

**Hydrosphère et atmosphere:
Origine
Point sur l'actualité: L'eau sur Mars**

@ Kess Veenenbos



D'où vient l'hydrosphère et l'atmosphère ?
Comment évolue l'hydrosphère et l'atmosphère des planètes telluriques?

-4.56 milliards d'années



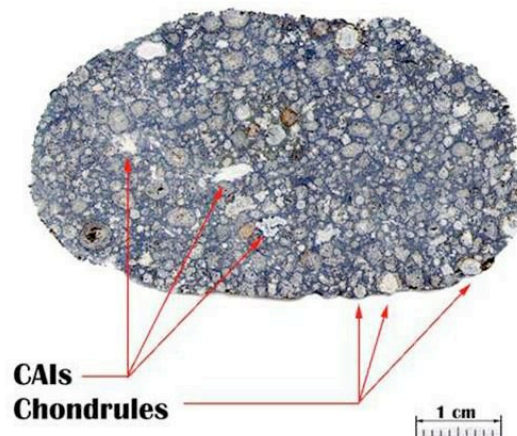
Naissance de Mars



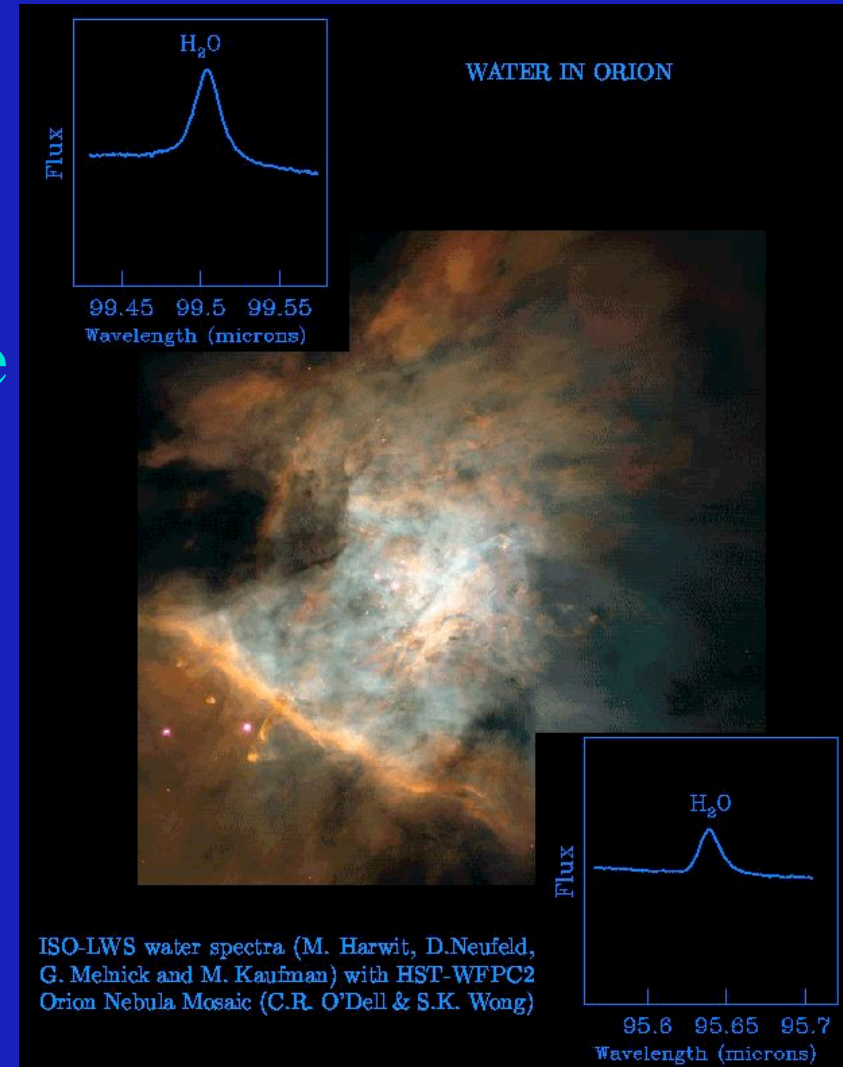
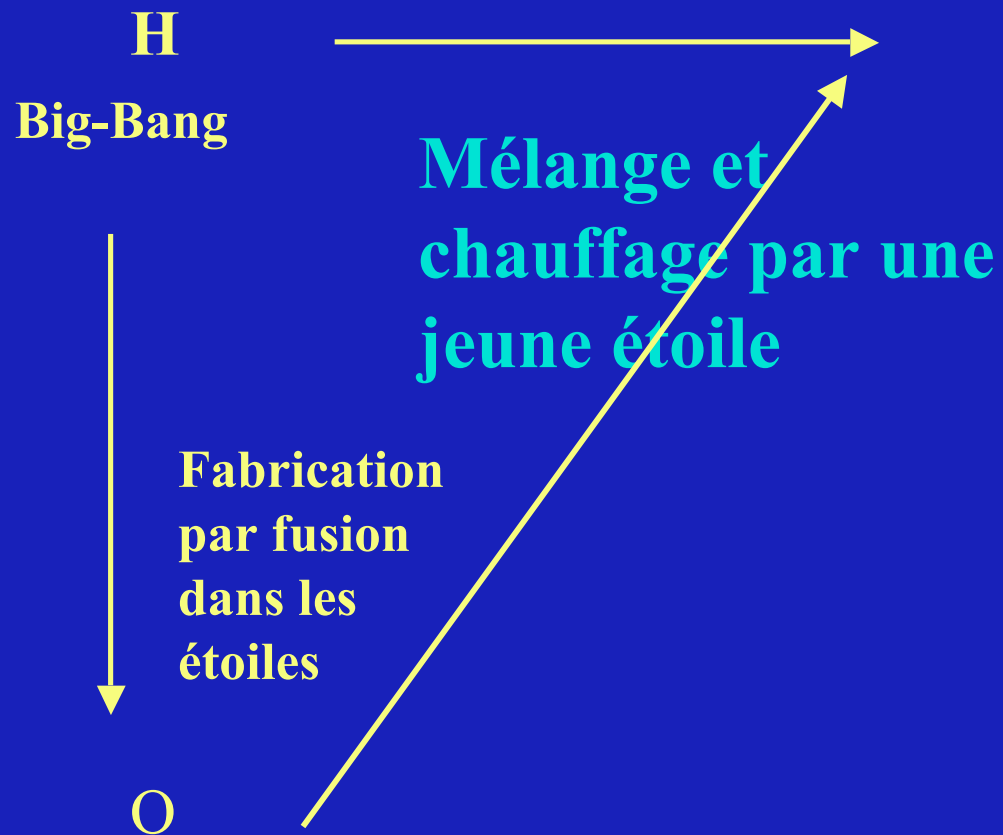
Au début....il y a 4.56 milliards d'années

- un jeune soleil entouré de poussières
- des poussières qui se collent les unes aux autres pour faire des objets de quelques kilomètres
- et déjà, beaucoup d'eau

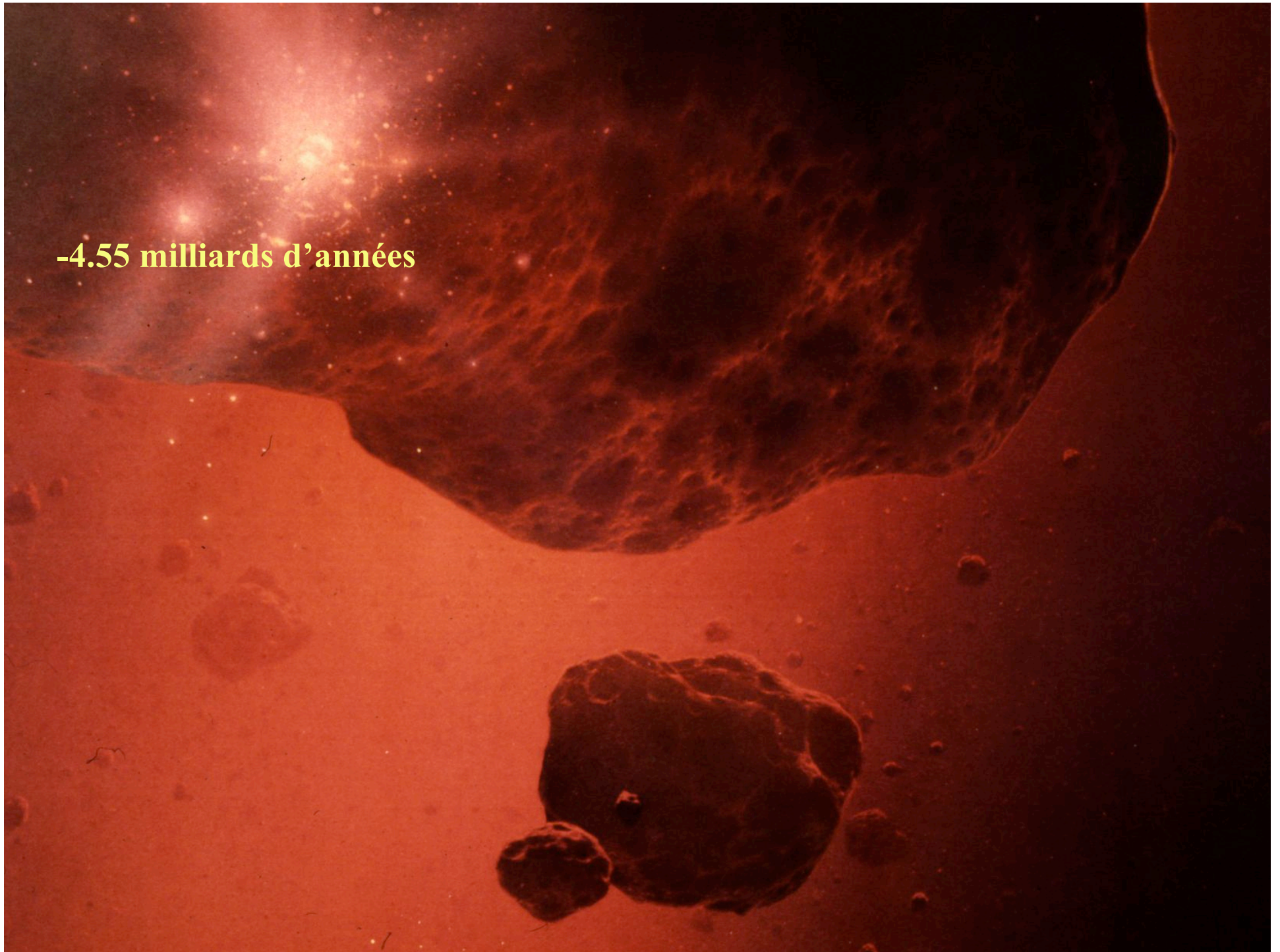
**Météorite
Allende
4.56 Milliards
D'années**



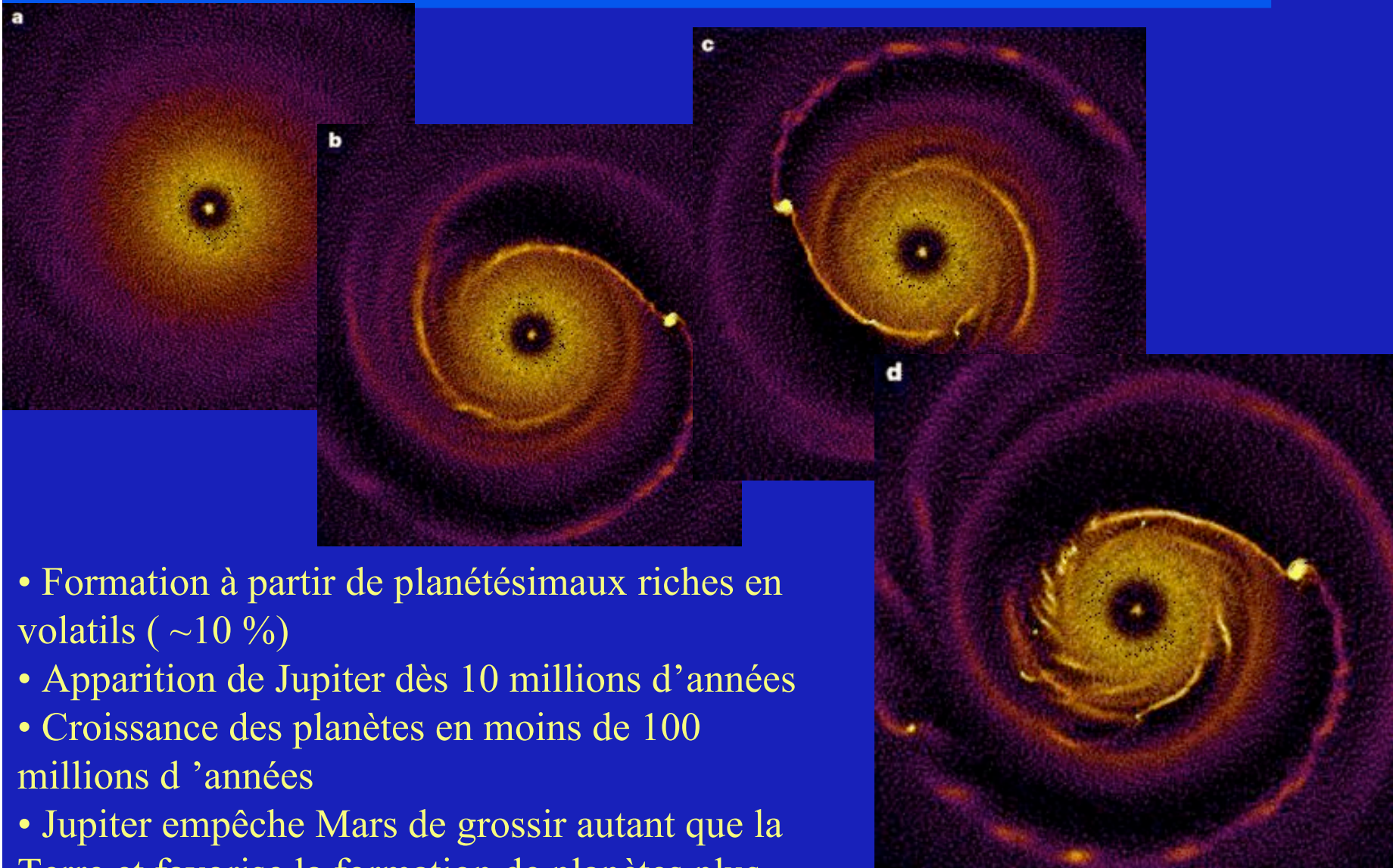
Autour du soleil... une fabrique d'eau



-4.55 milliards d'années



Planétésimaux et Croissance des planètes



- Formation à partir de planétésimaux riches en volatils ($\sim 10\%$)
- Apparition de Jupiter dès 10 millions d'années
- Croissance des planètes en moins de 100 millions d'années
- Jupiter empêche Mars de grossir autant que la Terre et favorise la formation de planètes plus grosses (Terre, Vénus) entre 0.5 et 1 UA

Quelques ordres de grandeur

- ◆ Energie gravitationnelle d'une planète homogène
- ◆ Ordre de grandeur:
 - Mars 8.25 MJ/kg
 - Terre 37.5 MJ/kg
- ◆ En terme de température
 - $C_p = 1.2$ kJ/kg
 - Même pour Mars, correspond à plus de 6000°C d'élévation de température
 - Energie à l'origine de l'océan de magma
 - Perte d'énergie limitée par une atmosphère dense

$$U = \frac{3}{5} G \frac{M^2}{a}$$

$$\frac{U}{M} = \frac{3}{5} G \frac{M}{a}$$

Etat initial des planètes

- ◆ Temps de croissance des planètes $\sim 10^8$ années

$$r(t) = r_0(1 - e^{-t/T})$$
$$\frac{dr}{dt} = \frac{r_0}{T}$$

- Avec $T \sim 2 \cdot 10^7$ années,
 - » $dr/dt = 0.32$ m/an (1280 kg/m²/an pour $\rho = 4000$ kg/m³)
- Pour $gr \sim 60$ MJ/kg, (fin d'accrétion de la Terre), ceci donne un flux de 2500 W/m²
 - » Comparable avec rayonnement de chaleur du Soleil
 - » Ne suffit pas en soi pour faire fondre la surface (rayonnement dans le vide possible)
 - » Importance du bilan de rayonnement lors de l'accrétion et de l'opacité de l'atmosphère primitive

**-4.50 milliards d'années:
Fin de l'accrétion et océan de Magma**



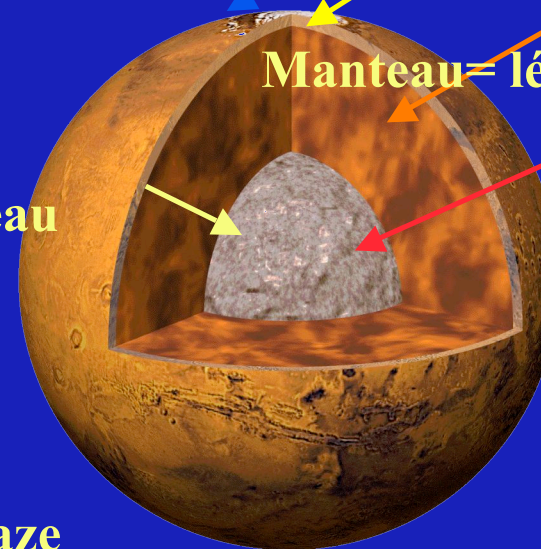
Formation de l'atmosphère



Météorites= mélange de fer, de Carbone, d'eau et de roches

Impacts violents = chaleur = Température d'un haut fourneau

Formation de la croûte qui remonte, du noyau qui tombe. Entre les deux le manteau. Au dessus une atmosphère qui dégaze

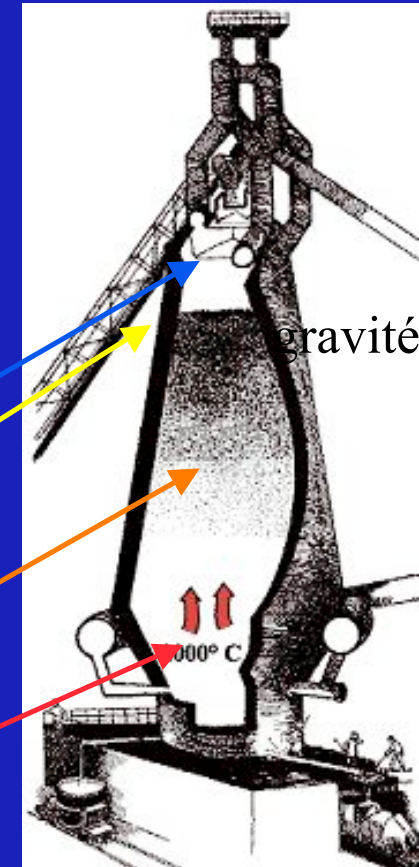


Atmosphère et eau

Croûte= très légère

Manteau= léger

Noyau de Fer = lourd



gravité

Bilan des volatils de la Terre

Inventaire

Atmosphere:	1 Bar = 10^4 kg/m ²
Masse totale atmosphere:	$5.1 \cdot 10^{18}$ kg
Autres volatils ($\cdot 10^{17}$ kg)	H ₂ O CO ₂

Atmosphere/hydrosphere	14 600	1.6
Roches sédimentaires	2 100	2724

(estimation minimum sans le manteau...)

Total	16 700	2726
-------	--------	------

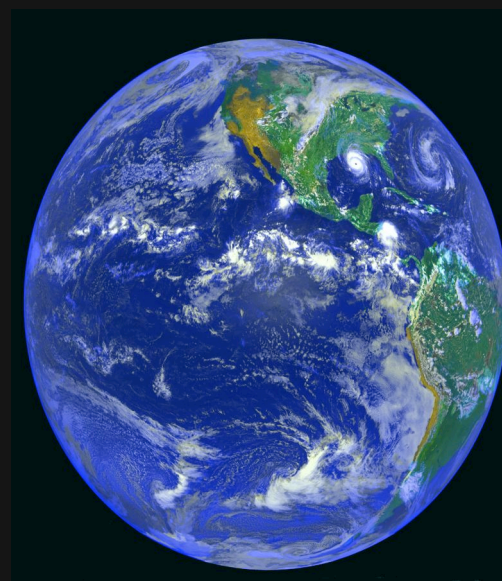
Masse en volatils = $19.5 \cdot 10^{20}$ kg (>380 Bar)

Rapport H₂O/CO₂ = 18.1

Echappement : 2-3 kg/s

Avec l'échappement actuel>

Durée de vie: ≈ 50 By



Bilan des volatils de Mars

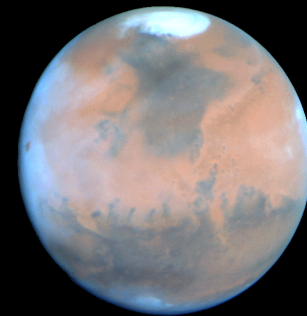
Inventaire dans l'atmosphère

Atmosphere CO_2)	0.007 Bar (mainly
Masse	$1.0 \cdot 10^{16}$ kg

Phobos-2, ASPERA1 observations:

Pertes, O^+ , O_2^+ , CO_2^+ ... ≈ 1 kg/s

Echappement actuel =>
Disparition en ≈ 200 My



Bilan CO₂

◆ Terre

- Peu de CO₂ dans l'atmosphère (<0.1 %), essentiellement du CO₂ stocké dans les carbonates
- Croûte $\sim 6 \cdot 10^{21}$ moles, manteau ?
- Océans + atmosphère + matières organiques $\sim 3.4 \cdot 10^{18}$ moles

◆ Vénus

- Atmosphère dense de CO₂ (à 95,5 %), densité au sol de 65 kg/m³ et pression de 92 bar
- Atmosphère $\sim 10^{22}$ moles

◆ Mars

- Atmosphère peu dense de CO₂ (à 95,32%) $\sim 4,8 \cdot 10^{17}$ moles
- Calottes polaires mélange de CO₂ et d'eau $2\text{-}3 \cdot 10^{17}$ moles
- Masse cumulée ~ 104 moindre que la Terre ou Venus pour une masse planétaire 10x moindre
 - CO₂ perdu dans l'espace ou stocké dans le sol?

Volatils: premier bilan

- ◆ Les planètes à priori partent avec un stock en volatils très important
- ◆ Le début de l'histoire commence donc avec une perte de volatils très importante

	^{36}Ar ($10^{-10} \text{ cm}^3/\text{g}$)	^{84}Kr ($10^{-10} \text{ cm}^3/\text{g}$)	H_2O (ppm)	C (ppm)	S (ppm)
C1(orgueil)	7800	83	72900	30900	58000
Terre	210	4,3	322	30	238
Mars	1,6	0,055	45		

	Stock initial dans les chondrites C1			
	H_2O (km)	CO_2 (bar)	H_2O (km)	CO_2 (bar)
Terre	853,032303	130175,9586	3,767851873	126,384426
Mars	324,6966	?	0,20043	?

Etat initial des planètes

- ◆ Temps de croissance des planètes $\sim 10^8$ années

$$r(t) = r_0(1 - e^{-t/T})$$
$$\frac{dr}{dt} = \frac{r_0}{T}$$

- Avec $T \sim 2 \cdot 10^7$ années,
 $dr/dt = 0.32$ m/an (1280 kg/m²/an pour $\rho = 4000$ kg/m³)
- Pour $gr \sim 60$ MJ/kg, (fin d'accrétion de la Terre), ceci donne un flux de 2500 W/m²

Comparable avec rayonnement de chaleur du Soleil

Ne suffit pas en soi pour faire fondre la surface (rayonnement dans le vide possible)

Importance du bilan de rayonnement lors de l'accrétion et de l'opacité de l'atmosphère primitive

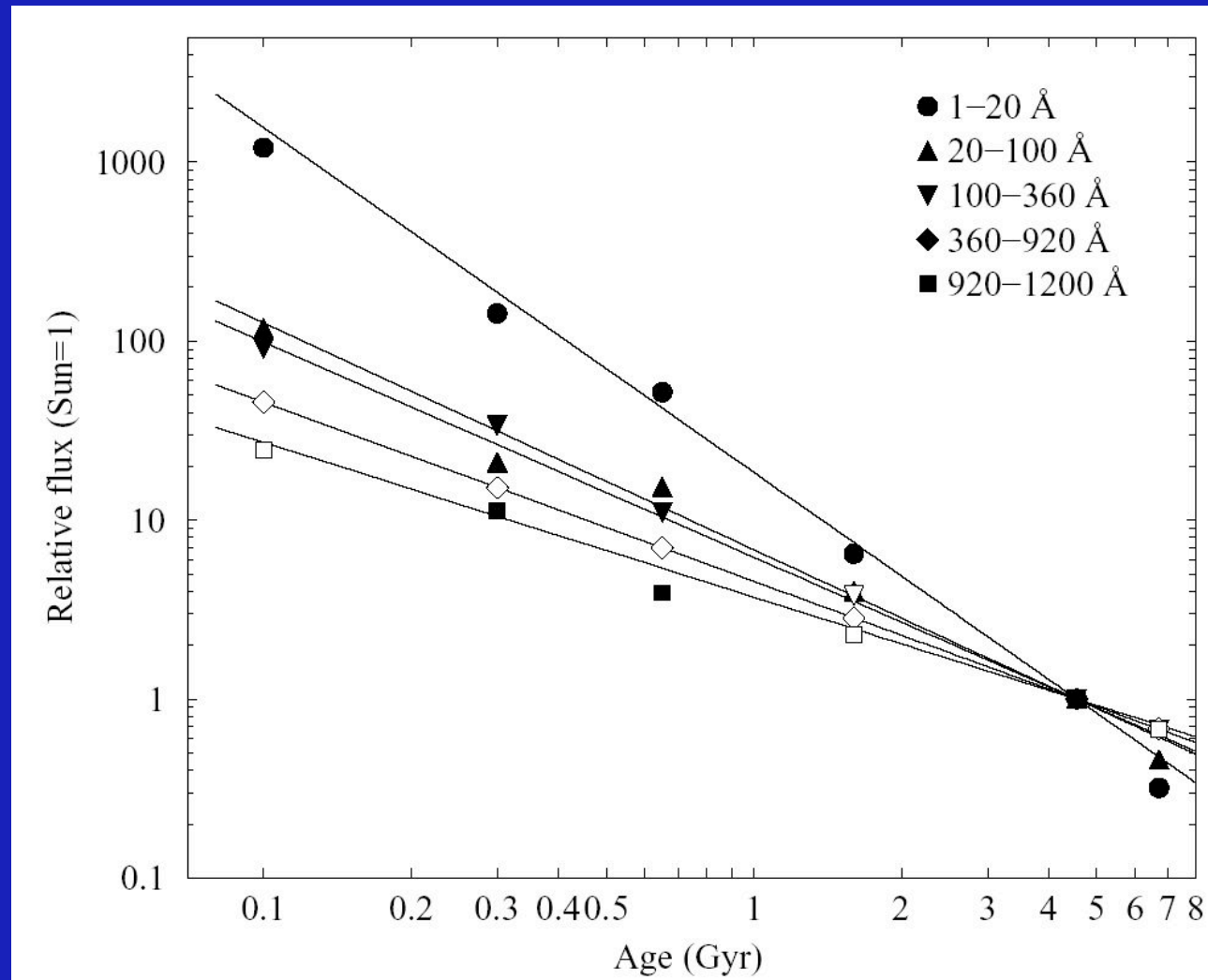
Température de Surface

- ◆ Loi de Stéfán

$$\Phi_s = \varepsilon \sigma T_s^4$$

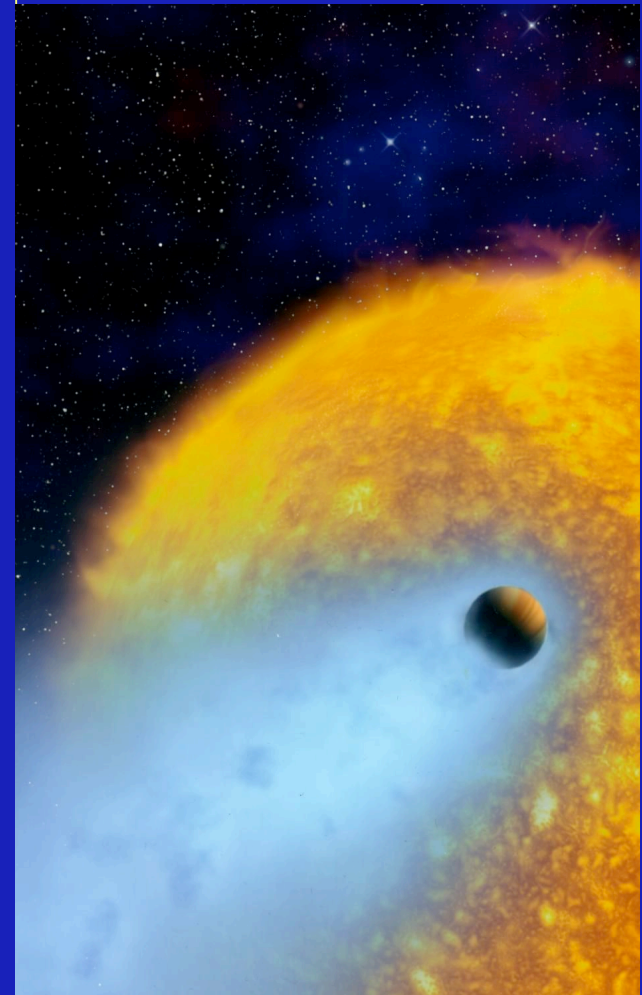
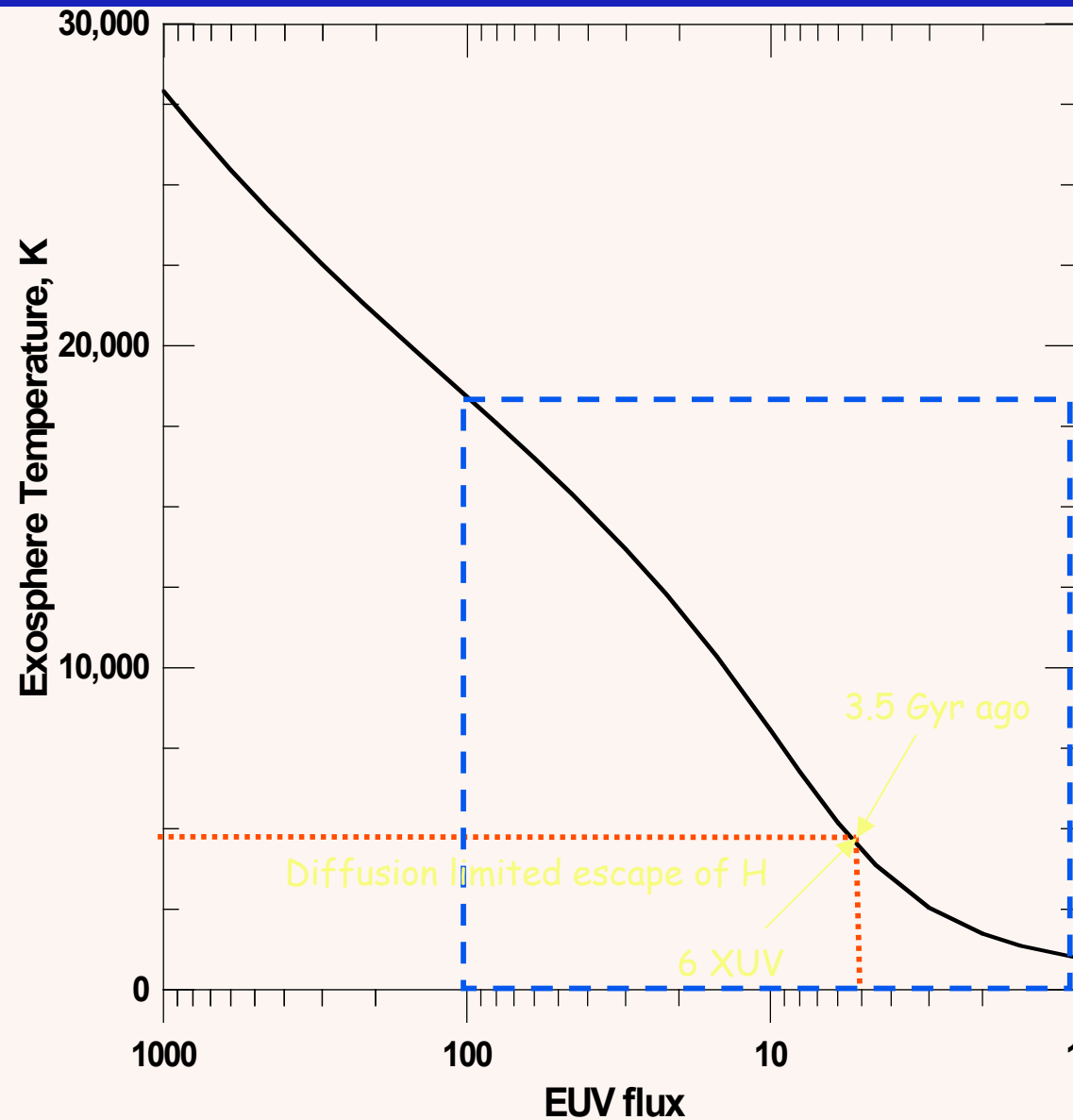
- ◆ où est la puissance rayonnée, T_s la température de surface et $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ SI la constante de Stefan et ε l'émissivité effective.
- ◆ Pour $\varepsilon = 1$, 2500 W/m² est obtenu avec $T = 460$ K
- ◆ Une émissivité $\ll 1$ est donc nécessaire pour arriver à un océan de magma
- ◆ Emissivité élevée en raison des poussières et gaz à effet de serre (atmosphère très riche en vapeur d'eau)

Un soleil primitif beaucoup plus fort dans les premiers 100 Millions d'années

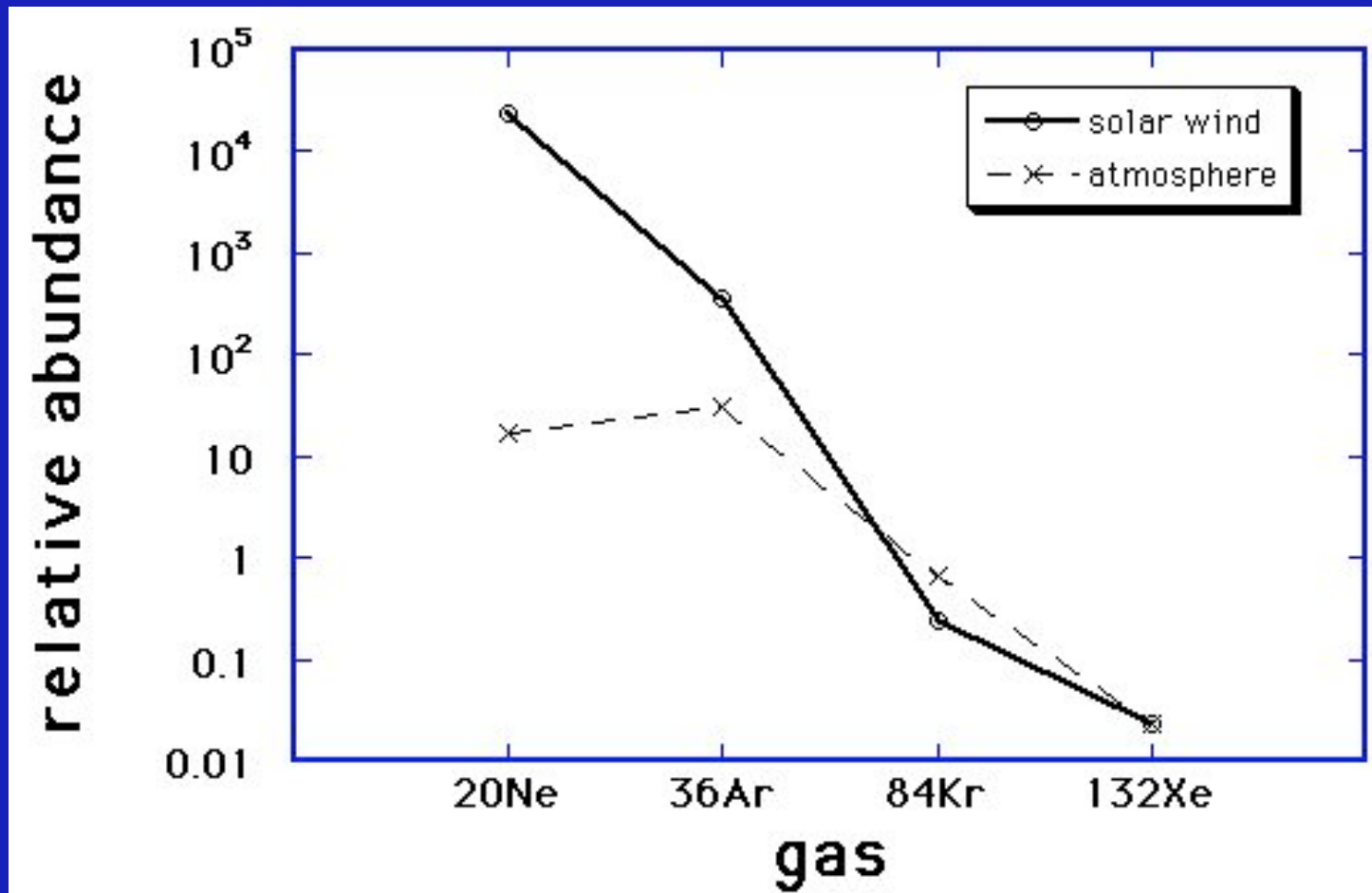


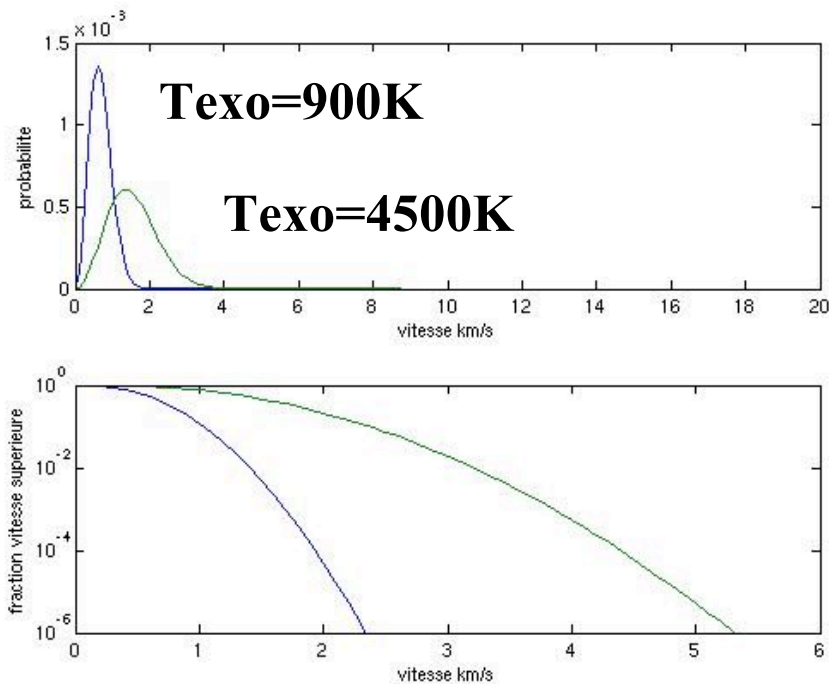
Ribas et al. (2004)

Thermosphère plus chaude....



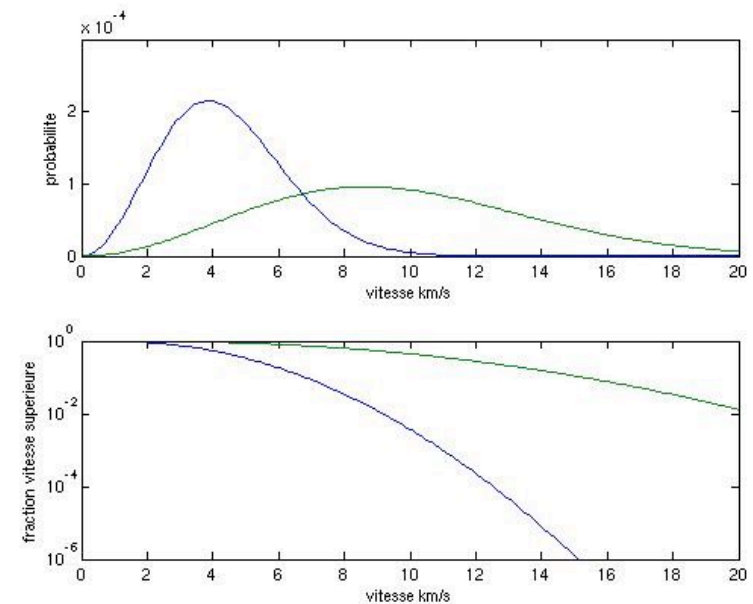
Echappement initial très important





- Echappement massif de l'Hydrogène
- Entrainement des autres gaz (dont les gaz rares dégazé)

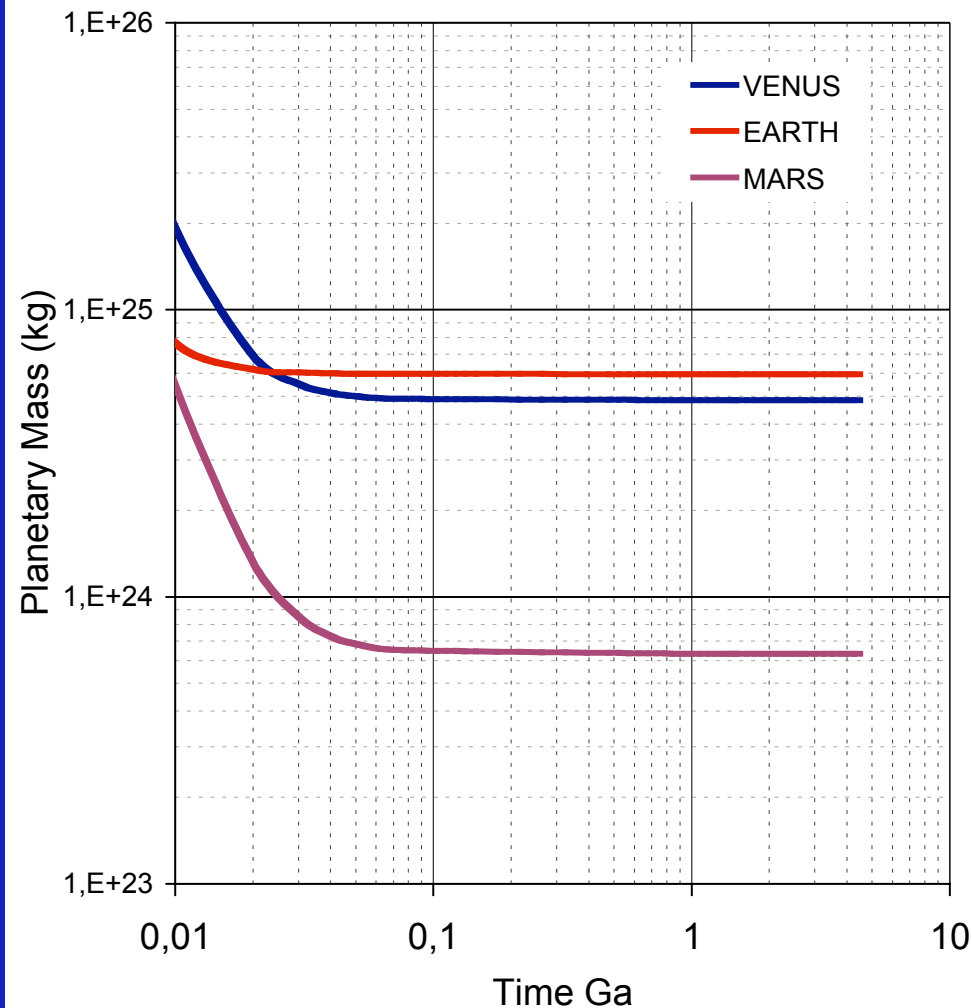
Echappement plus important
Exemple de l'Argon { M~40)



Echappement hydrodynamique

$$\Phi_2 = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{m_c - m_2}{m_c - m_1} \right) \Phi_1$$
$$m_c = m_1 + \frac{NkT}{bg} \Phi_1$$

Echappement de l'atmosphère



Calibrées avec les échappements actuels

Terre (≈ 2 kg/s), Mars (≈ 1 kg/s) et estimation de 3 kg/s pour Venus

• $\neq$ Terre/Venus: effet du champ magnétique

$\neq$ Terre/Mars: effet de la gravité, mais M

Autre perte: érosion par impacts

- ◆ E_v = parametre d'évaporation ~ 20

$$M_e = \frac{\pi R^2 P_0}{g_e} \varepsilon_e$$
$$\varepsilon_e = \frac{v_i^2}{v_e^2 (1 + \varepsilon_v)}$$

Bilan des volatils de Mars

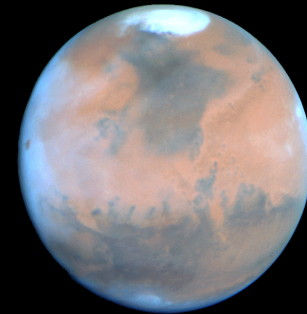
Inventaire dans l'atmosphère

Atmosphere	0.007 Bar (mainly
CO ₂)	
Masse	1.0·10 ¹⁶ kg

Phobos-2, ASPERA1 observations:
Pertes, O⁺, O₂⁺, CO₂⁺... ≈1 kg/s

Echappement actuel =>
Disparition en ≈200 My

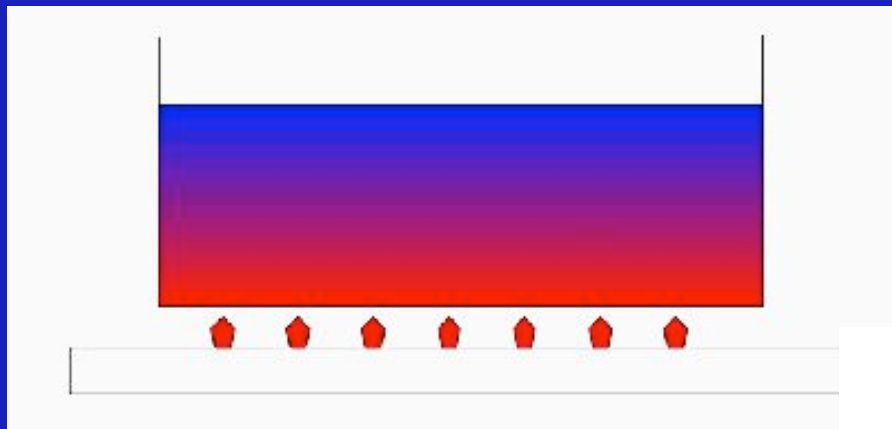
Où est la source d'atmosphère
secondaire?



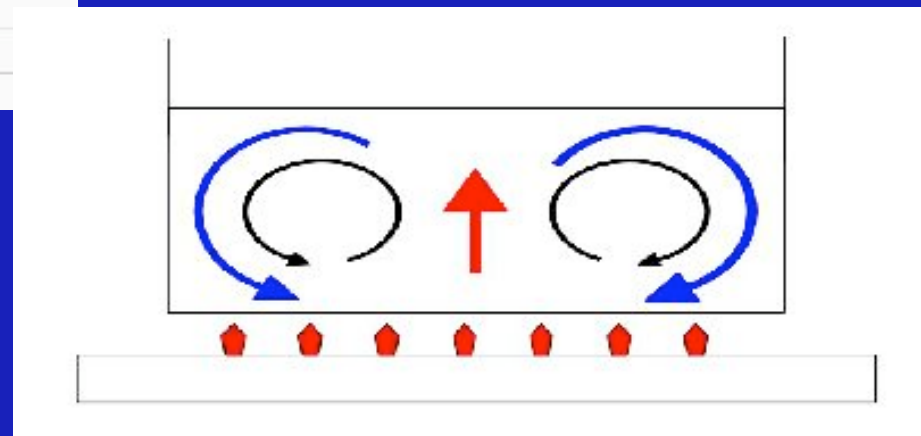
Convection et volcanisme: Mars

Mars doit évacuer la chaleur accumulée par tous les chocs de météorites lors de sa formation

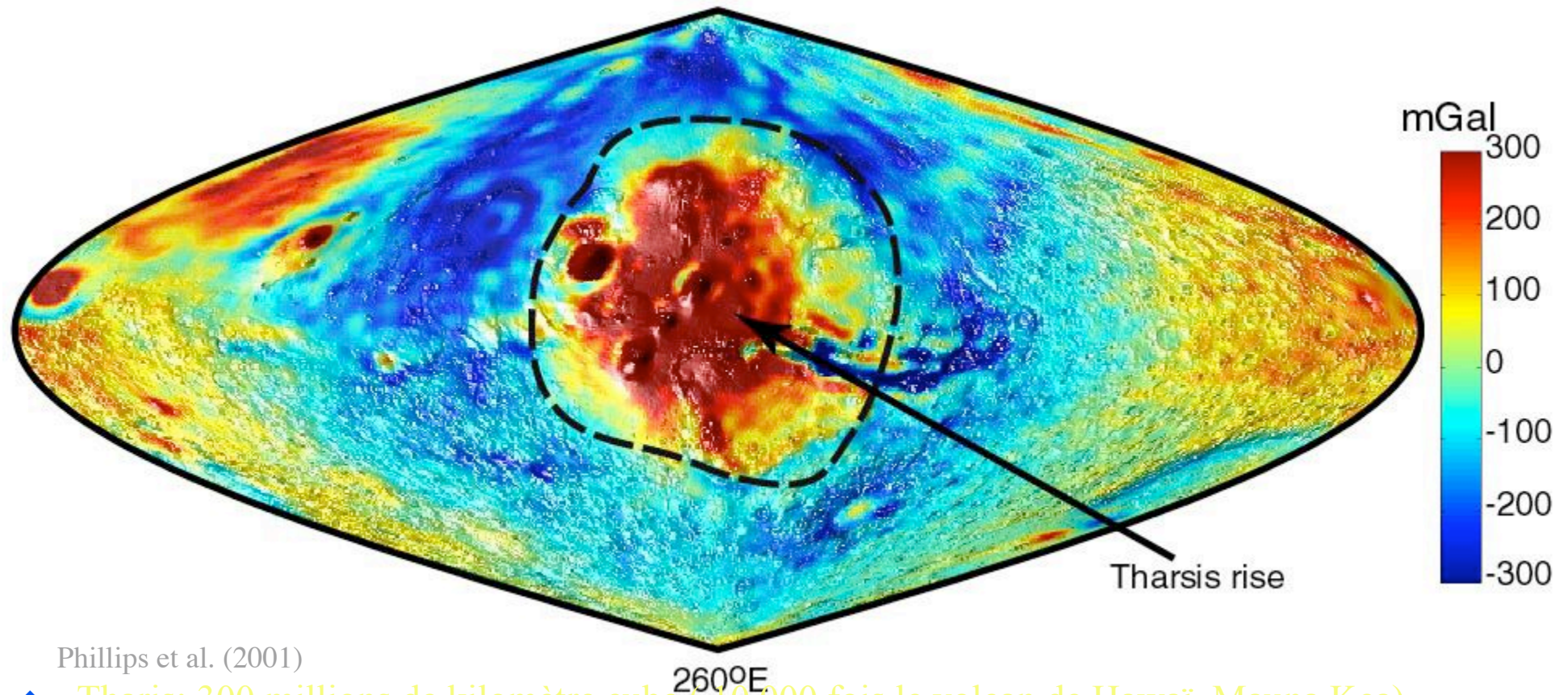
- **En tombant au centre, le noyau augmente la chaleur libérée**
- **Chauffage par le bas.... Refroidissement par le haut**



Dans une casserole...



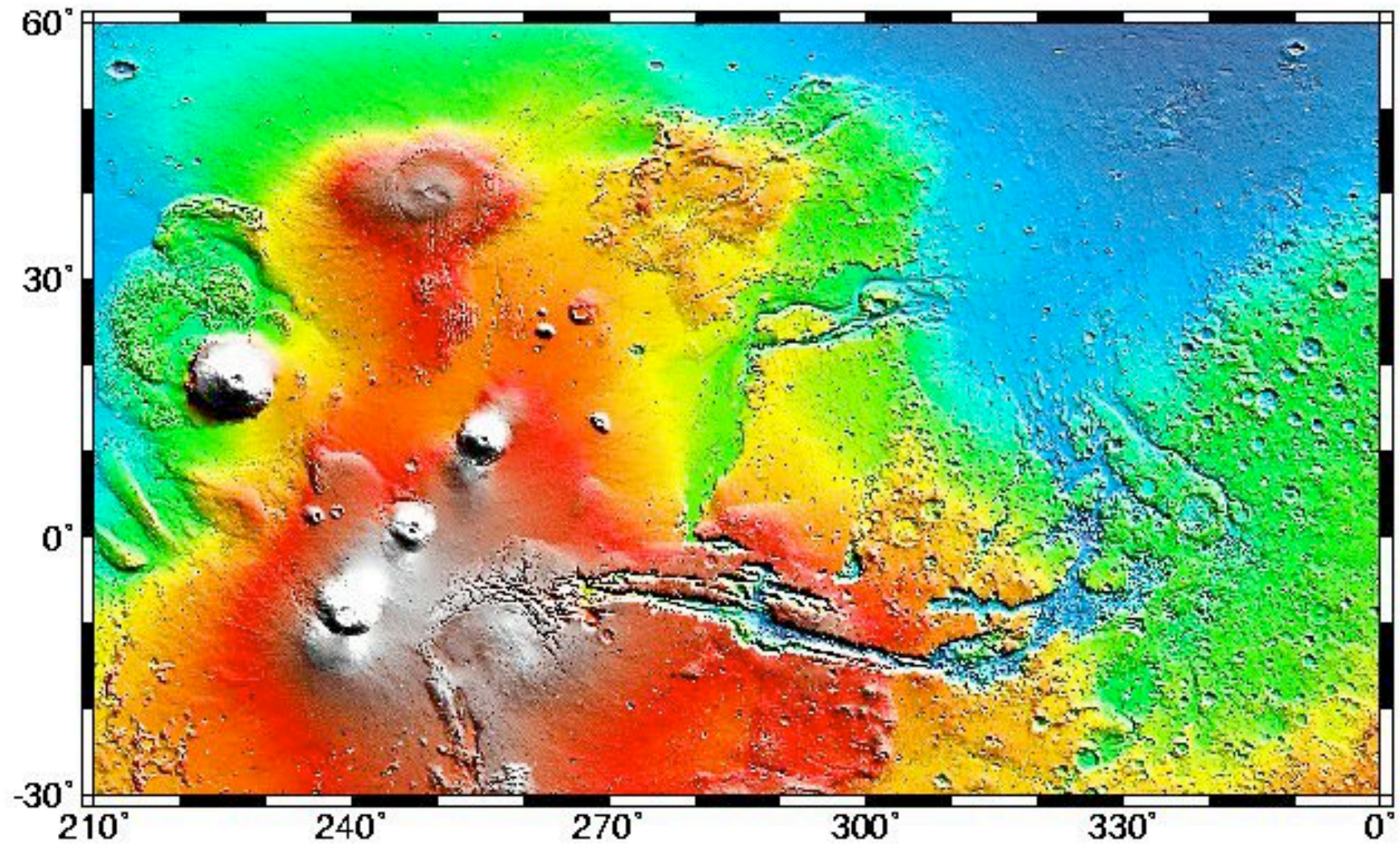
Convection primitive et formation de Tharsis



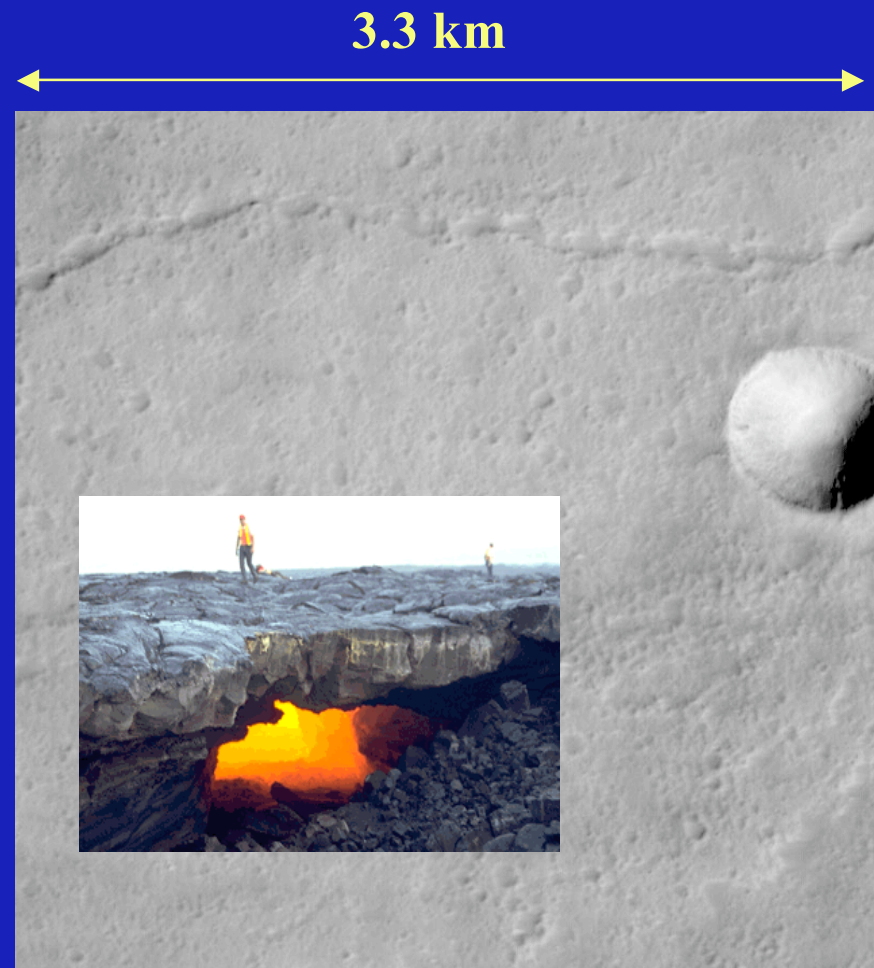
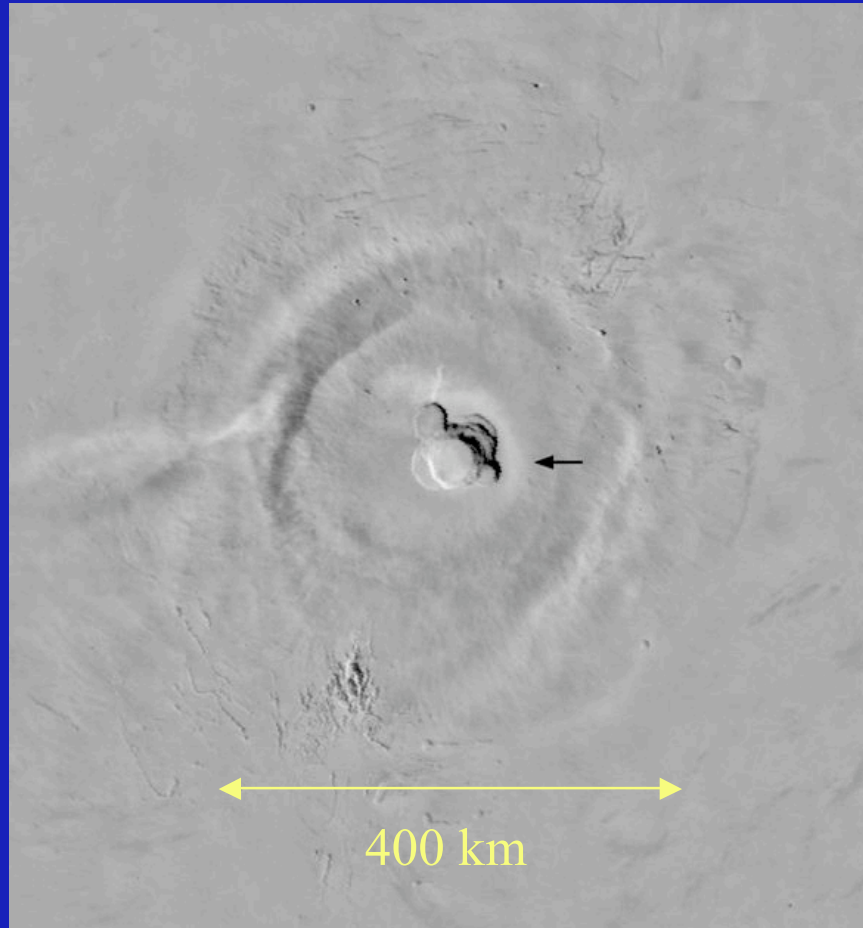
Phillips et al. (2001)

- ◆ Tharsis: 300 millions de kilomètre cube (10 000 fois le volcan de Hawaï, Mauna Kea)
- ◆ A l'échelle globale:
 - Charge de la croûte et de la lithosphère élastique
 - Dégazage avec une production de CO_2 moitié plus grande que celle de la Terre (1.5 bar) et assez d'eau pour recouvrir Mars de 120m d'eau

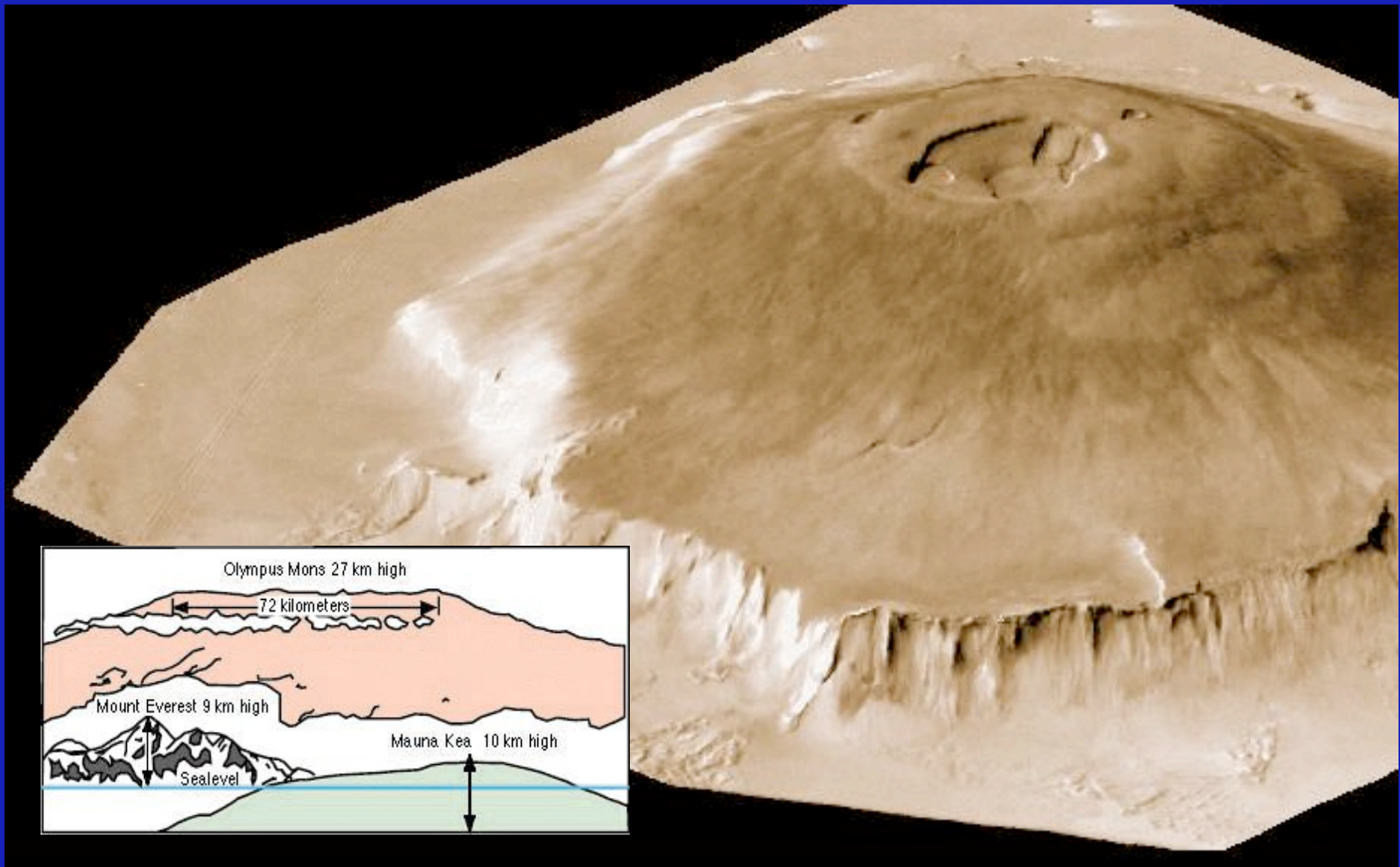
Tharsis et les volcans géants

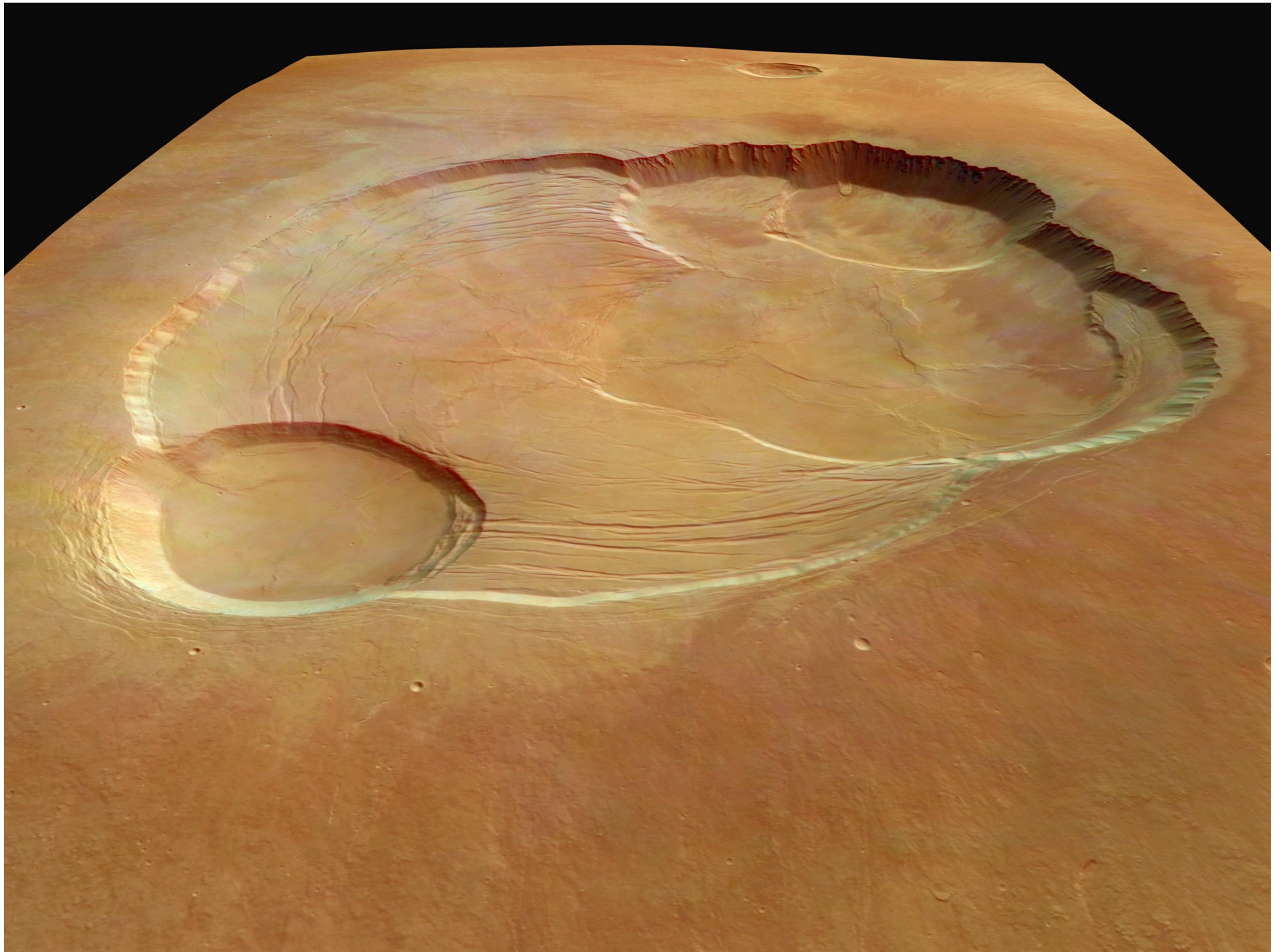


Ascraeus Mons



Le plus grand volcan du système solaire





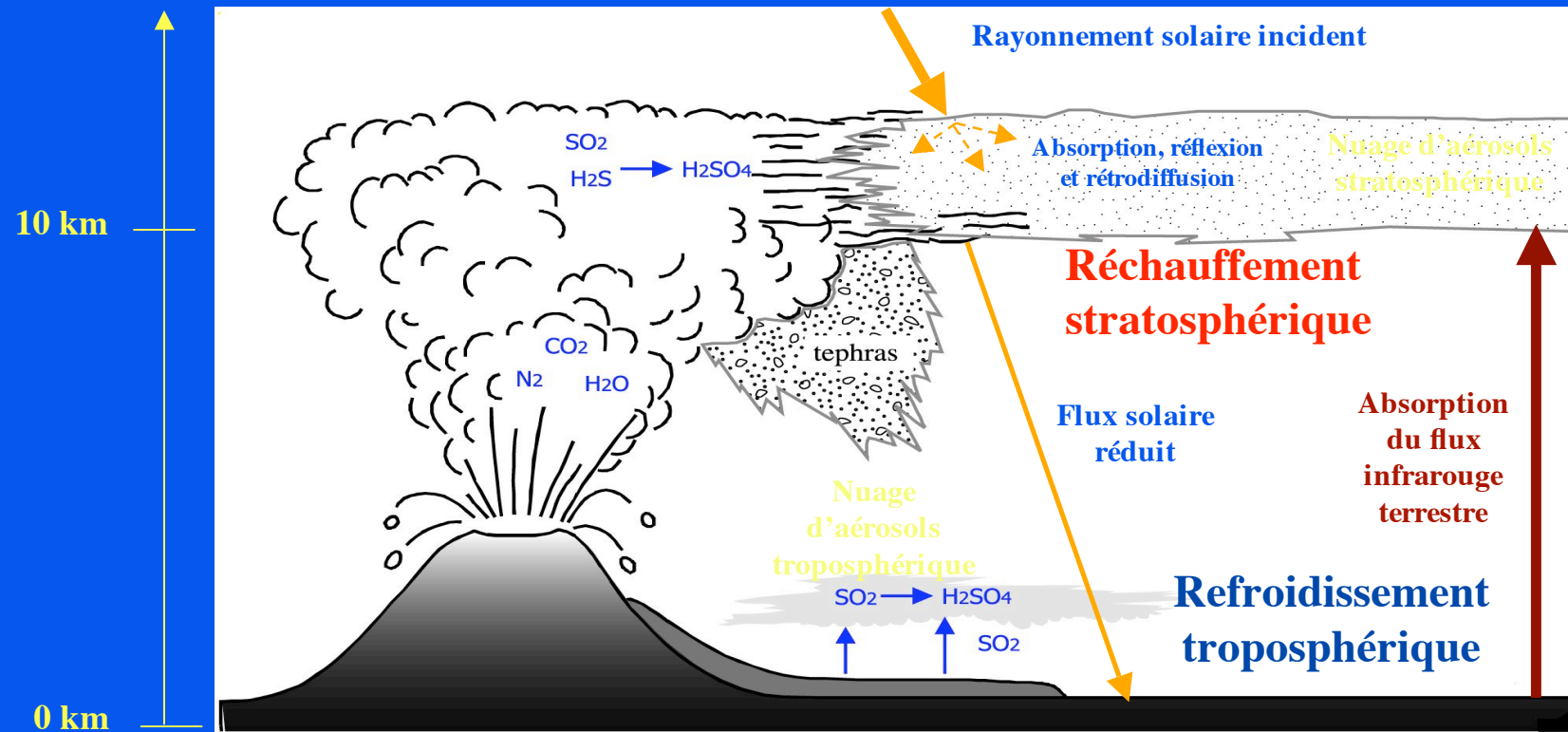
Le dégazage de l'atmosphère.. Et de l'eau



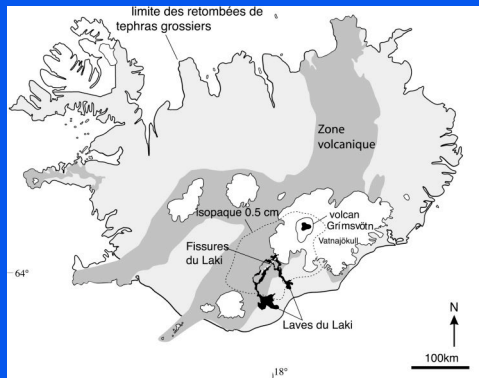
- ◆ 300 millions de kilomètre cube (10 000 fois le volcan de Hawaï)
- ◆ A l'échelle globale:
 - Produit assez de pour une pression atmosphérique en CO_2 moitié plus grande que celle de la Terre (1.5 bar)
 - Produit assez d'eau pour recouvrir Mars de 120m d'eau
- ◆ Tharsis fut peut être à l'origine de la période humide et chaude de Mars
- ◆ Ruissellement et pluie
 - transfert de l'eau dans la subsurface très poreuse (les quelques kilomètres sous la surface)
 - ruissellement puis rivières

éruption volcanique et l'atmosphère

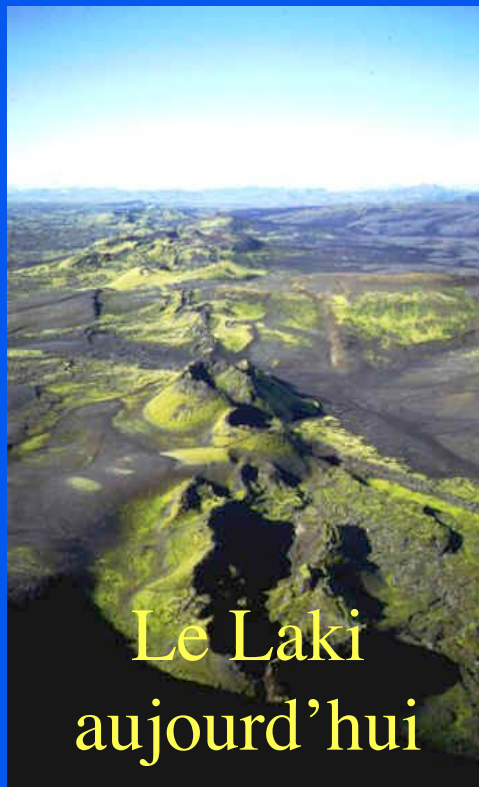
- Composition chimique modifiée par l'injection de gaz et de particules (CO_2 , H_2O , SO_2 , HCl , tephra...)
- Modification du transfert radiatif



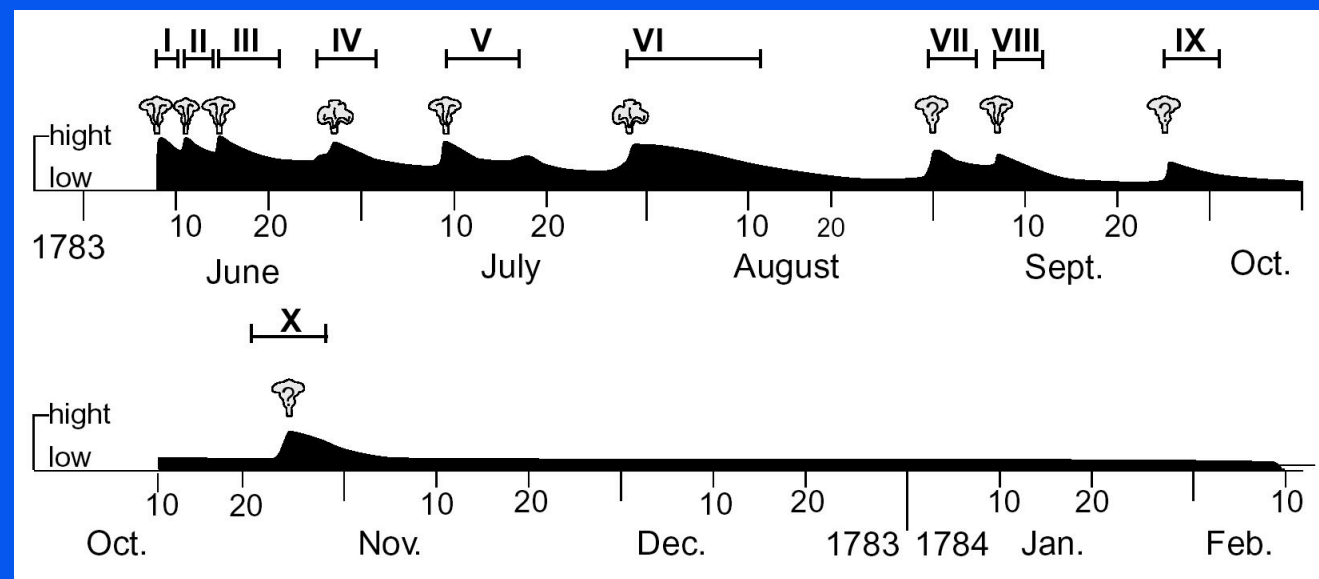
L'éruption du Laki en 1783-1784



15 km³ de coulées basaltiques
122 Mt de dioxyde de soufre
=> 250 Mt de H₂SO₄
=> 16 Mt H₂SO₄ / km³



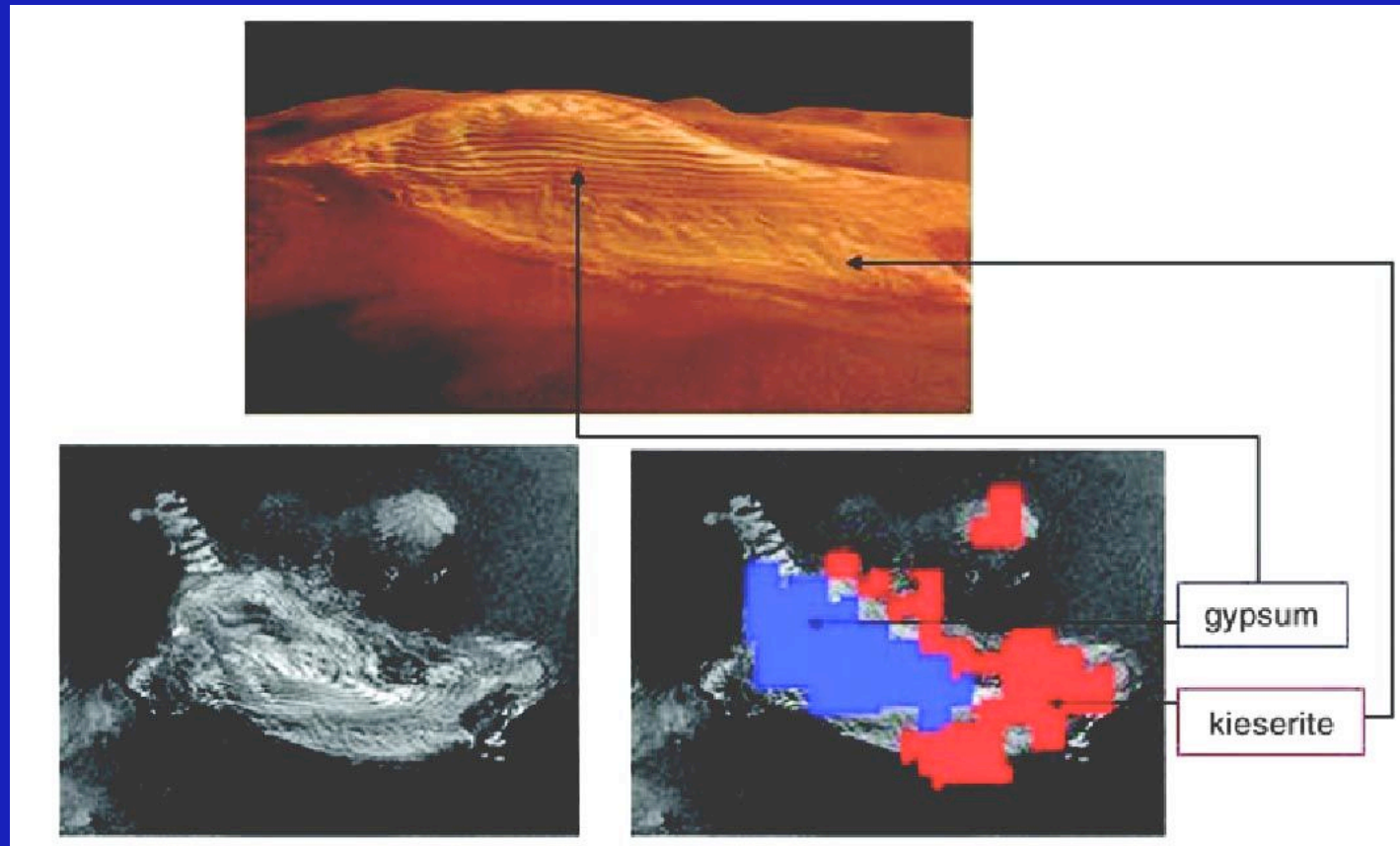
1100 Mt de téphras
Durée de Juin 1783 à Février 1784



(d'après Thordarson et Self, 2003)

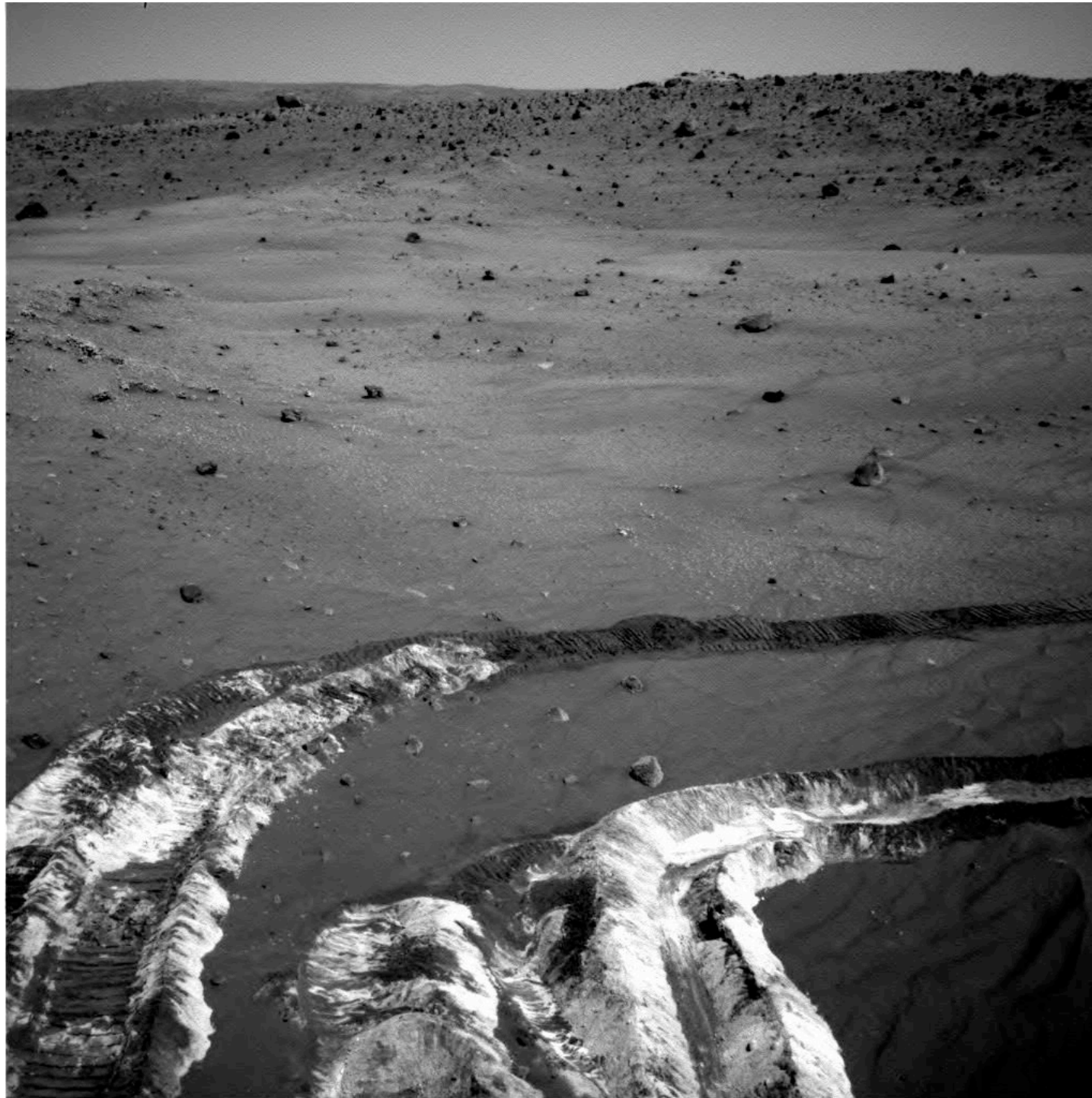
Mais aussi beaucoup de SO_2

- ◆ Des gisements massifs de Gypse (sulfates de calcium) et de kiesérite (sulfates de magnésium)
- ◆ Pas de carbonates (disparaissent dans l'eau acide)





**Roches tapissées
de sulfate
observées de
près par le
robot NASA
Opportunité
(février 2004)**



des dépôts
massifs de
sulfates
(Spirit, 23
Mars2006)

Acidité de l'eau

Typiquement $16 \text{ Mt H}_2\text{SO}_4 / \text{km}^3$

Production d'eau $\sim 0.06 \text{ km}^3 / \text{km}^3$

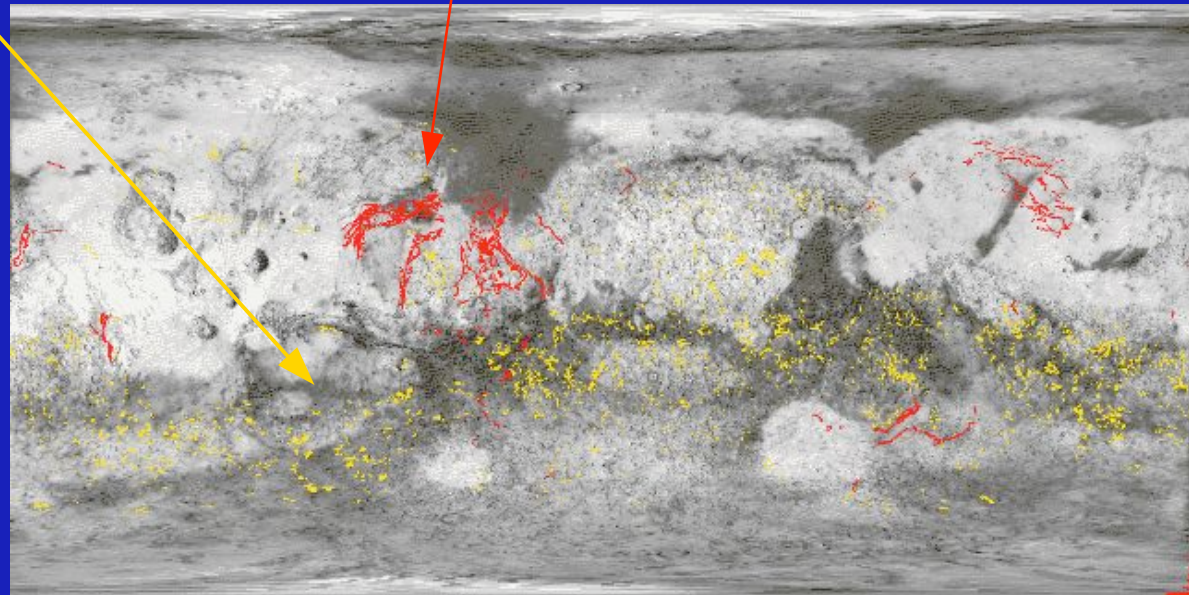
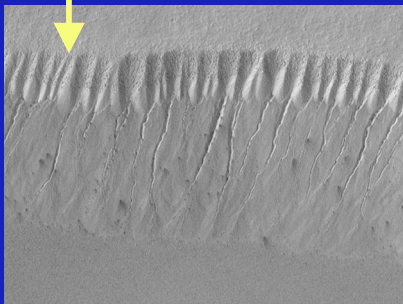
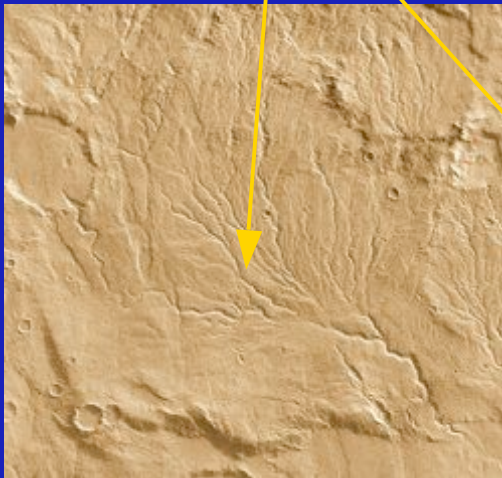
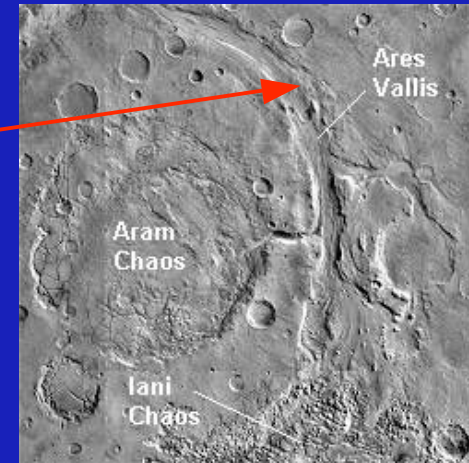
Acidité $\sim 2 * 16 \cdot 10^9 / 0,98 \text{ moles km}^3$
 $\sim 0,06 \cdot 10^{12} \text{ litres}$

Ph ~ 2

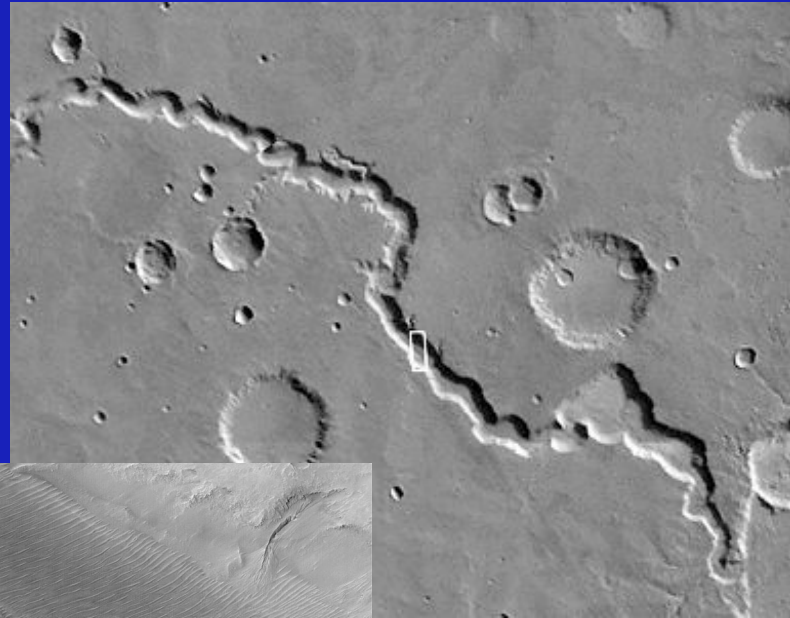
Rivières, vallées de débâcle et ravines

Trois systèmes bien différents:

- des vallées de débâcle, façonnées par de brutales inondations
- des rivières
- des petites traces de ravinement



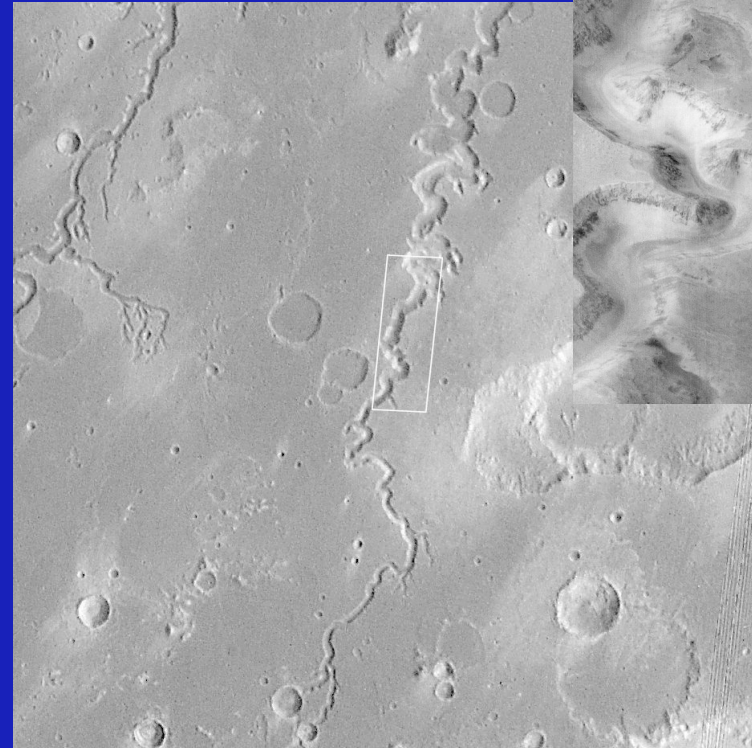
Les réseaux de vallées



Nirgal Valles



3 km



Nanedi Valles



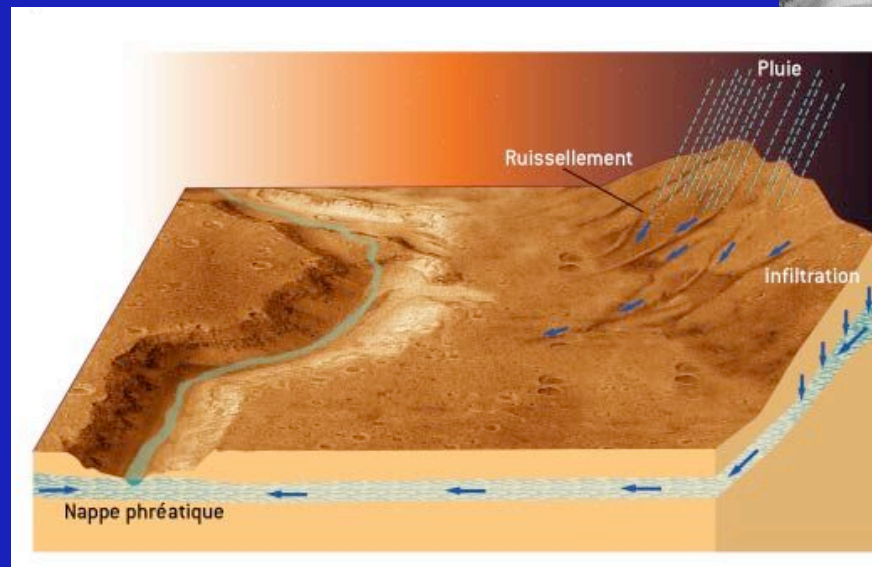
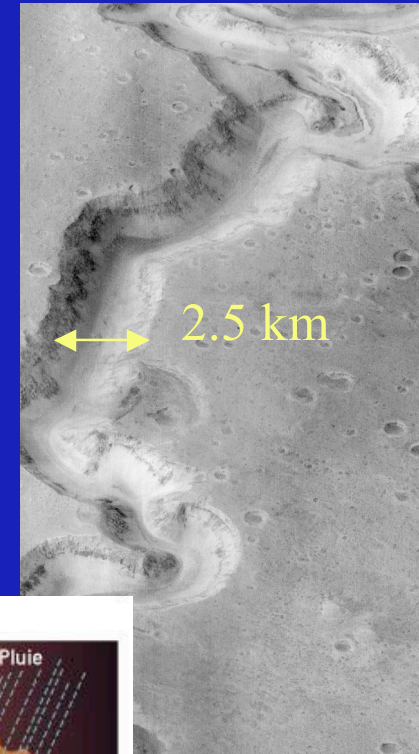
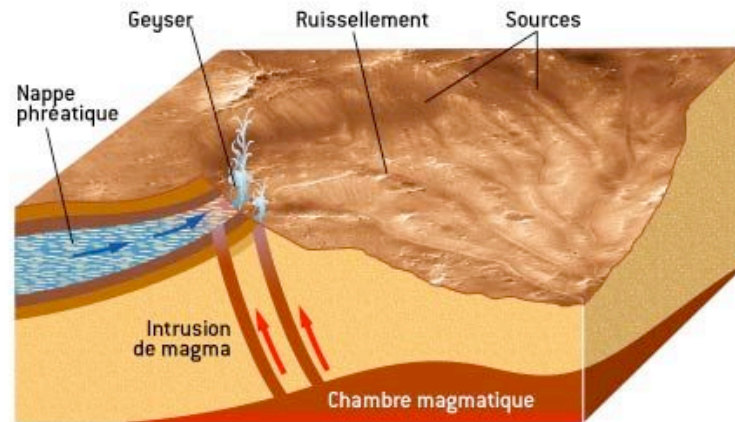
2.5 km



↑
MARS

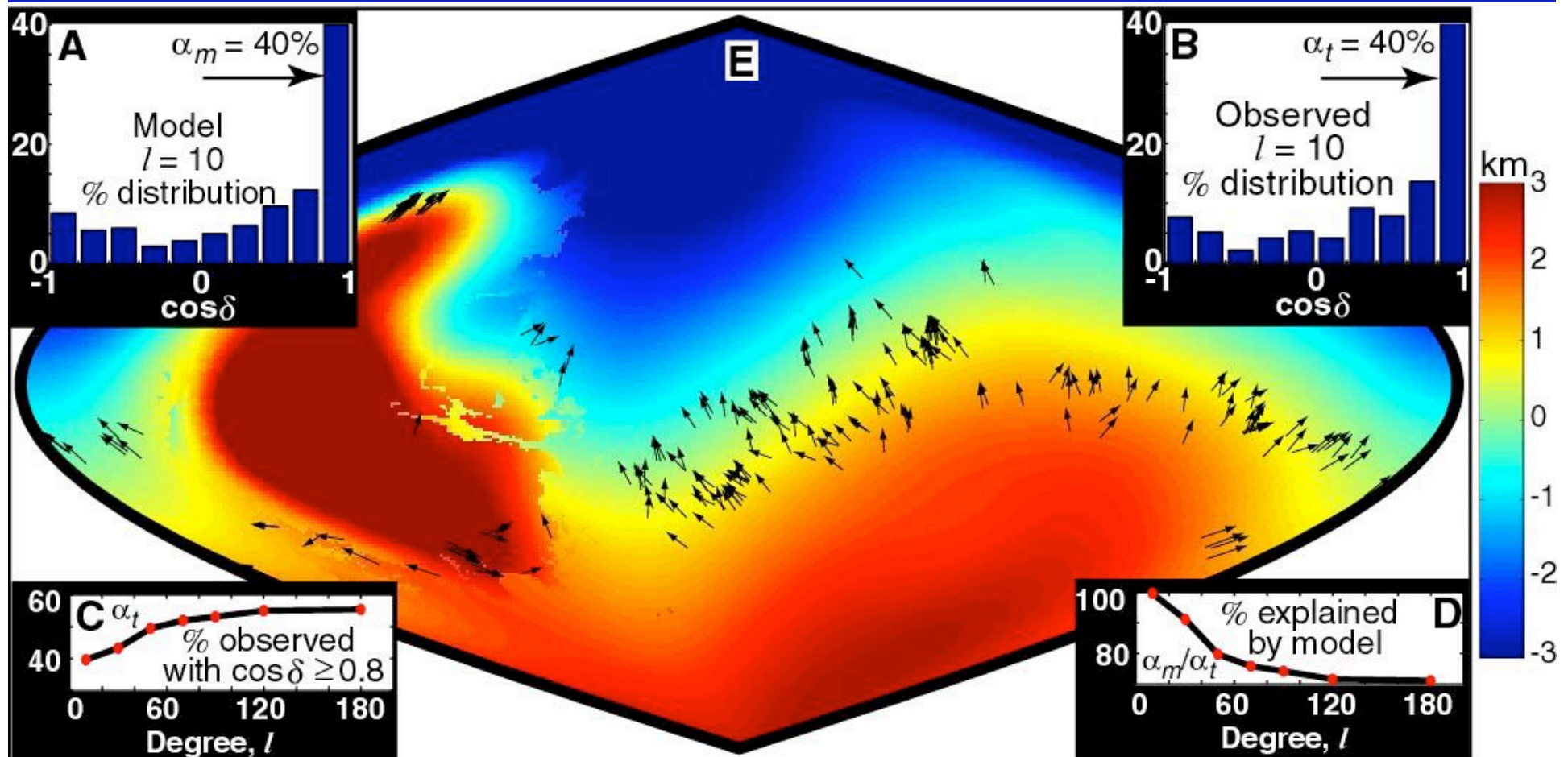
←
TERRE

Les réseaux de vallées



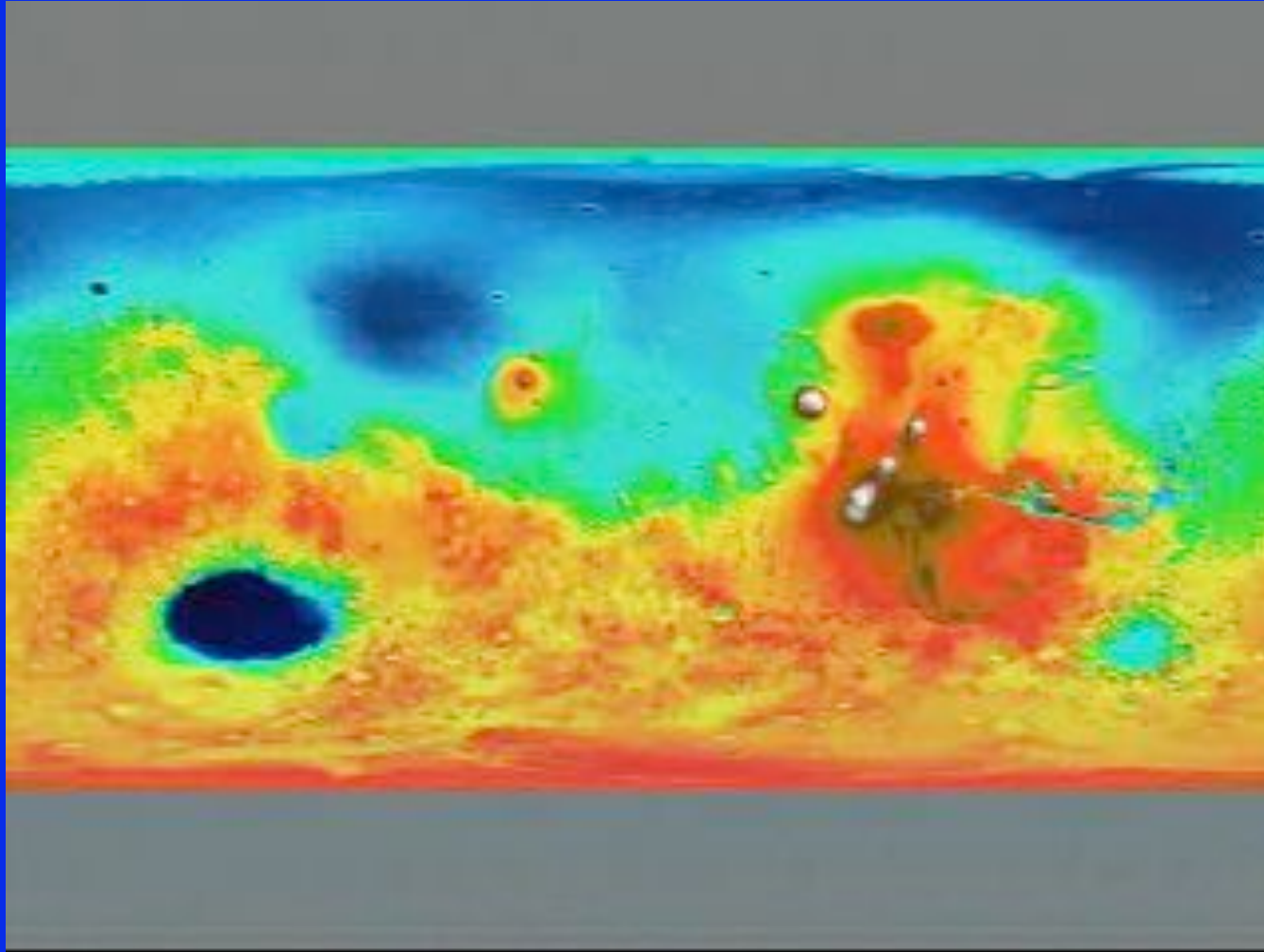
Nanedi
Valles

Tharis et les réseaux de rivières

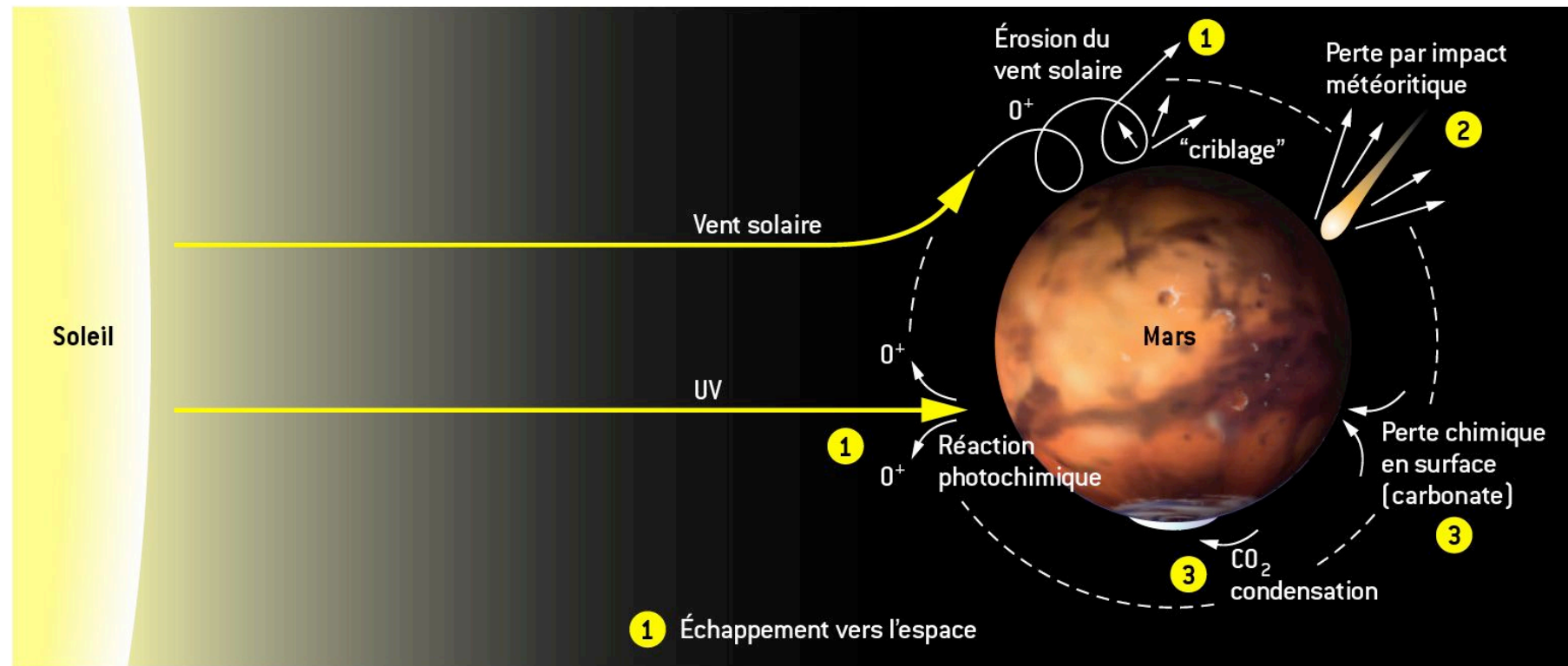


- Alignement des réseaux de rivières le long des pentes de Tharsis!
- Même si la surface de Tharsis est jeune, le plateau est donc ancien et a dû être formé dans les premiers 500 Millions d'années de la planète

Topographie de la planète Mars



Où est partie l'atmosphère?

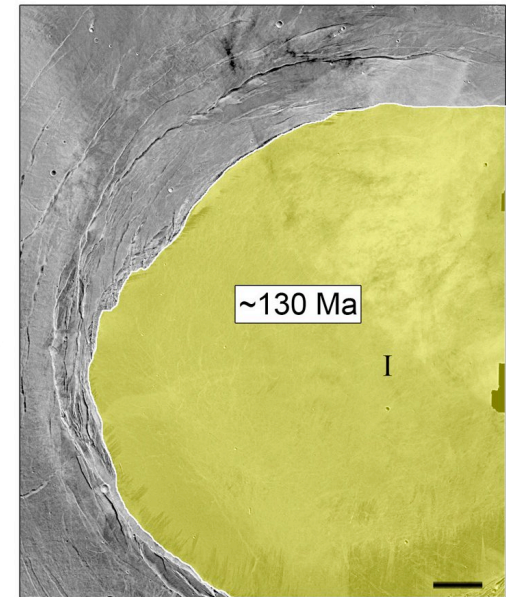
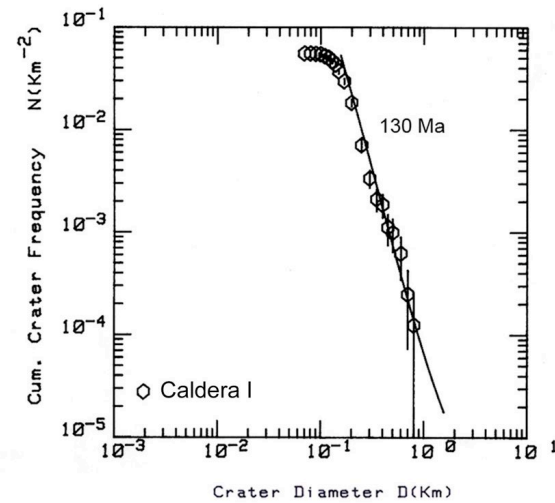
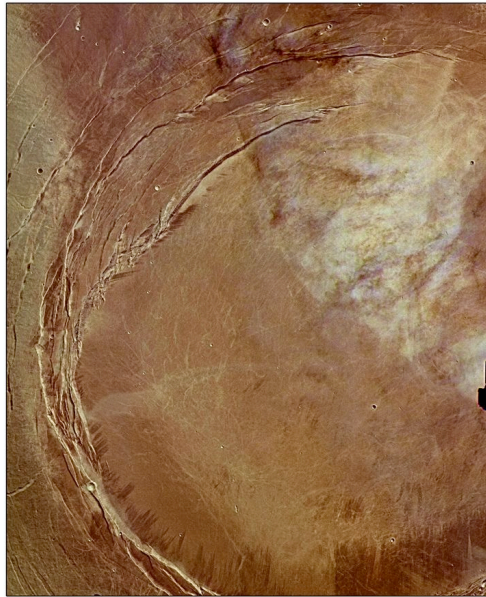


Bilan possible pour Mars

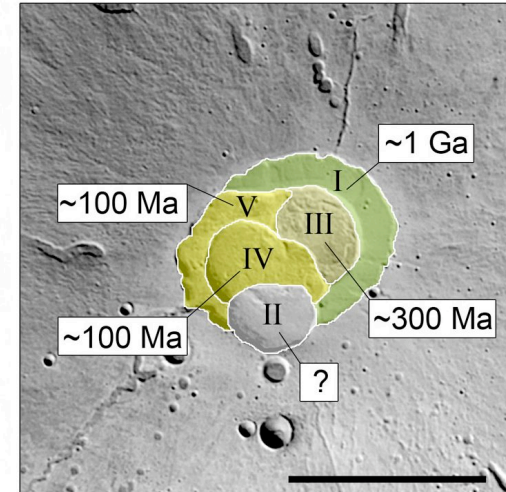
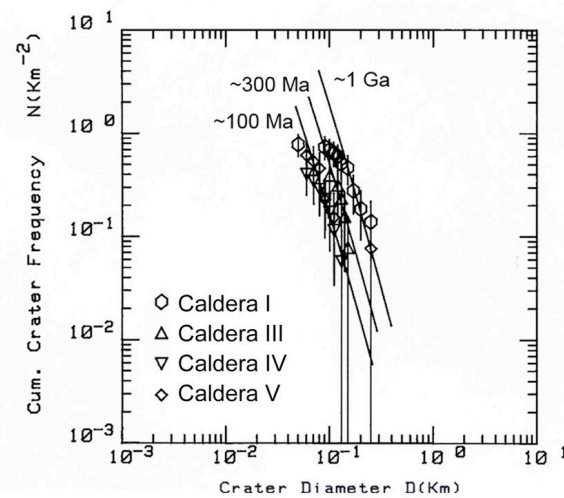
- ◆ 50%-80% de l'atmosphère a peut être été perdue lors du bombardement massif
- ◆ Abrasion du vent solaire aurait pu arracher ~1 bar d'atmosphère,

Hecates Tholus

Arsia
Mons



Hecates
Tholus



Neukum et al., 2004

