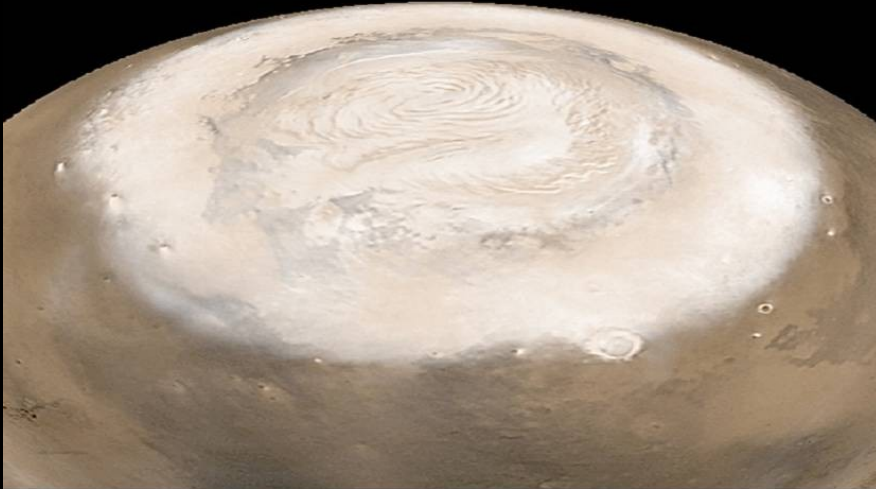


Le système climatique martien



Cycle des poussières et
cycle de l'eau

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)

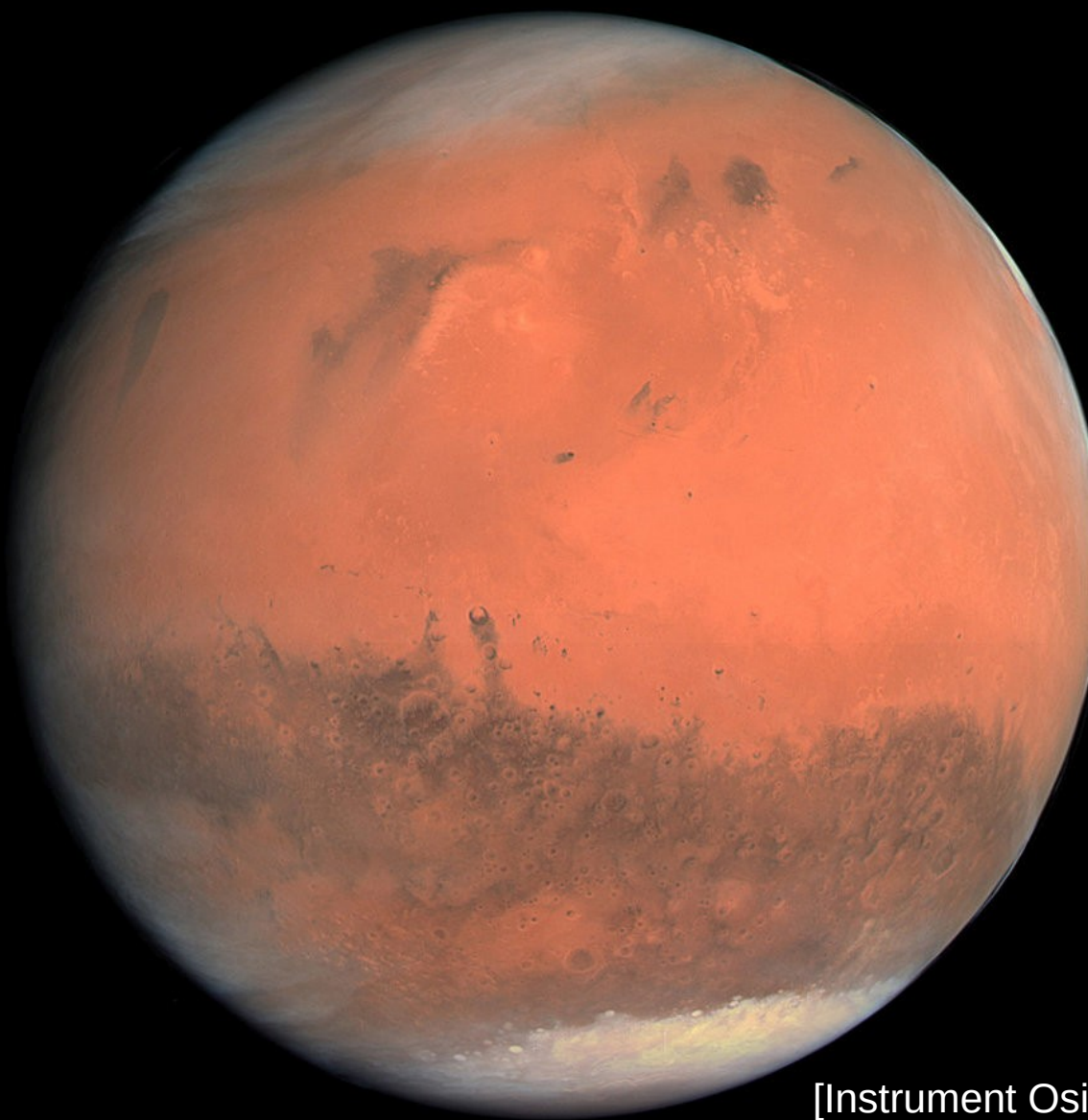


June 26, 2001



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. :
Le cycle des
poussières

[Pancam, rover Opportunity]

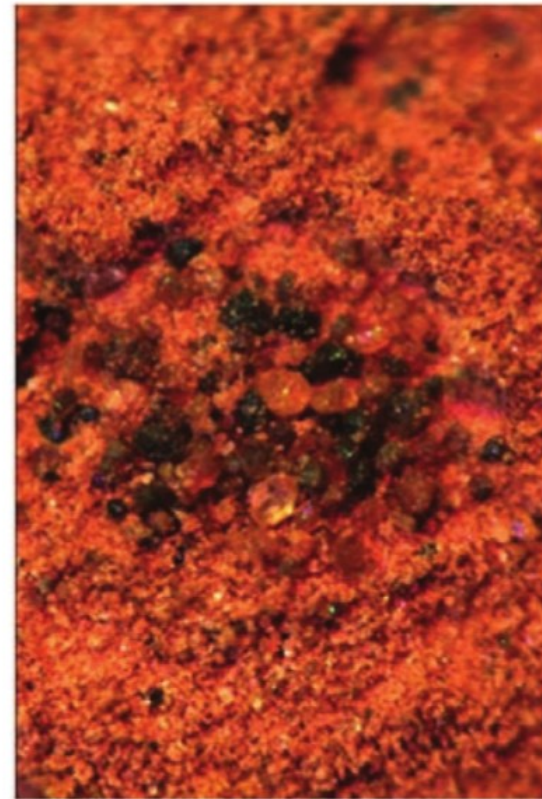
Composition de la « poussière »

Mesures satellite et in-situ suggèrent une structure silicatée, probablement des **feldspaths, avec de l'olivine et pyroxènes en moindre abondance, de l'hématite, et de la magnétite.**

Cette composition suggère que la poussière est principalement produite par **altération mécanique par l'atmosphère** de roches basaltiques sans altération chimique majeure [Hamilton et al., 2005].

Taille poussière en suspension : 0.5-1 μ m

Grains observés par Phoenix d'environ 50 μ m et poussières



1 mm

[Smith, 2009]

Diffusion de Mie



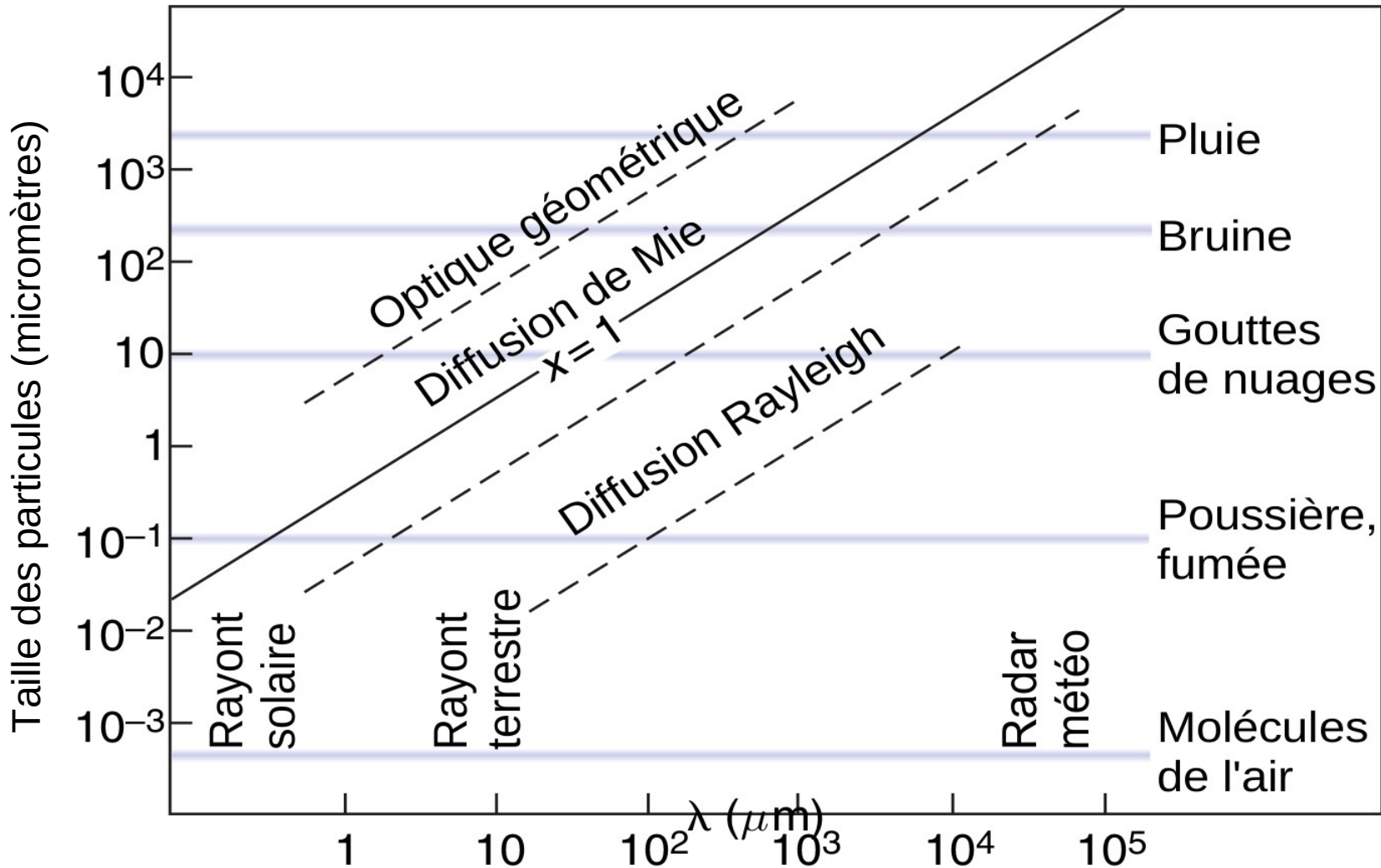
Tempête de poussière sur Sydney
[Site internet The Big Picture]

Diffusion de Mie



Tempête de poussière sur Sydney
[Site internet The Big Picture]

Régimes de diffusion 1/2

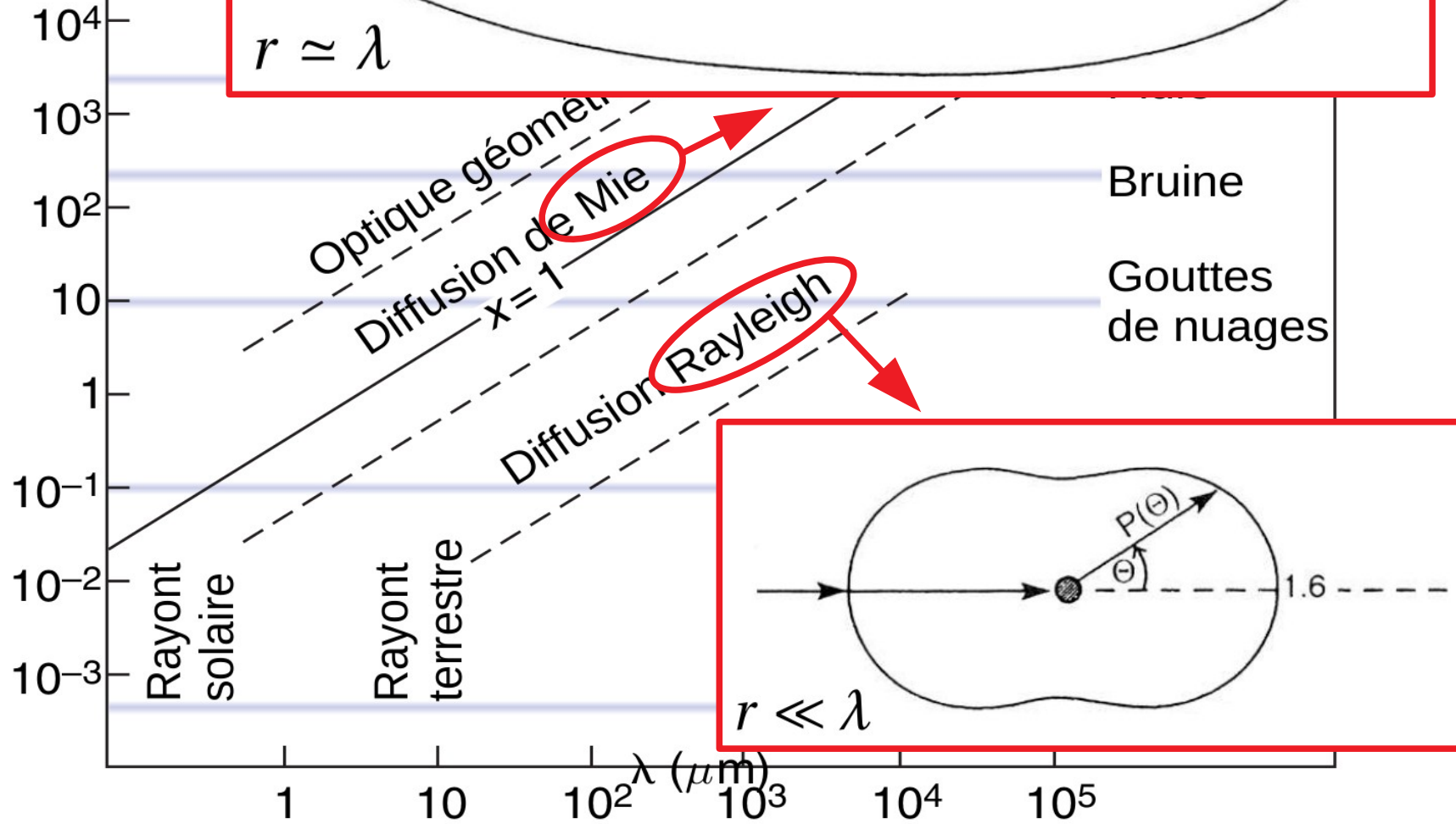


Paramètre de taille :

$$x = 2\pi r / \lambda$$

[Figure adaptée de Wallace and Hobbs, Atmospheric Science, 2006.]

Taille des particules (micromètres)



Paramètre de taille :

$$x = 2\pi r / \lambda$$

[Figure adaptée de Wallace and Hobbs, Atmospheric Science, 2006.]

Paramètres de diffusion simple

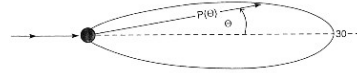
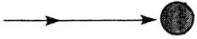
Index of refraction

$$n = n_r + i n_i$$



Mie/T-Matrix code

$$Q_{\text{ext}}, \omega_0, g$$



Optical depth or Opacity τ_λ

$$d\tau_\lambda = \frac{3}{4} \frac{Q_{\text{ext}} \lambda}{\rho_p r_{\text{eff}} g} dp$$

Single Scattering Albedo ω_0

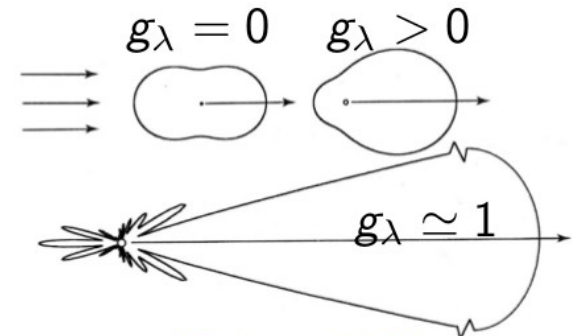
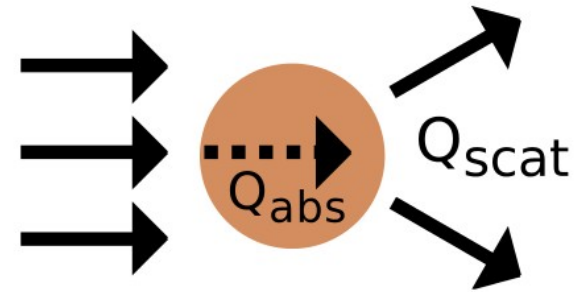
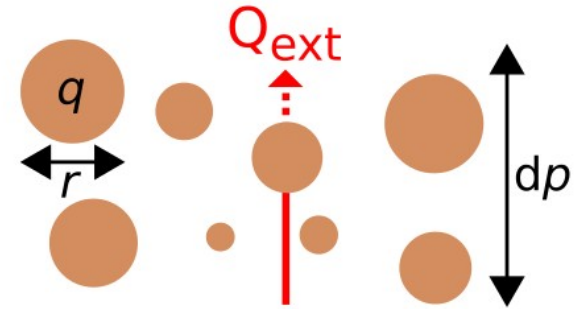
$$\omega_0 = \frac{Q_{\text{scat}}}{Q_{\text{abs}} + Q_{\text{scat}}} = \frac{Q_{\text{scat}}}{Q_{\text{ext}}}$$

Reflects the optical index of refraction n

Asymmetry factor g_λ

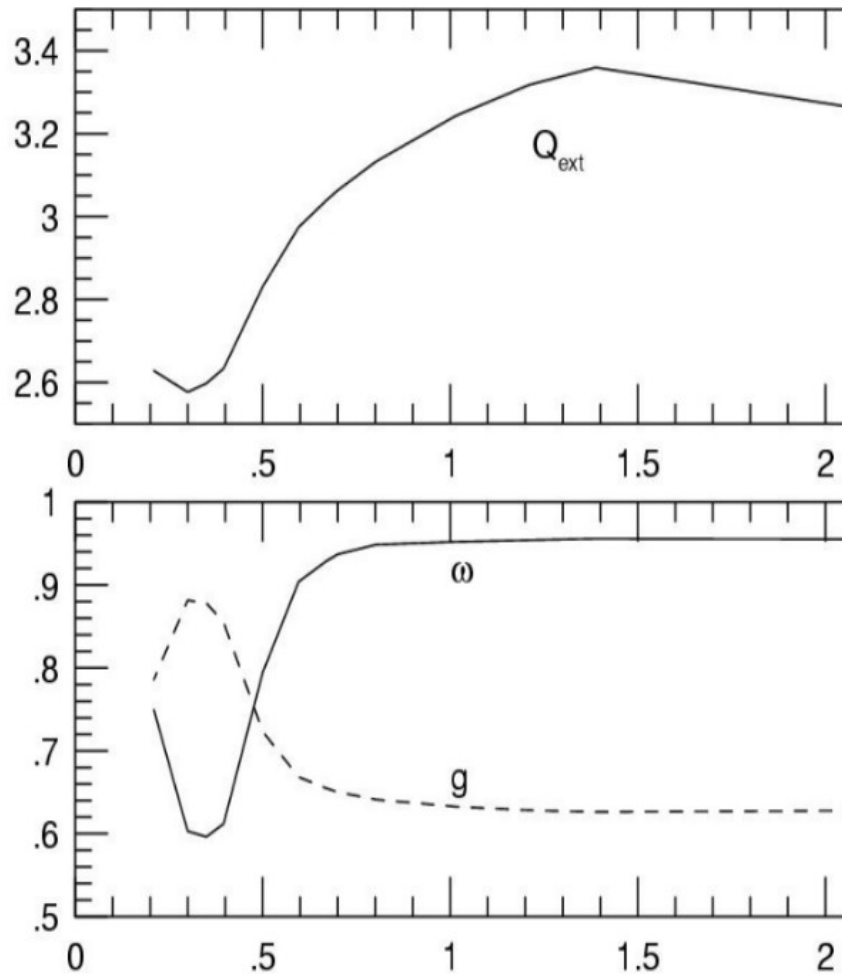
$$g_\lambda = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 P_\lambda(\cos \Theta) \cos \Theta d \cos \Theta$$

Reflects the phase function $P_\lambda(\theta)$



[Salby, 1996]

Single scattering param. - VIS



[F. Forget PhD 1996, d'après Ockert-Bell et al. JGR 1997]

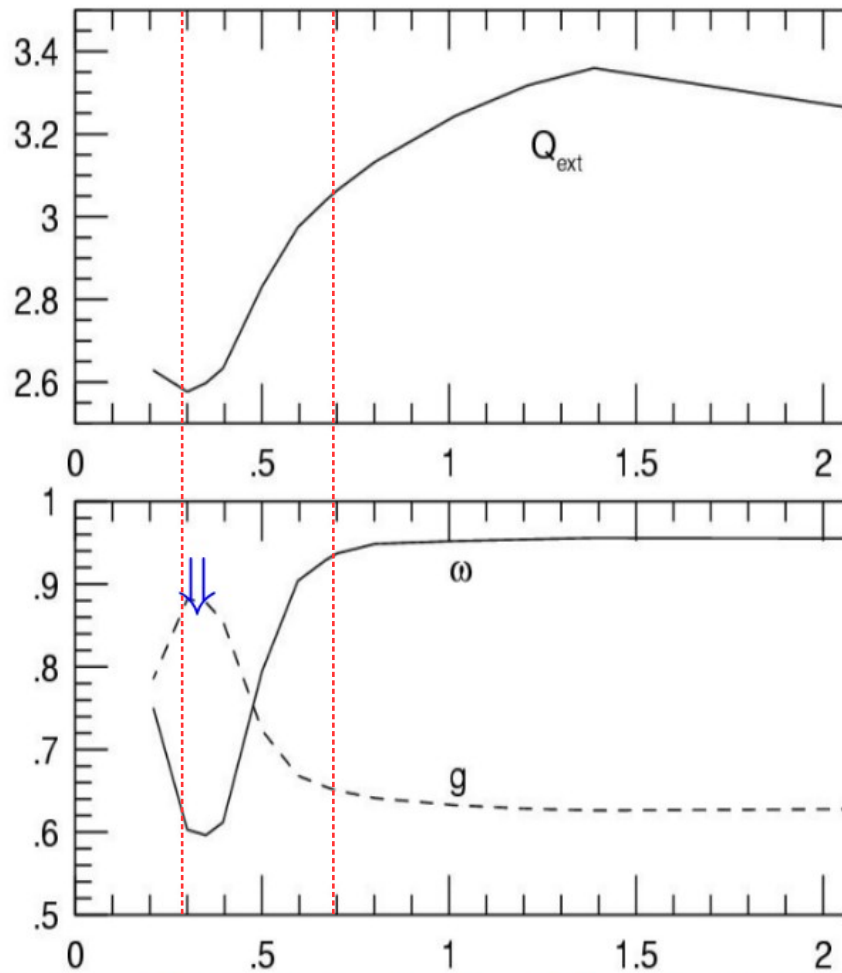
- Extinction maximale autour de $\lambda \sim 1.5 \mu\text{m}$ [Il se trouve qu'il s'agit de l'ordre de grandeur du rayon effectif de la poussière sur Mars]
- Part **diffusée** plus importante dans le **rouge** $\lambda \sim 0.6 - 0.7 \mu\text{m}$
- Part **absorbée** plus importante dans le **bleu** $\lambda \sim 0.4 - 0.5 \mu\text{m}$

Comment expliquer ces couleurs ?



[Image par Pancam à bord de Spirit 2005 (référence PIA07997)]

Single scattering param. - VIS



De quelle couleur est un coucher de soleil sur Mars ?

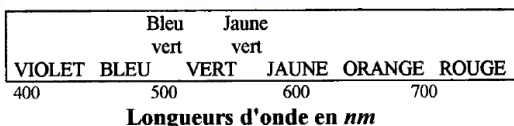
Le soleil apparaît blanc car Q_{ext} ne varie pas suffisamment dans le visible pour favoriser une longueur d'onde (couleur) par rapport à une autre

Quid des photons diffusés ?
Indice... Raisonner avec g

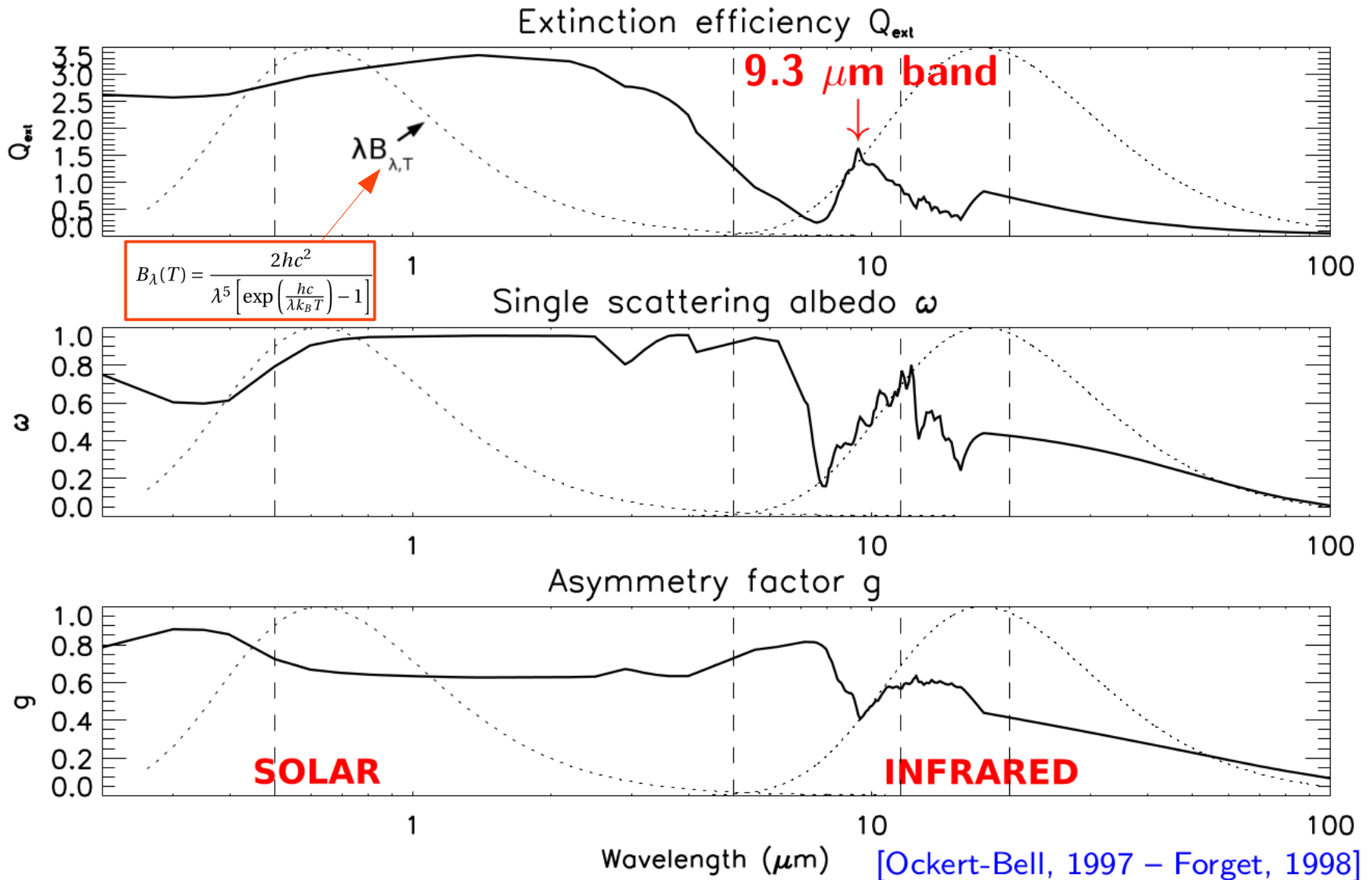
Plus forte diffusion dans le **rouge**
 $\lambda \sim 0.6 - 0.7 \mu\text{m}$... cependant ...

Forte **diffusion vers l'avant** dans le **bleu** $\lambda \sim 0.4 - 0.5 \mu\text{m}$

[F. Forget PhD 1996, d'après Ockert-Bell et al. JGR 1997]

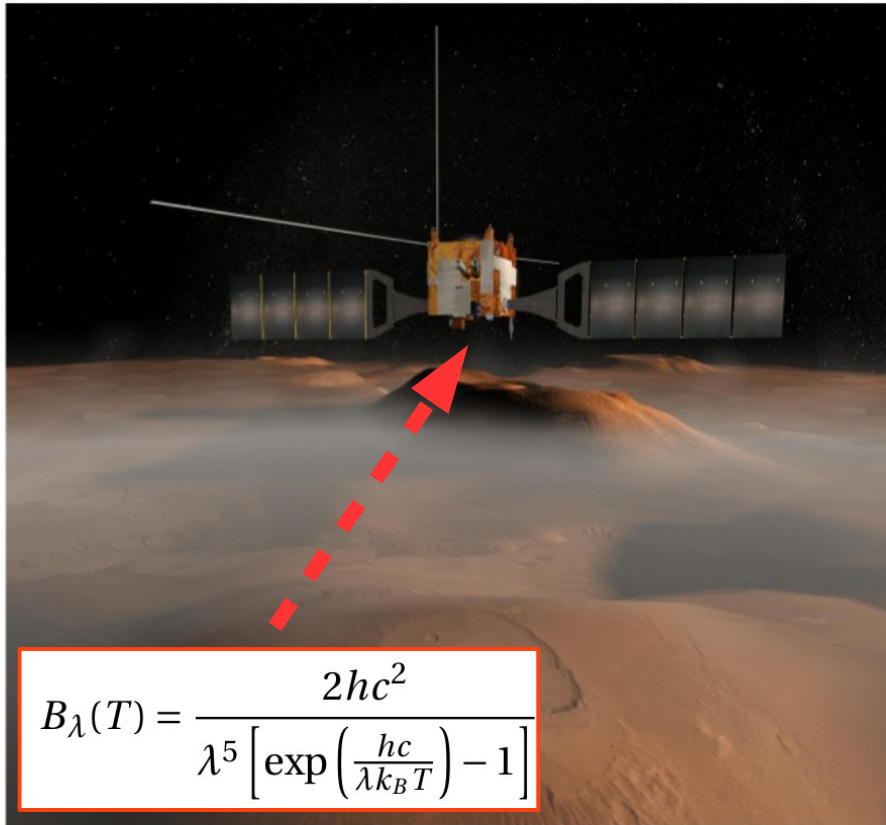


Single scattering param. - VIS+IR



Téledétection et climatologie du cycle des poussières

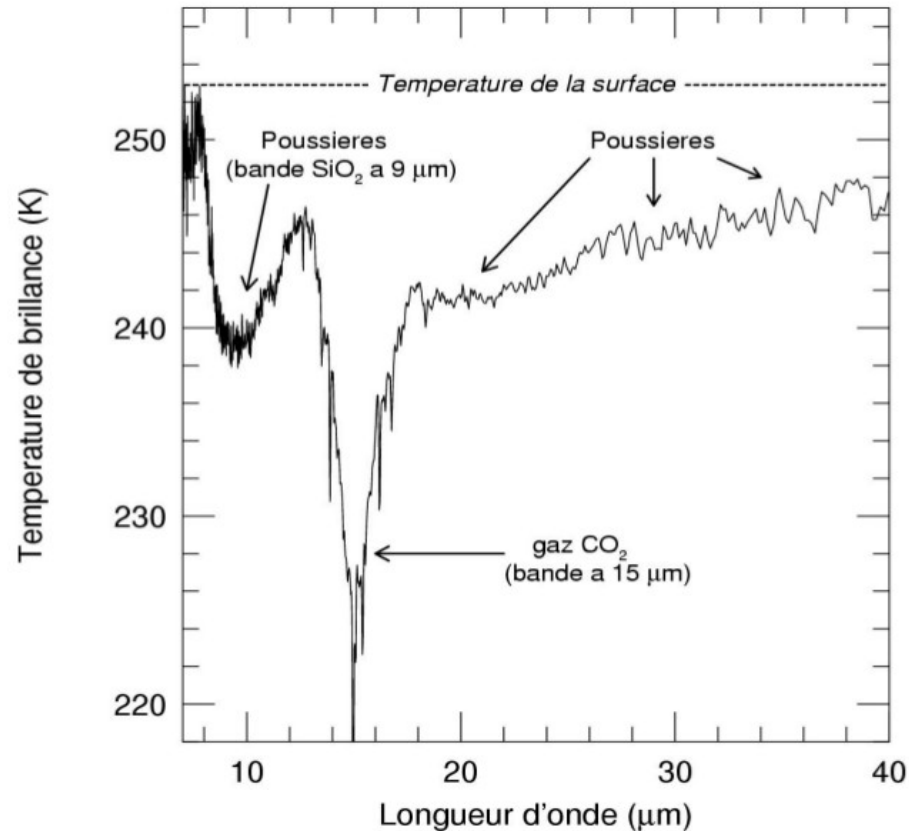
$$T_{\text{brillance}} = (1 - \xi) T_{\text{surf}} + \xi T_{\text{atm}}$$



$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]}$$

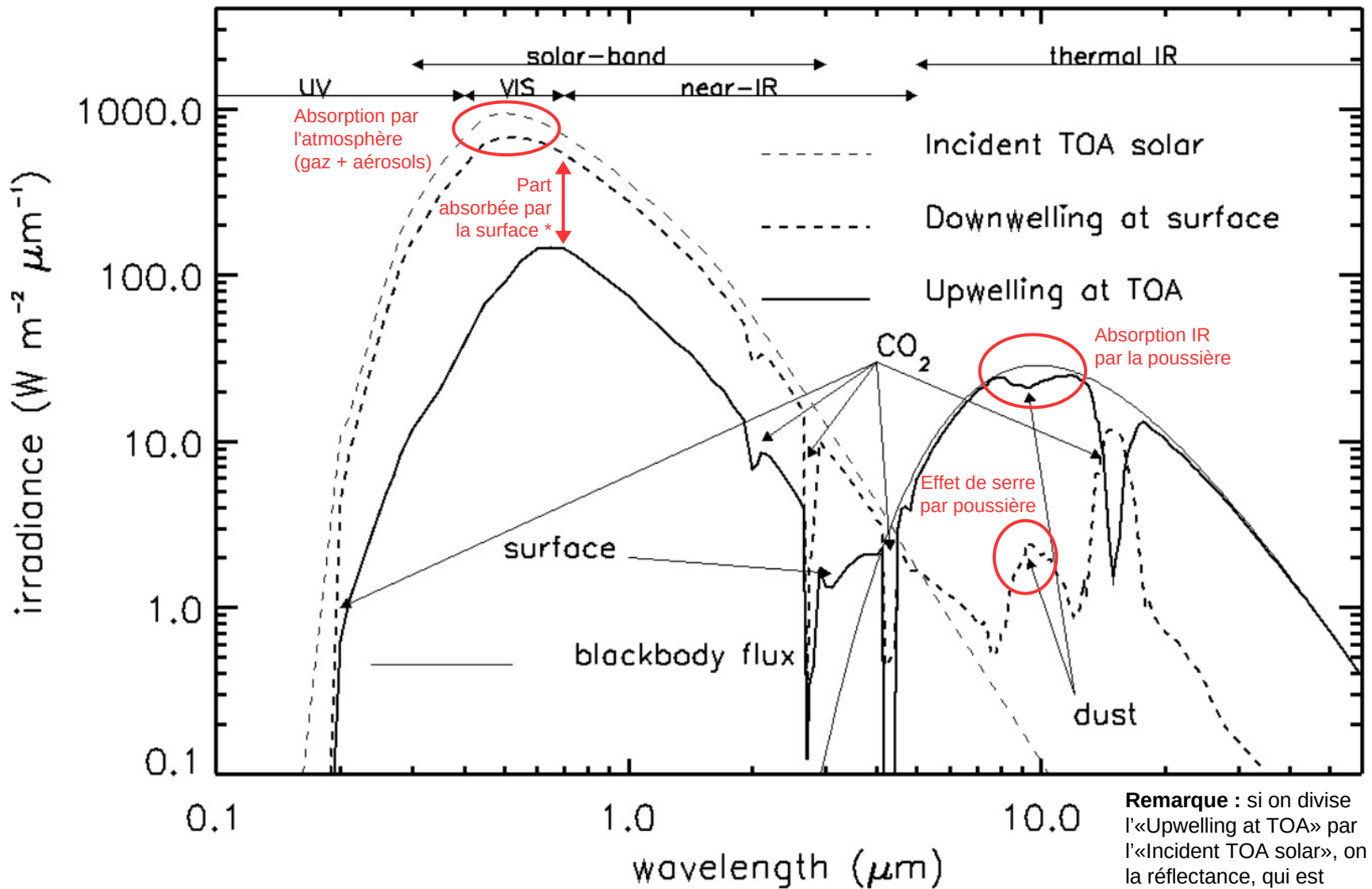
La luminance spectrale (« monochromatic radiance ») mesurée à une longueur d'onde donnée par le satellite peut être ajustée à la luminance d'un corps noir $B_{\lambda}(T)$ à une température équivalente donnée T . **La température fonction de la longueur d'onde T_b résultante est appelée température de brillance (« brightness temperatures »).**

Spectre IRIS [Mariner 9] à 2.2 cm^{-1}
ancêtre de PFS [Mars Express]



[F. Forget 1996]

Eclairement / émittance spectrales

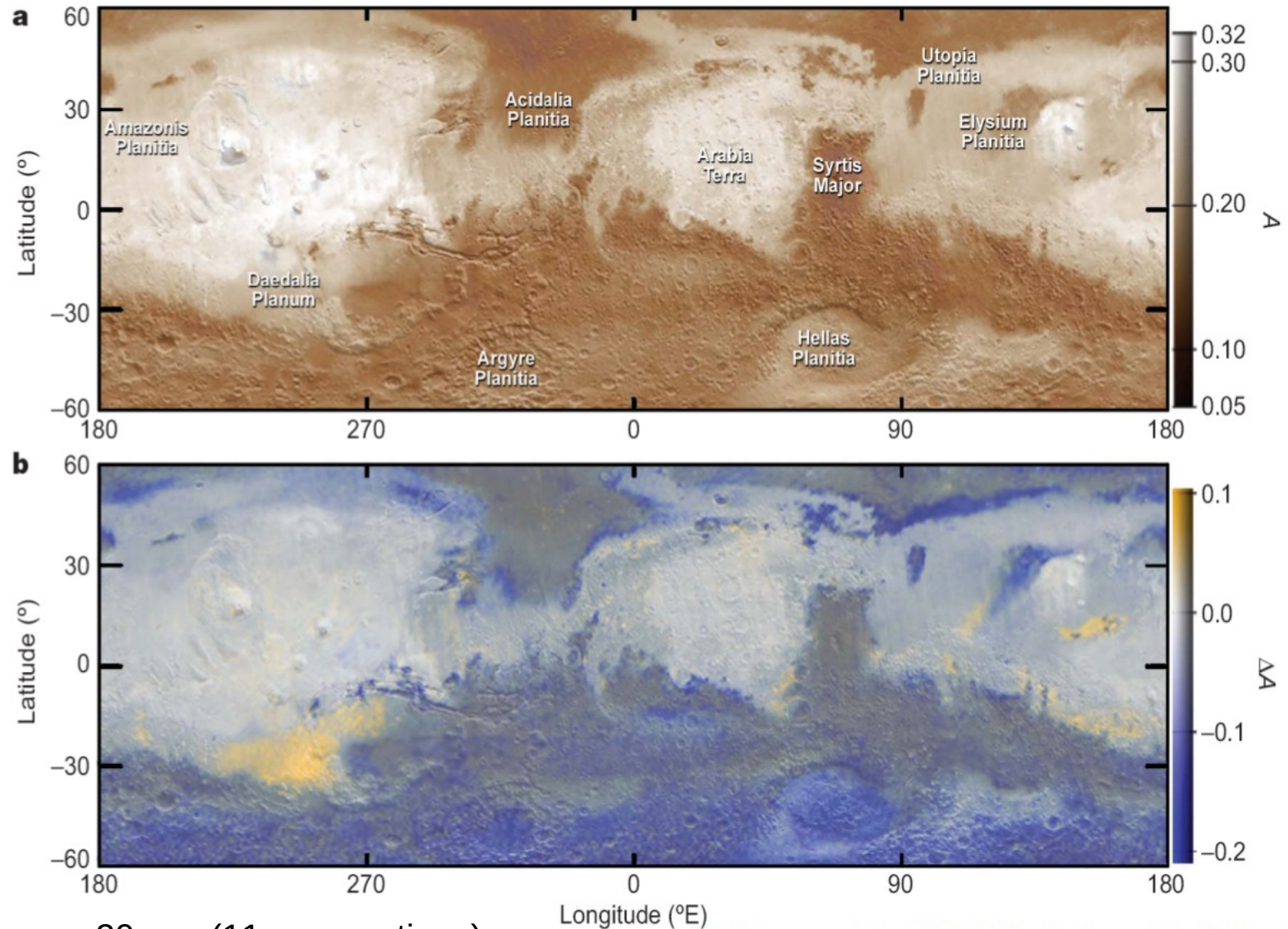


[Wolff et al. 2013]

* principalement ; l'atmosphère va absorber de nouveau le flux réfléchi par la surface

Remarque : si on divise l'«Upwelling at TOA» par l'«Incident TOA solar», on obtient la réflectance, qui est communément utilisée pour tracer les « spectres d'absorption »

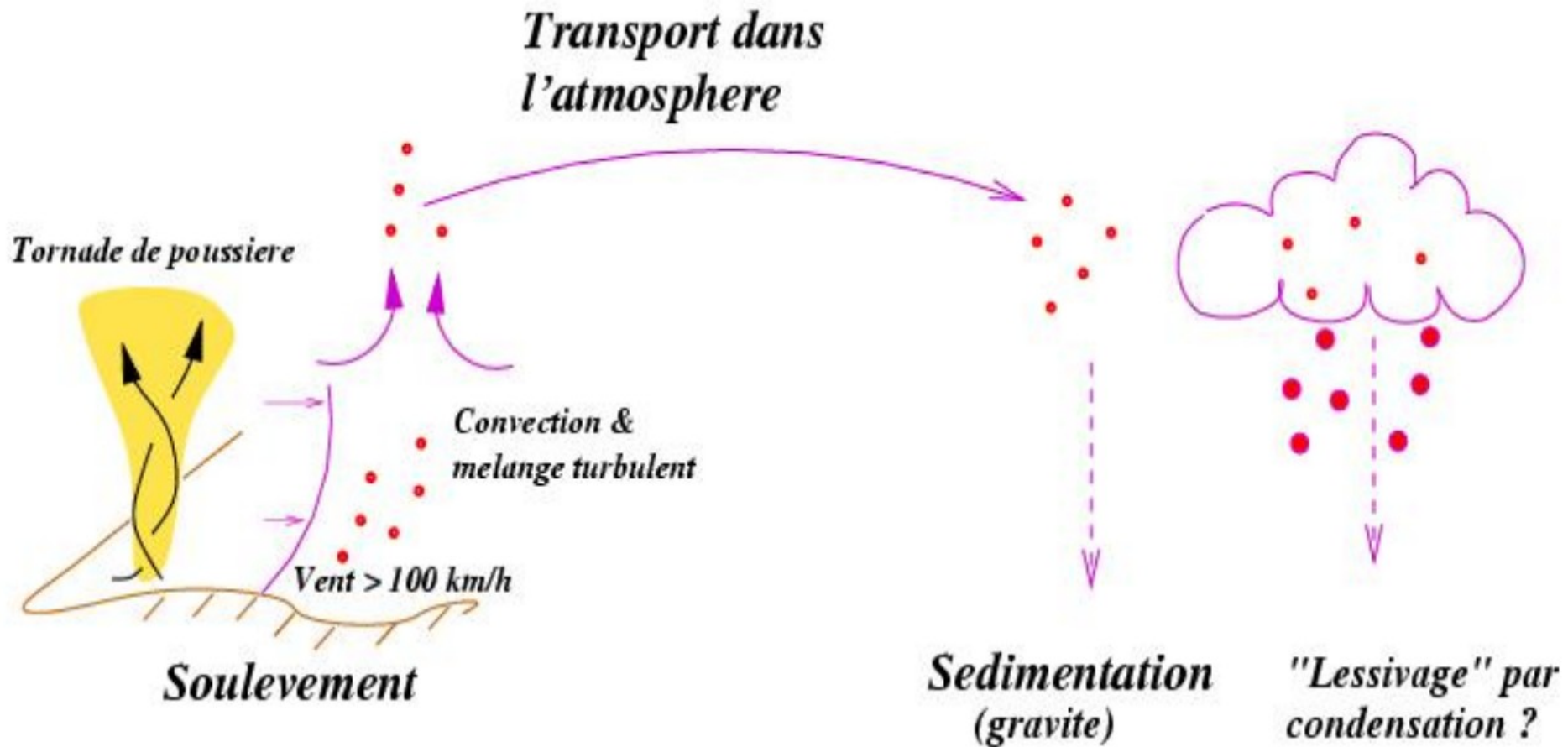
Albédo de surface



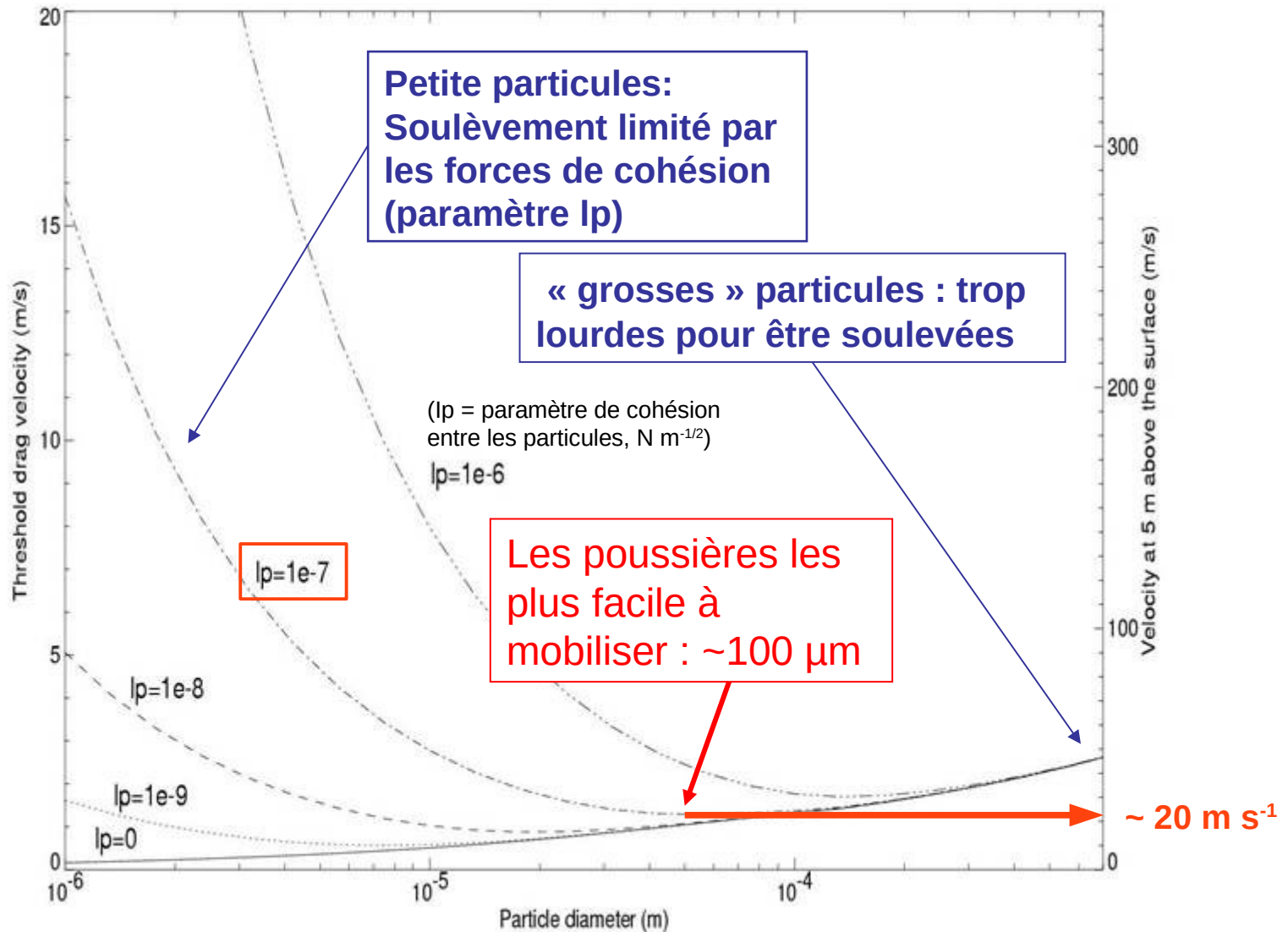
Différence en 20 ans (11 ans martiens)

[Christensen et al., JGR 2001 ; Fenton et al., Science 2007]

Transport de la poussière

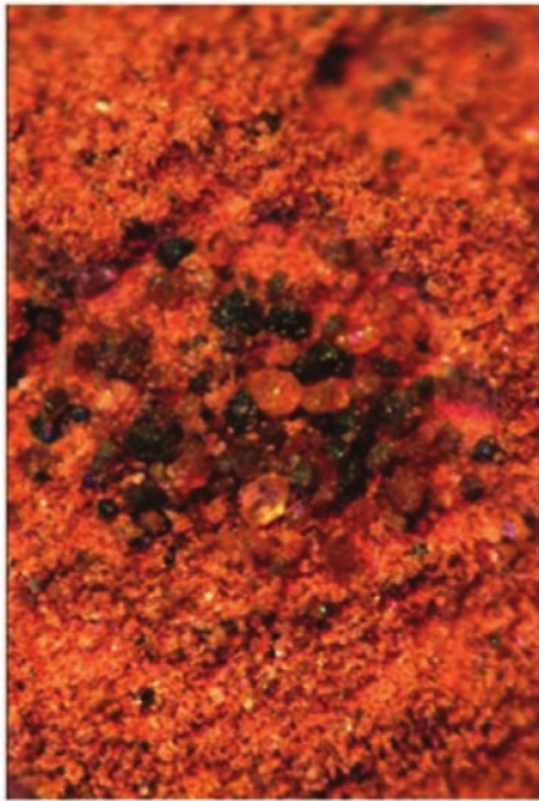


Soulèvement en surface



Processus de saltation

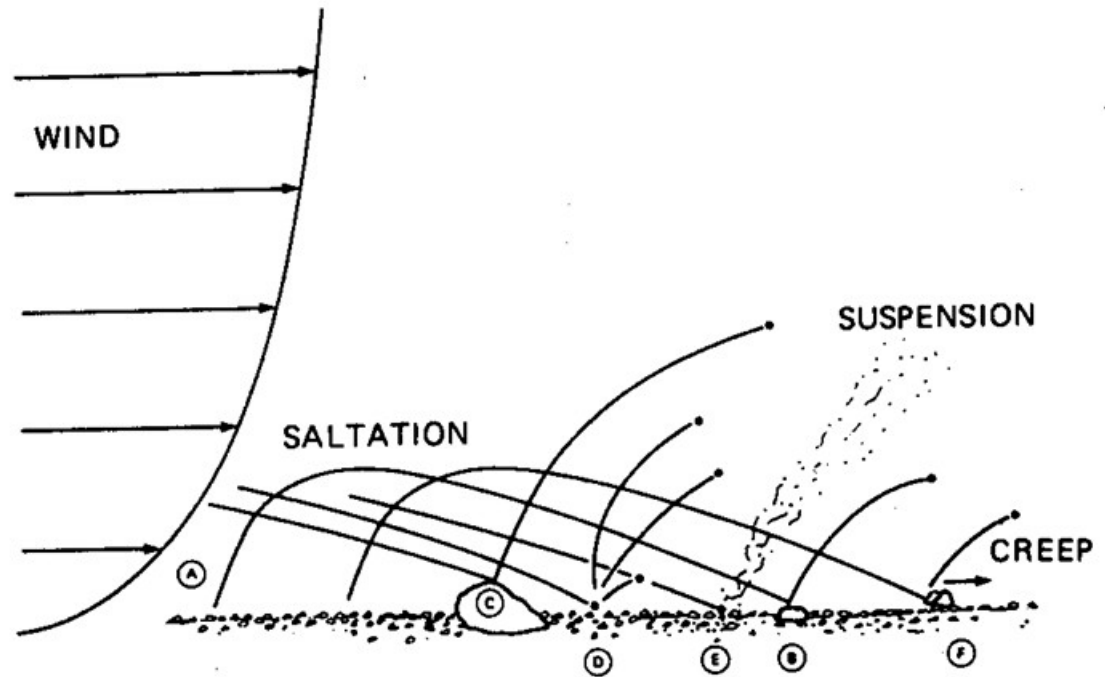
Grains observés par Phoenix
d'environ $50\ \mu\text{m}$
(grains concernés par la saltation)



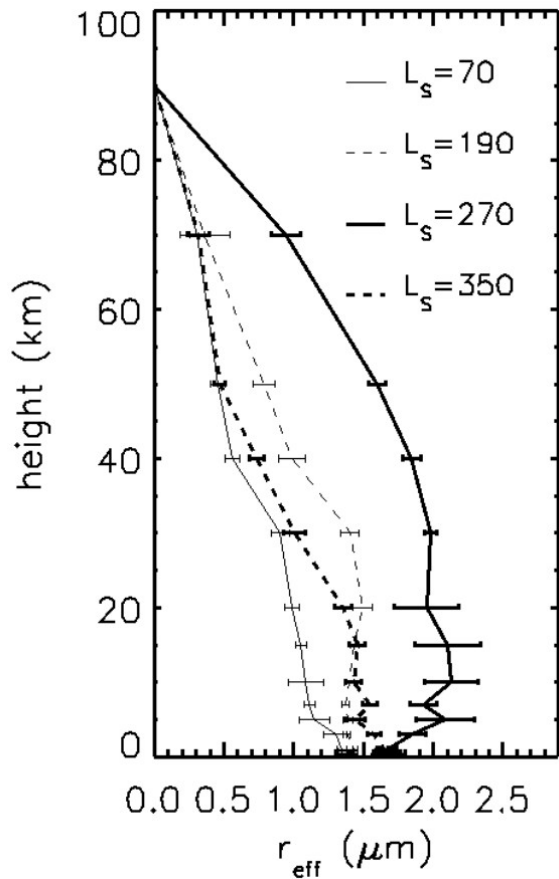
1 mm

[Smith, 2009]

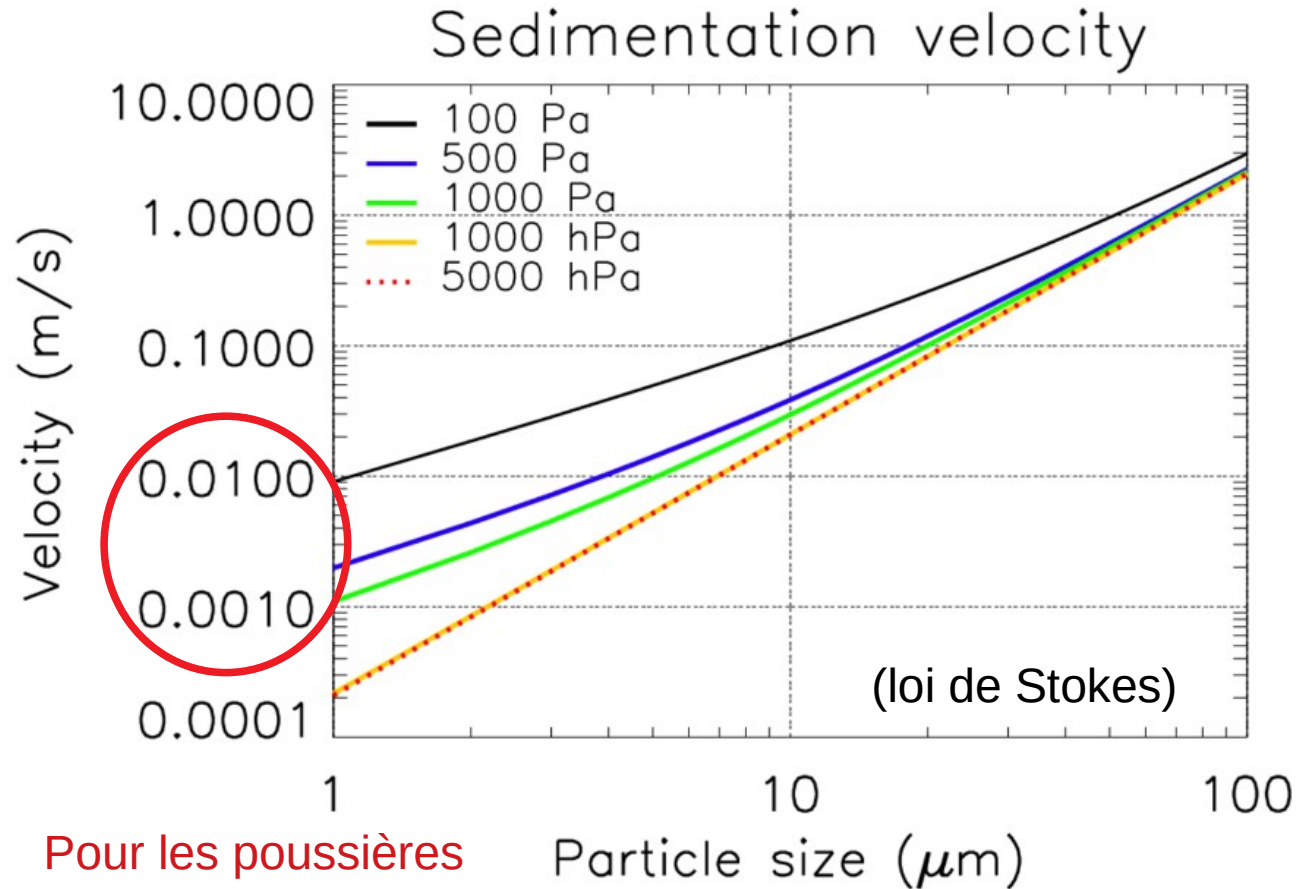
Les poussières de $\sim 100\ \mu\text{m}$ délogent
les plus petites particules capables de
rester en suspension



Sédimentation et ségrégation en taille



[Kahre et al., 2008]

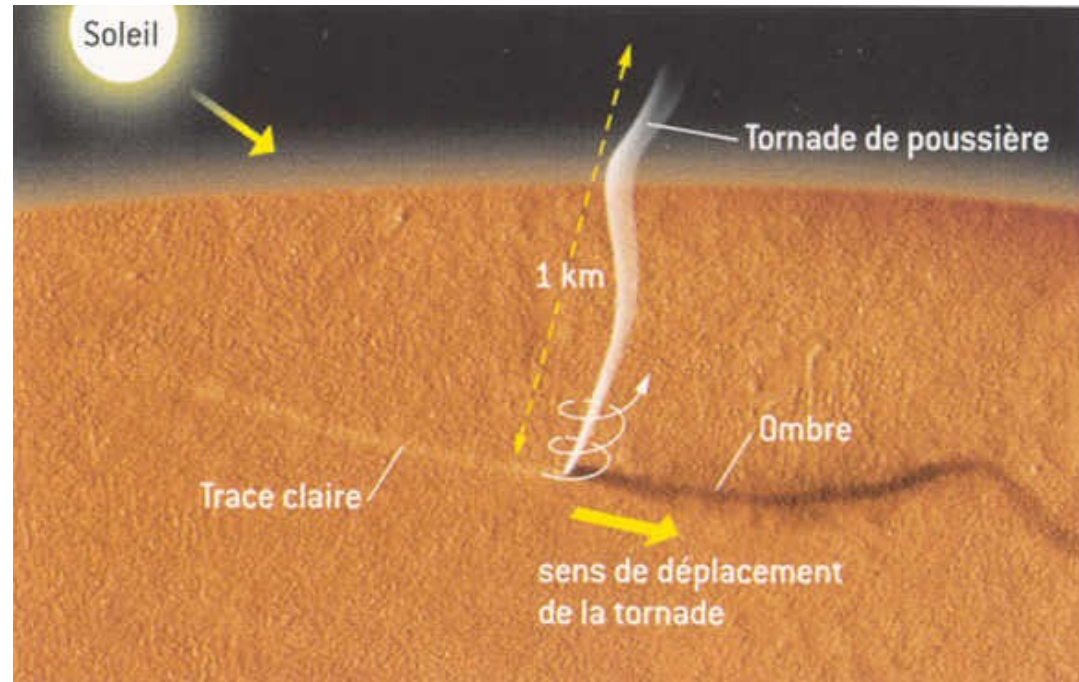
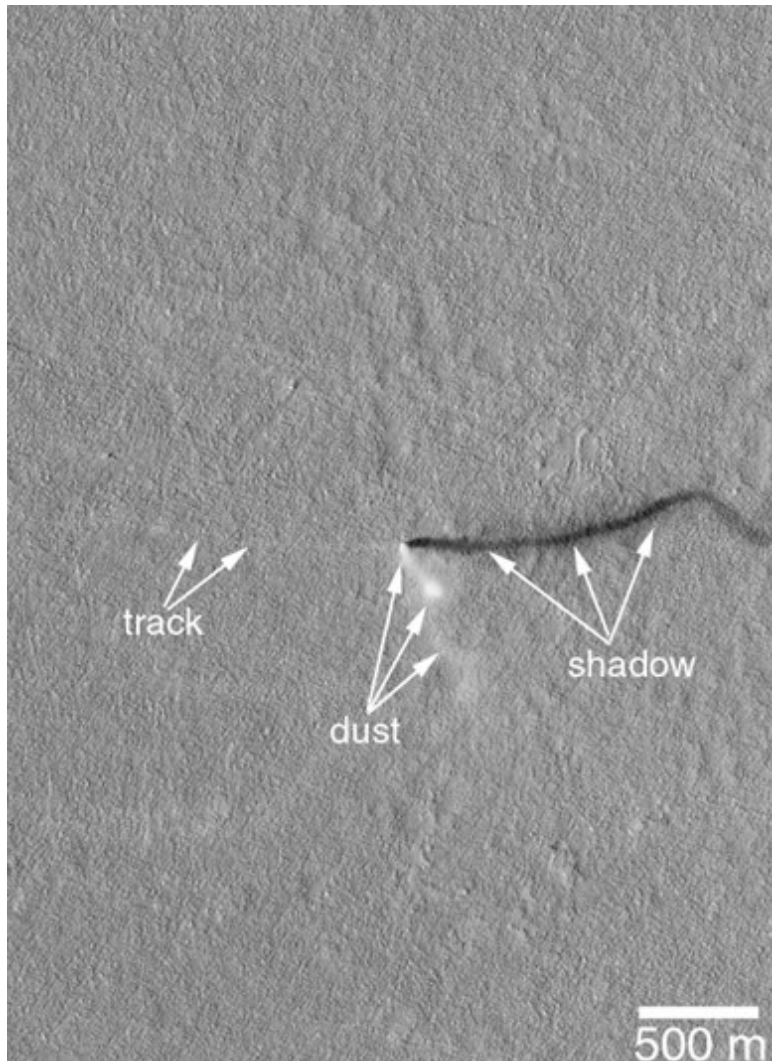


Pour les poussières
martiennes, vitesse
de l'ordre du cm/s
voire du mm/s

Origine de la poussière

1) Tornades de poussières

(convective vortices = dust devils, voir aussi cours sur la dynamique atmosphérique)



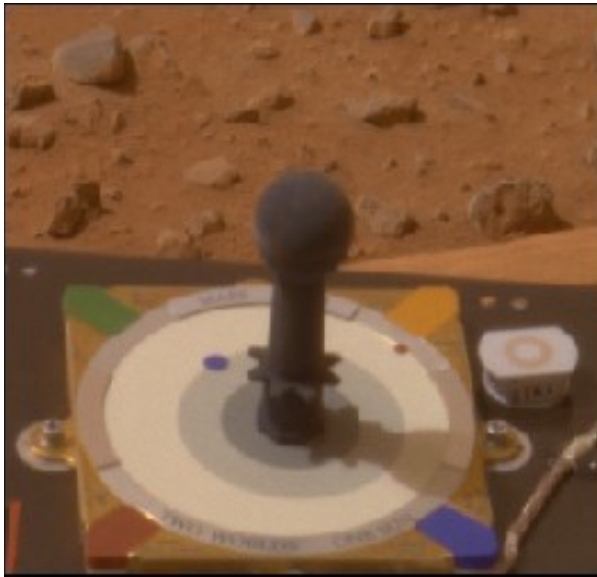
Traces laissées par les tornades



[HiRISE, Mars Reconnaissance Orbiter, 2009]

Nettoyage du rover Spirit !

Spirit sol 9 (11/01/2004)



sol 416 (05/03/2005)



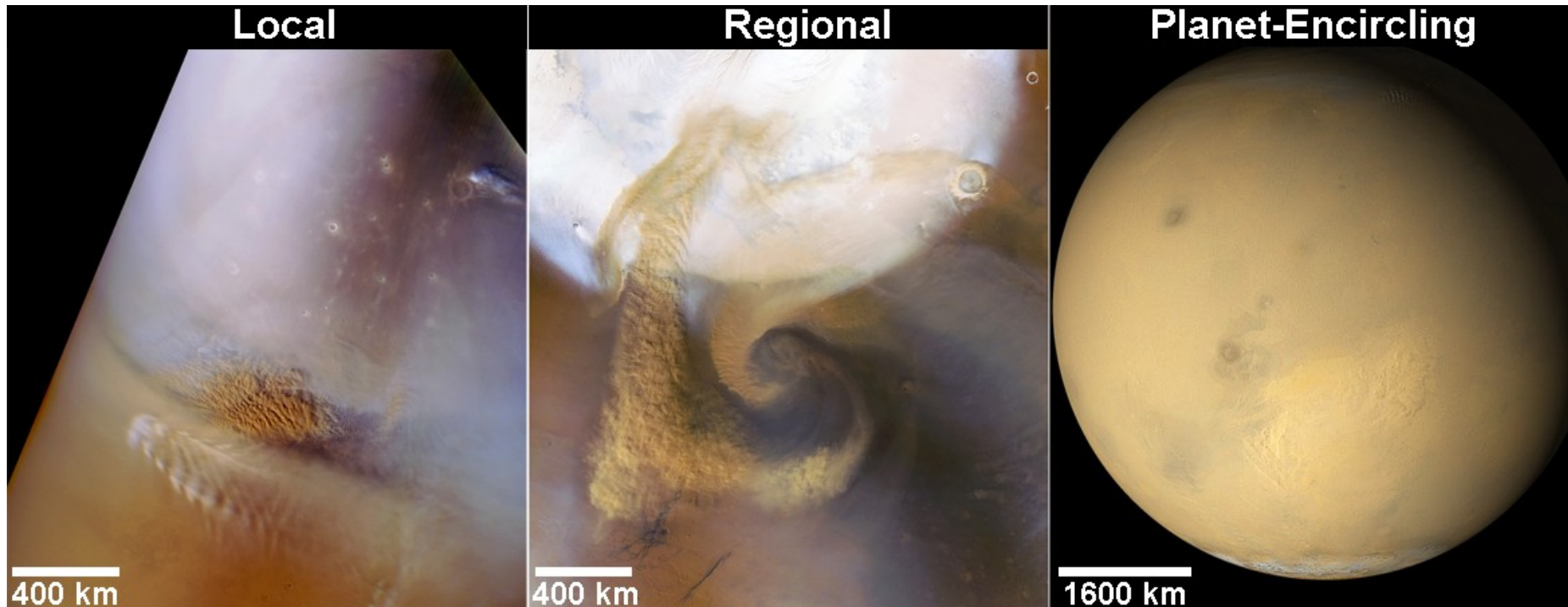
sol 426 (15/03/2005)



Dust devil cleaning on sol 420 !

Tempêtes de poussière

2) Tempêtes de poussières locales, régionales et globales

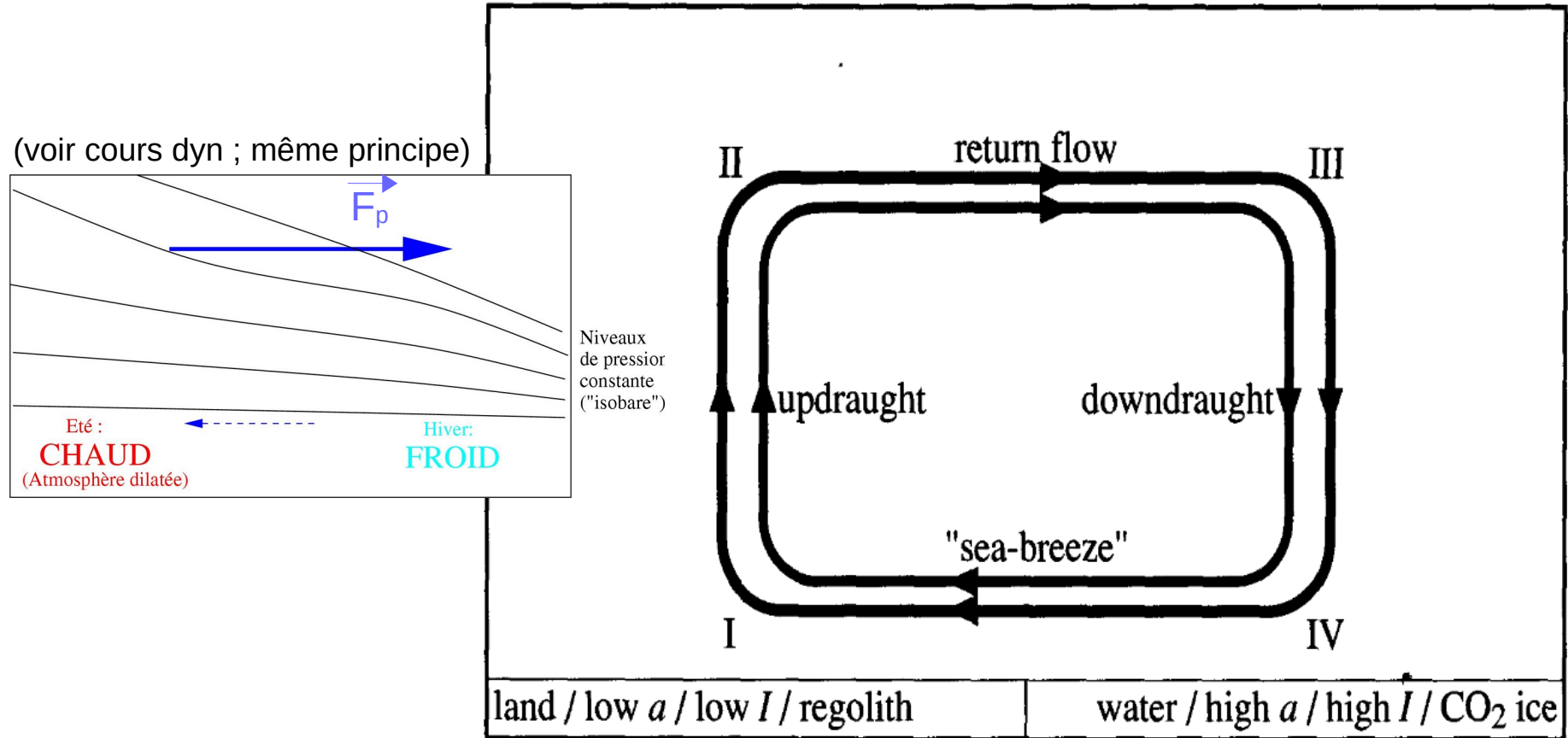


Tempêtes globales : MY9 1971 (Mariner 9), MY12 1977 (Viking orbiters), MY25 2001 (MGS), MY28 2007 (MRO, MEx, MO, MERs), MY34 2018

[Cantor et al., 2014]

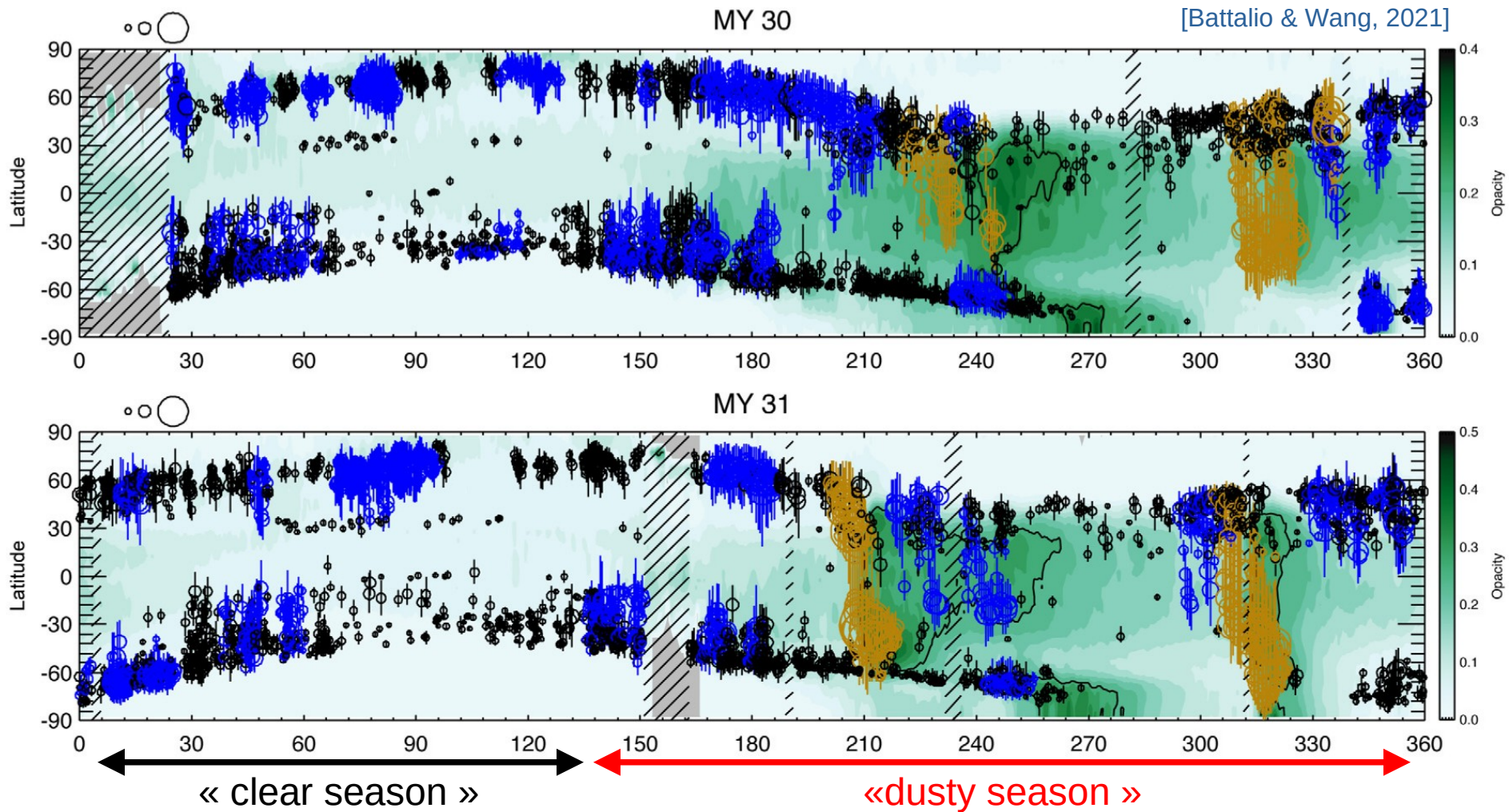
Soulèvement en marge de la calotte saisonnière

Le contraste thermique à la frontière de la calotte de CO₂ est la principale source de la forte tension de vent à la surface dans cette région [Toigo et al. JGR, 2002]



[source : T. Siili]

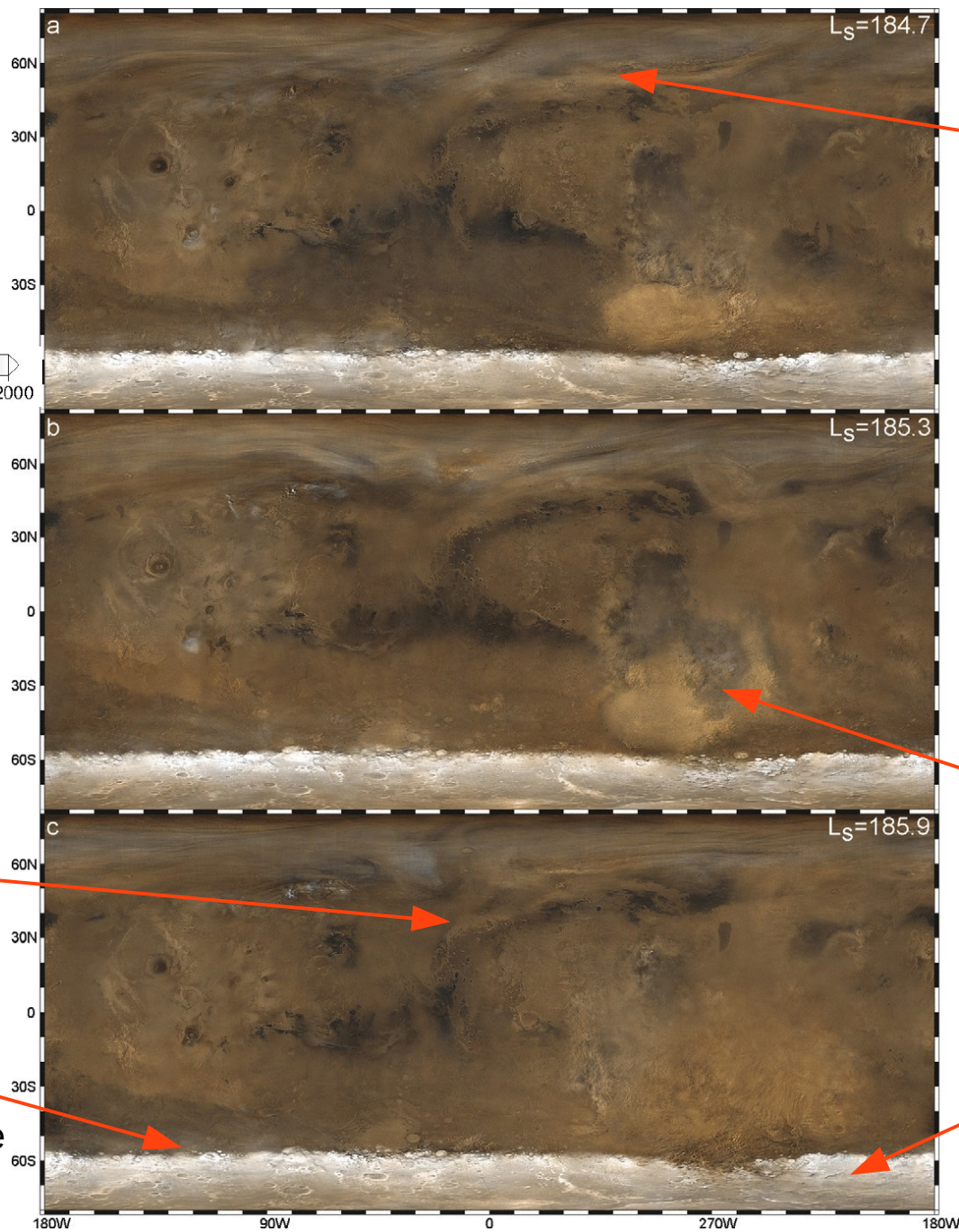
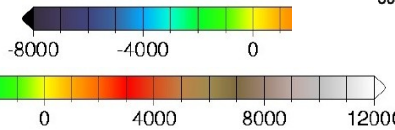
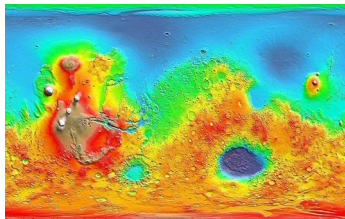
Cycle saisonnier de la poussière



Bleu = Séquence de tempêtes de poussière
Jaune = Séquence longue de tempêtes
Couleur verte = Épaisseur optique à 9,3 μm

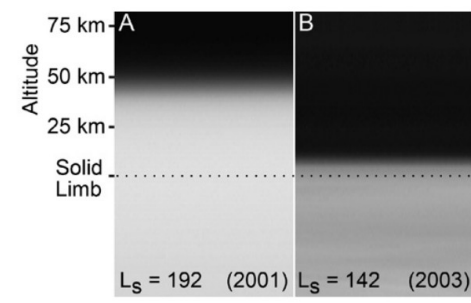
- En marge des calottes saisonnières
- Dans le passage des ondes baroclines (bassin d'Acidalia surtout)

Topographie :



Nuages et ondes stationnaires

Épaississement de la couche :



Ondes baroclines et « storm track »

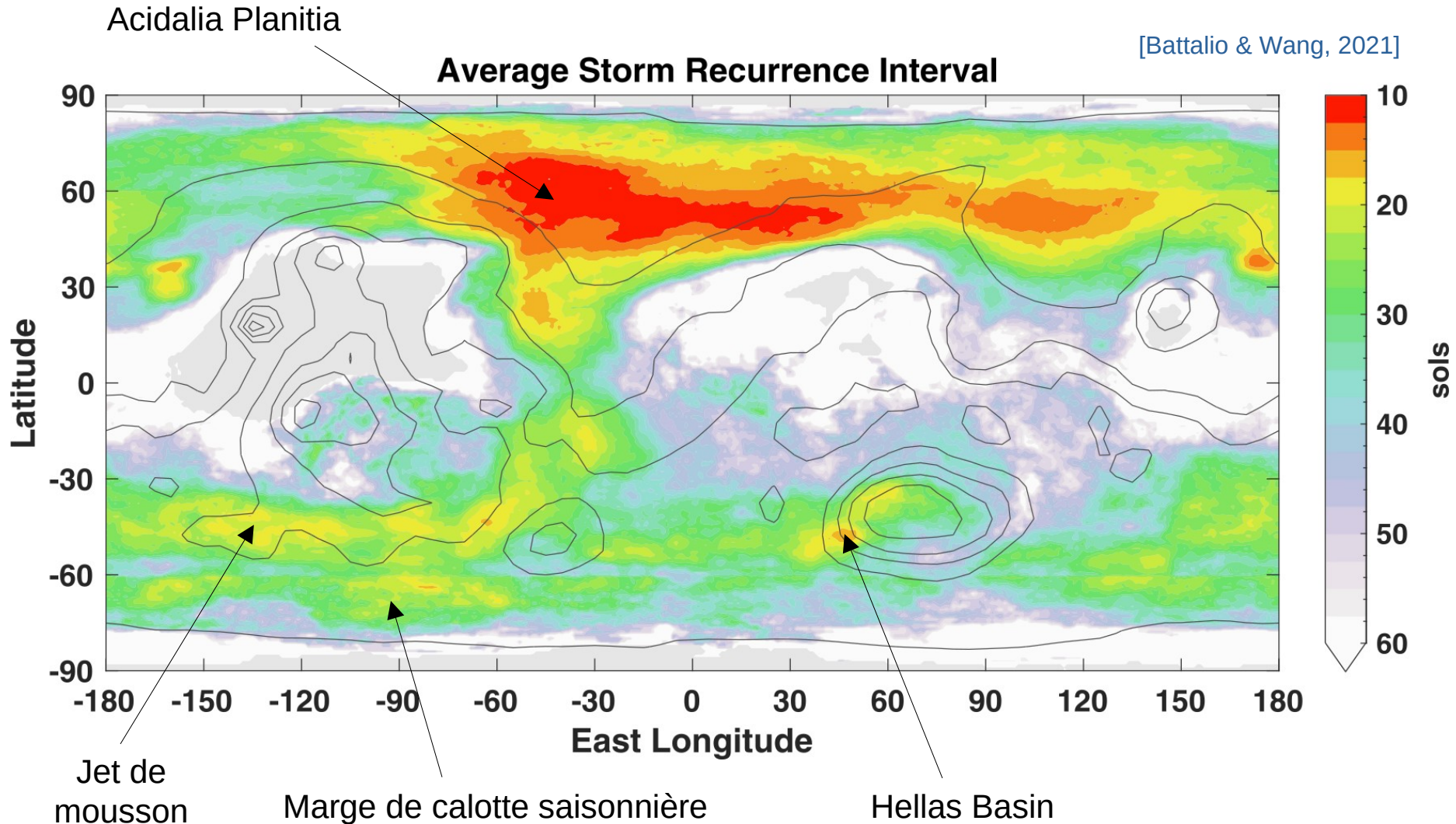
Soulèvement en marge de la calotte saisonnière

Initiation de la tempête dans Hellas basin

Calotte saisonnière de CO₂ + eau

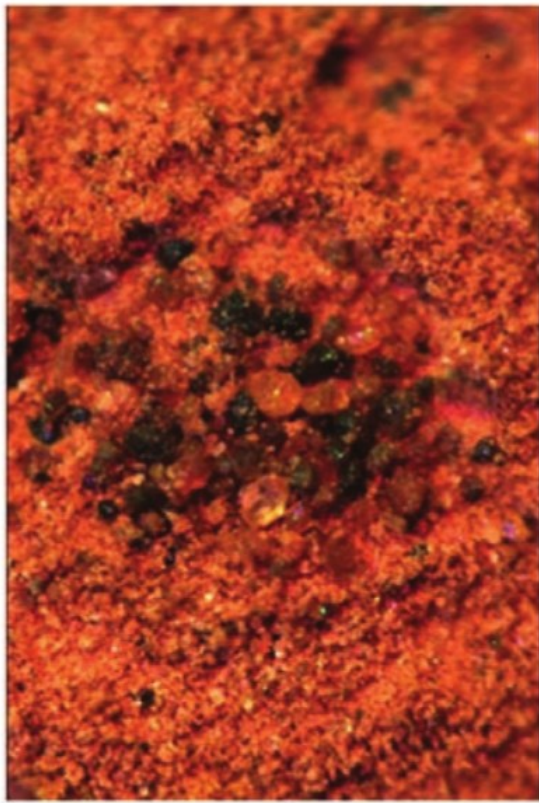
[Cantor et al., 2007]

Régions de tempêtes



Impact sur la structure thermique

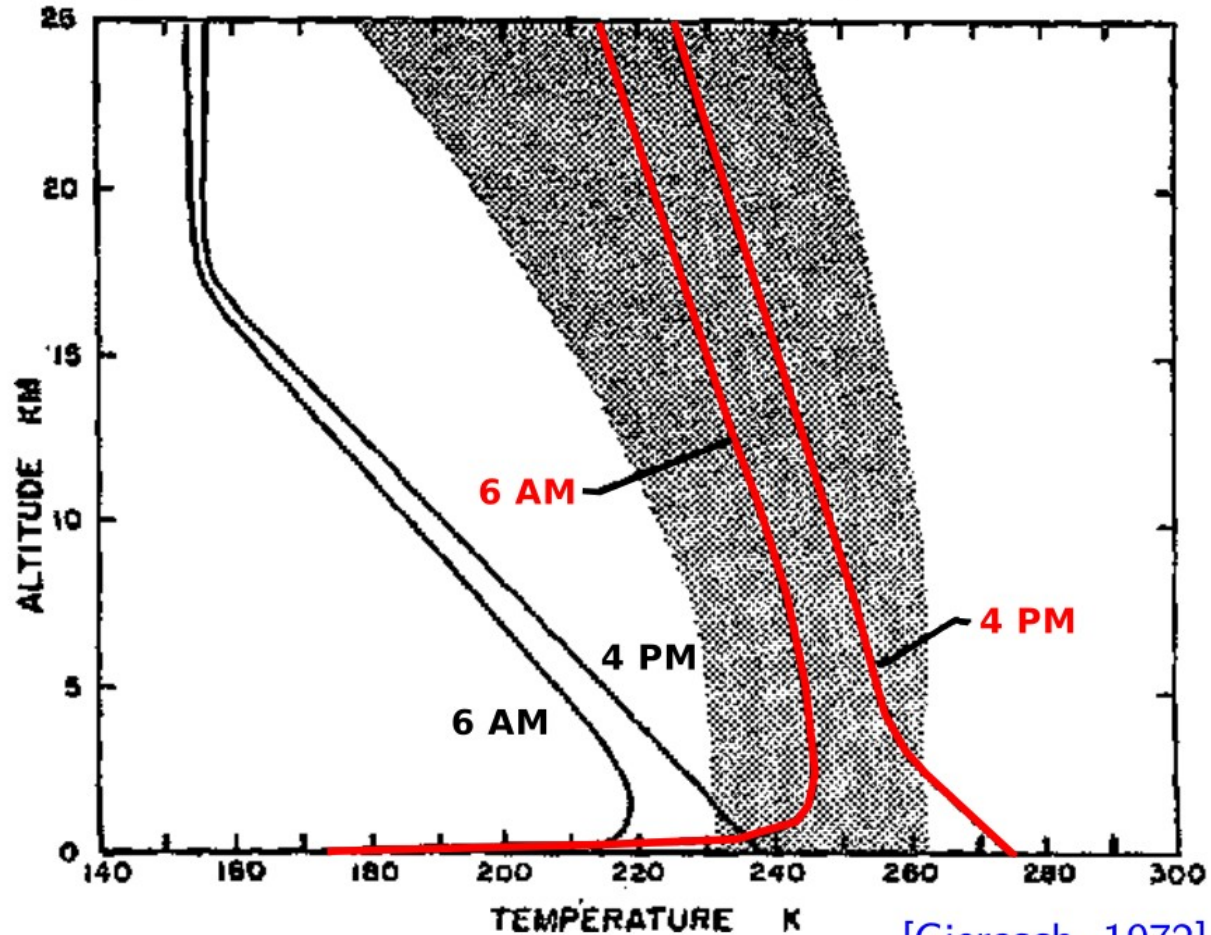
Microscope image of the surface by Phoenix.



1 mm

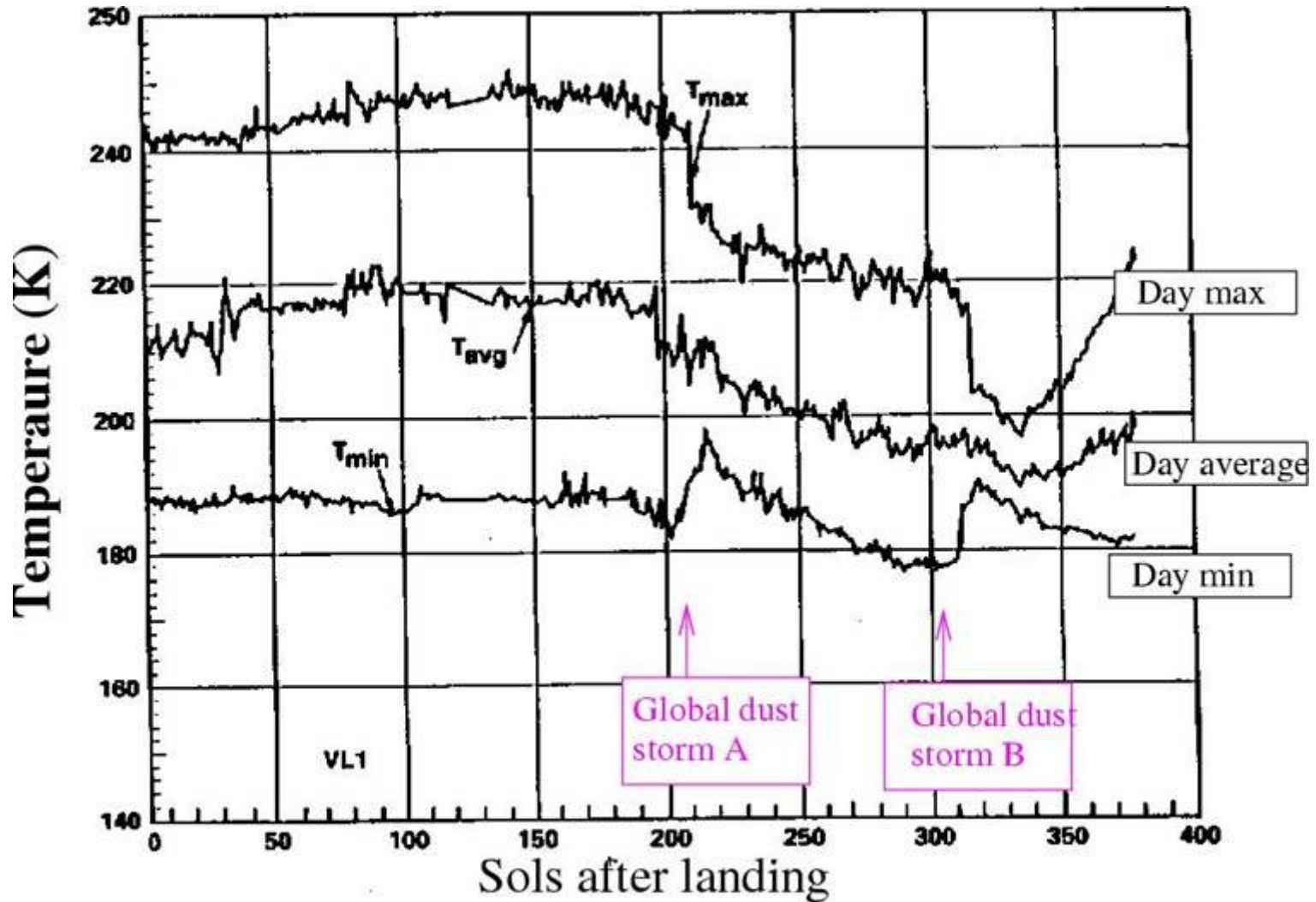
[Smith, 2009]

Black: pure CO₂ – **Red:** CO₂ + solar abs.
Grey area: Mariner 6 & 7 temperatures.



[Gierasch, 1972]

Impact sur la température de surface



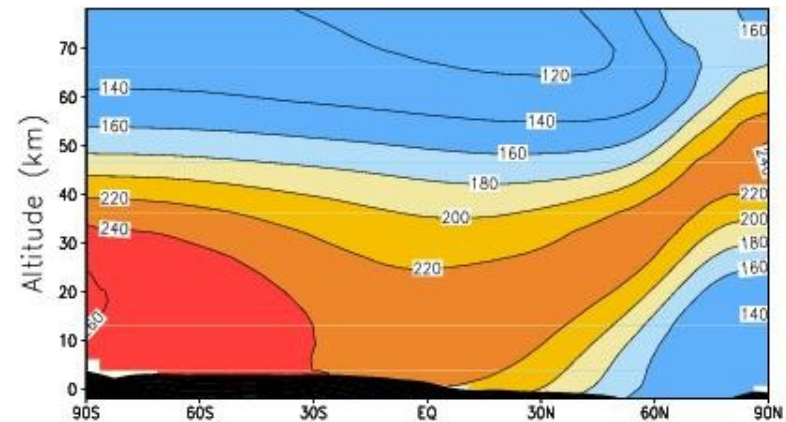
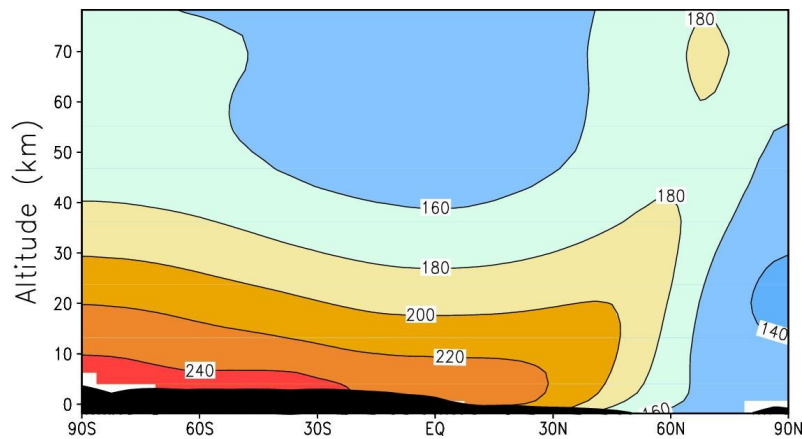
Influence sur la structure thermique et la dynamique

$L_s = 270-300^\circ$

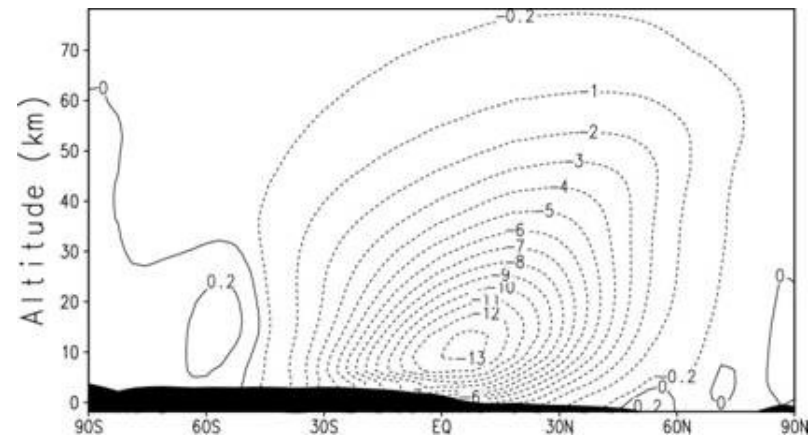
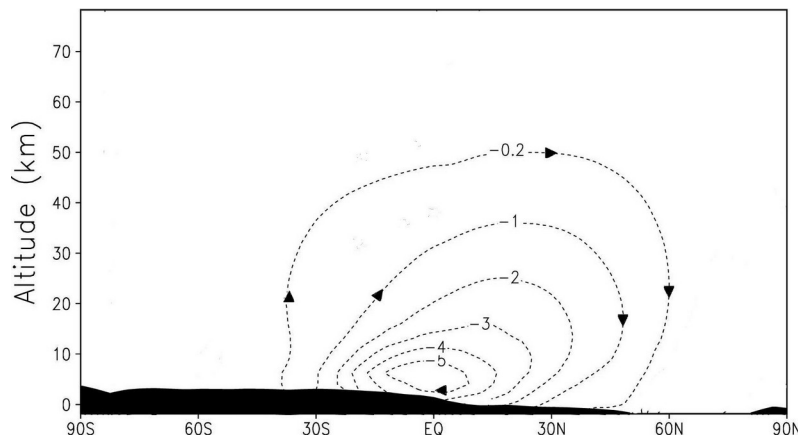
Atmosphère Claire

Atmosphère poussiéreuse

Température (K)



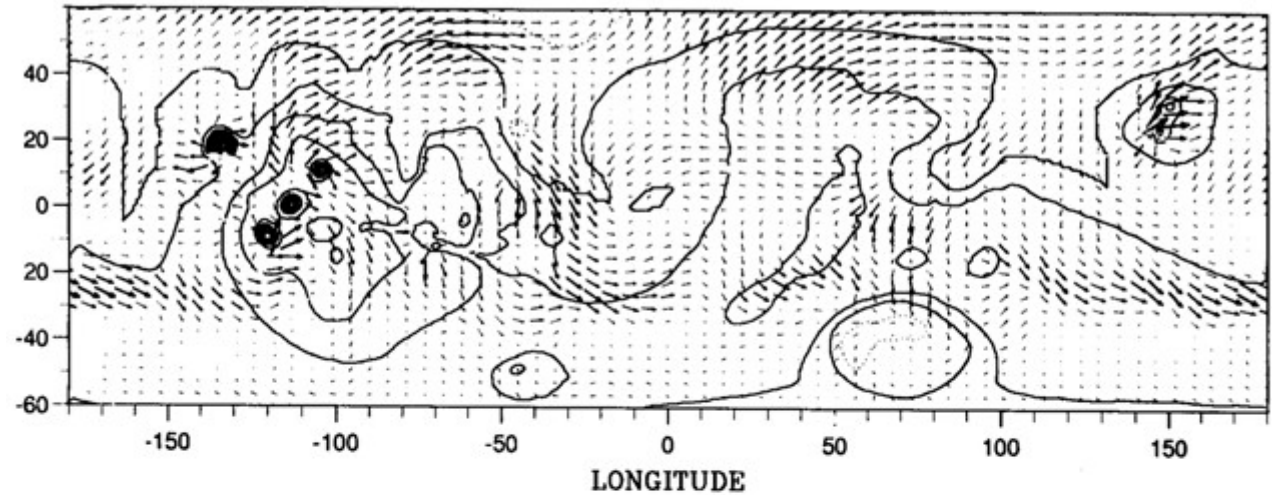
Fonction de courant méridienne (10^9 kg s^{-1})



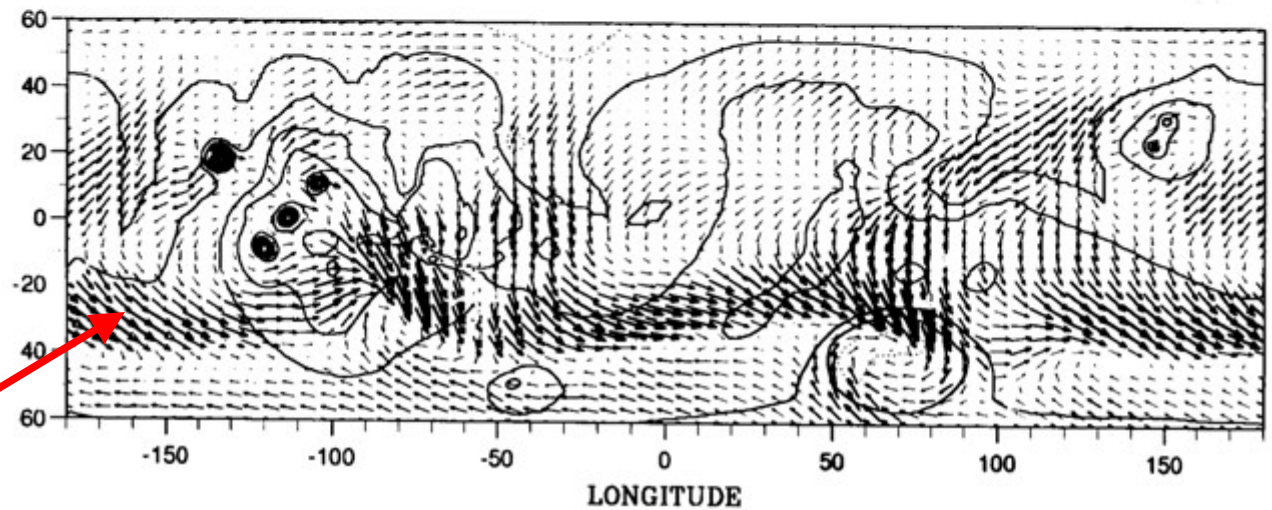
Influence sur les vents proche de la surface

$L_s = 270-300^\circ$

Clear
Atmosphere



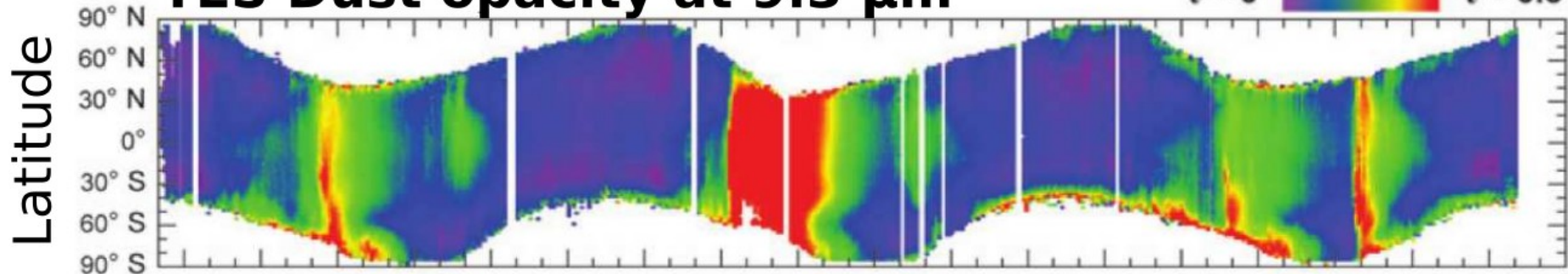
Dusty
Atmosphere



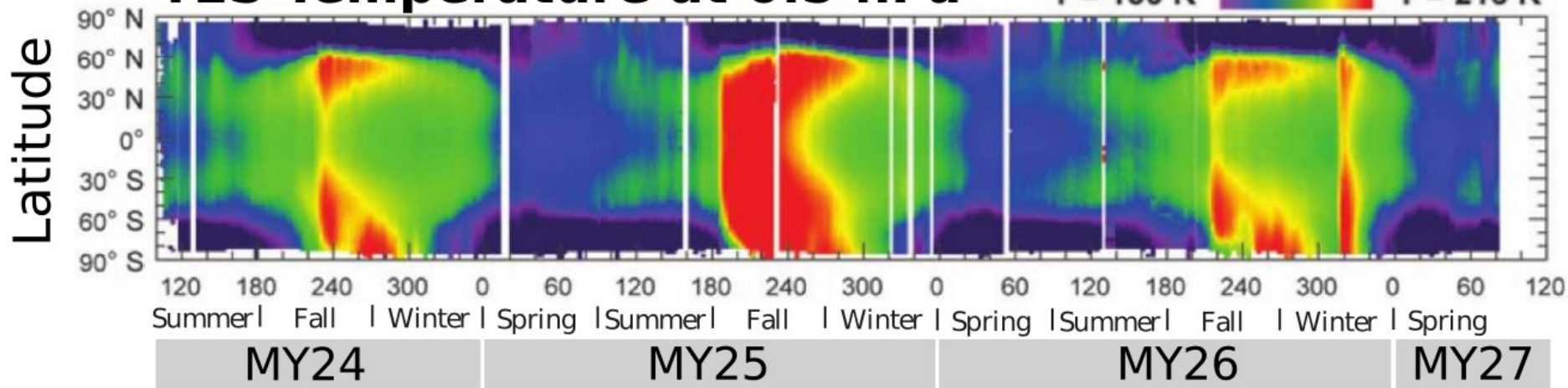
**Jet de
mousson**

Variabilité interannuelle de l'opacité

TES Dust opacity at 9.3 μm



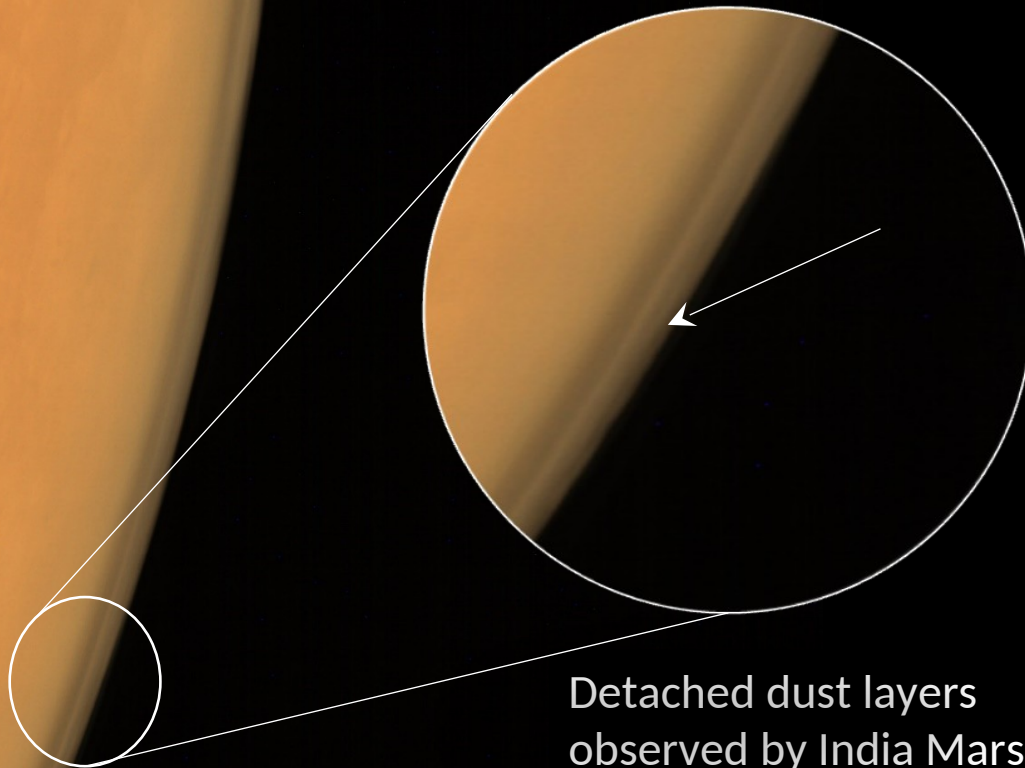
TES Temperature at 0.5 hPa



L_s

[Smith, 2008]

Distribution verticale de la poussière



Detached dust layers
observed by India Mars
Orbiter Mangalyaan
mission (seen from an
altitude of 8449 km)

Observations par MCS

Dust density scaled opacity ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) during the aphelion season observed by Mars Climate Sounder

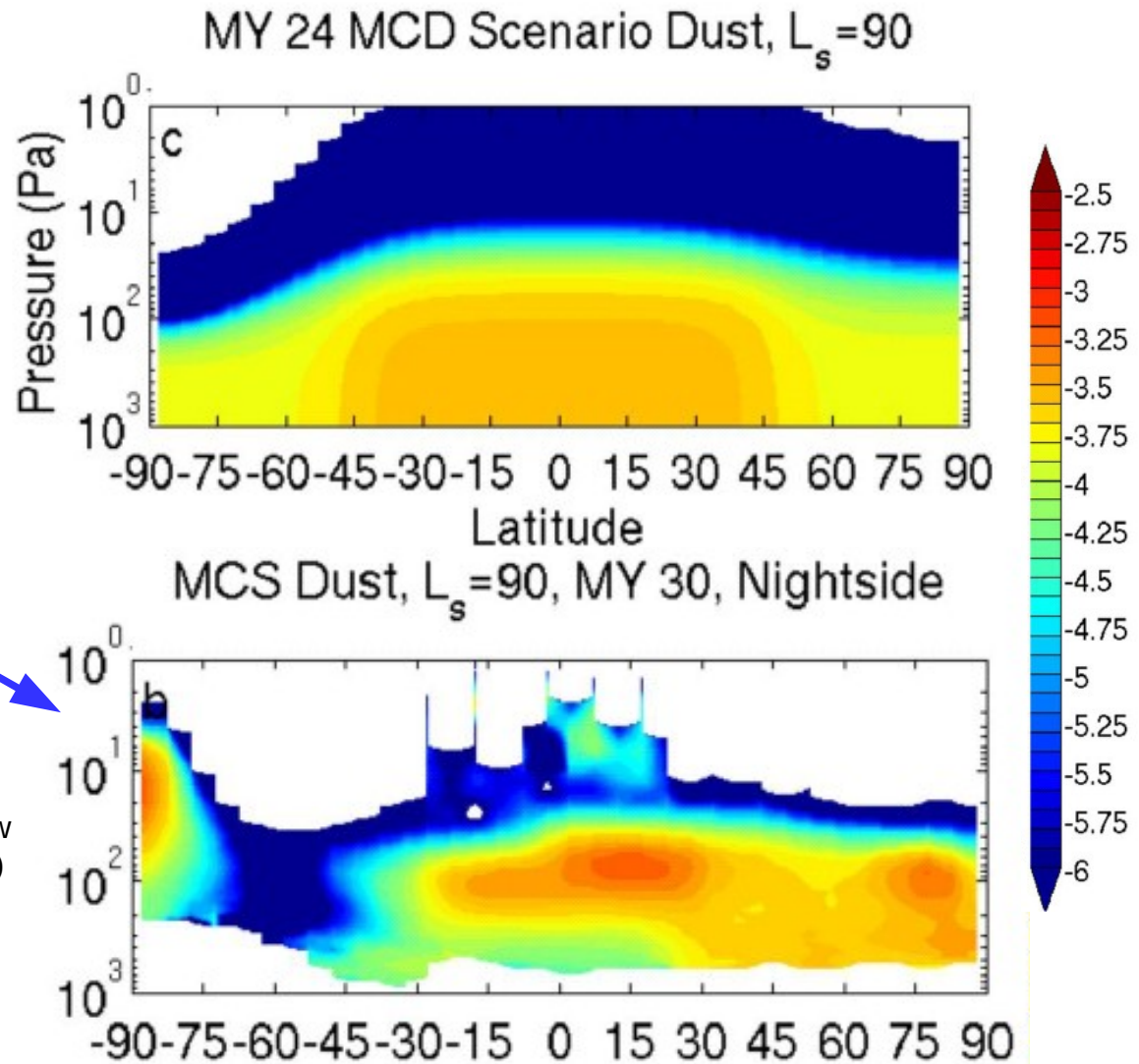
(Heavens et al. 2011)
(log units)

Expected distribution
(Forget et al. 1999)
(well mixed)

Distribution observed by Mars Climate sounder
(enriched layer)

Which process ?

- 1) **Dust scavenging** → Dust enrichment below clouds → does not work ? (Navarro et al. 2014)
- 2) **Direct transport of dust** from the boundary layer to the mid atmosphere by:
 - Local topography circulation ? (Rafkin 2011)
 - Convective dust storms ? (Spiga et al. 2013)
 - Combination of both ?



PSP_007338_2640



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



83.7N 235.8E



**Partie 2.1 :
Localisation et
propriétés des
réservoirs d'eau**



L'eau sur Mars de nos jours

Pole nord

Équateur

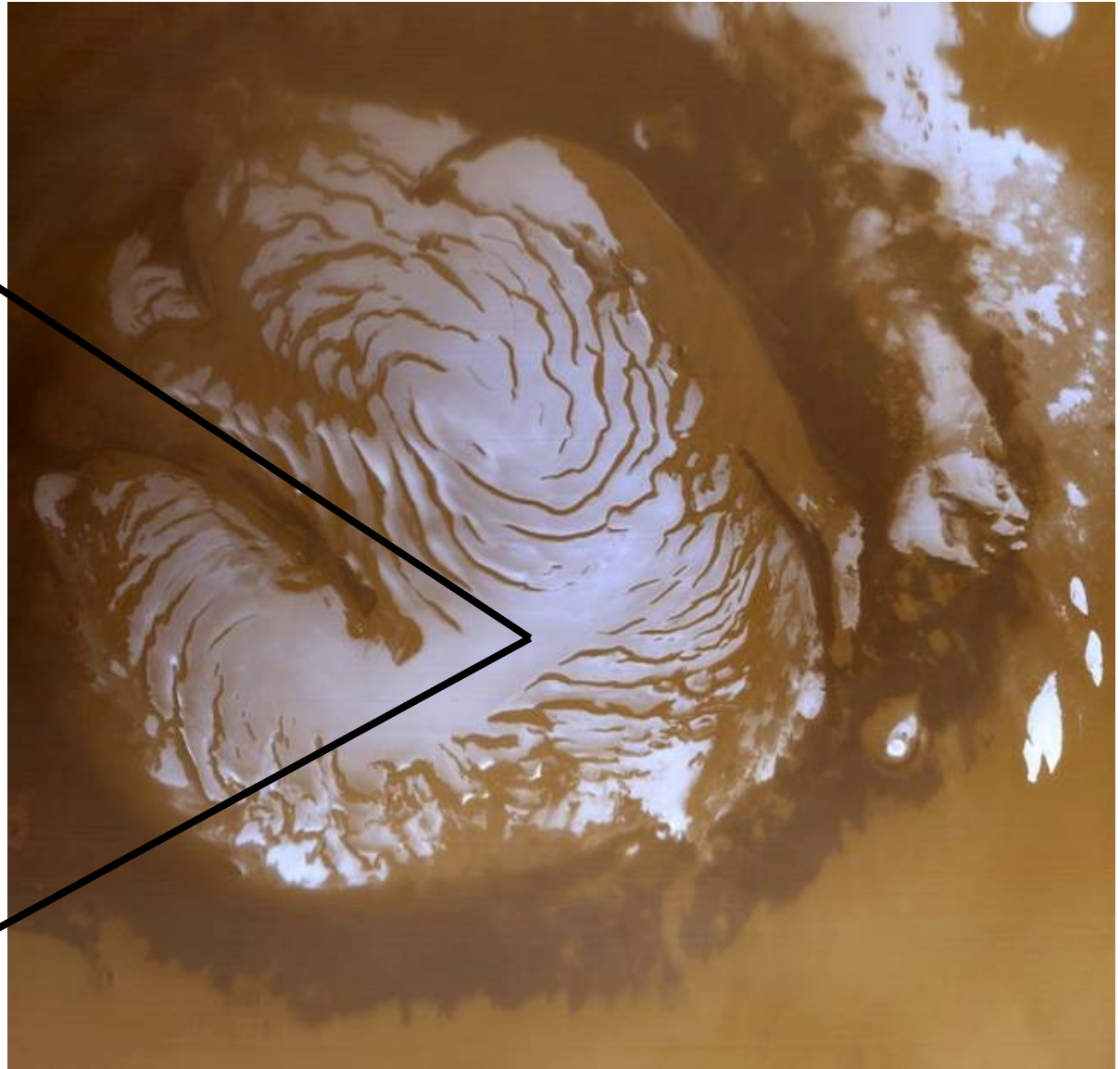
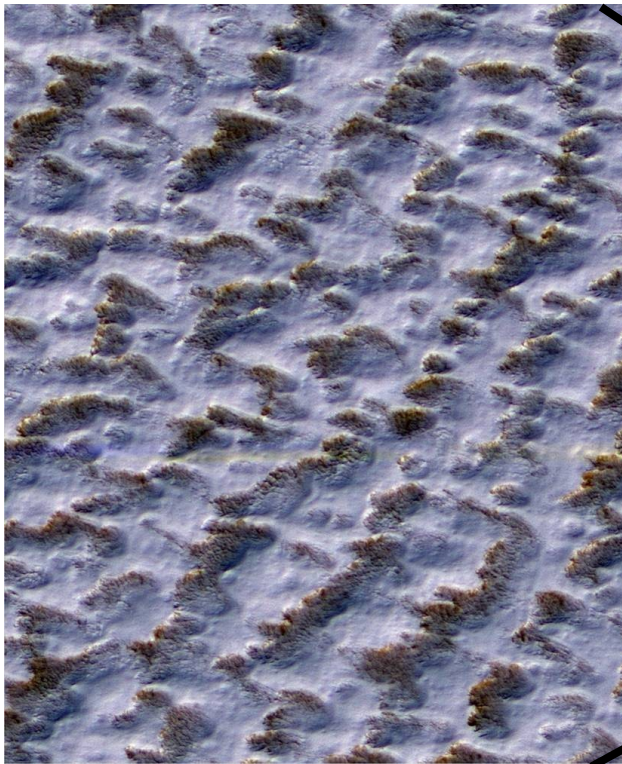
Pole sud

Glace en interaction avec l'atmosphère



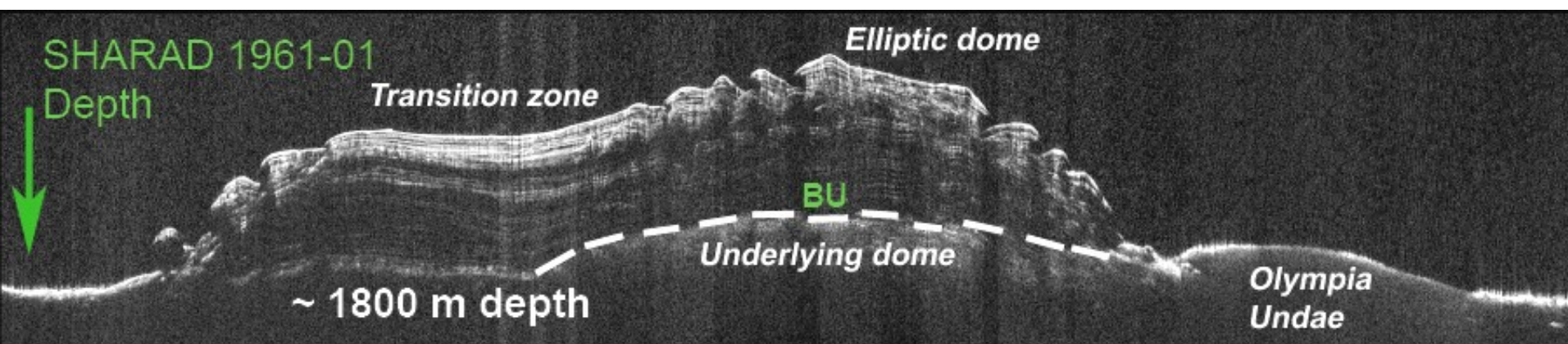
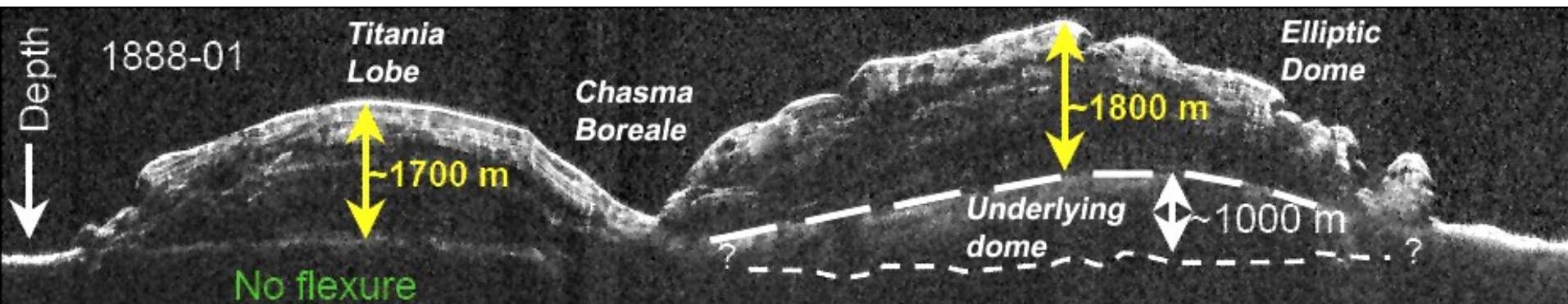
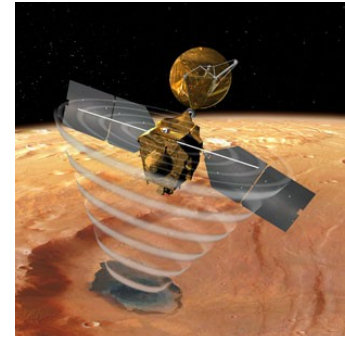
Calotte permanente Nord

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

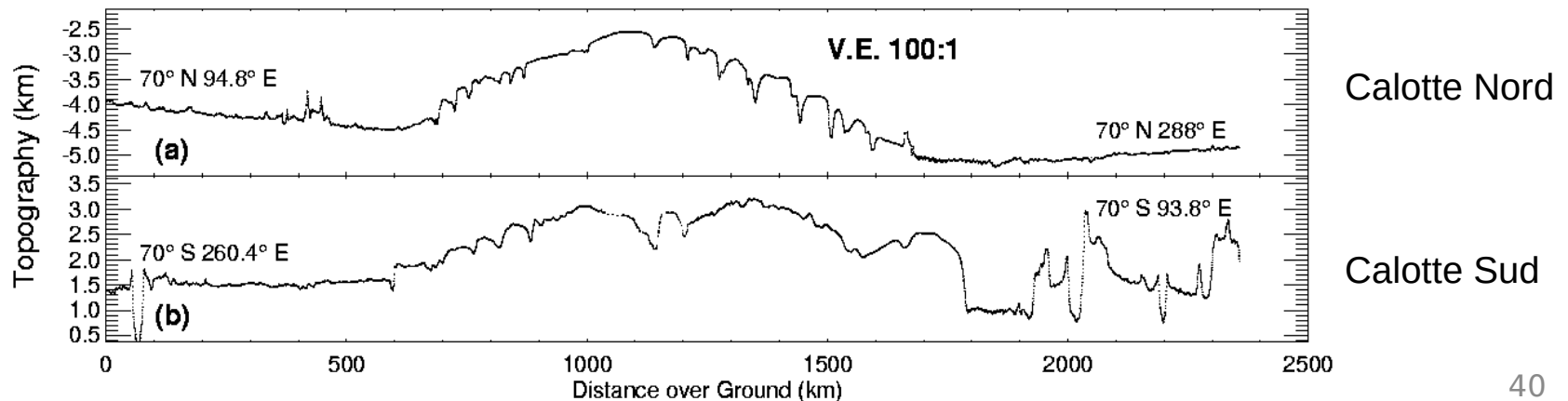
Glace en interaction avec l'atmosphère

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]

CO₂

Regolite sec en contact diffusif avec l'atmosphère

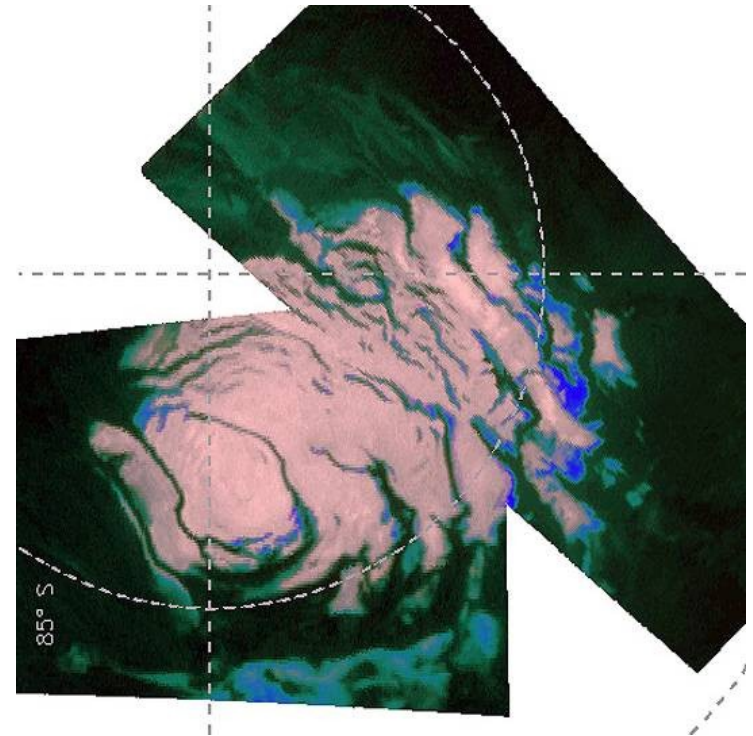


Différences pôle Nord / pôle Sud

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

Blue: Perennial H₂O ice
White Perennial CO₂ ice

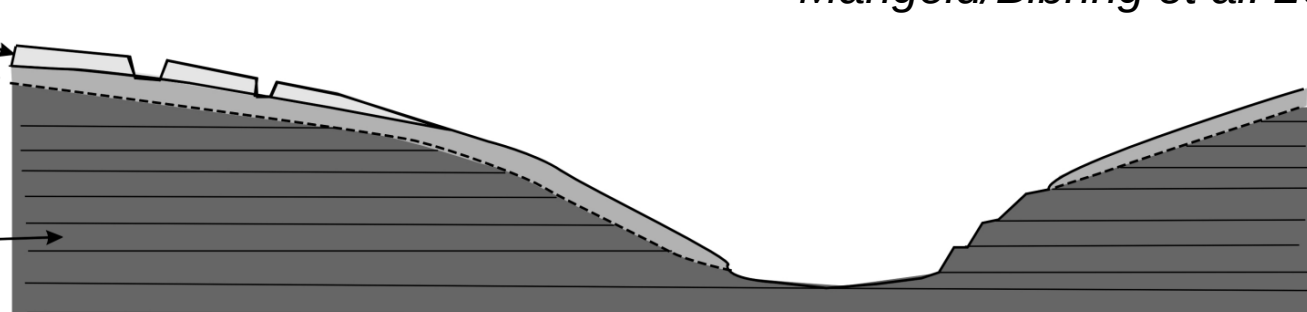
Bibring et al. 2004



Thin CO₂ layer
<10 m

H₂O layer
(seems thin?)

Polar deposits
(ice free at surface)



Mangold/Bibring et al. 2004

L'eau sur Mars de nos jours

Pole nord

Equateur

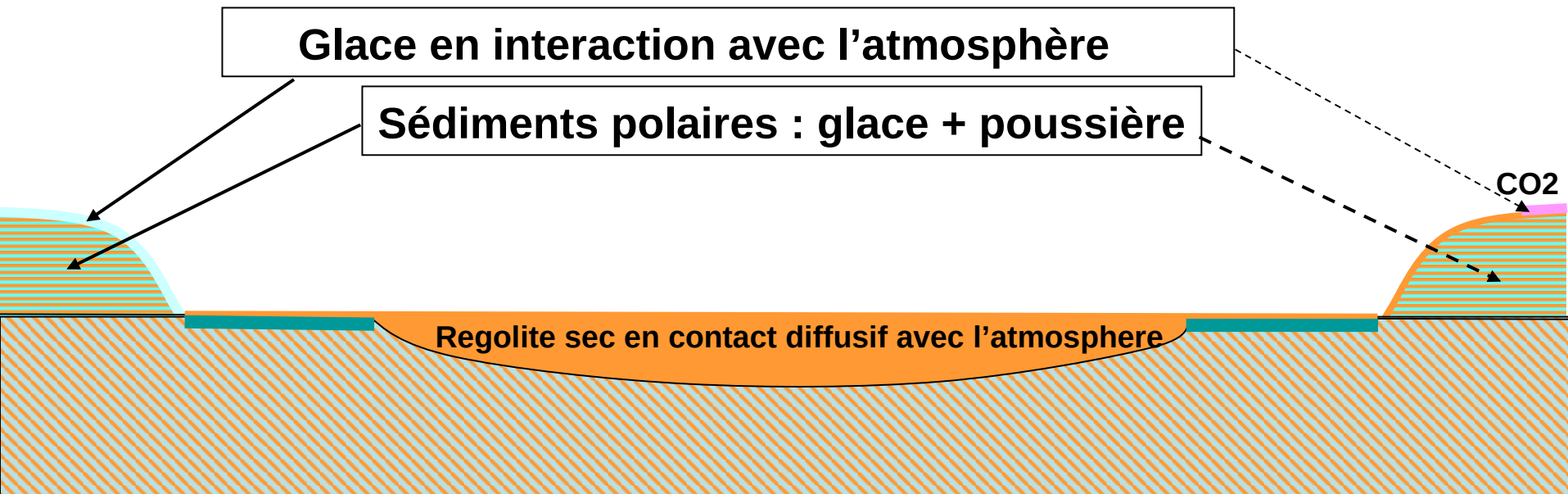
Pole sud

Glace en interaction avec l'atmosphère

Sédiments polaires : glace + poussière

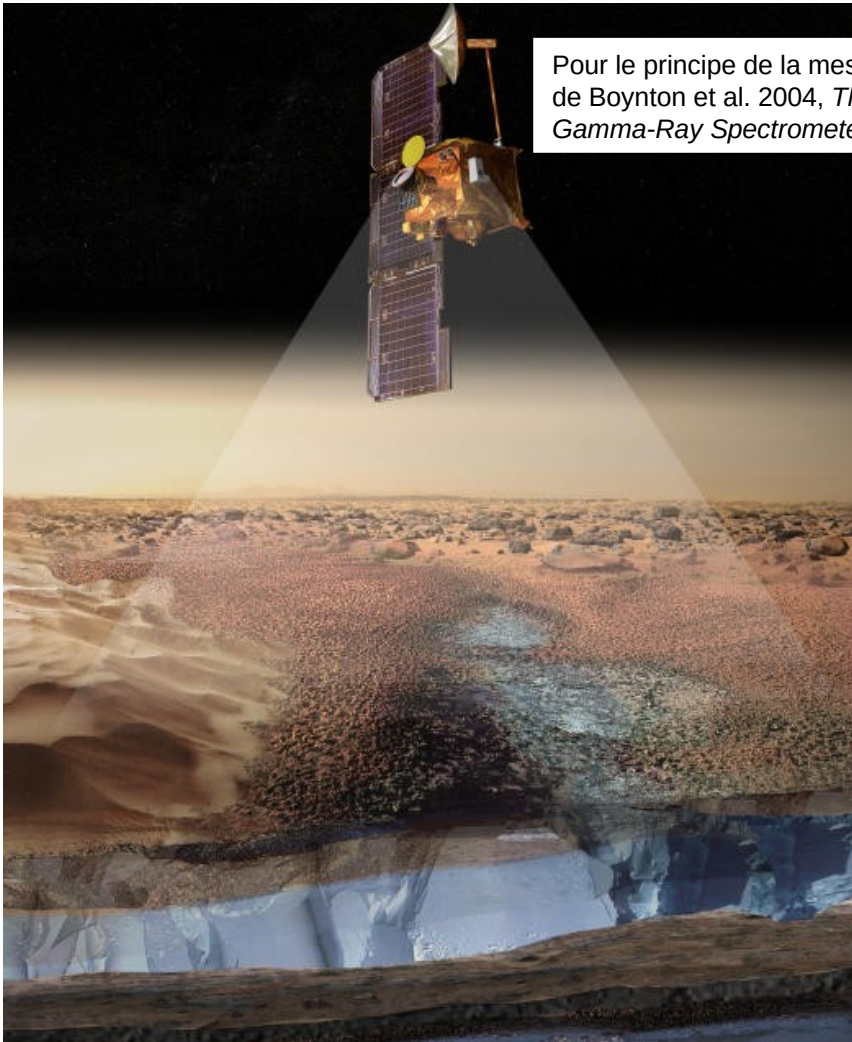
CO₂

Regolite sec en contact diffusif avec l'atmosphère

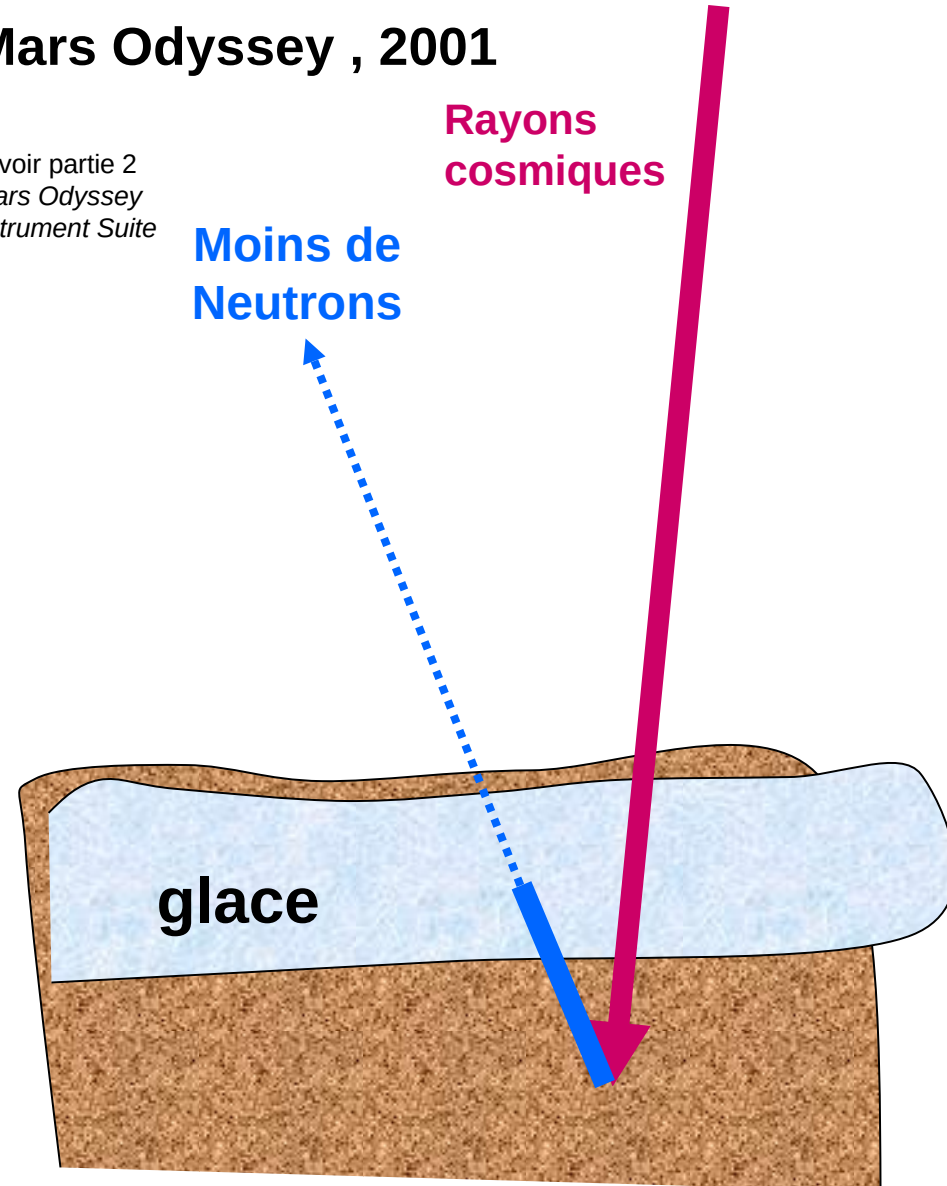


Cartographie du pergélisol

Spectromètre Neutron, NASA Mars Odyssey , 2001



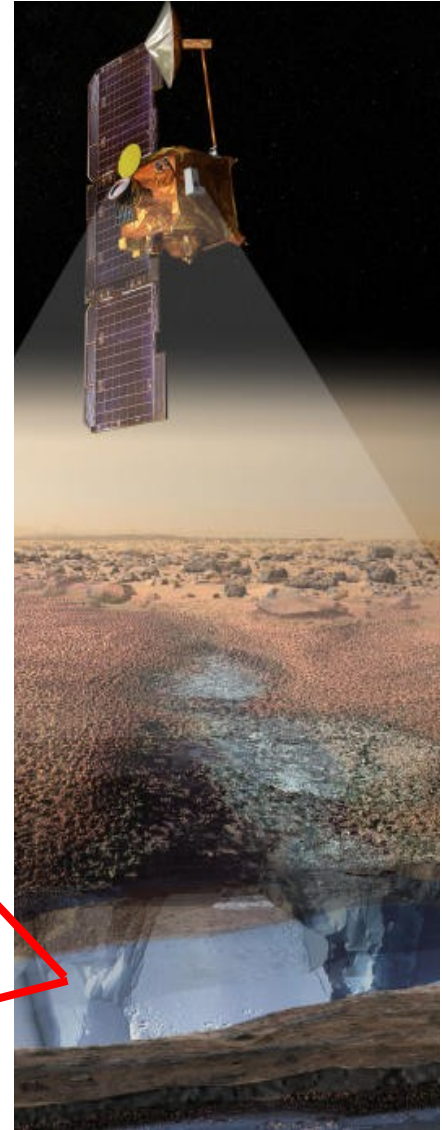
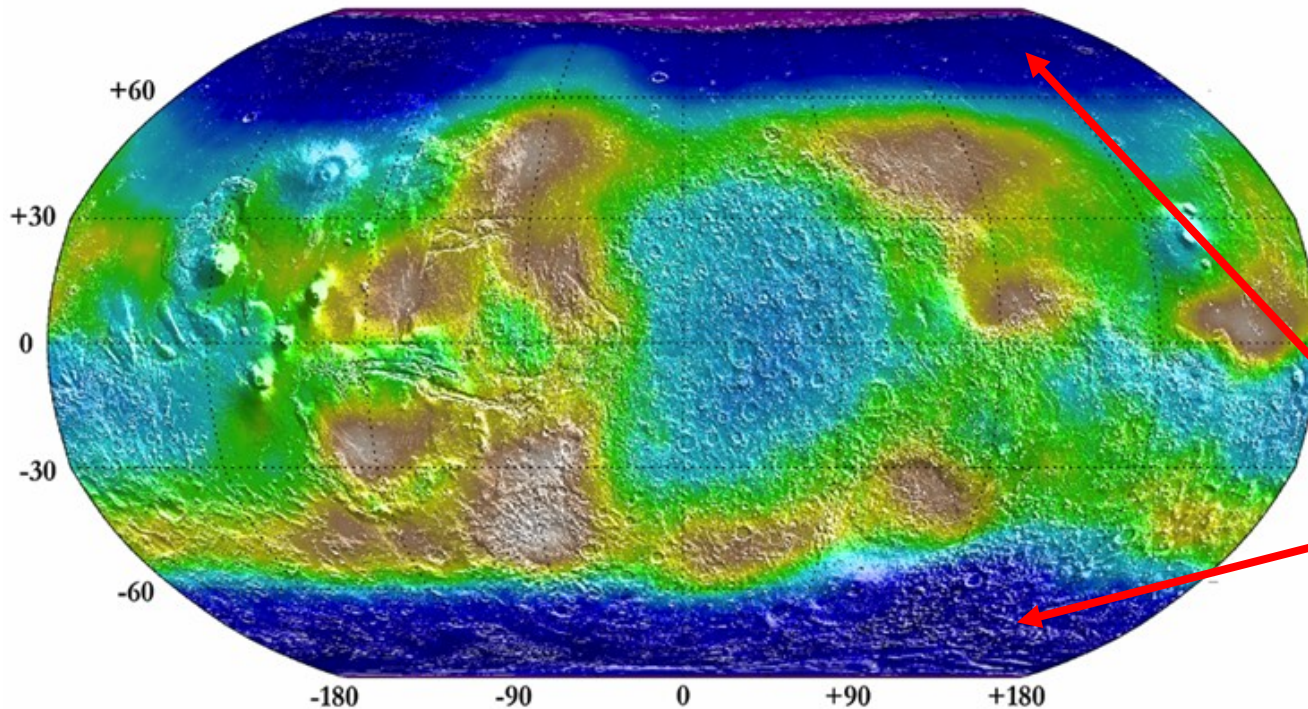
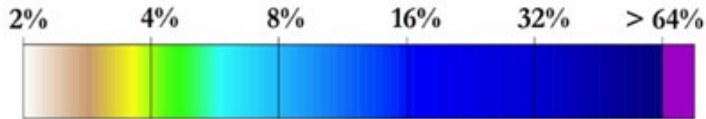
Pour le principe de la mesure, voir partie 2 de Boynton et al. 2004, *The Mars Odyssey Gamma-Ray Spectrometer Instrument Suite*



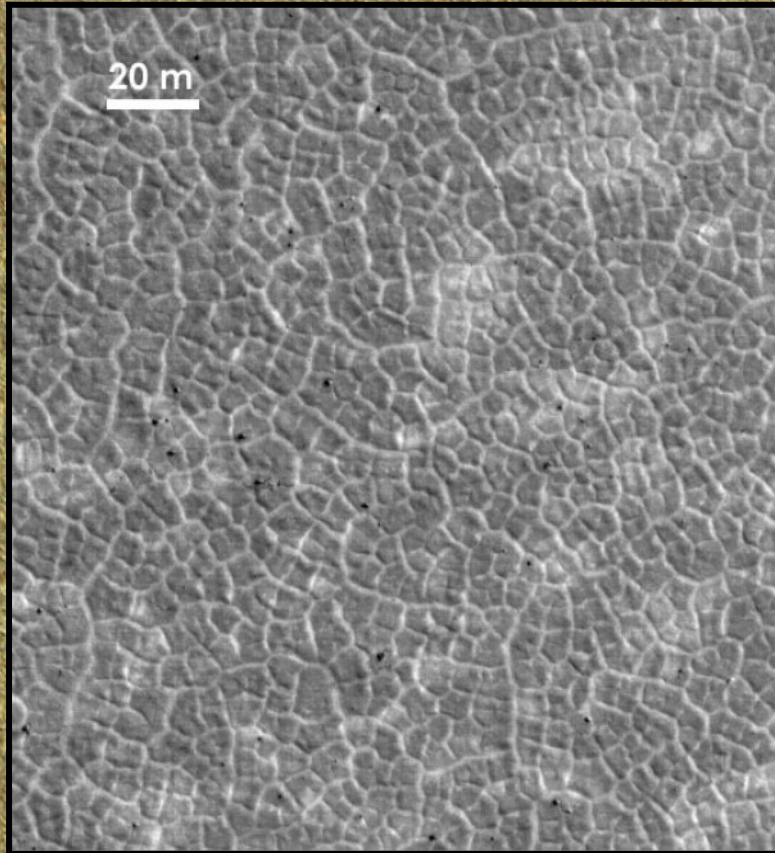
Glace d'eau dans le sous-sol

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

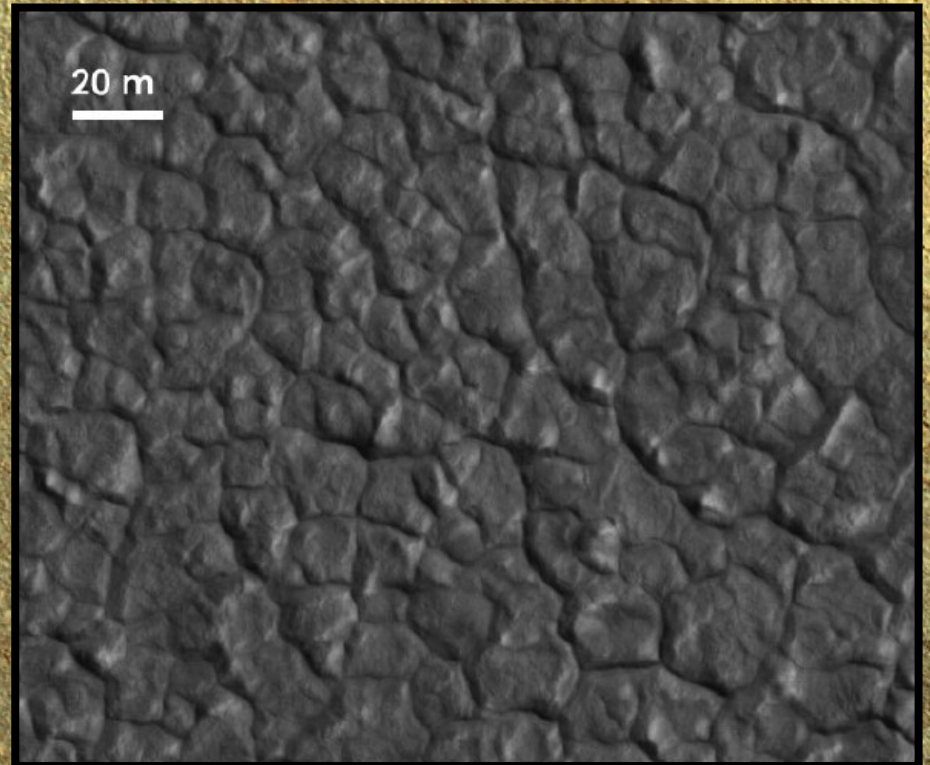
Minimum water equivalent hydrogen abundance
(weight percent) deduced from Neutron flux
(*Boynton et al. 2002 , Feldman et al. 2004*)



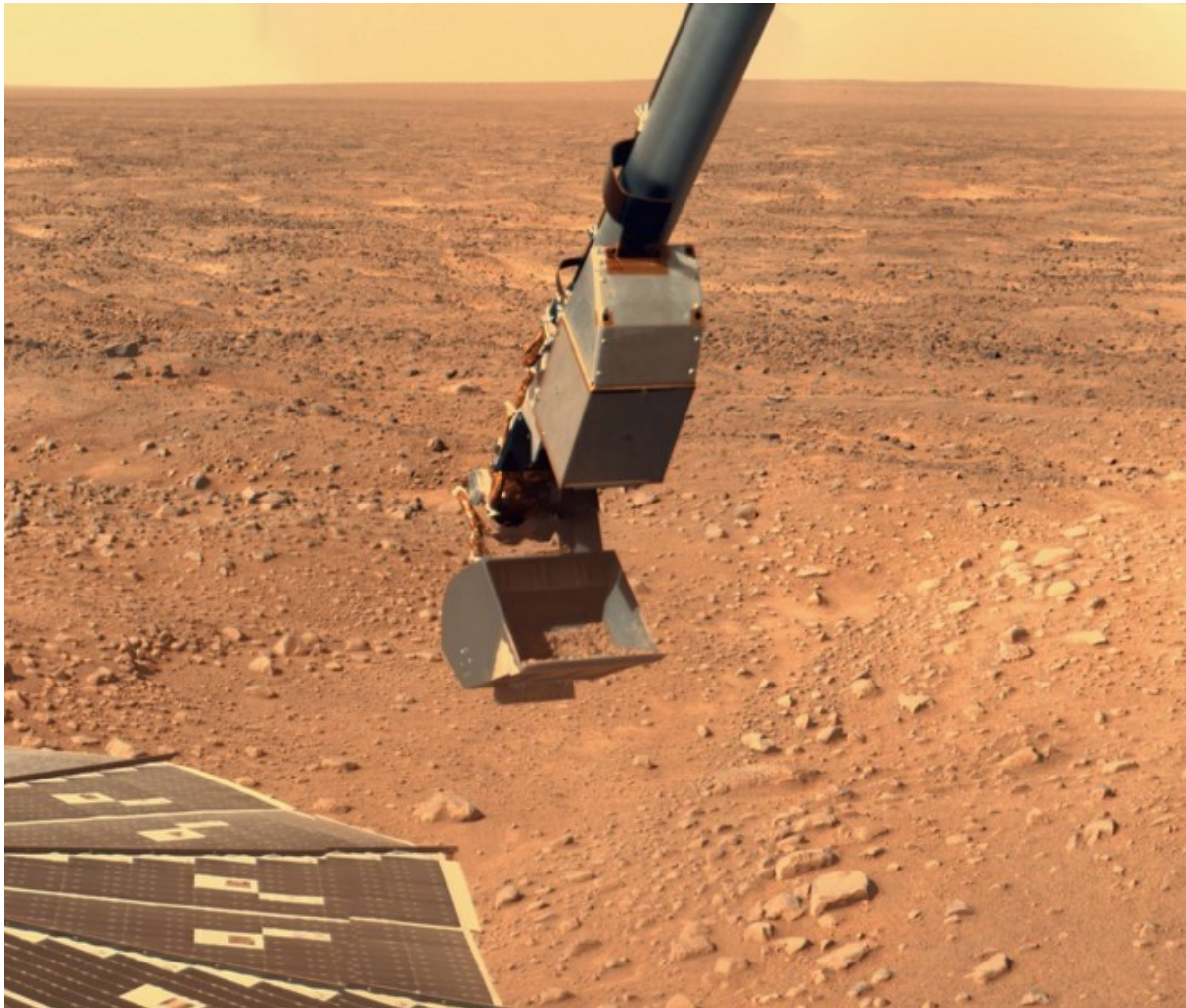
Polygones de sublimation



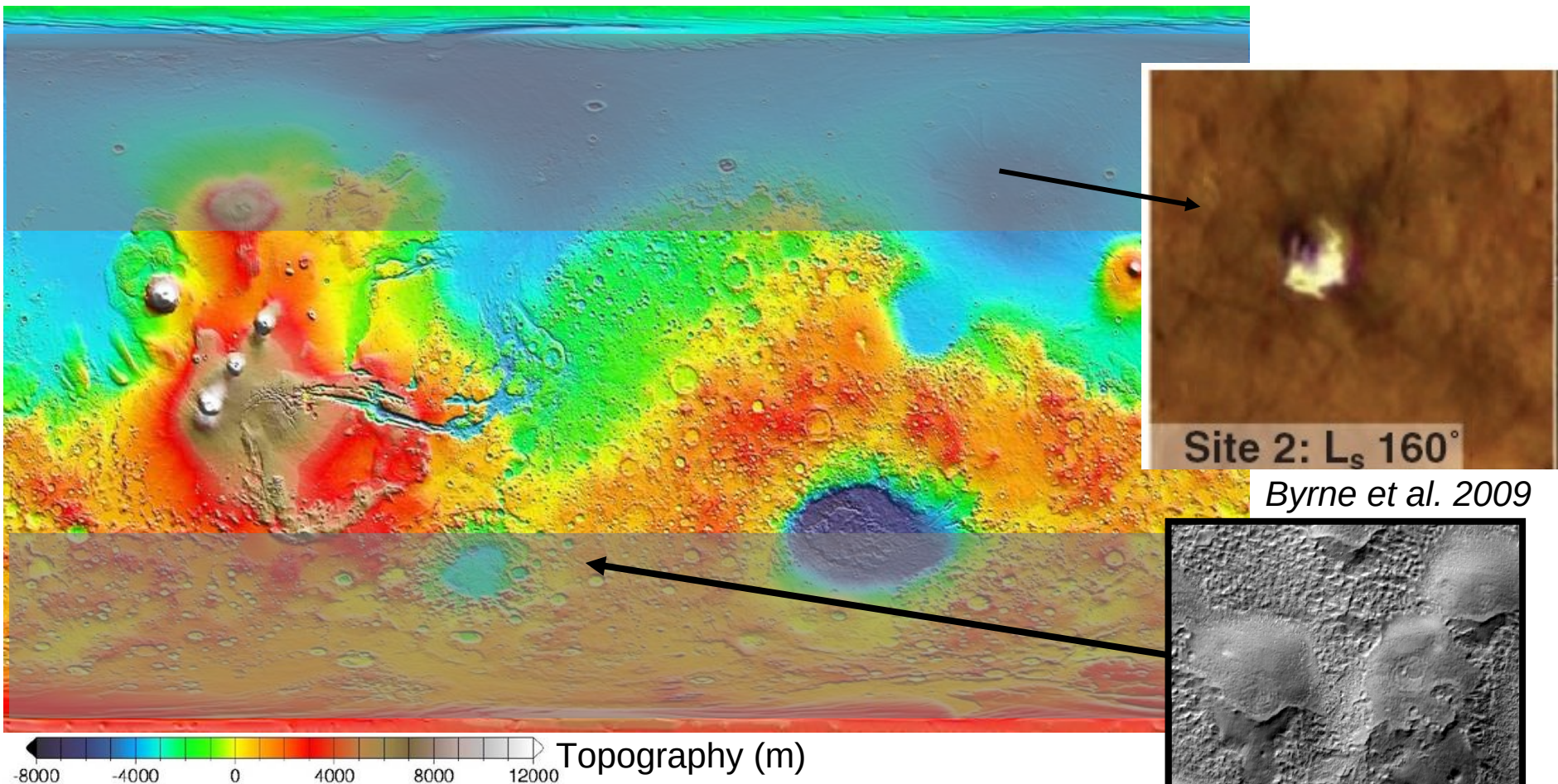
Géomorphologie façonnée par la glace
(60°-90° latitude)
(cf. cours A. Séjourné)



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

Pole nord

Equateur

Pole sud

Glace en interaction avec l'atmosphère

Sédiments polaires : glace + poussière

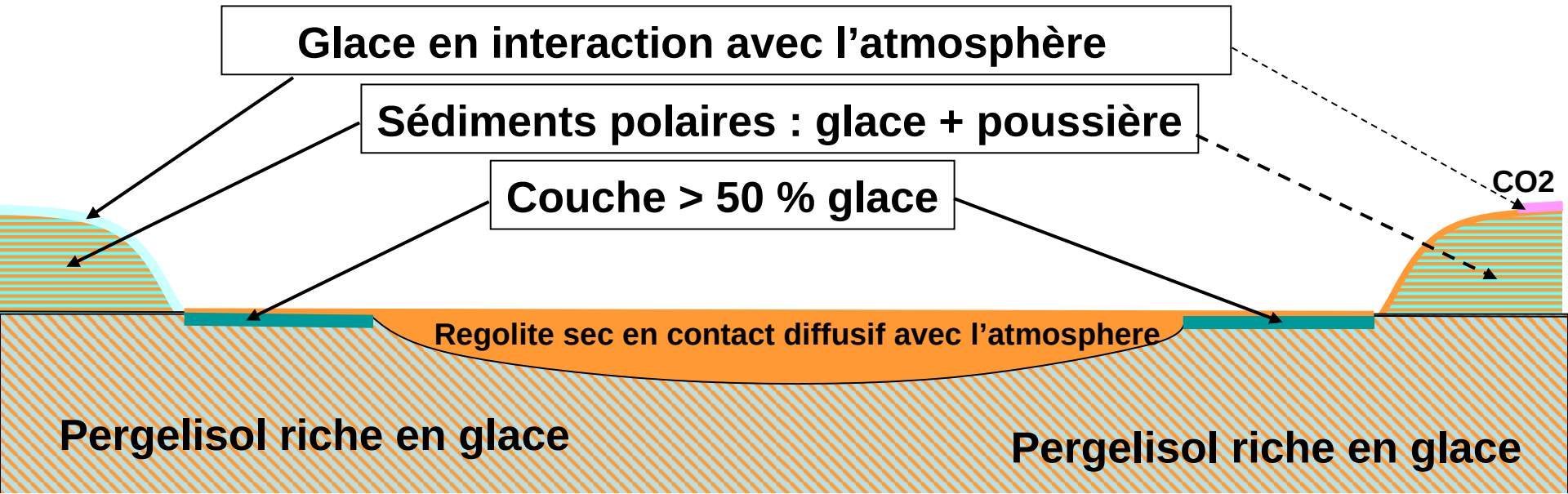
Couche > 50 % glace

Regolite sec en contact diffusif avec l'atmosphère

Pergelisol riche en glace

Pergelisol riche en glace

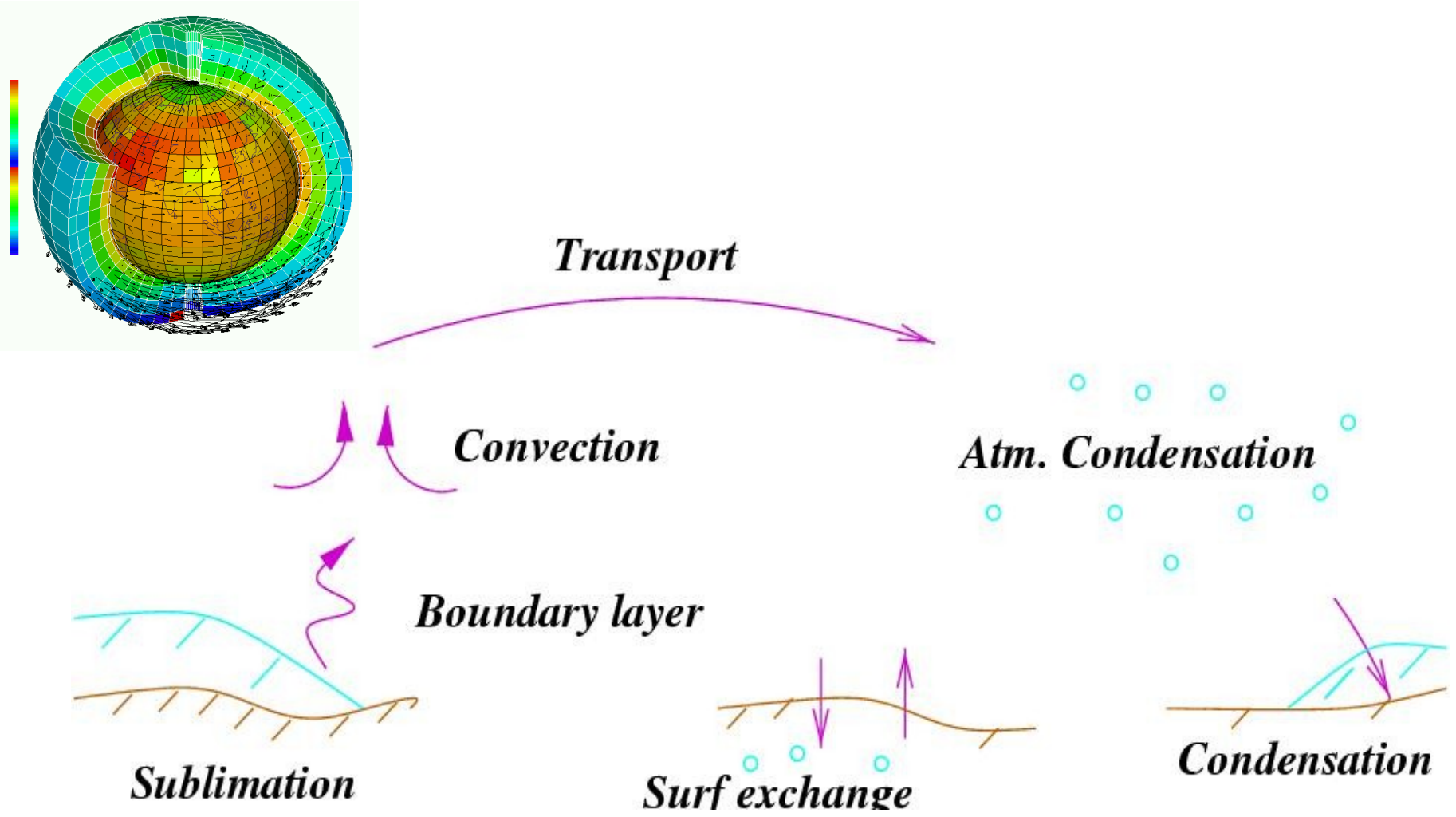
CO₂





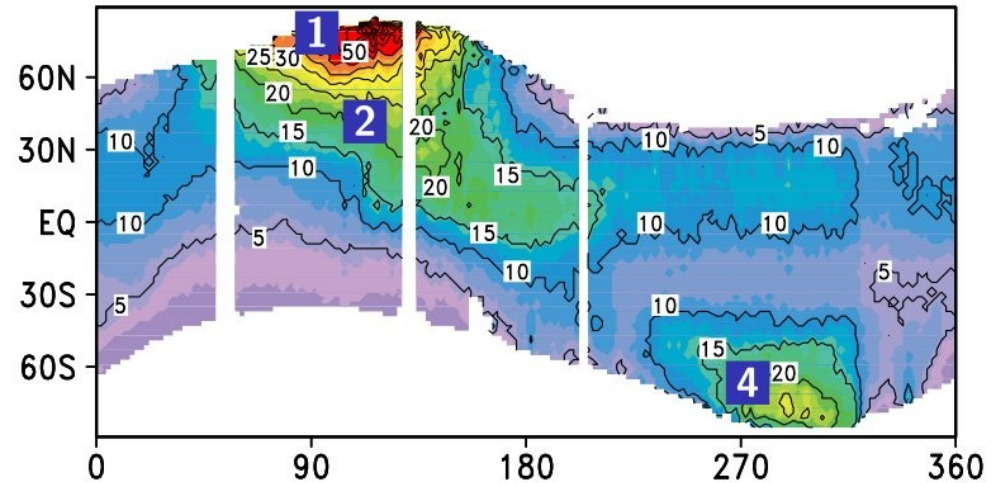
Partie 2.2 :
Le cycle de l'eau
actuel de Mars

Modèle de climat global

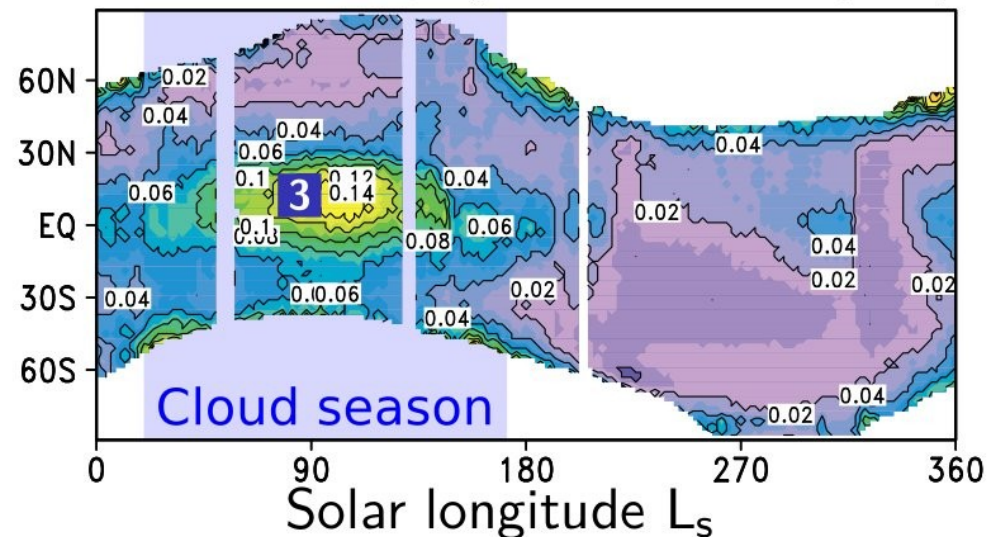


Mécanismes à l'oeuvre

Water vapor column (2 PM, pr. μm)



Cloud opacity (2 PM, 12.1 μm)

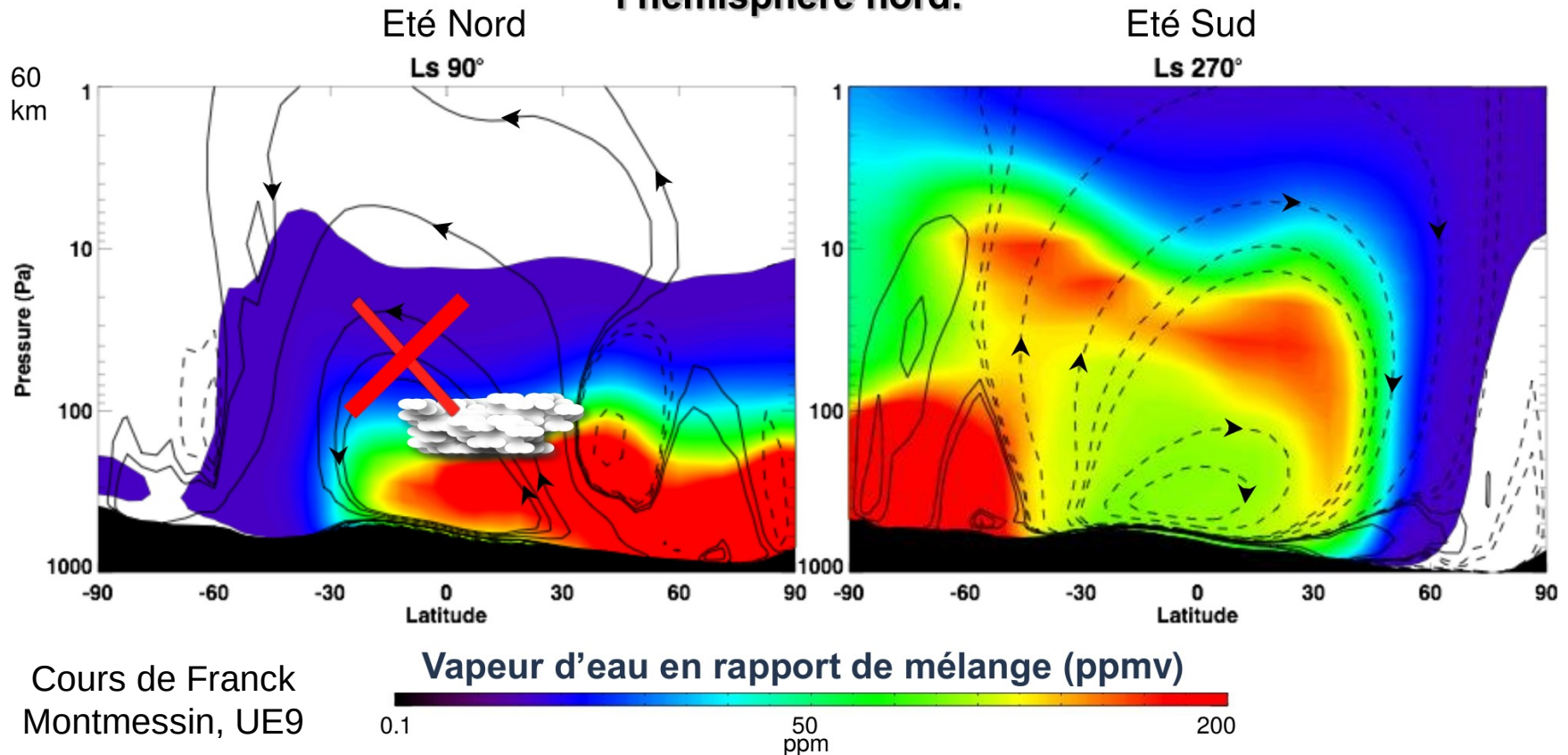


- 1 Sublimation of the north polar cap during northern summer;
- 2 Advection into the overturning Hadley cell;
- 3 Formation of the aphelion cloud belt;
- 4 Beginning of southern summer, formation of the north polar hood.

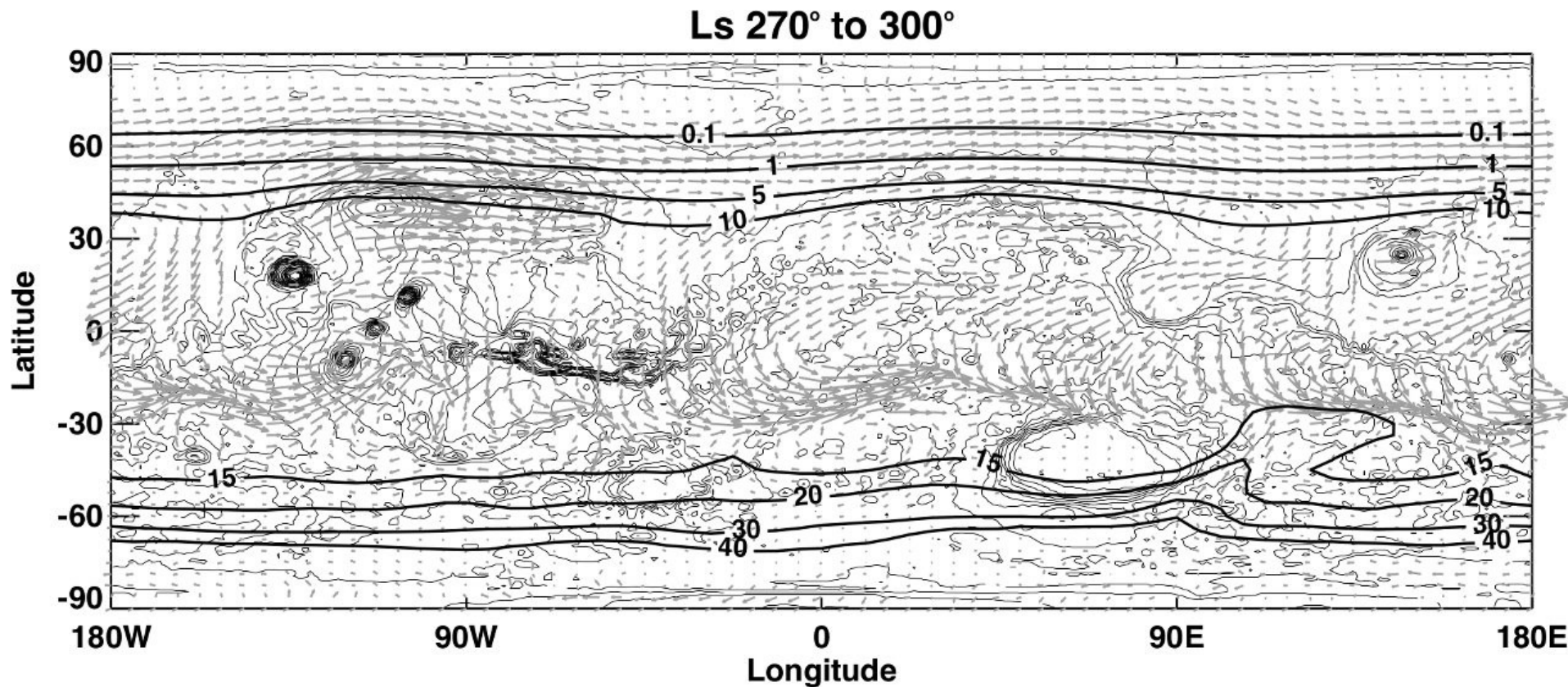
Dissymétrie Nord-Sud (effet « Clancy »)

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

Clouds form when saturated air is cooled

2 Major cloud structure :

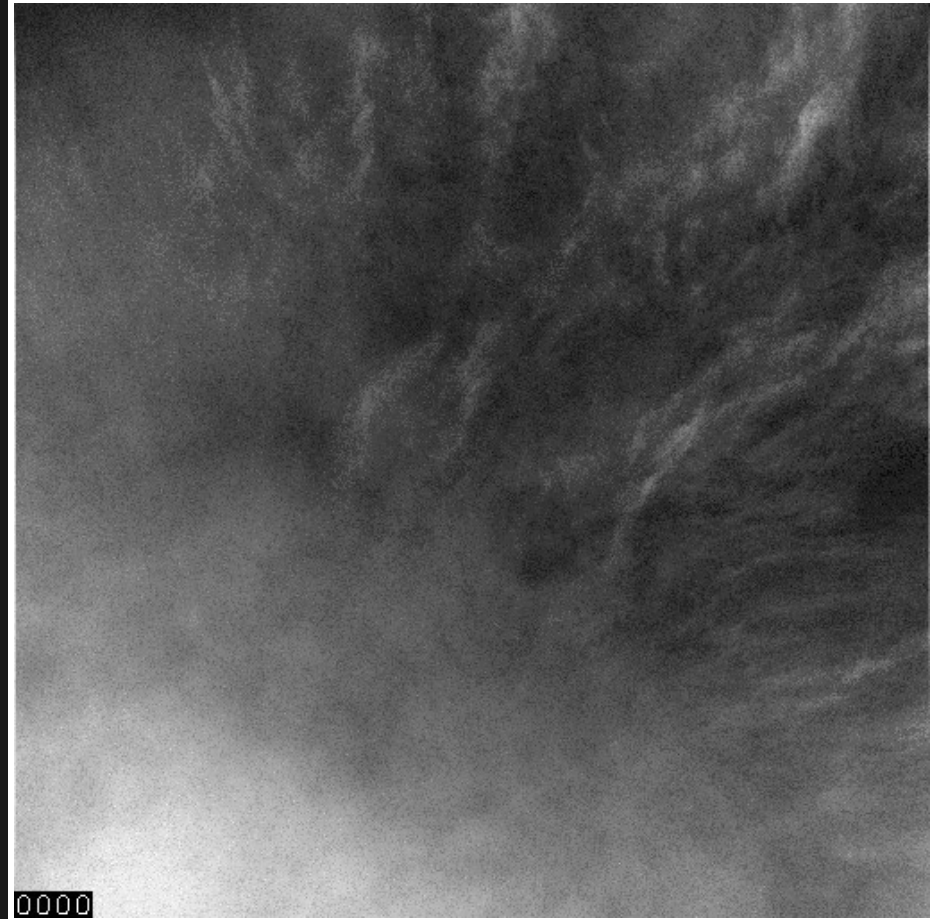
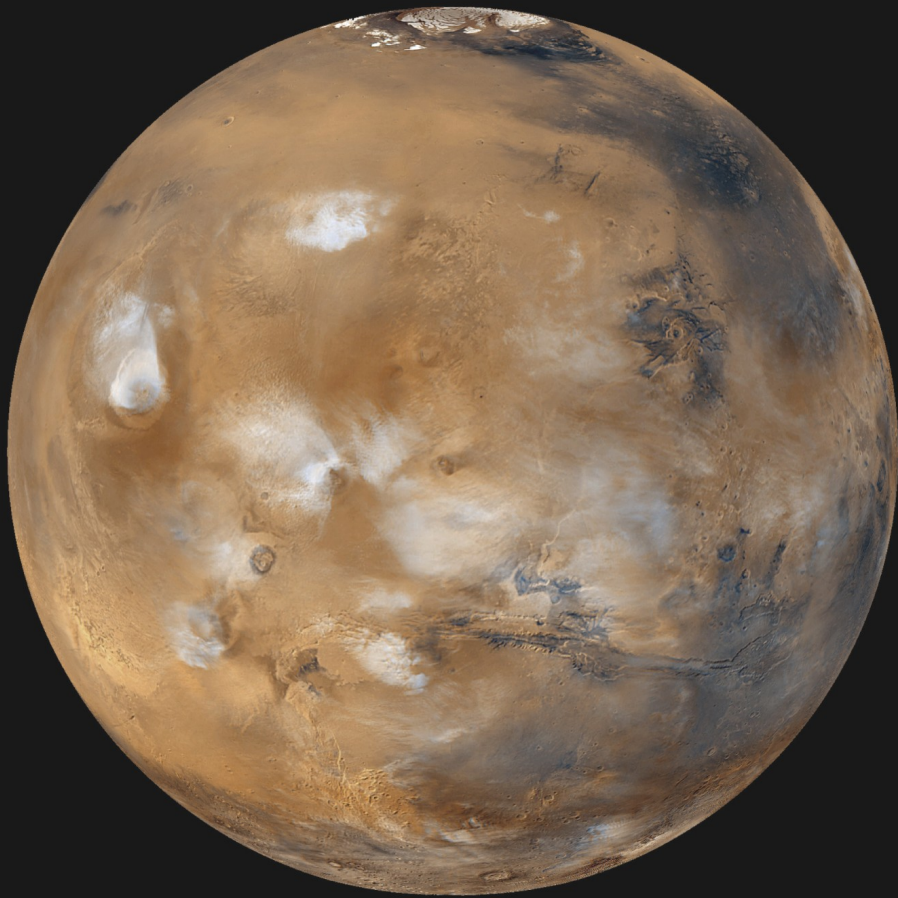
The “aphelion cloud belt”

- 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)*

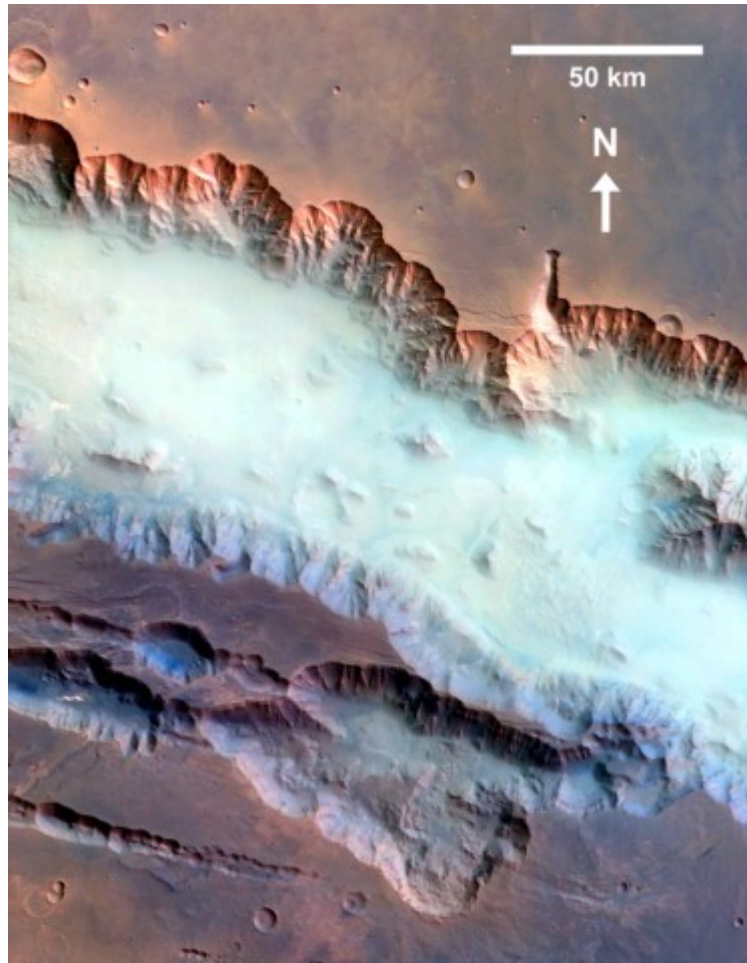
The “polar hood”

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

Ceinture de nuages d'aphélie

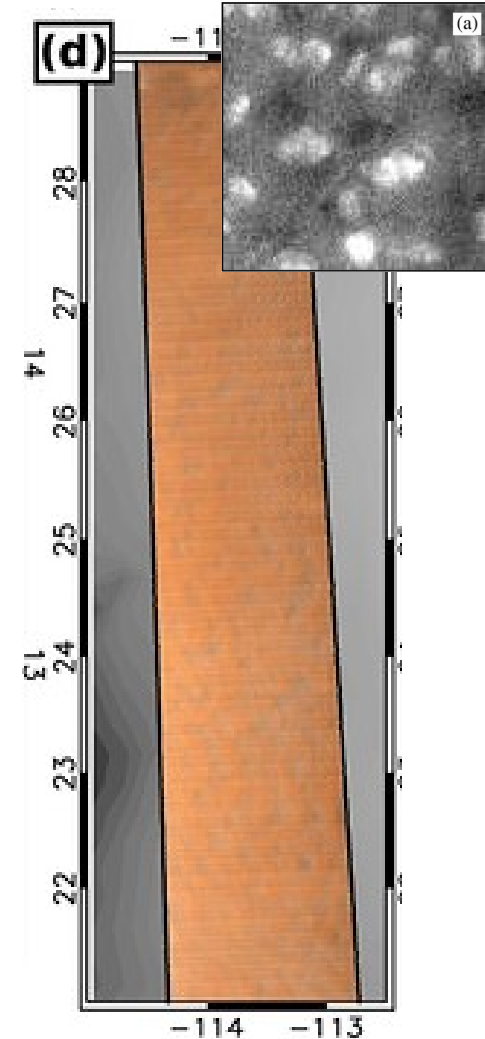
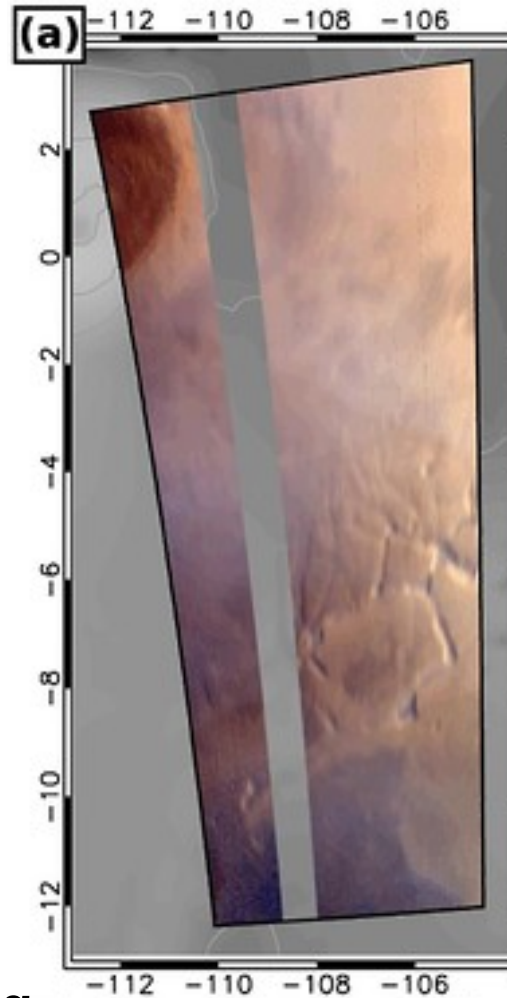


Nuages locaux



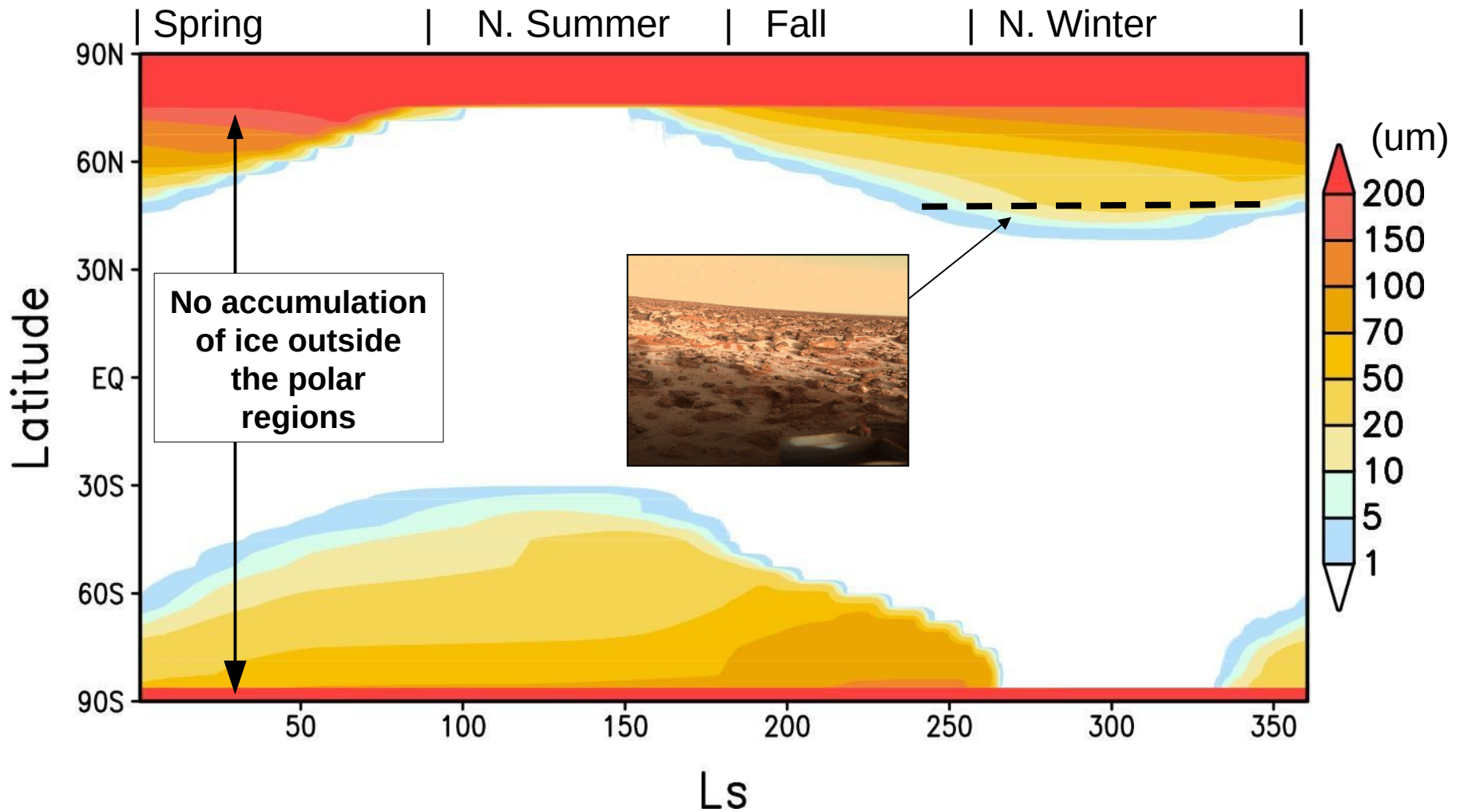
Nighttime and morning fog

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

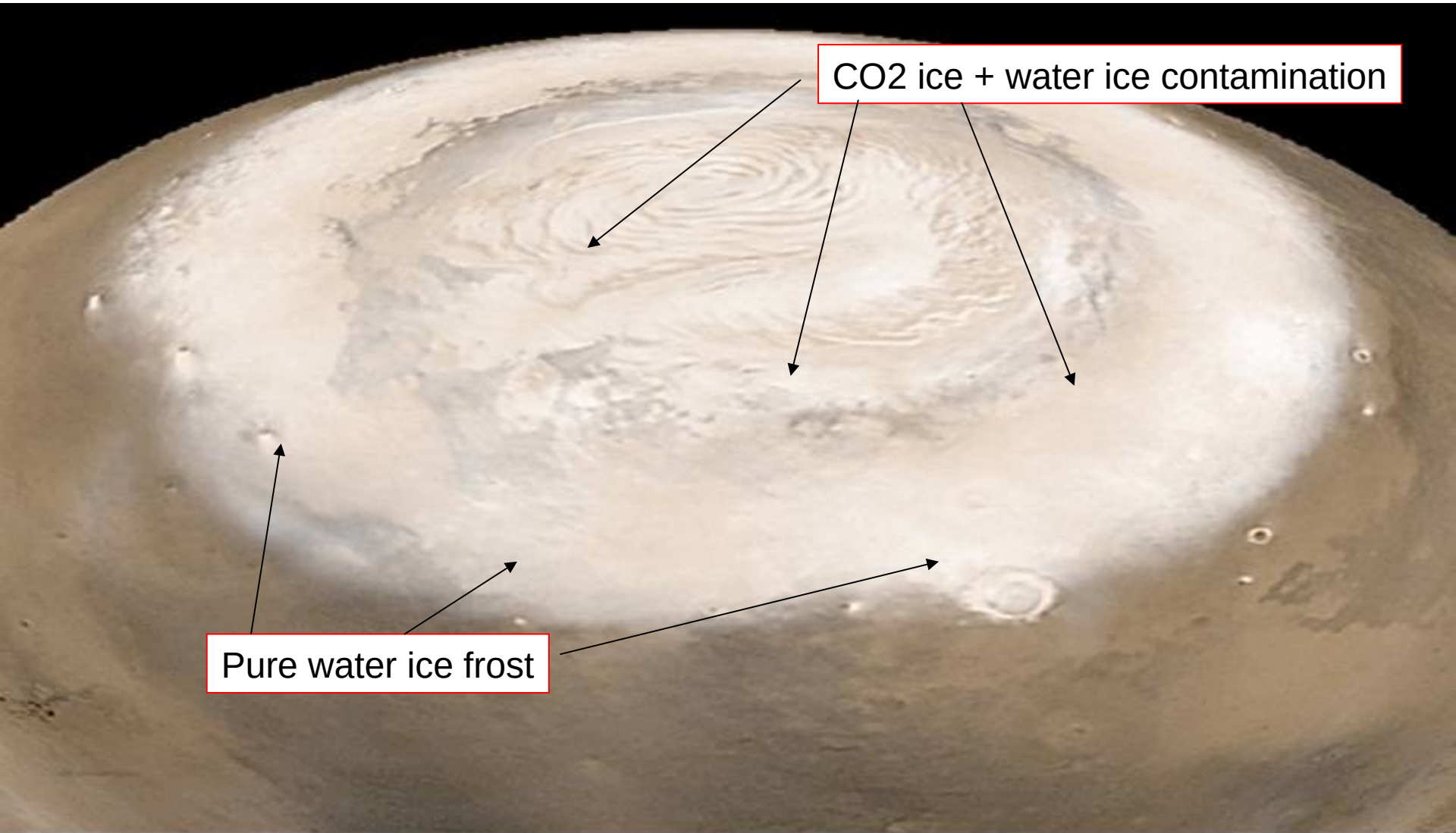


Cumulus clouds

Givre de glace d'eau en surface



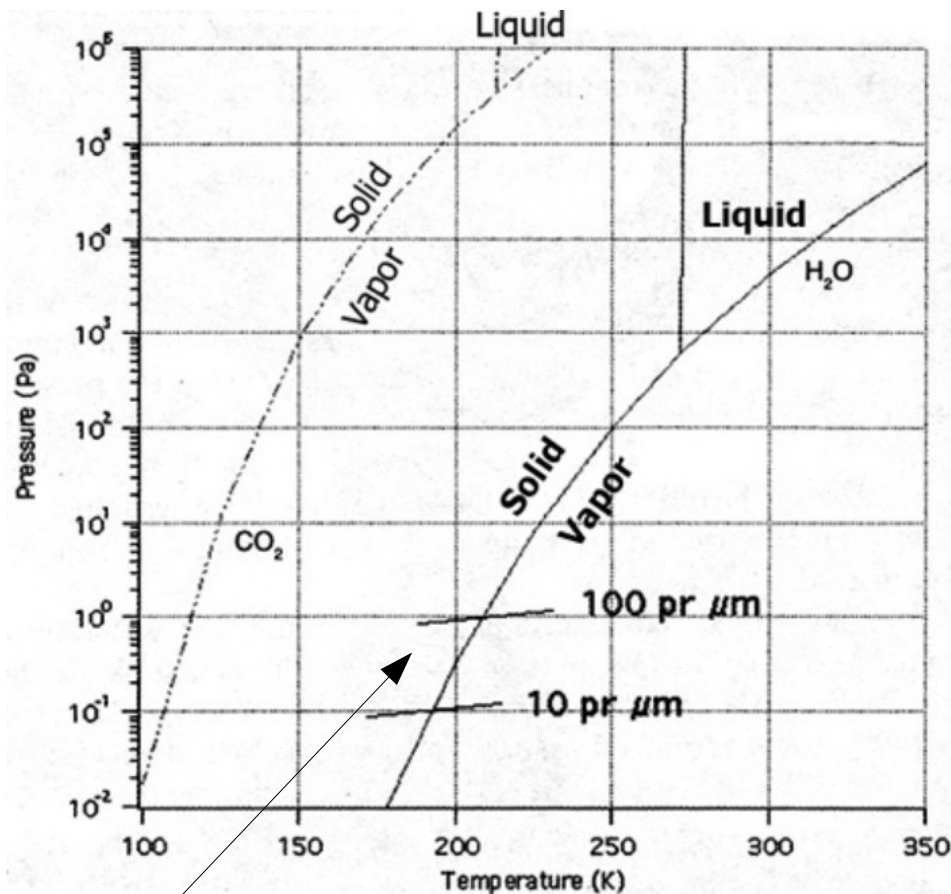
Calotte saisonnière au printemps



CO2 ice + water ice contamination

Pure water ice frost

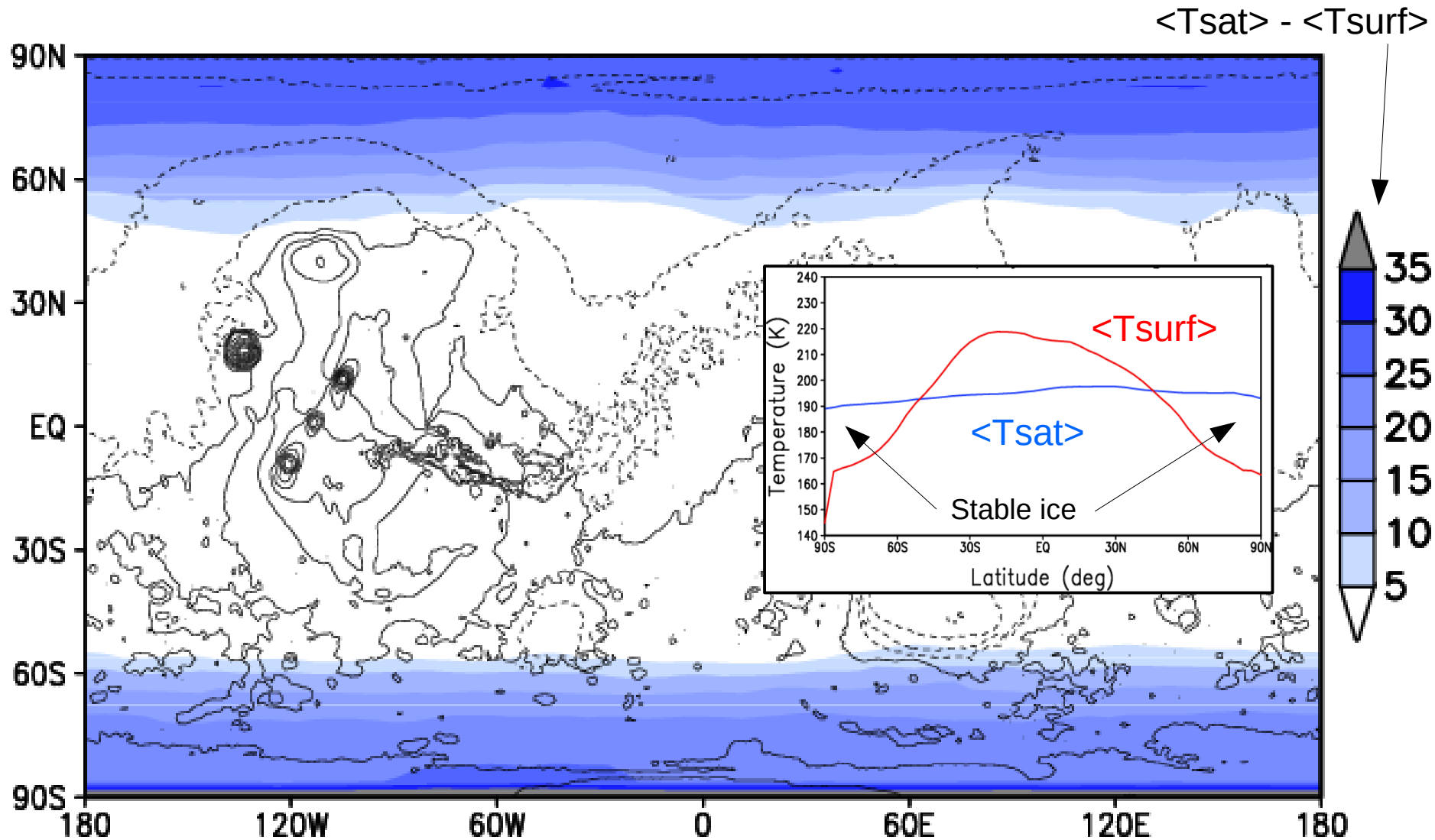
Stabilité de la glace en surface



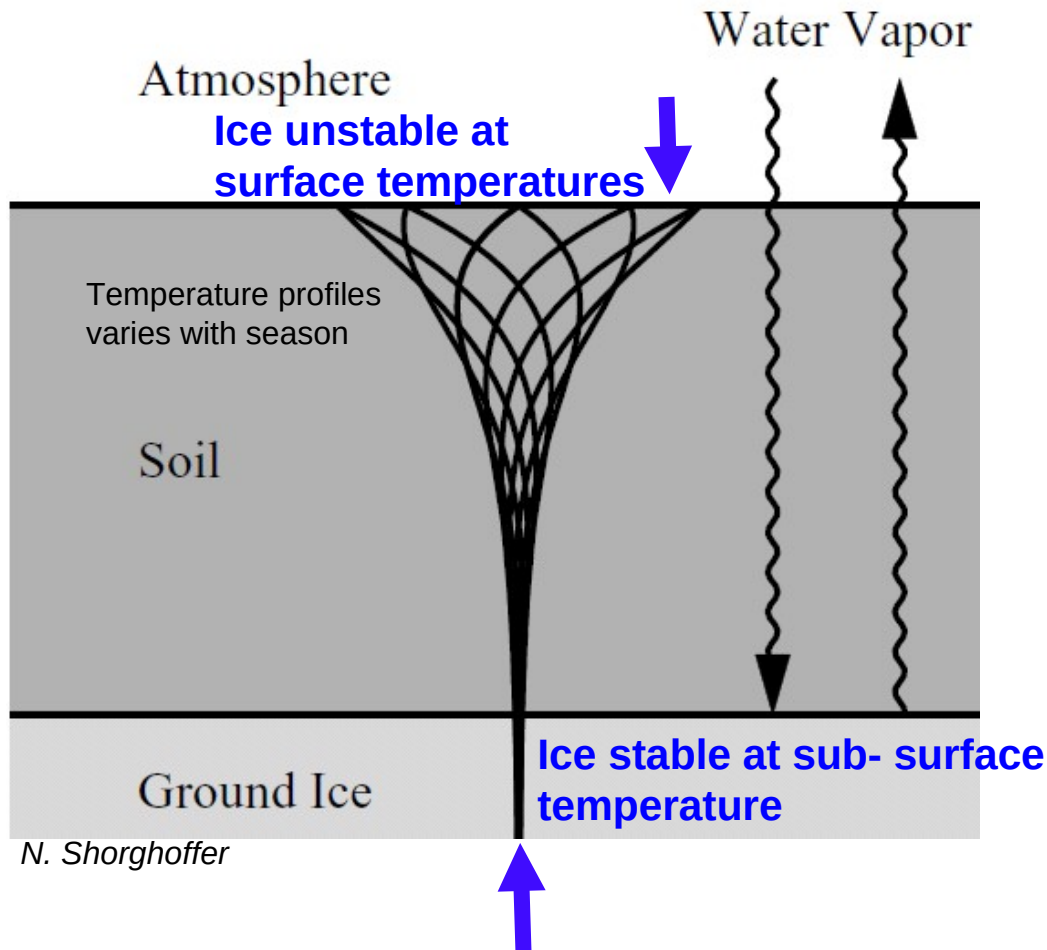
Gamme de pressions partielles de vapeur d'eau typique actuelle (équilibre liquide-vapeur autour de 200 K)

- 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}).

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

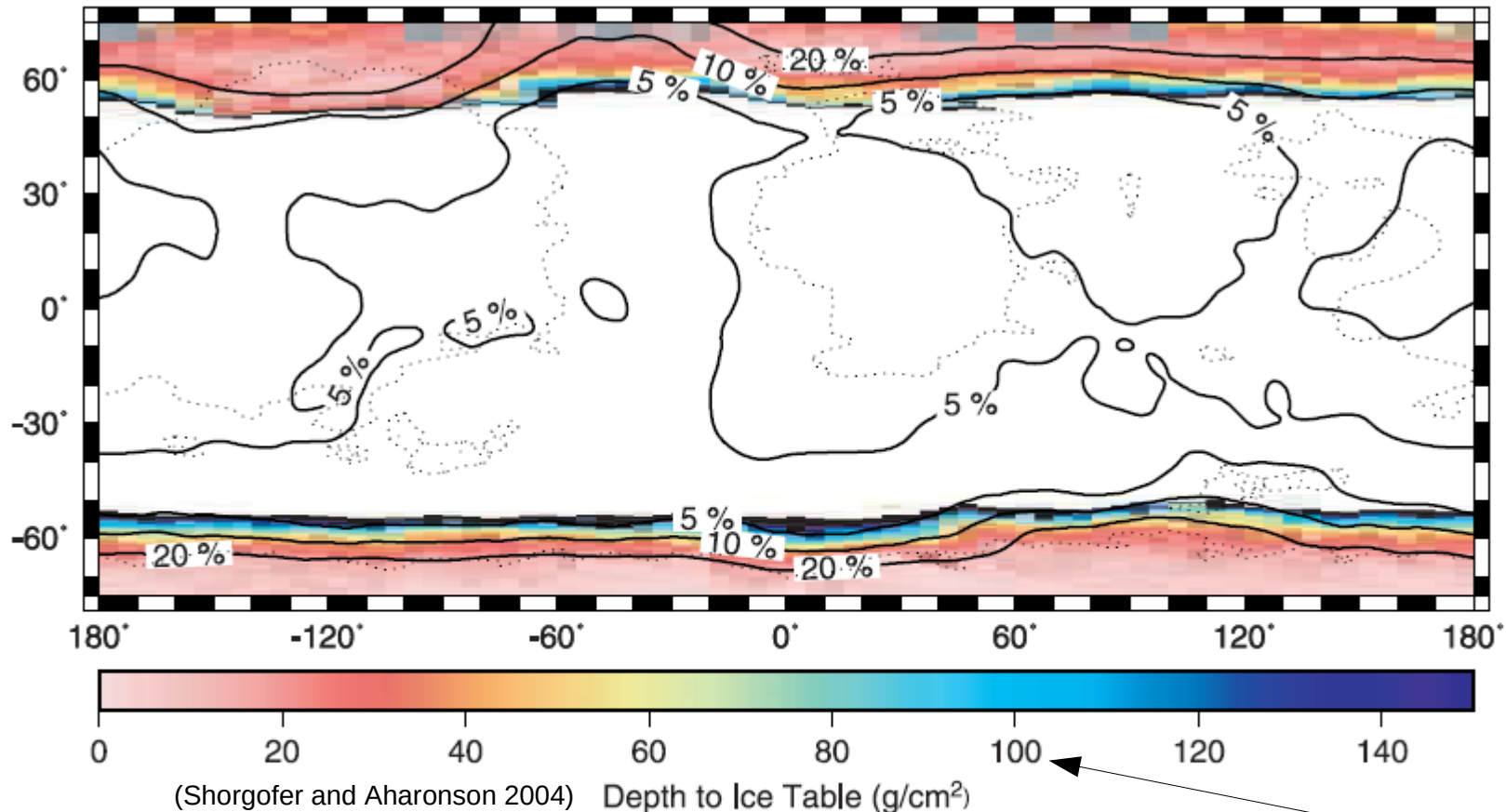


Figure 8. Color indicates depth to the ice table in g cm^{-2} when ice is in equilibrium with the atmospheric water vapor. Ground ice is unstable in the white area. Black segments indicate finite burial depths larger than 150 g cm^{-2} . Missing data points are shown in gray. Assumed volume fraction 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

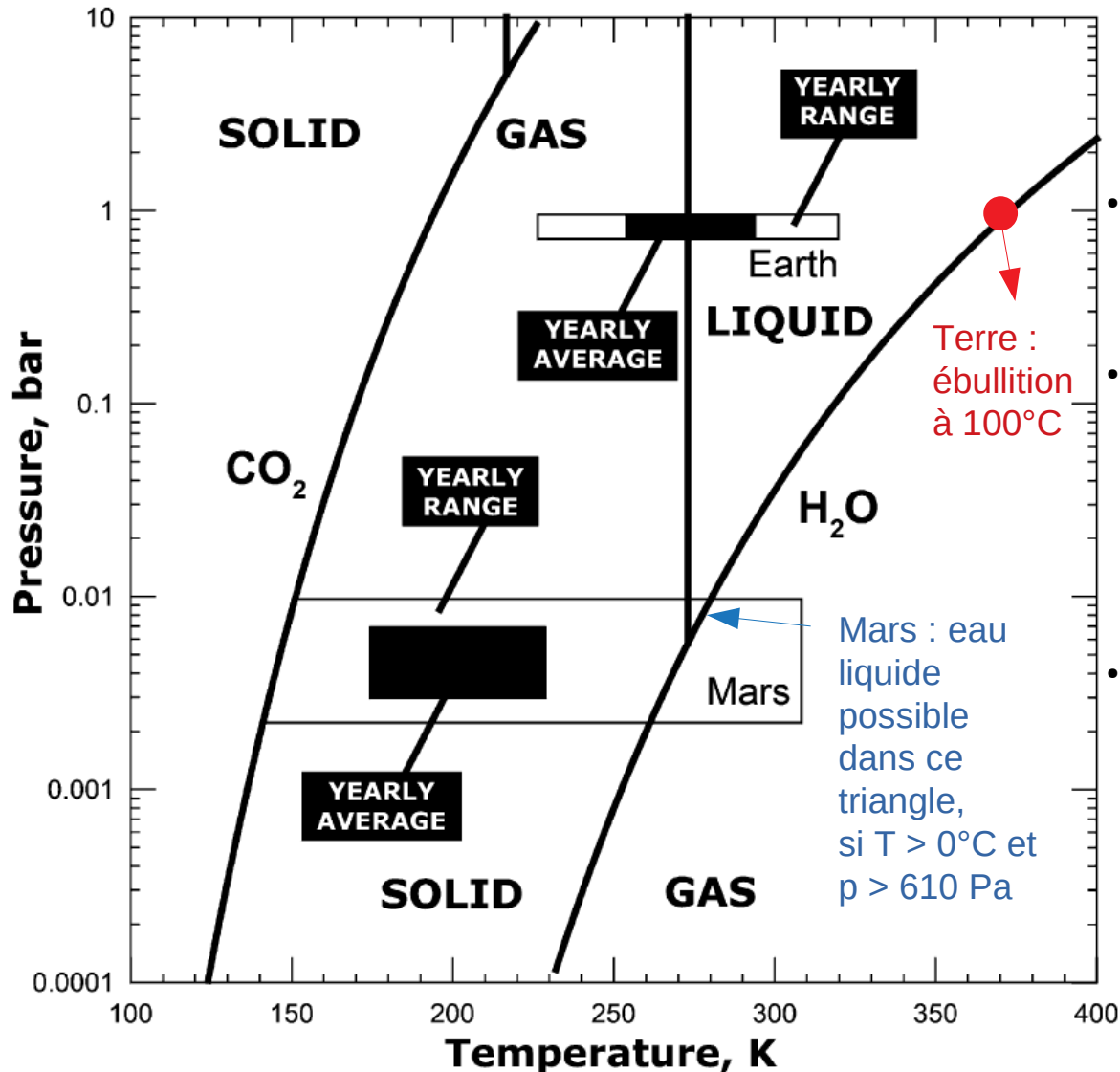
Résumé stabilité de la glace

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)

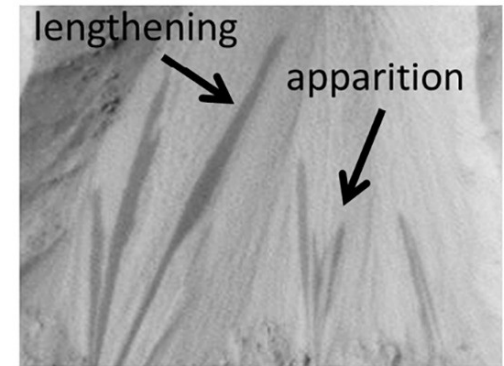
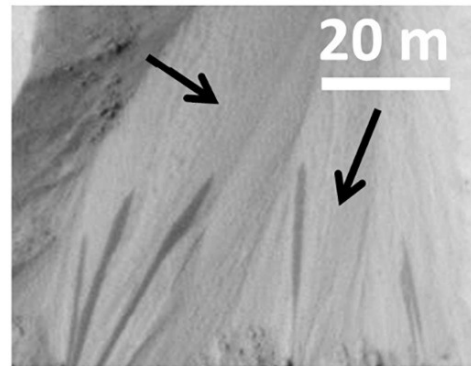
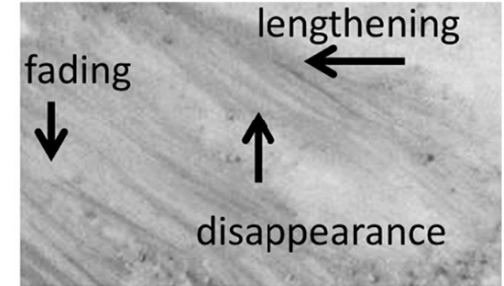
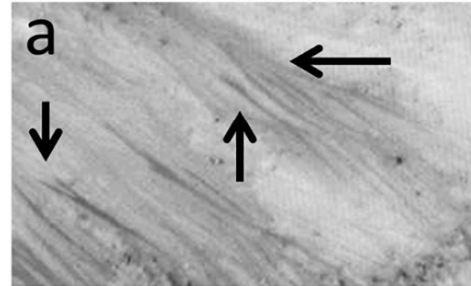
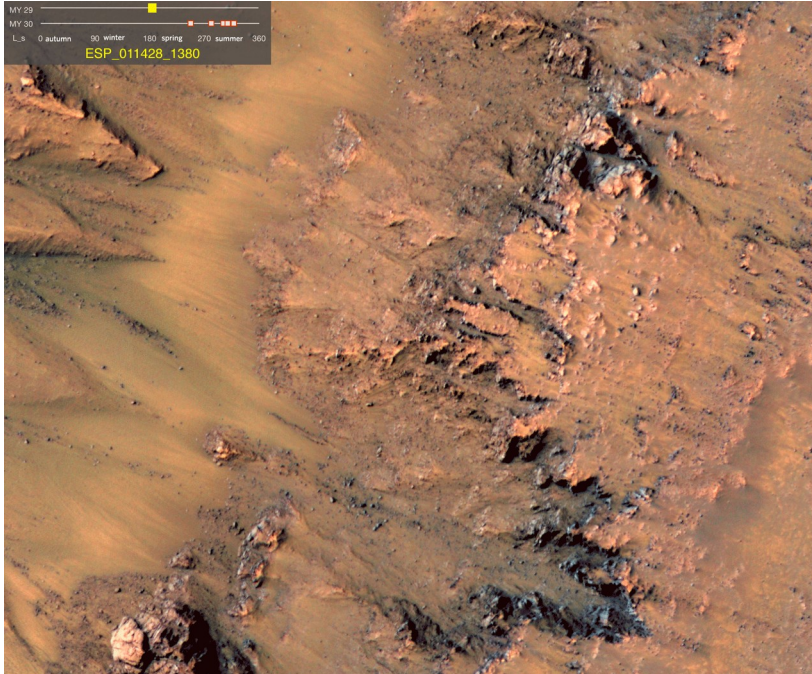
What about surface liquid water ?

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



L_s 302°

L_s 312°

Warm slopes during southern spring and summer

Flowing brines ?
(saumures)

OR

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

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

Une application du cours

Toute la connaissance de Mars est d'abord provenue de mesures spectrométriques ; très tôt, on a par exemple mesurer la quantité de grains de poussières soulevés à partir des propriétés optiques mesurées par satellite. Ce petit exercice permet de manipuler quelques grandeurs radiométriques très utiles.

- D'après les observations de [Cantor et al. 2001], la masse surfacique de poussière soulevée pendant une tempête de poussière est typiquement de $2 \text{ à } 4 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$
- Comme l'opacité visible totale de poussière τ pendant une tempête est typiquement de 2, **on peut retrouver ce résultat** en utilisant les propriétés de diffusion de la poussière (on se placera à une longueur d'onde de $0.67 \text{ }\mu\text{m}$ pour laquelle $Q_{\text{ext}} = 2.65$, avec $r_{\text{dust}} = 1.5 \text{ }\mu\text{m}$ et $\rho_{\text{dust}} = 2500 \text{ kg m}^{-3}$)
- Par le calcul, on obtient une masse surfacique typique de **$3,77 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$**

$$\text{Rappels : } \tau_{\lambda} = \int_z^{\infty} N \sigma_{\text{ext}\lambda} dz \quad \text{avec} \quad Q_{\text{ext}} = \frac{\sigma_{\text{ext}}}{G} \quad \text{et} \quad G = \pi r^2$$

Résolution 1/2

$$\bullet \tau_f = \int_z^{\infty} N \underbrace{\sigma_{ext, H}}_{\substack{\# \text{ m}^{-3} \\ \text{section efficace} \\ \text{d'achèvement}}} dz$$

$$\rho_{ext} = \frac{\sigma_{ext}}{G}$$

$G \approx 1/2$

$$\bullet \tau_{\text{cylindre}} = \int_{z=0}^{\infty} N \sigma_{ext} dz = \underbrace{\sigma_{ext}}_{\substack{\text{supposé} \\ \text{const}}} \int_{z=0}^{\infty} N dz$$

Résolution 2/2

$$\tau_{\text{colonne}} = \tau_{\text{ext}} N_{\text{colonne}} \text{ en } \# \text{ m}^{-2}$$

$$\tau_{\text{colonne}} = \tau_{\text{ext}} \left(\frac{M_{\text{colonne}} \text{ kg/m}^2}{\frac{4}{3} \pi r_d^3 \rho_{\text{dust}}} \right) \quad \text{avec } \tau_{\text{ext}} = \tau_{\text{ext}0}$$

$$\text{donc } \tau_{\text{colonne}} = \frac{\tau_{\text{ext}} r_d^2 M_{\text{colonne}}}{\frac{4}{3} \pi r_d^3 \rho_{\text{dust}}} = \frac{\tau_{\text{ext}} M_{\text{colonne}}}{r_d \rho_{\text{dust}}} \frac{3}{4}$$

$$M_{\text{colonne}} = \tau_{\text{colonne}} \frac{r_d \rho_{\text{dust}}}{\tau_{\text{ext}}} \frac{4}{3}$$

$3,77 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$

$$m_{\text{col}} = \int_{z=0}^{z_{\text{top}}} \rho_{\text{dust}} dz$$

$$q = M_{\text{colonne}} \frac{g}{P_5} \longrightarrow$$

$$2,3 \cdot 10^{-5} \text{ kg/kg}$$