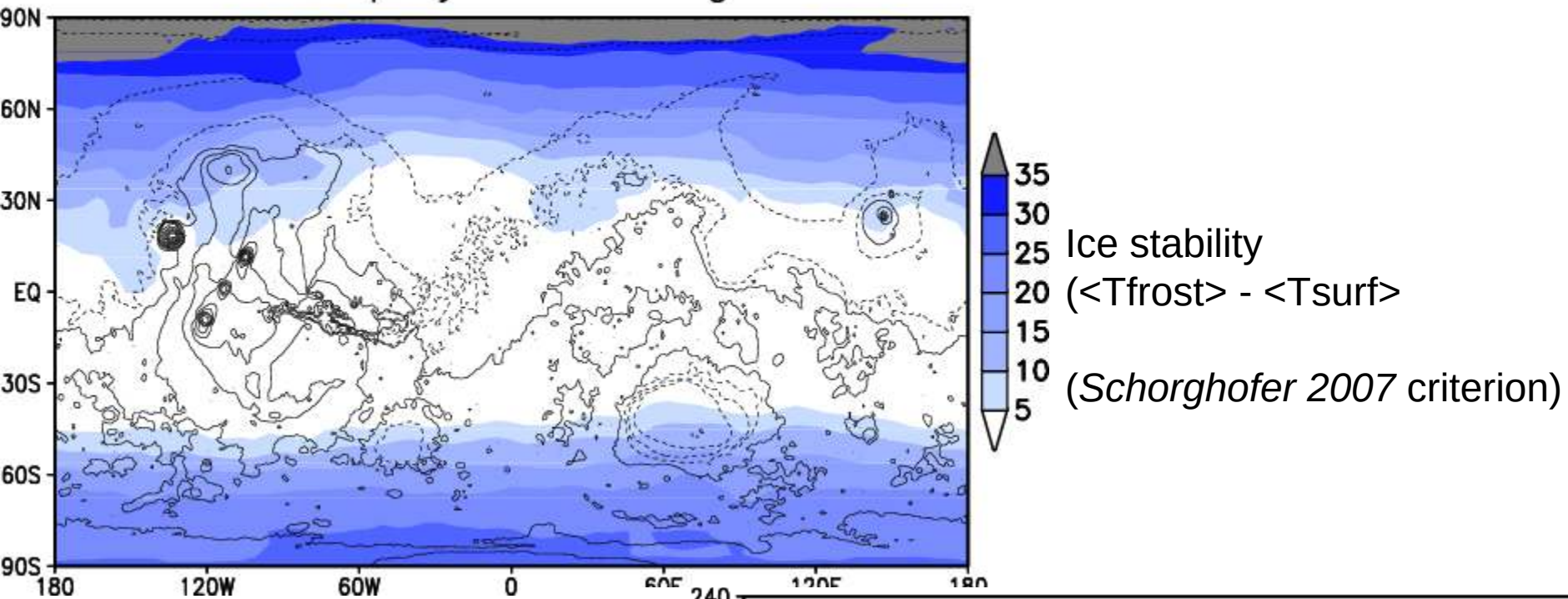
Obliquity = 25 deg



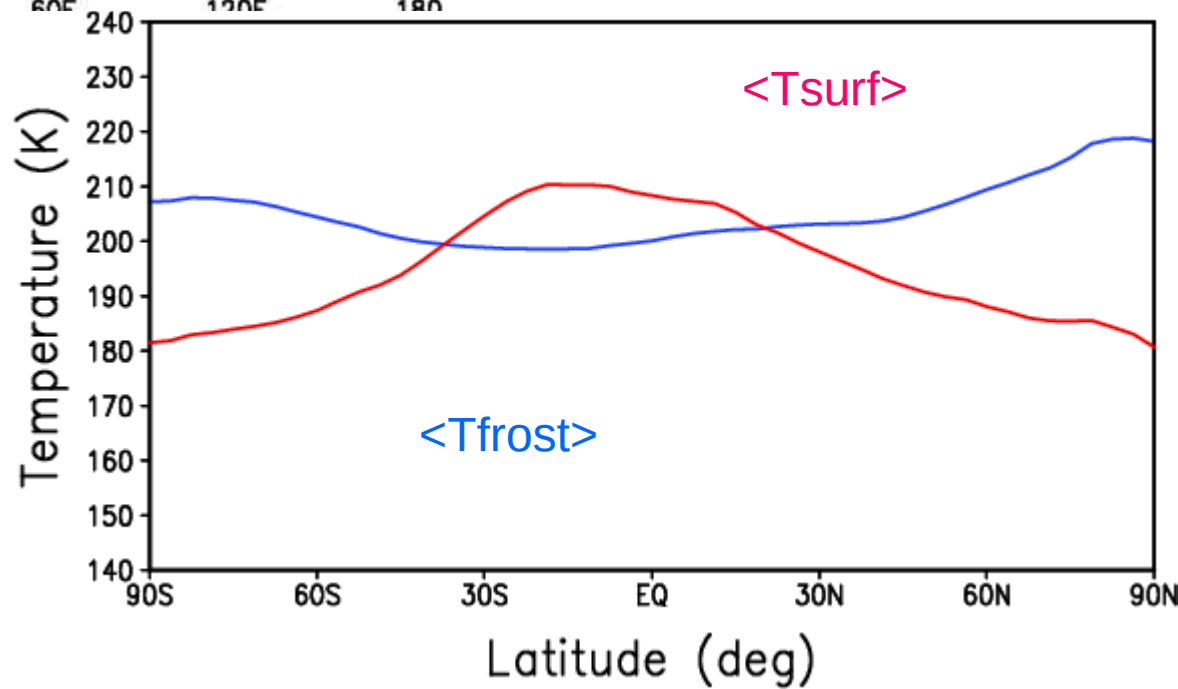
Forget et al. 2007



Obliquity = 45 deg

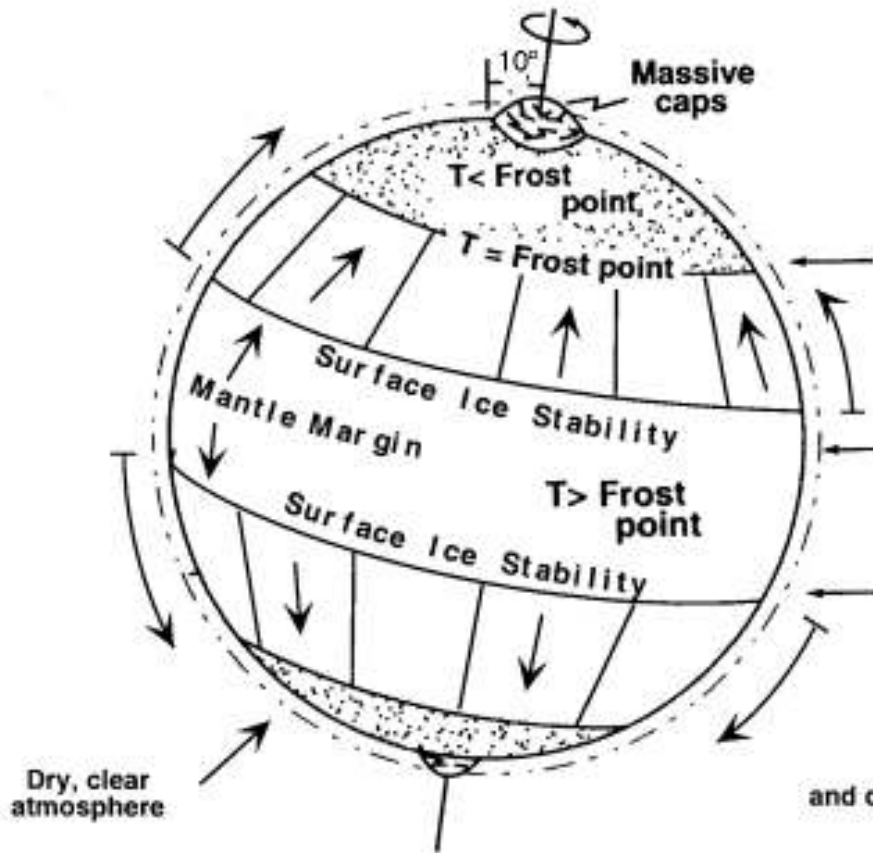


Forget et al. 2007

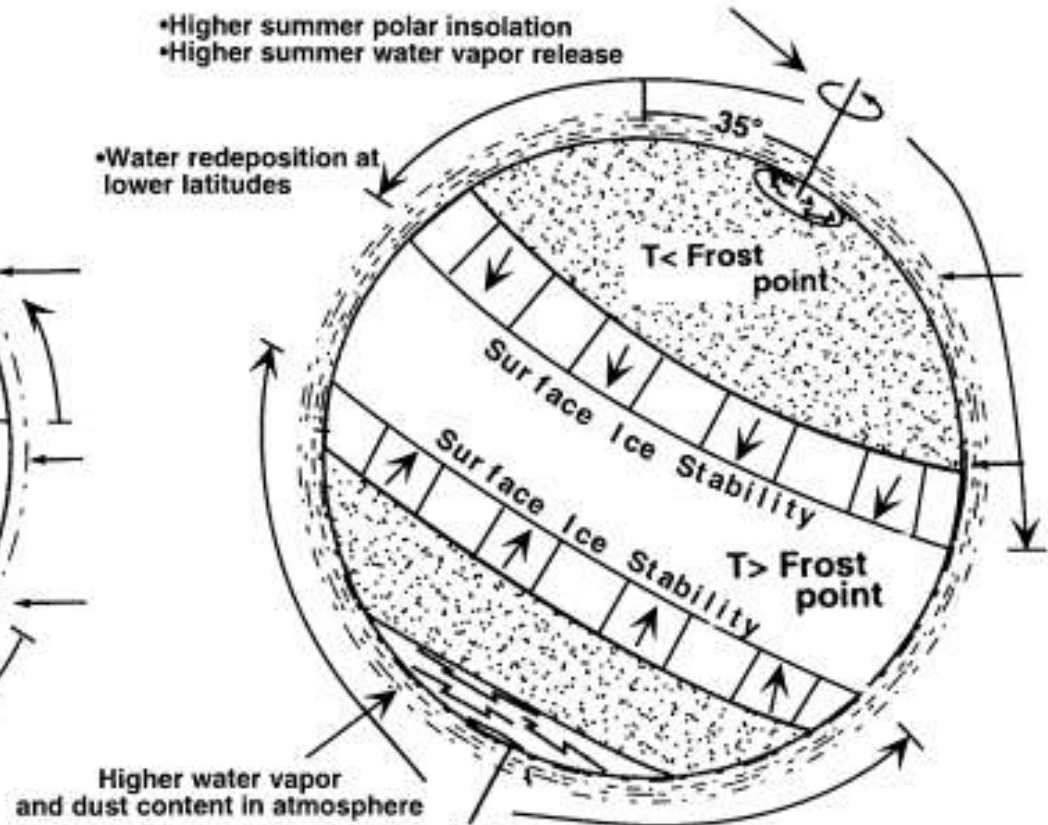


Formation du Latitude Dependent Mantle

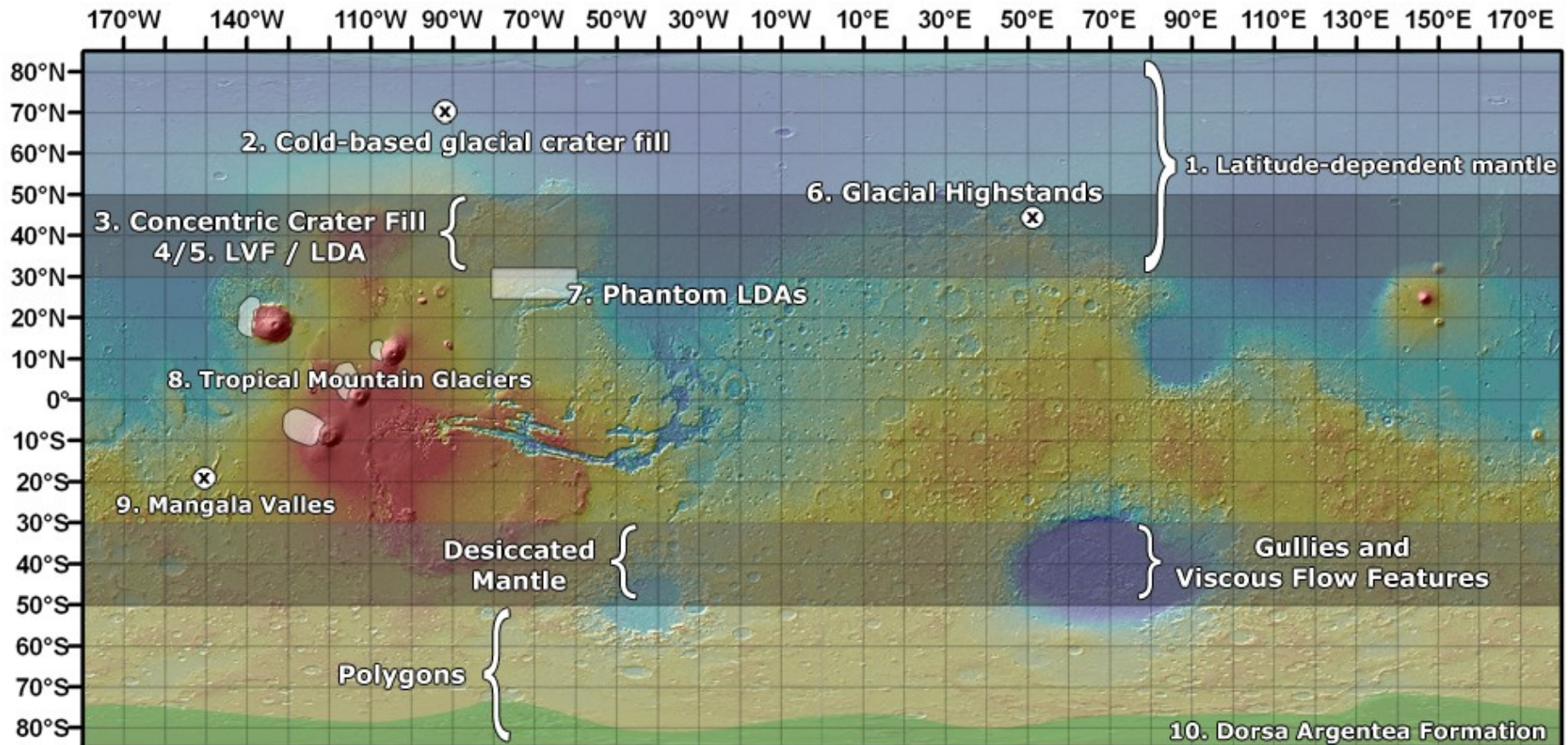
Low Obliquity



High Obliquity

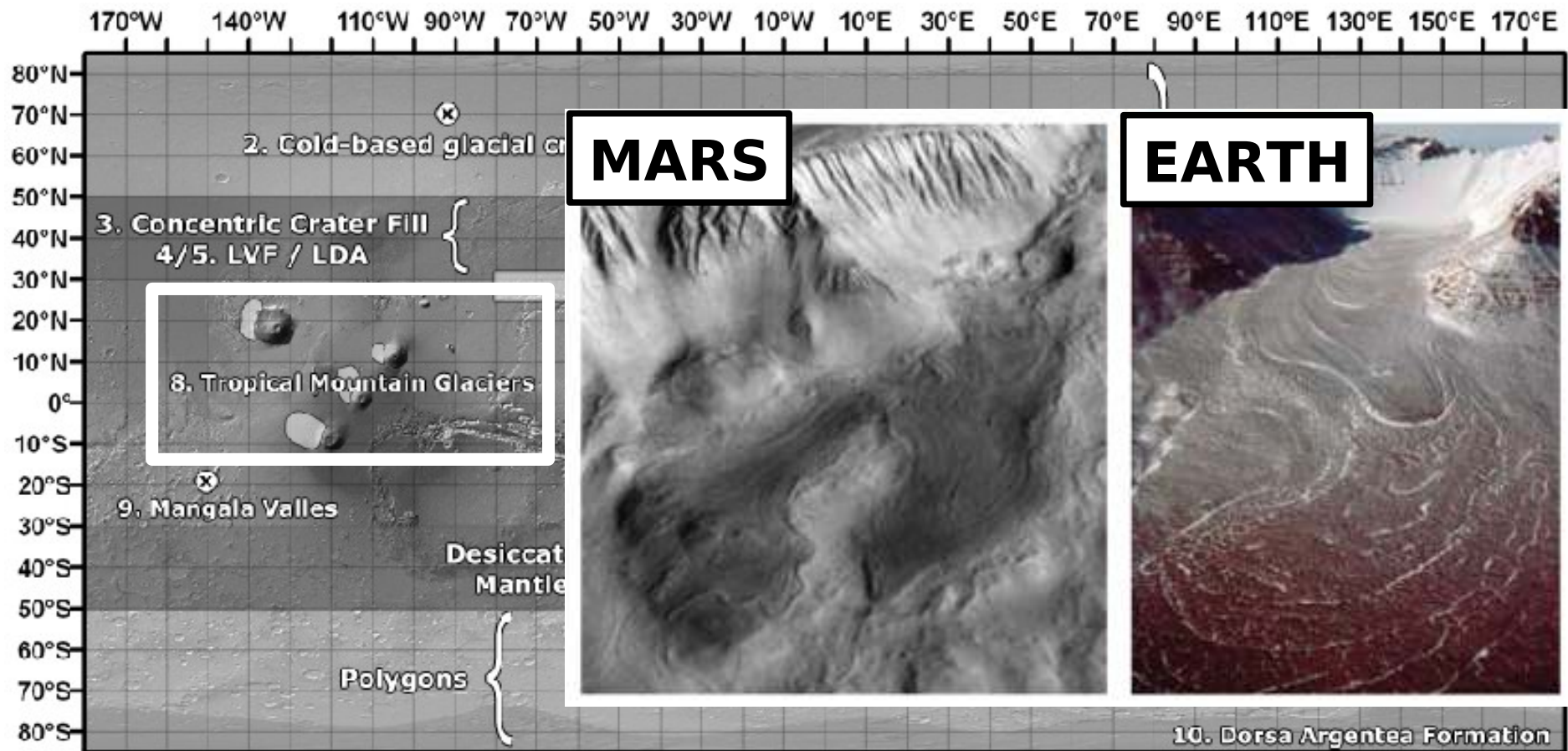


Vestiges de structures glaciaires en dehors des pôles



Head et al. (2005, 2008)

Les glaciers tropicaux



Tropical mountain glaciers (8): mountain glacial systems, episodes of advance and retreat;

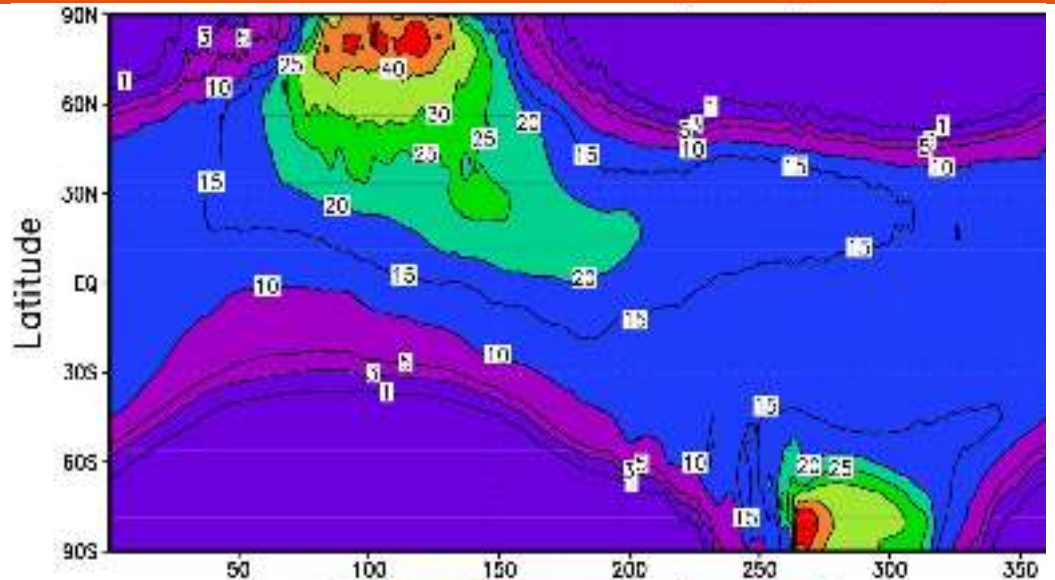
Head et al. (2005, 2008)

Variation du cycle de l'eau

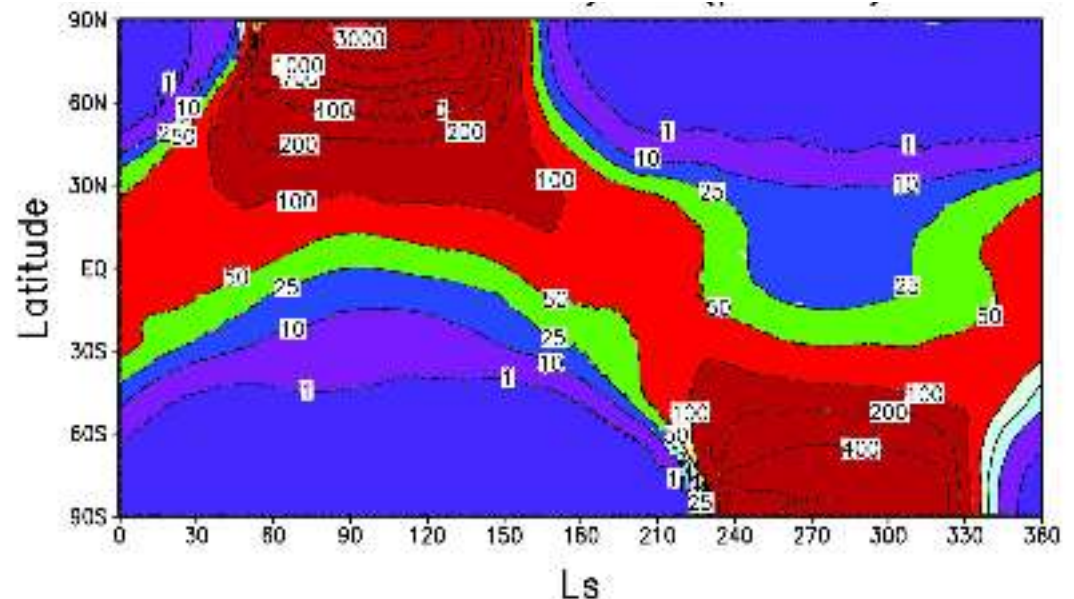
LMD GCM Simulations:

Water vapor column
(precipitable –microns)

On present-day Mars :



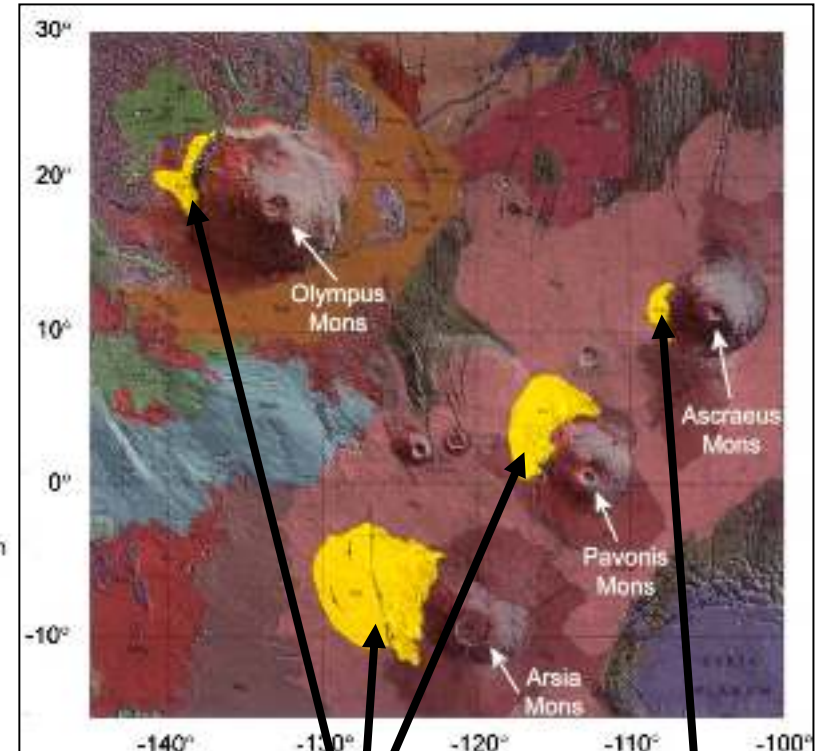
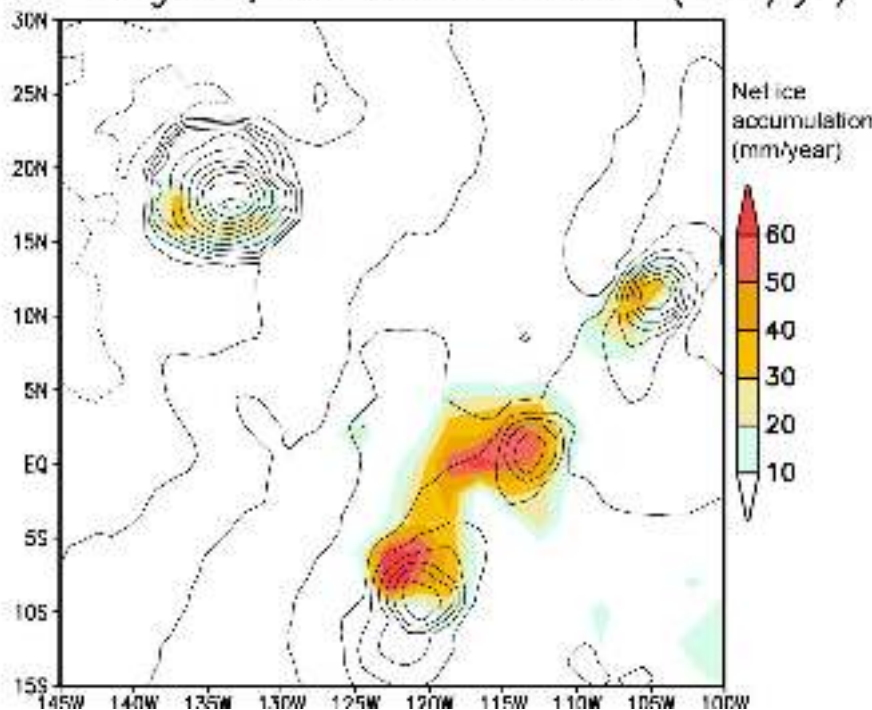
Same, but 45° Obliquity
(Circular orbit)



Comparaison à la géologie

*Accumulation de glace
(mm/an) (simulation
numérique)*

Forget et al. 2005



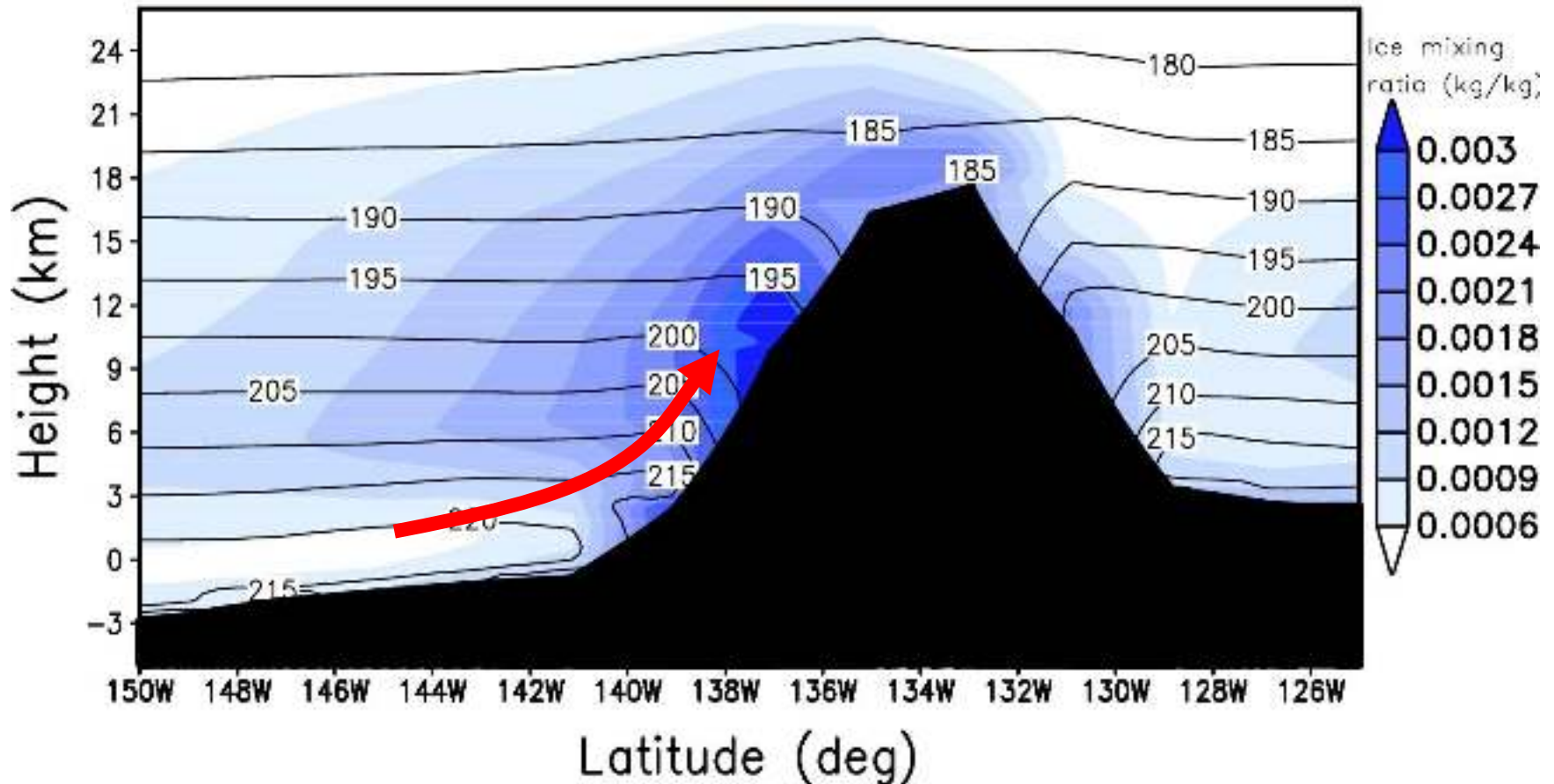
**Geological evidence for
past glaciers**

(Head et al. 2003, 2005)

Fan shaped deposits,
drop moraines, rock
glaciers...

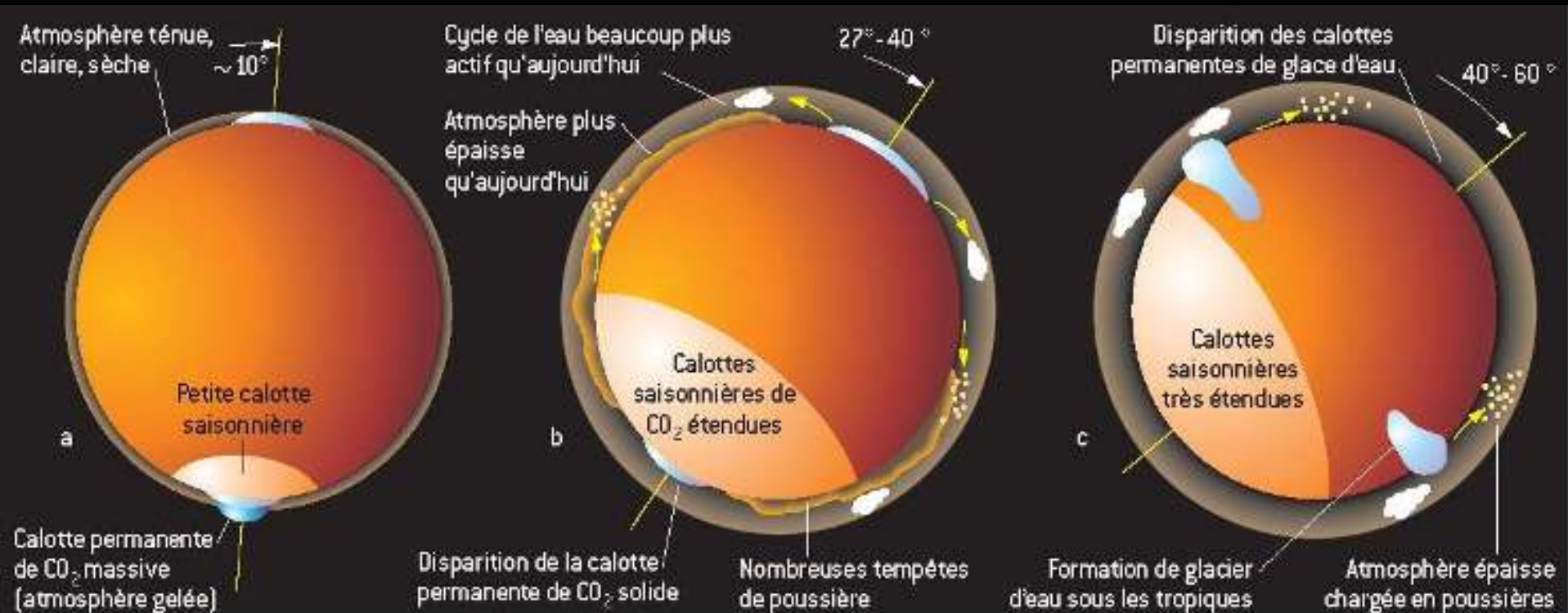
Mécanisme de formation

T(K) and cloud ice at 16N Ls=125–155



At high obliquity: Ice accumulation by ice precipitation on windward slope

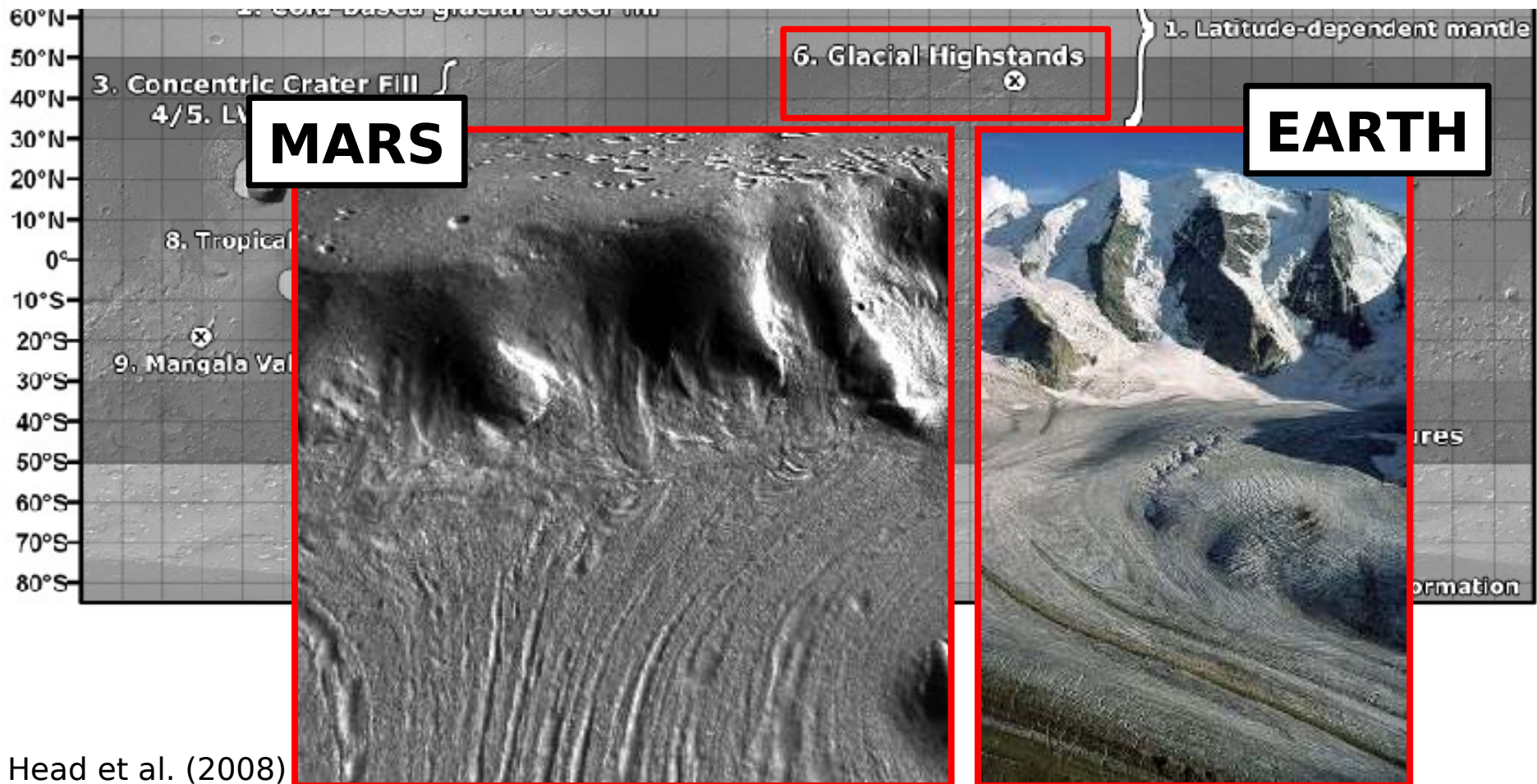
Résumé



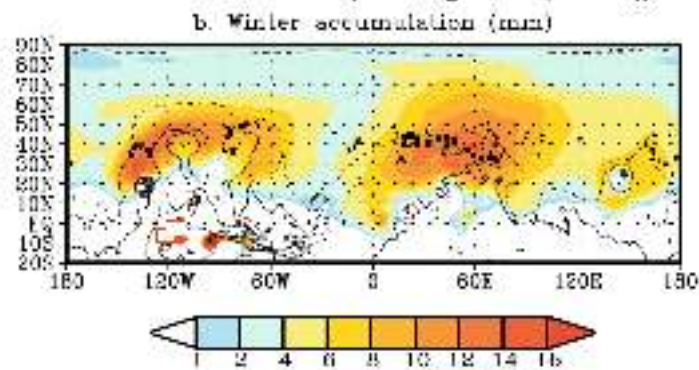
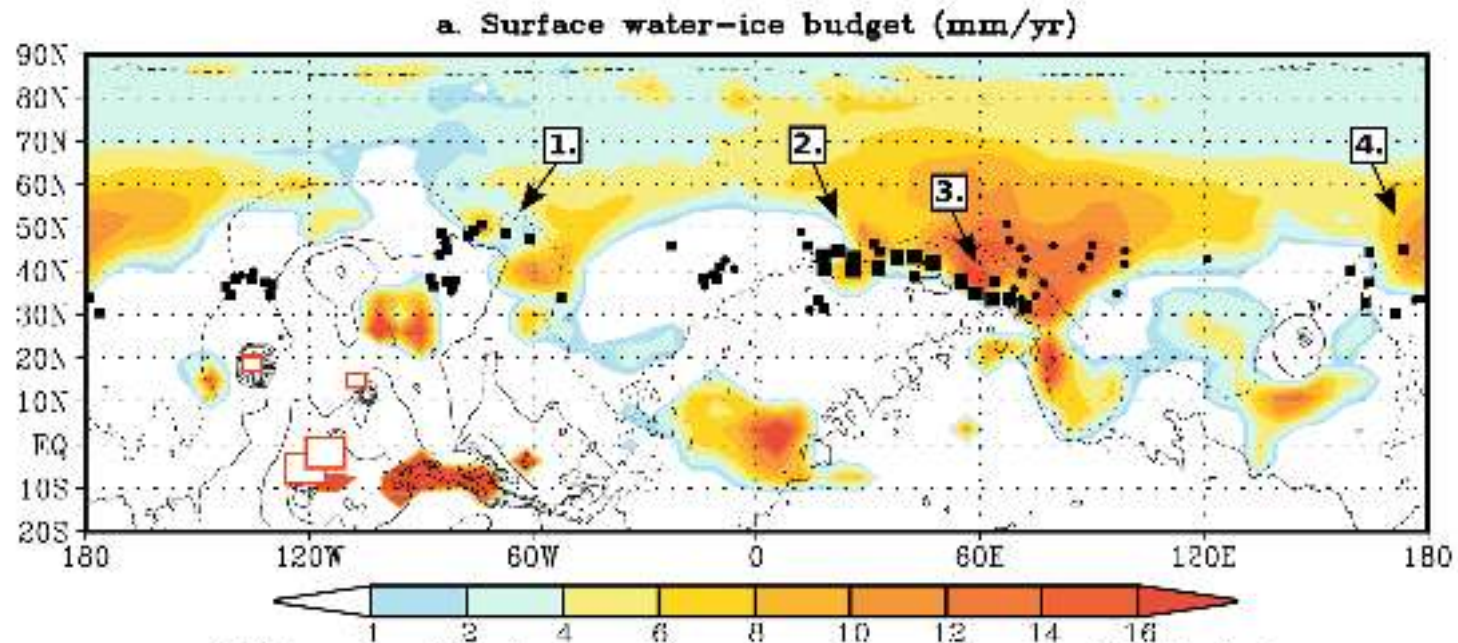
La glaciation des moyennes latitudes

170°W, 140°W, 110°W, 90°W, 70°W, 50°W, 30°W, 10°W, 10°E, 30°E, 50°E, 70°E, 90°E, 110°E, 130°E, 150°E, 170°E

Northern mid-latitudes (3,4,5,6,7): valley glaciers and plateau glaciation, km thicknesses;



Modélisation avec le LMD/GCM



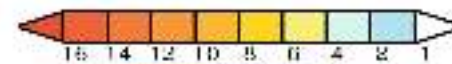
□ GCM Water Ice Reservoirs (WIR)

Dust opacity = 2.5

Obliquity = 35°

L_s (perihelion) = 270°

Water source =
Tharsis Glaciers

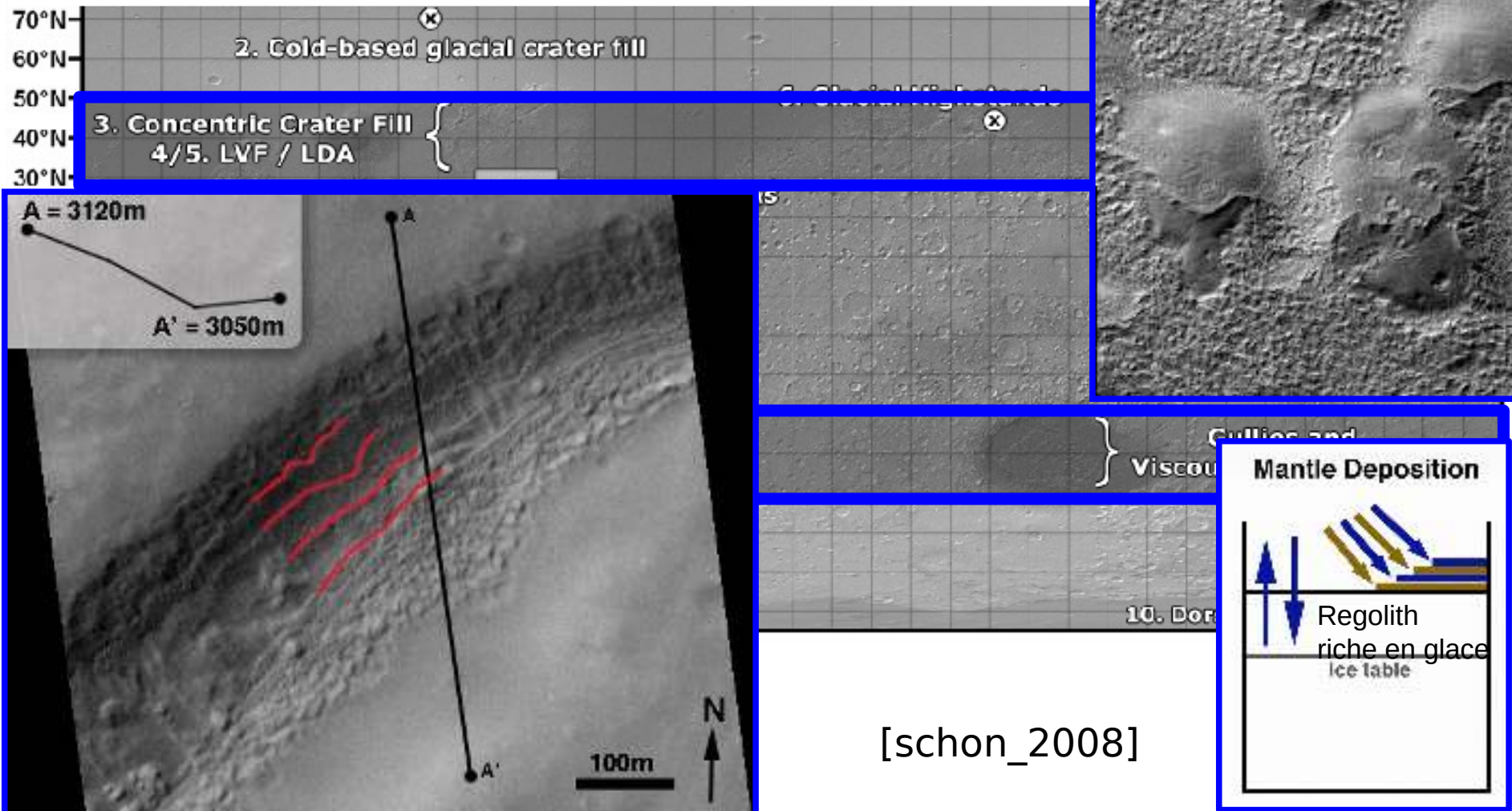


Map by Squyres (1979):

• Concentric crater fill ■ LDA & LVF

Le manteau des hautes latitudes

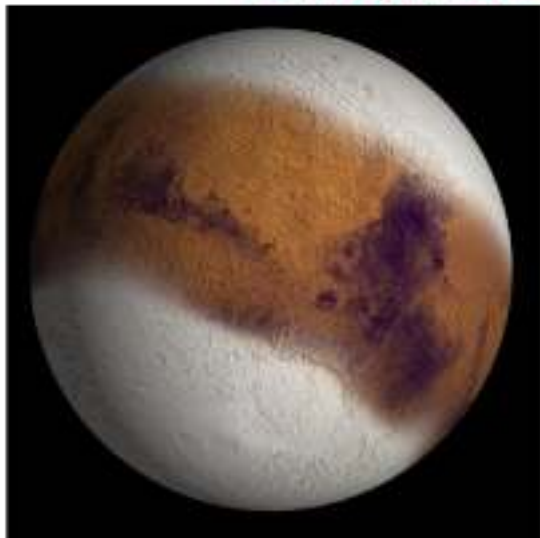
- The latitude dependent mantle (1): m thick layered deposits, above 50° (Head et al., 2003);



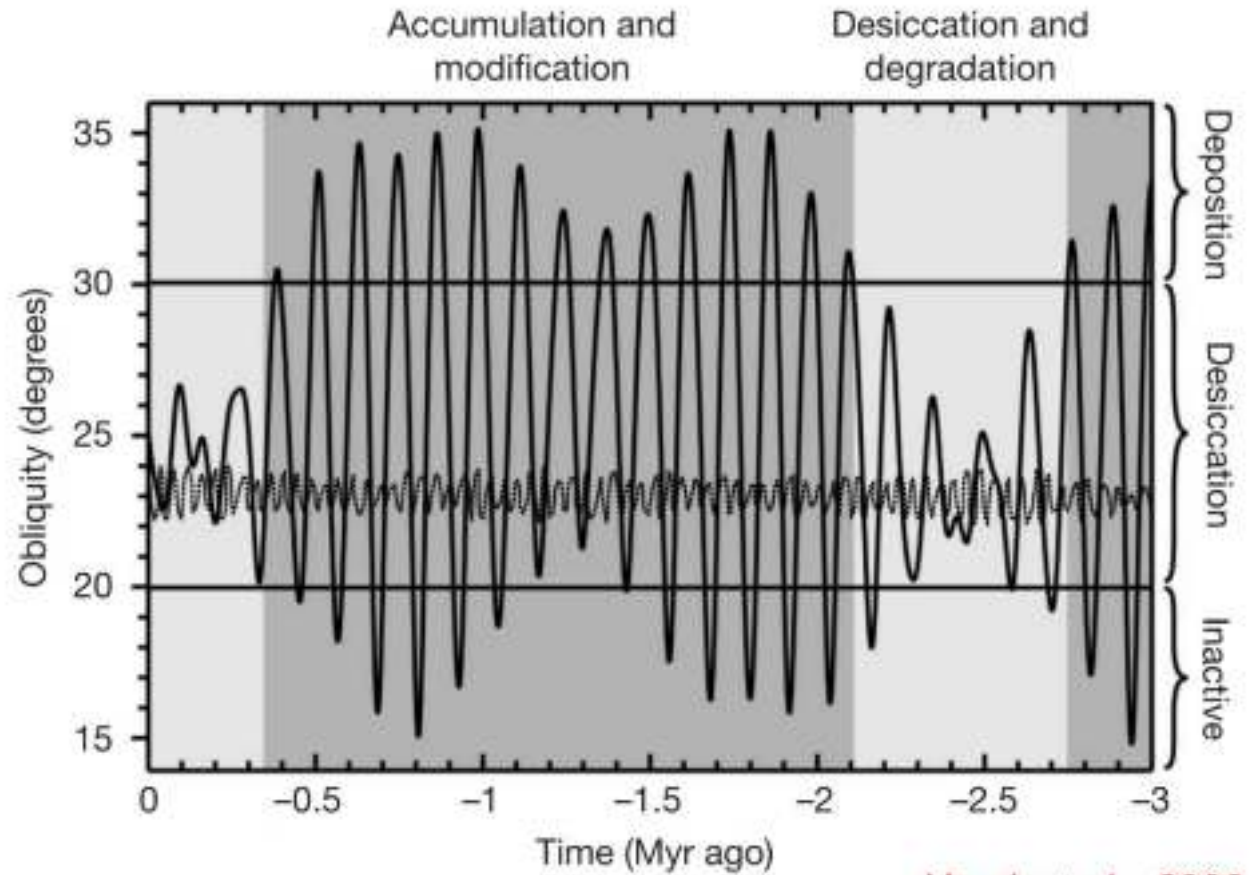
Formation du Latitude Dependent Mantle



OSIRIS/Rosetta



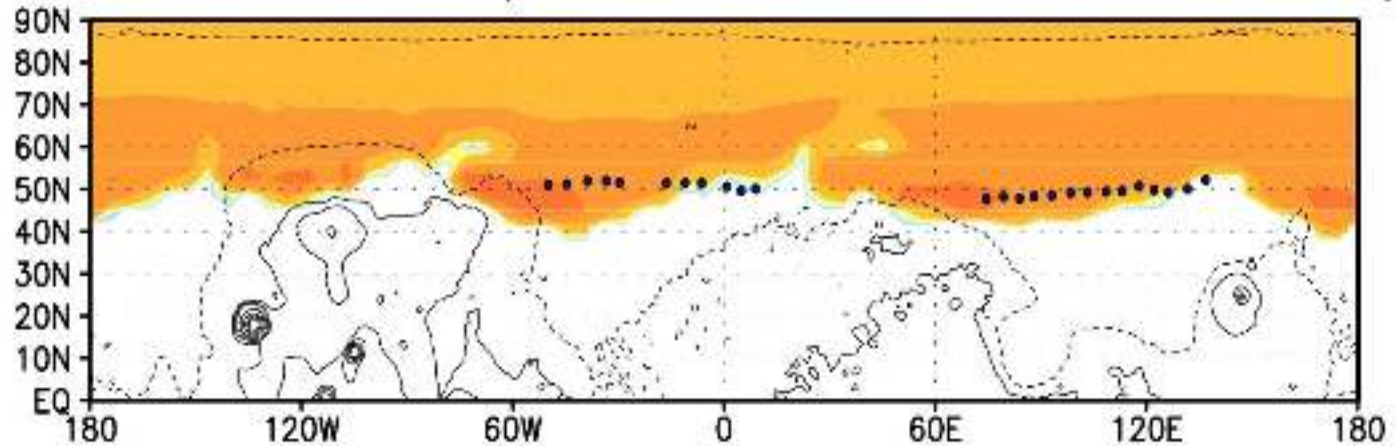
Head et al., 2003



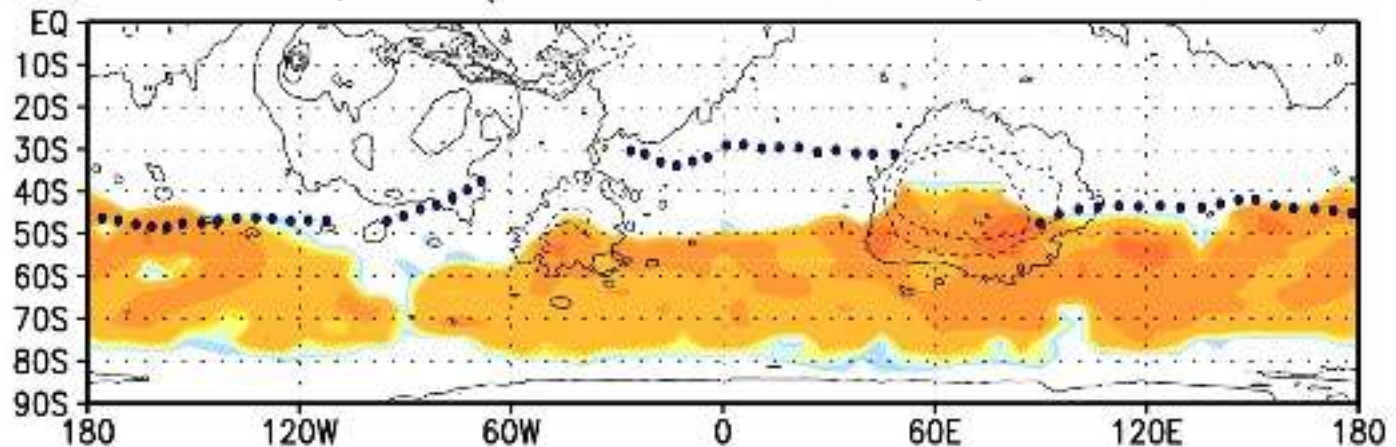
Head et al., 2003

Une vision en accord avec les « nouveaux » modèles climatiques

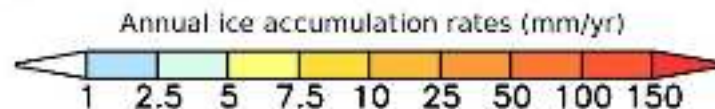
Northern hemisphere ($\epsilon = 35^\circ$, SPC, dust peak at $L_s = 90^\circ$)



Southern hemisphere ($\epsilon = 35^\circ$, NPC, dust peak at $L_s = 270^\circ$)

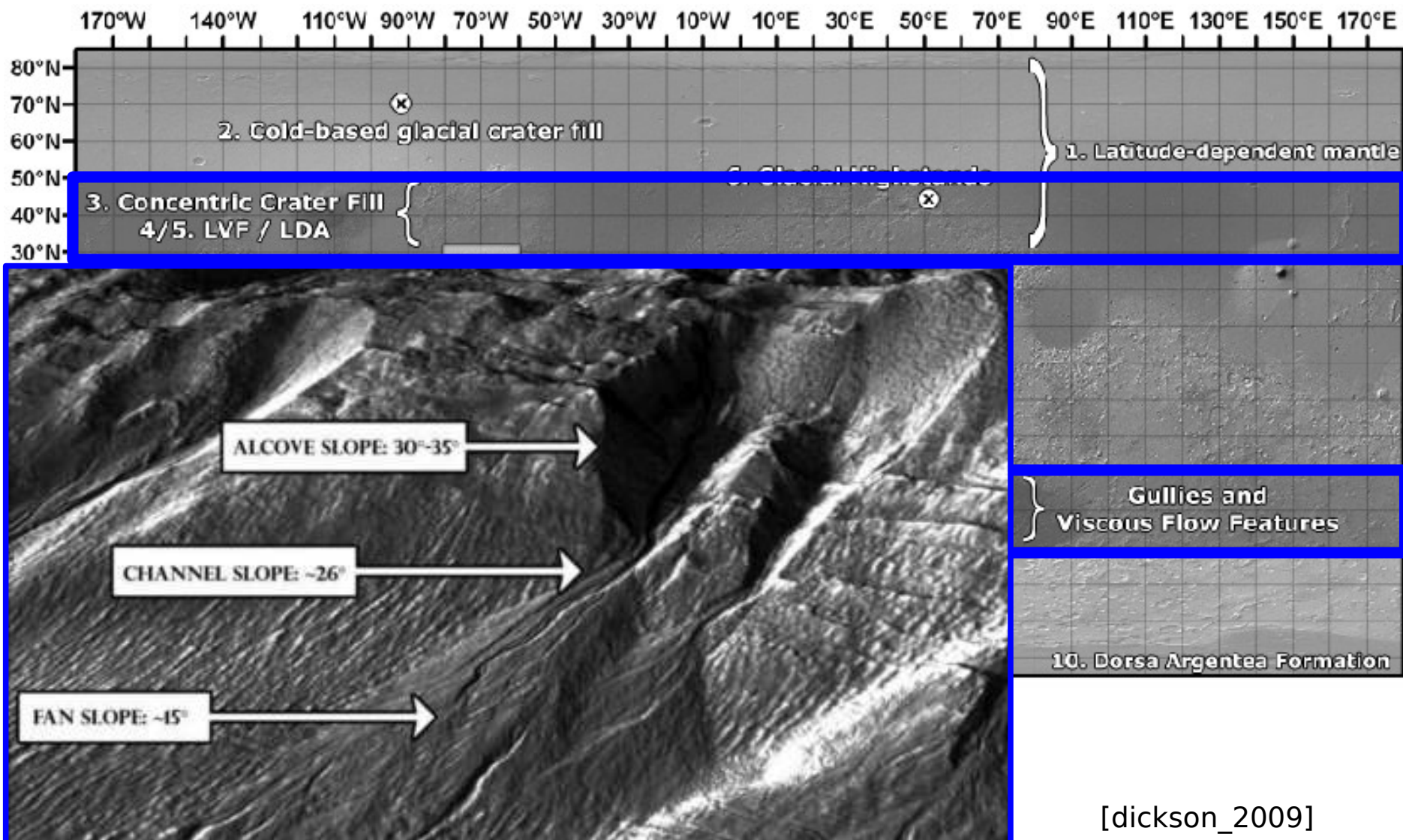


[Madeleine et al.,
submitted]



.... Diffuse roughness boundary
[Kreslavsky & Head, 2000]

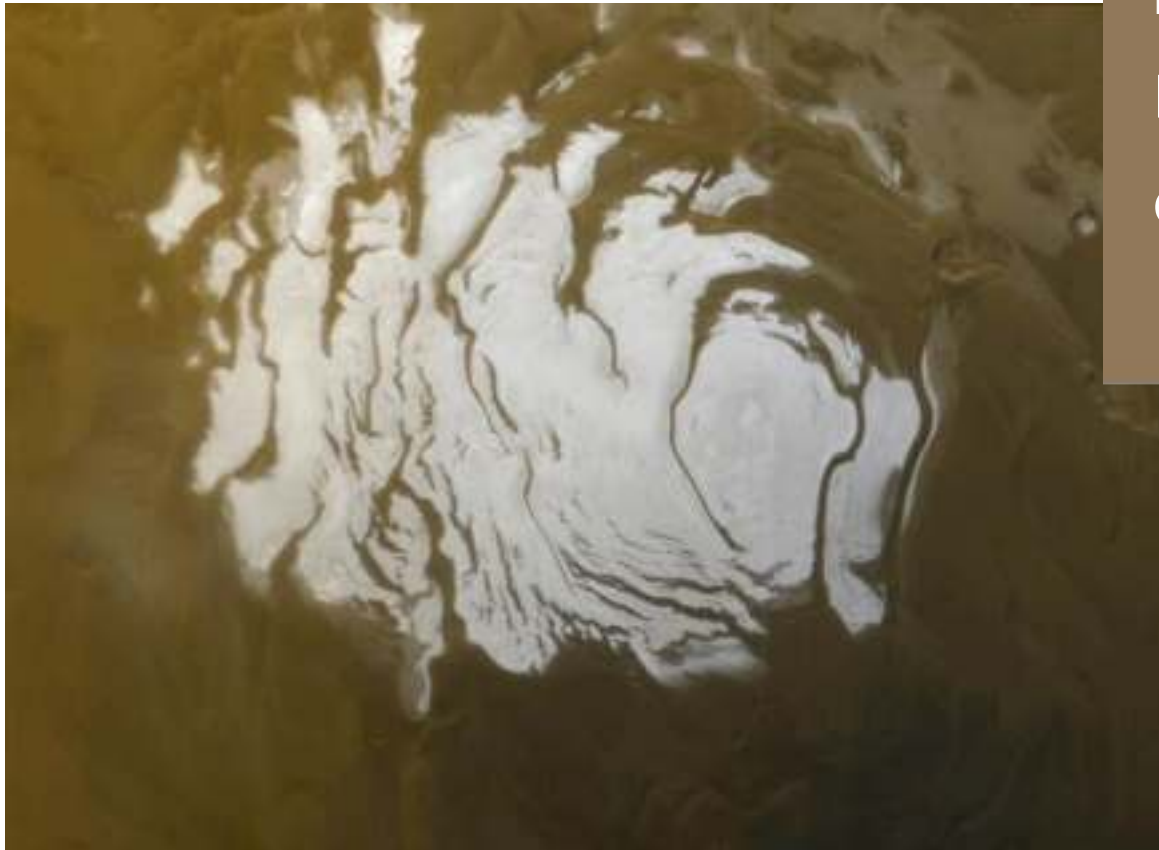
Ravines (« gullies »)



[dickson_2009]

Résumé : climat de l'Amazonien supérieur

- ~10-700 Myr: Glaciers tropicaux et glaciation grande échelle dans les moyennes latitudes;
- ~0.1-10 Myr (?): Couverture par le manteau des hautes latitudes, érosion du manteau, écoulements sous forme de ravines et structures visqueuses petite échelle;
- ~Aujourd'hui - 5 Myr (?): Formation de la calotte polaire Nord (sédiments de glace).

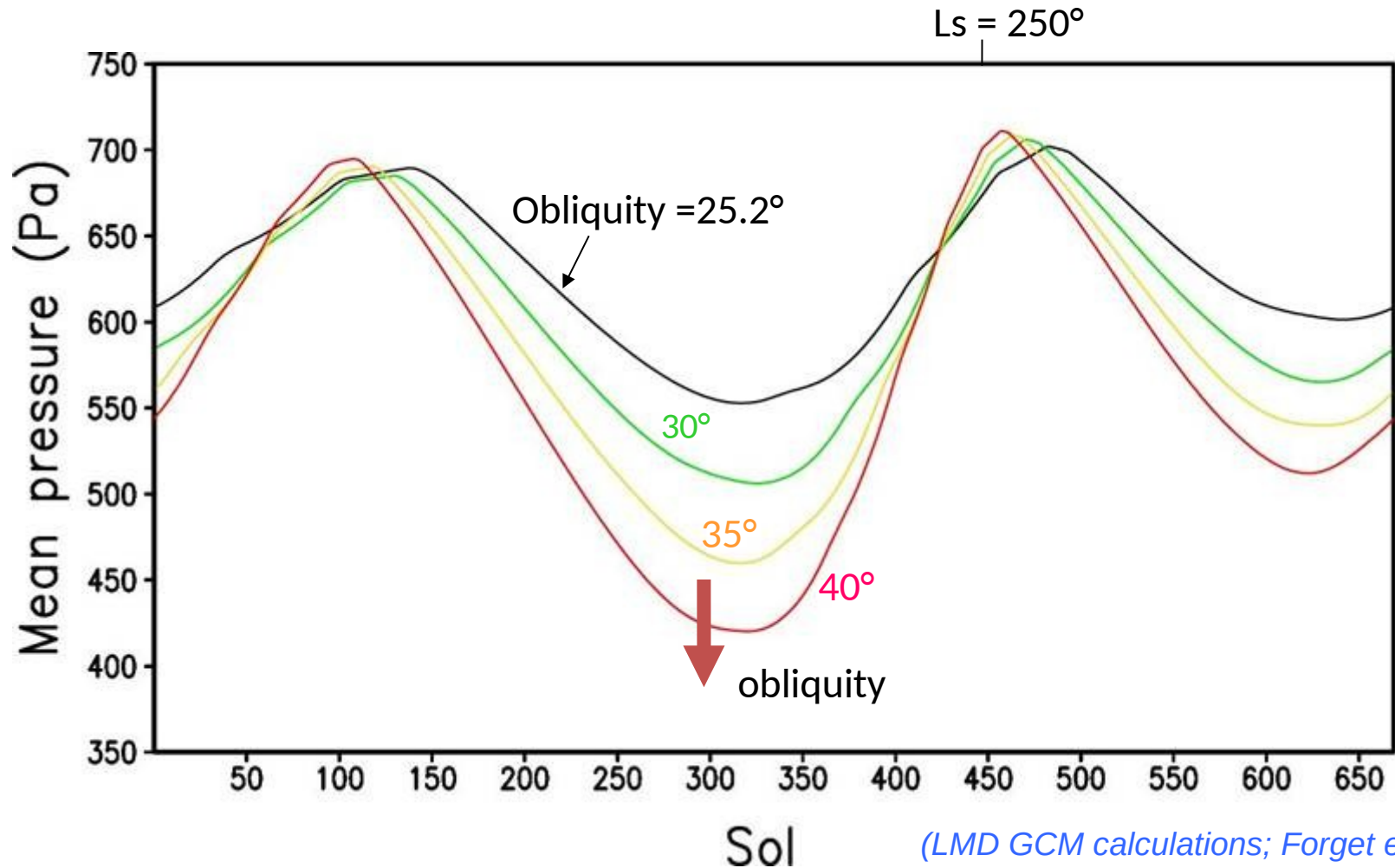


Partie 4 :
Le cycle passé
du CO₂

Perennial CO₂ ice
cap near the south
pole (300 km across)

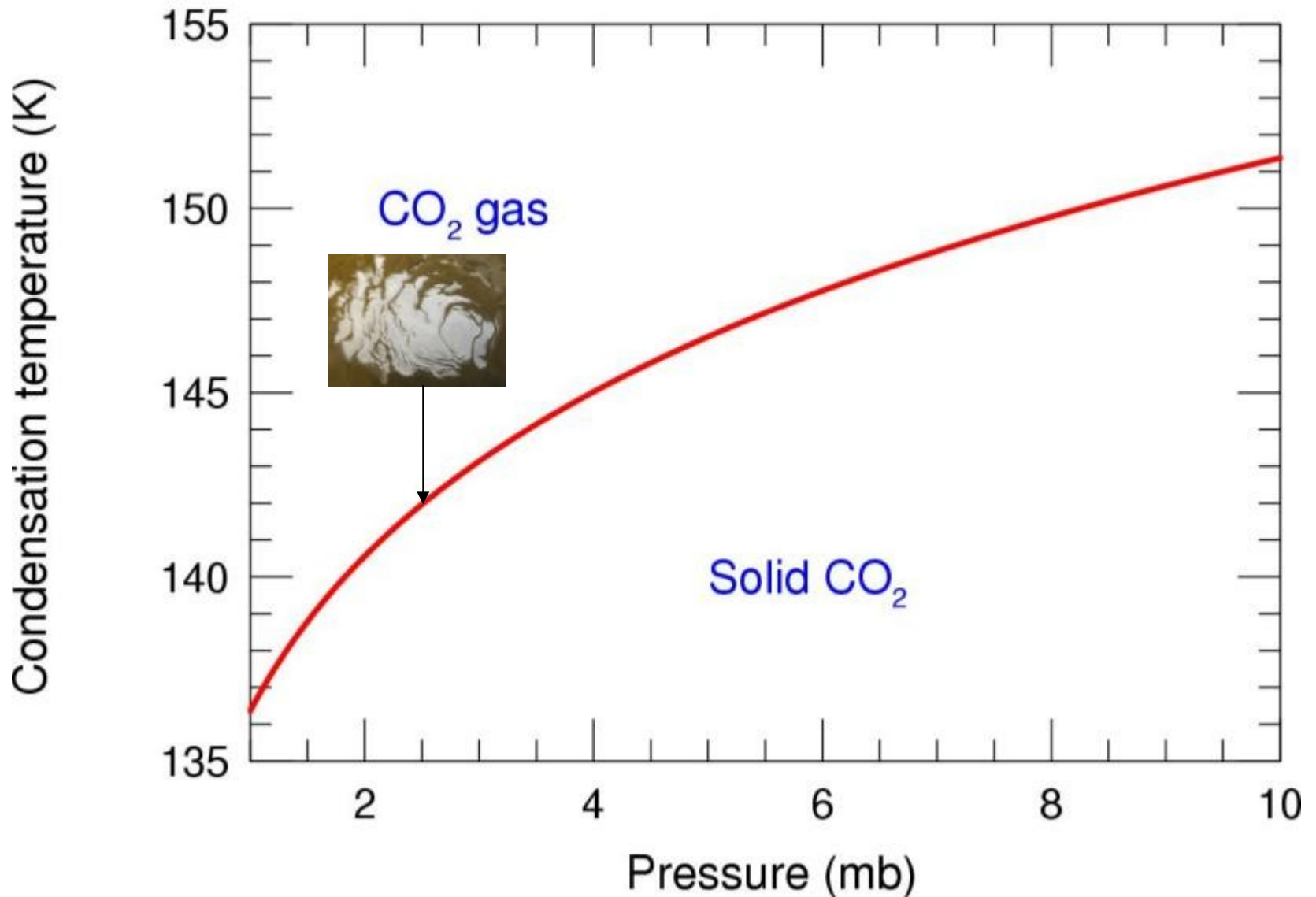
Seasonal variation of the mean pressure
(assuming present-day atmosphere)

Higher obliquity = more massive seasonal CO₂ ice caps



(LMD GCM calculations; Forget et al. 2003)

Total Atmospheric mass depends on the permanent CO₂ ice cap temperature (unless exhausted)

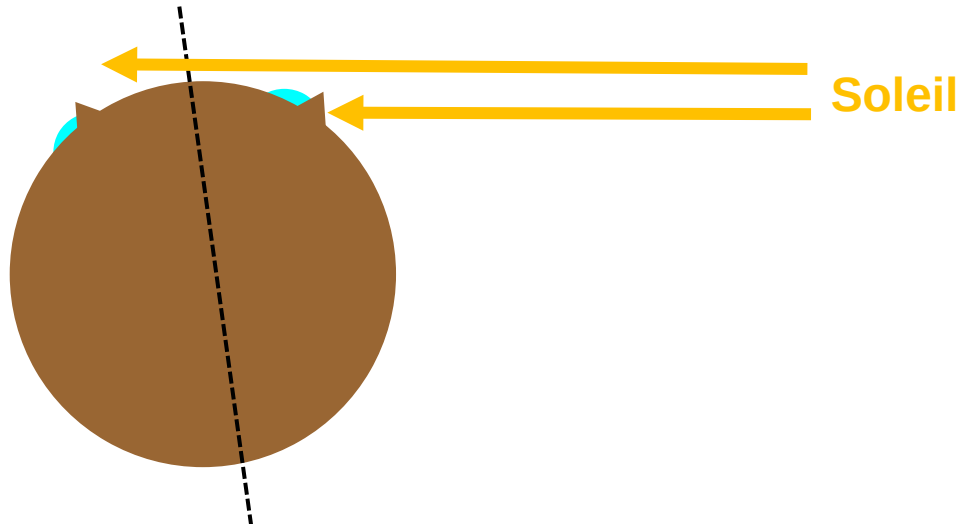


CO₂ inventory at high obliquity

- Average insolation at the pole is proportional to the sine of the obliquity: strong warming.
 - Sublimation of the relatively thin south surface residual polar caps: < 0.2 mbar [*Thomas et al., 2009*]
 - 6-8 mbar – deposit inside SPLD discovered by radar. [*Phillips et al., 2011*]
 - Desorbed CO₂ from the high latitude ground (30 mbars ? e.g. *Zent et al. 1992*): less likely with all the H₂O ice detected by Mars Odyssey ? < 20 mbar – mixed with H₂O ice in the PLD ?

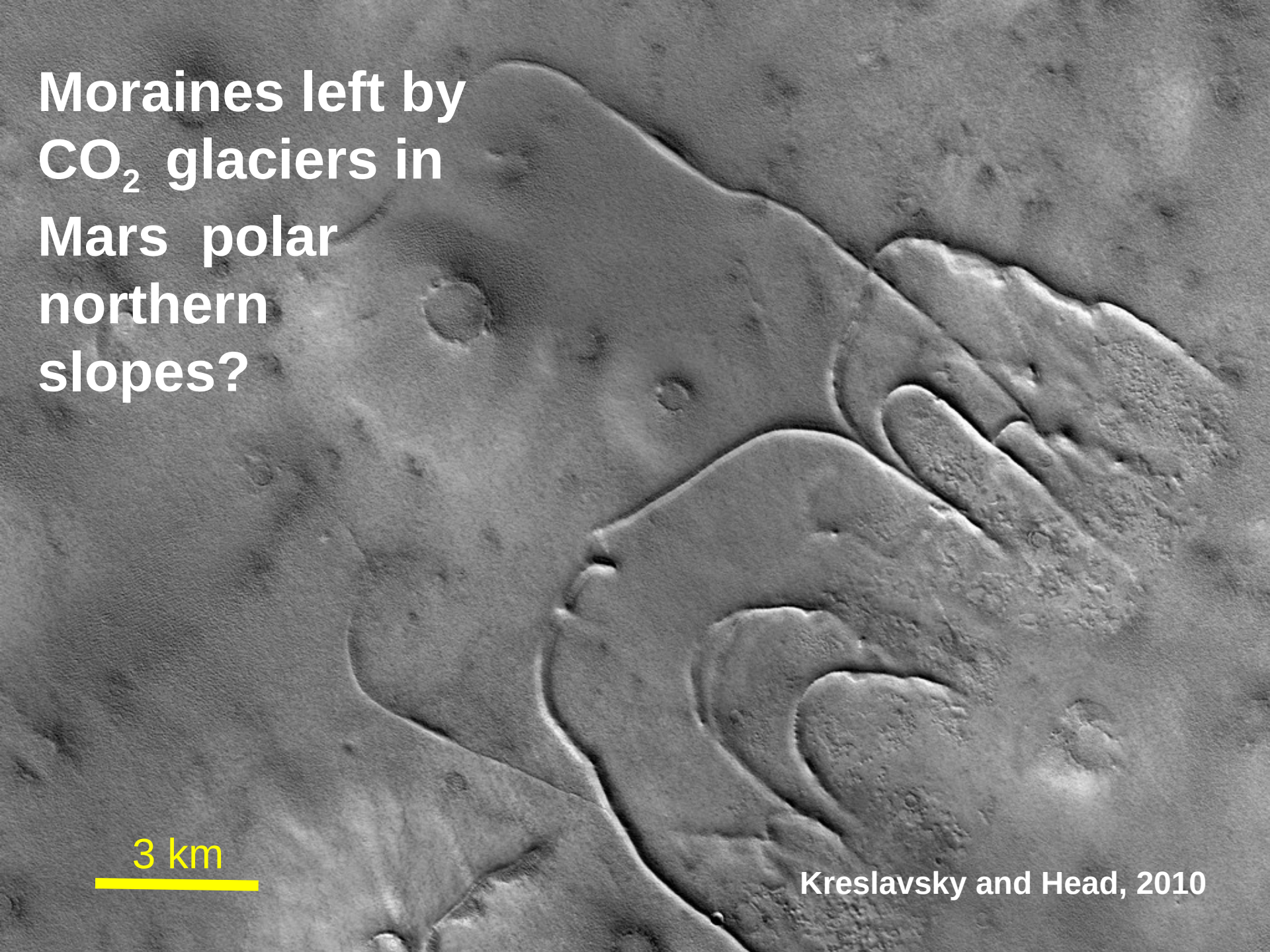
At low obliquity: Atmospheric collapse ?

- Average insolation at the pole is proportional to the sine of the obliquity: massive permanent CO₂ ice cap ? .
 - Preferential accumulation on steep pole-facing slopes at $\sim 70^{\circ}$ - 80° latitude rather than at the pôles ? [Kreslavsky and Head, 2005]

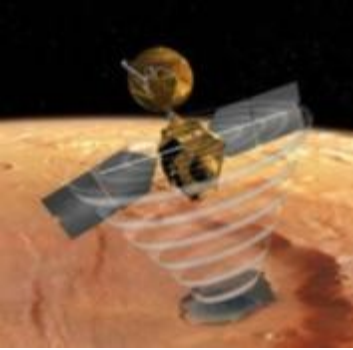


Moraines left by
 CO_2 glaciers in
Mars polar
northern
slopes?

3 km

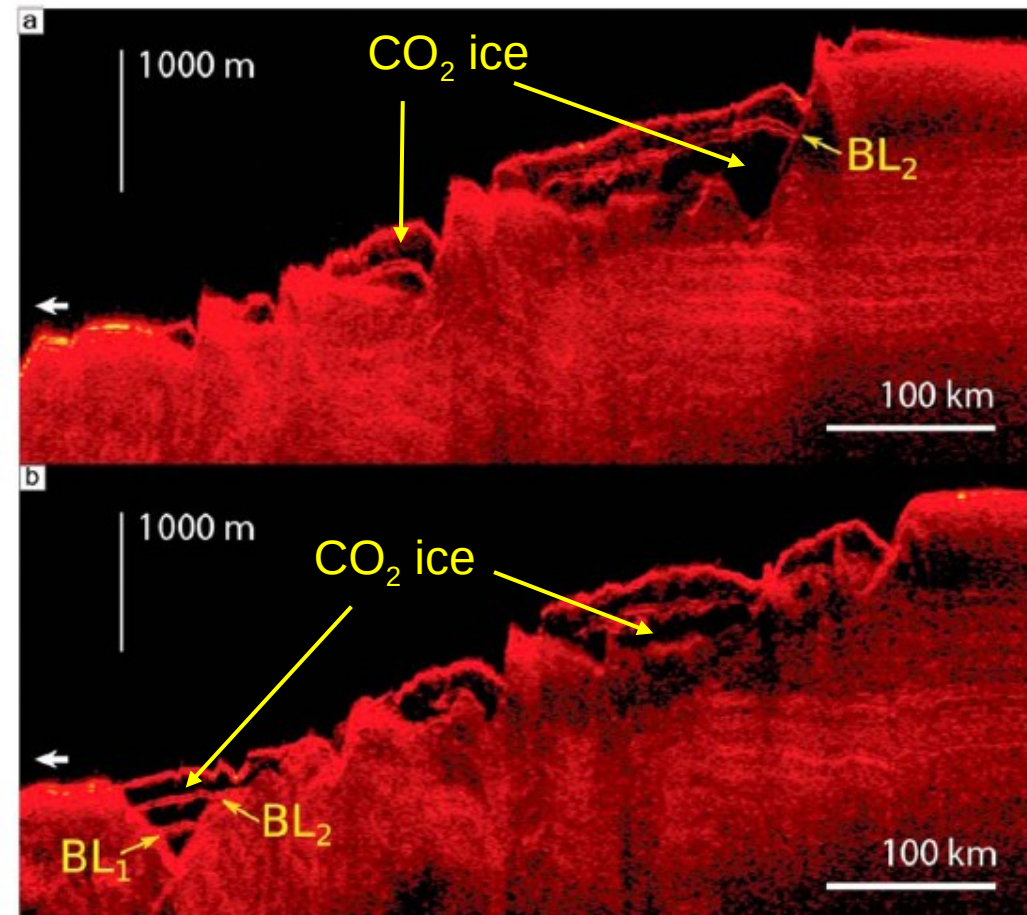
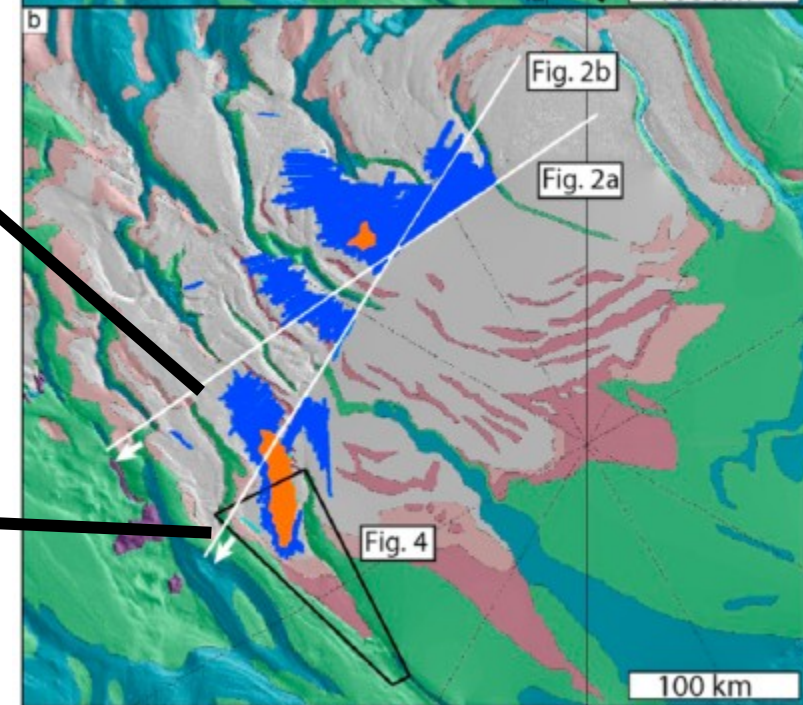
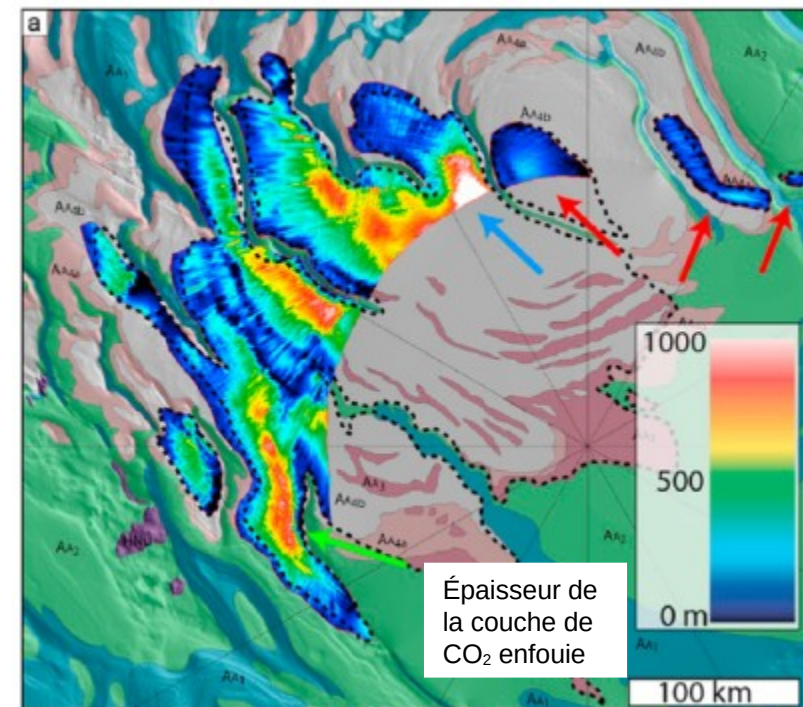


Kreslavsky and Head, 2010



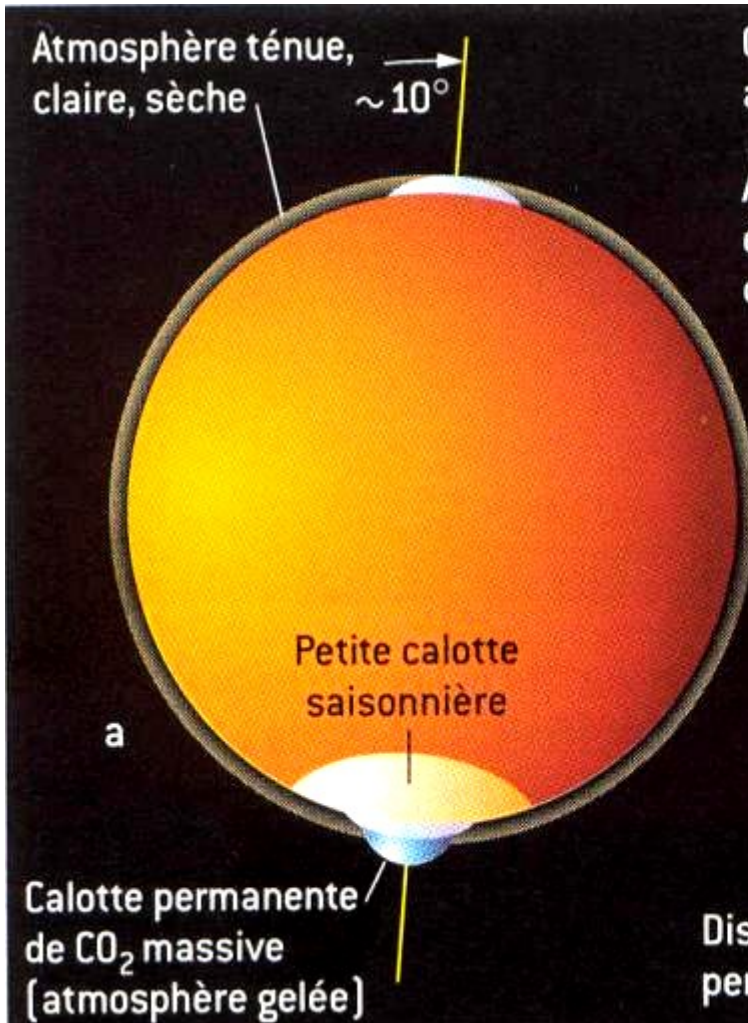
**Below the south residual cap:
a thick, buried CO₂ ice
deposits discovered by Radar**
(Philipps et al. 2011, Bierson et al. 2016)

Total mass = ~present-day
atmosphere (6 mbar)



Impact des variations d'obliquités sur le climat martien (considérations théoriques)

Obliquité basse



Obliquité haute

