

# Cartes d'identités : Terre

Atmosphère de N<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> principalement co-évoluant avec les processus de surface ( vie, géologie)

Faibles variations de la pression et de température (maintien de l'eau à l'état liquide)

	Terre	Mars	Venus
CO2	345 ppm	0.953	0.965
N2	0.7808	0.027	0.035
O2	0.2095	0.0013	0-20 ppm
H2O	~0.01	300 ppm	50ppm
CH4	3 ppm		/
He	5.2 ppm	/	12ppm
Ne	18 ppm	2.5ppm	7ppm
Ar	0.0093	0.016	70 ppm
Kr	1 ppm	0.3 ppm	0.05-0.7ppm
Xe	0.09ppm	0.08ppm	<0.1ppm

	Terre	Mars	Venus
gravité (ms <sup>-2</sup> )	9.78 ms <sup>-2</sup>	3.71ms <sup>-2</sup>	8.87 ms <sup>-2</sup>
pression atmosphérique	1 bar	0.007bar	90bar
température de surface	290K	183-268K	730K
distance au soleil	1 UA	1.52 UA	0.72 UA

# Cartes d'identités : Mars

- ◆ Atmosphère de CO<sub>2</sub> principalement
- ◆ Fortes variations de la pression (échanges atmosphère/surface au niveau des calottes polaires)
- ◆ Fortes variations de température jour/nuit

	Terre	Mars	Venus
CO2	345 ppm	0.953	0.965
N2	0.7808	0.027	0.035
O2	0.2095	0.0013	0-20 ppm
H2O	~0.01	300 ppm	50ppm
CH4	3 ppm		/
He	5.2 ppm	/	12ppm
Ne	18 ppm	2.5ppm	7ppm
Ar	0.0093	0.016	70 ppm
Kr	1 ppm	0.3 ppm	0.05-0.7ppm
Xe	0.09ppm	0.08ppm	<0.1ppm

	Terre	Mars	Venus
gravité (ms <sup>-2</sup> )	9.78 ms <sup>-2</sup>	3.71ms <sup>-2</sup>	8.87 ms <sup>-2</sup>
pression atmosphérique	1 bar	0.007bar	90bar
température de surface	290K	183-268K	730K
distance au soleil	1 UA	1.52 UA	0.72 UA

Composition

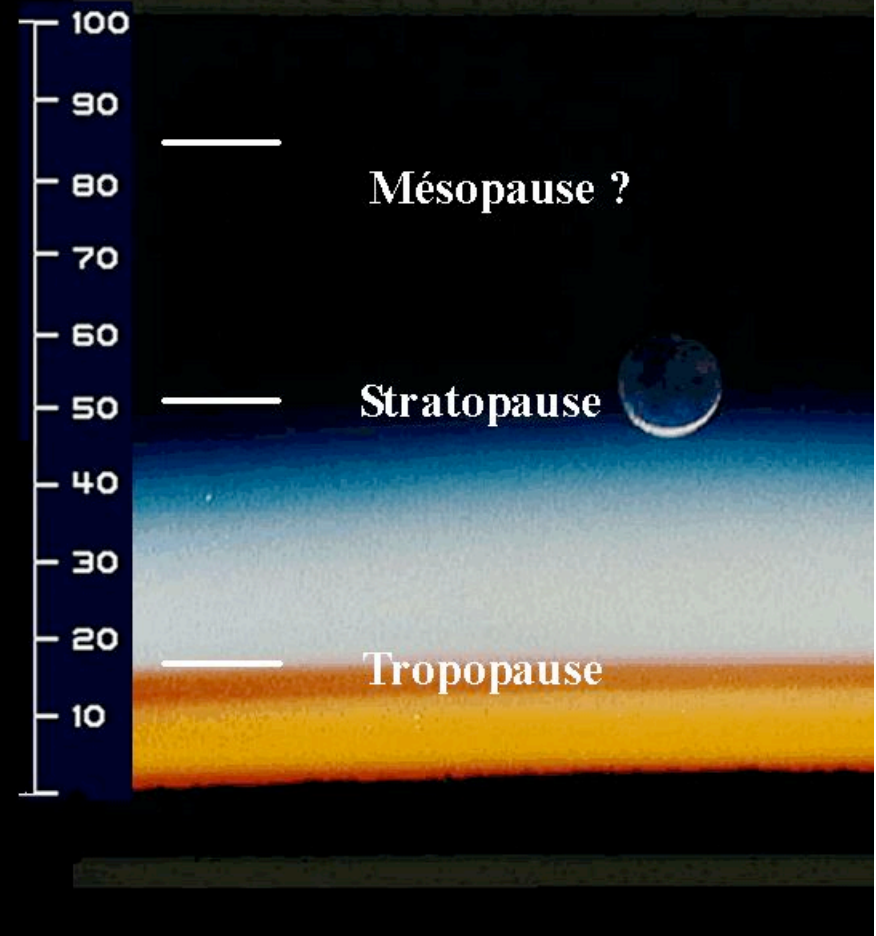
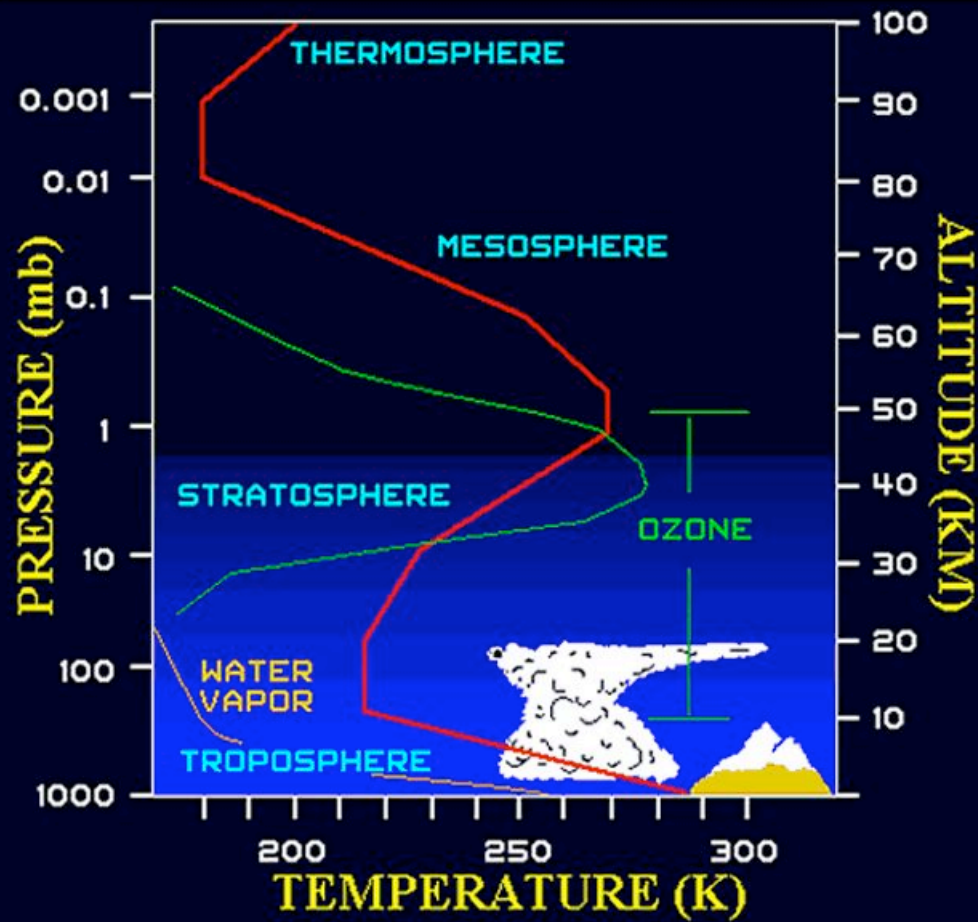
Venus: carte d'identité

	Terre	Mars	Venus
CO2	345 ppm	0.953	0.965
N2	0.7808	0.027	0.035
O2	0.2095	0.0013	0-20 ppm
H2O	~0.01	300 ppm	50ppm
CH4	3 ppm		/
He	5.2 ppm	/	12ppm
Ne	18 ppm	2.5ppm	7ppm
Ar	0.0093	0.016	70 ppm
Kr	1 ppm	0.3 ppm	0.05-0.7ppm
Xe	0.09ppm	0.08ppm	<0.1ppm

	Terre	Mars	Venus
gravité (ms <sup>-2</sup> )	9.78 ms <sup>-2</sup>	3.71ms <sup>-2</sup>	8.87 ms <sup>-2</sup>
pression atmosphérique	1 bar	0.007bar	90bar
température de surface	290K	183-268K	730K
distance au soleil	1 UA	1.52 UA	0.72 UA

- ◆ Atmosphère dense de CO<sub>2</sub> (à 95,5 %), densité au sol de 65 kg/m<sup>3</sup> et pression de 92 bar
- ◆ 3.5% de N<sub>2</sub> et 130 ppm de SO<sub>2</sub>
- ◆ Même inventaire de N<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> que la Terre mais 100 x plus d'Argon
- ◆ Nuages composés de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, mais réaction chimique à la surface qui fixe le soufre: apport de soufre nécessaire (volcanisme?)

# Structure de l'atmosphère



# Structure de l'atmosphère à l'équilibre

- ◆ Equilibre dynamique

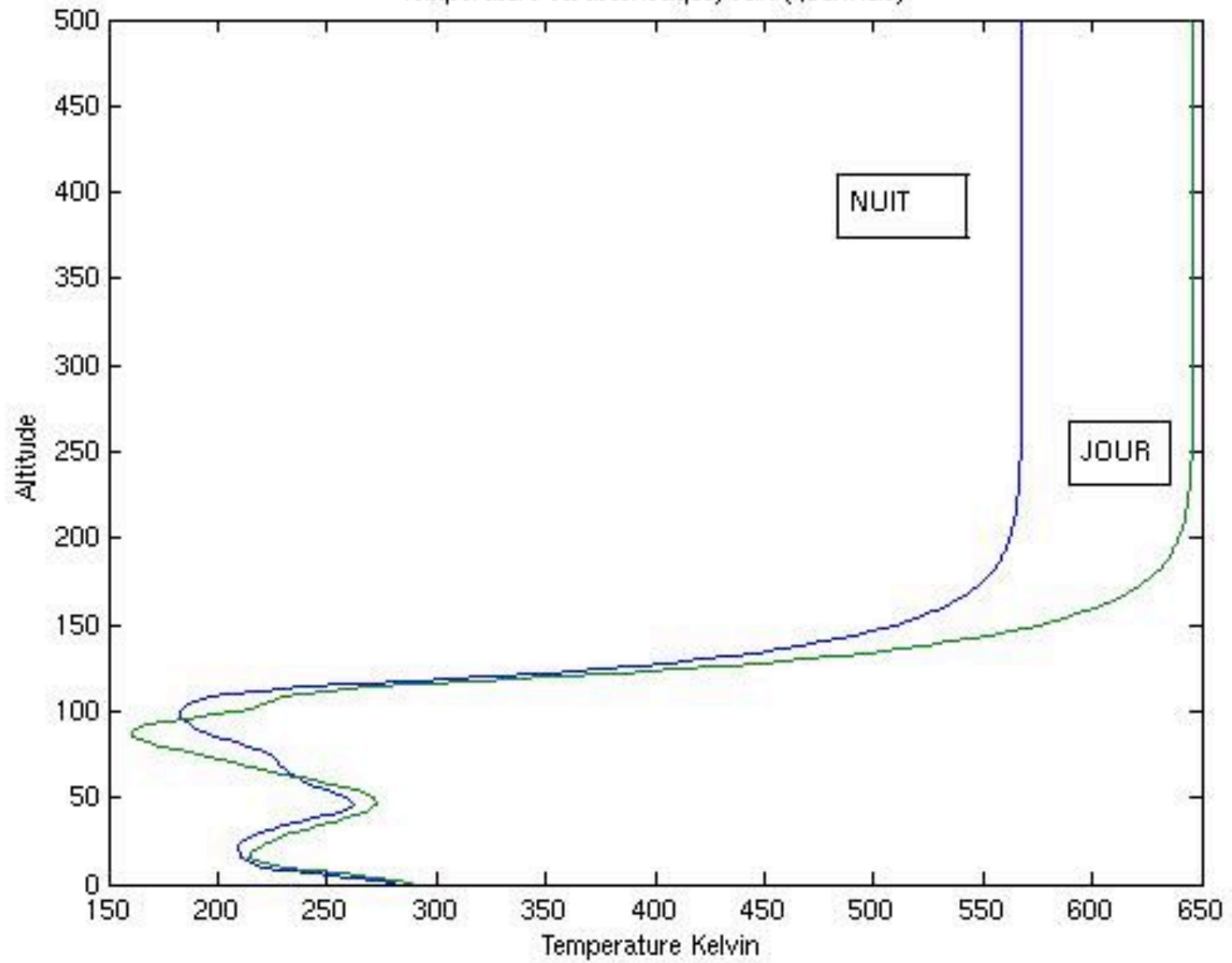
$$-\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} = \vec{0}$$

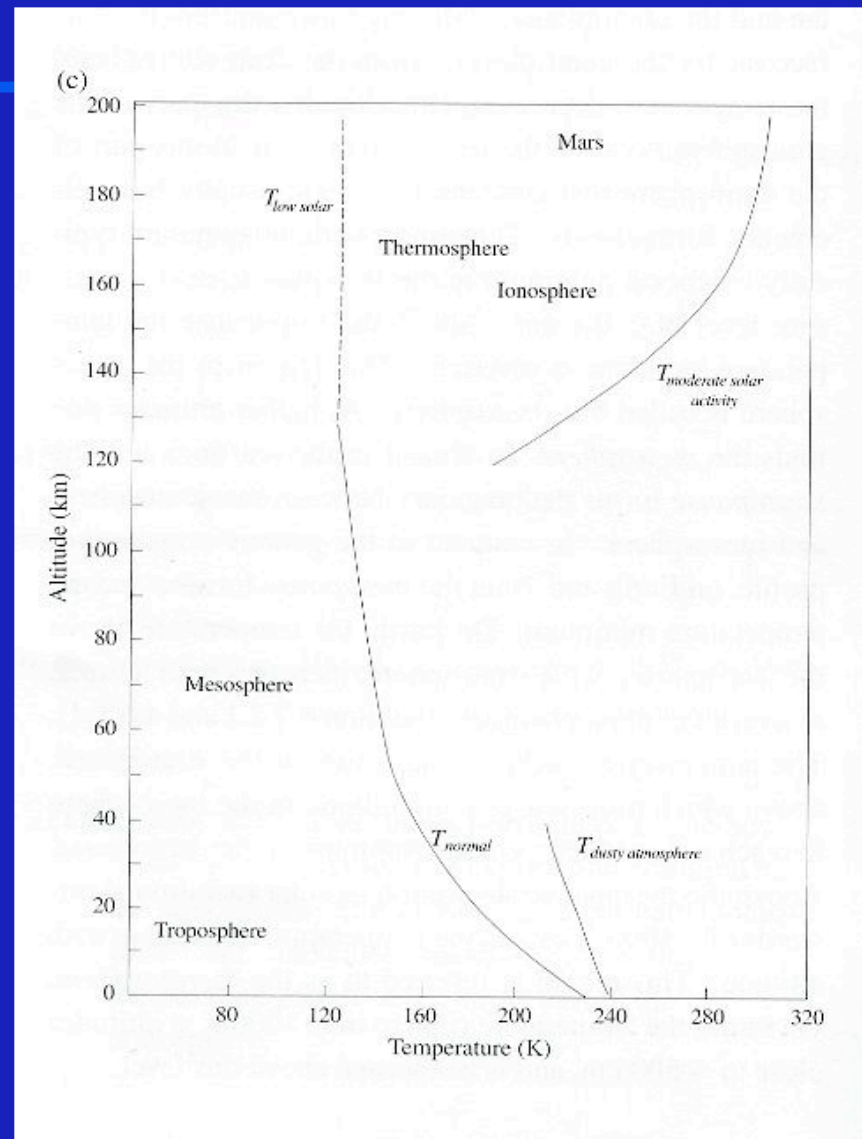
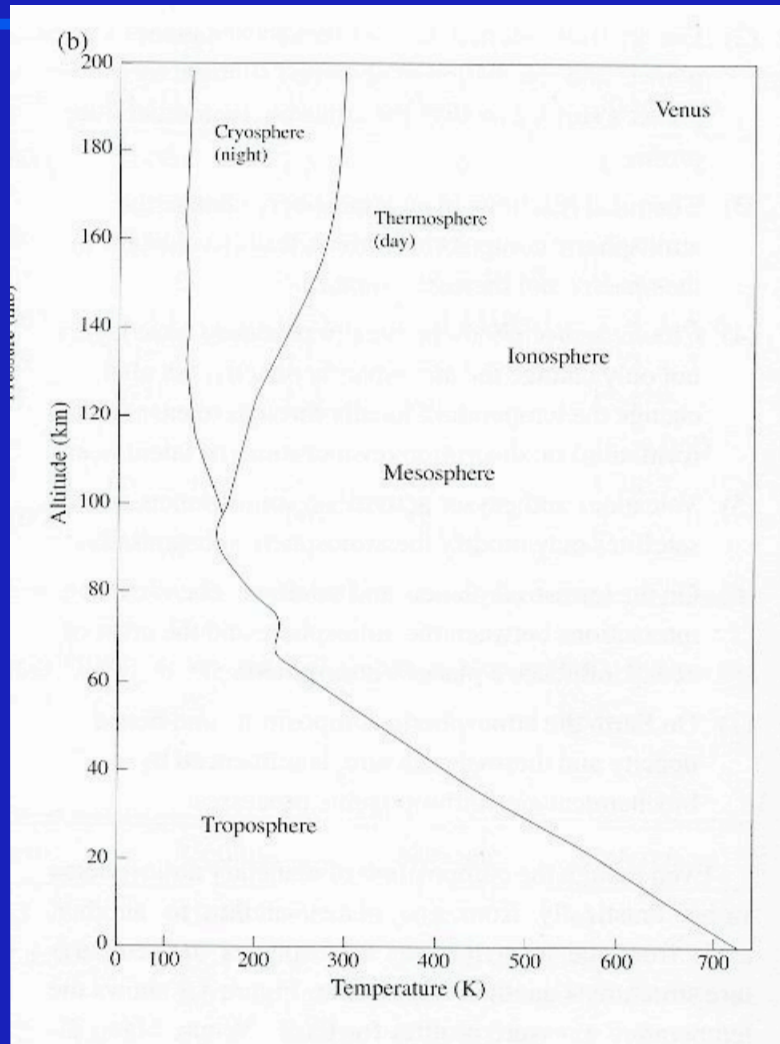
- ◆ Equilibre thermodynamique

$$dH = c_p dT = VdP + \delta Q = \frac{1}{\rho} dP + \delta Q$$

- $dQ$  = chaleur perdue/gagnée par conduction thermique et par rayonnement ( pas de convection à l'équilibre)

Temperature caractéristique, Juin ( jour/nuit )





# Atmosphère isotherme

- ◆ Equilibre dynamique

$$-\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} = \vec{0}$$

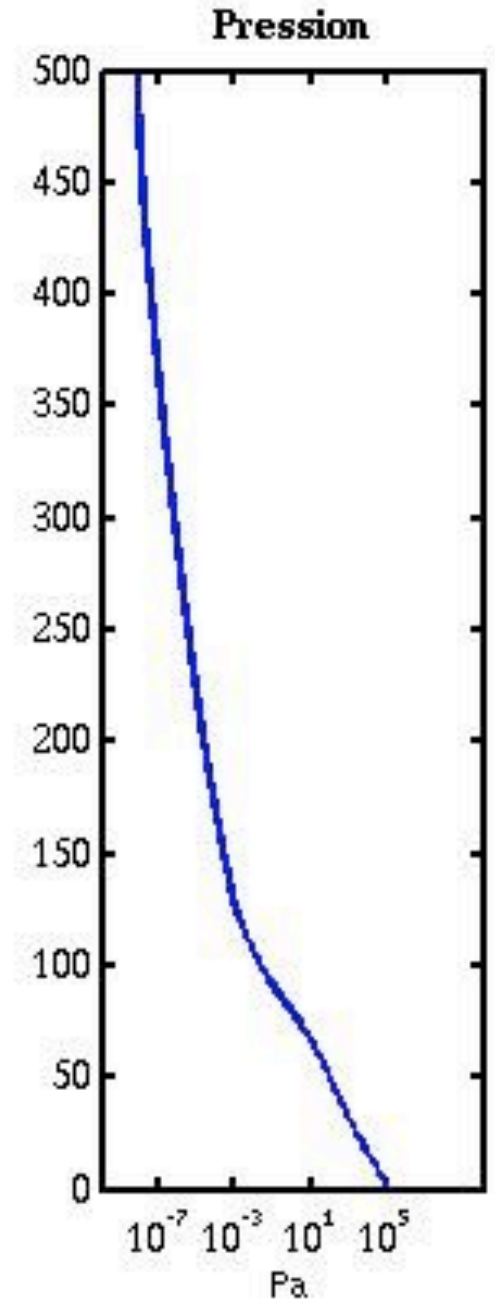
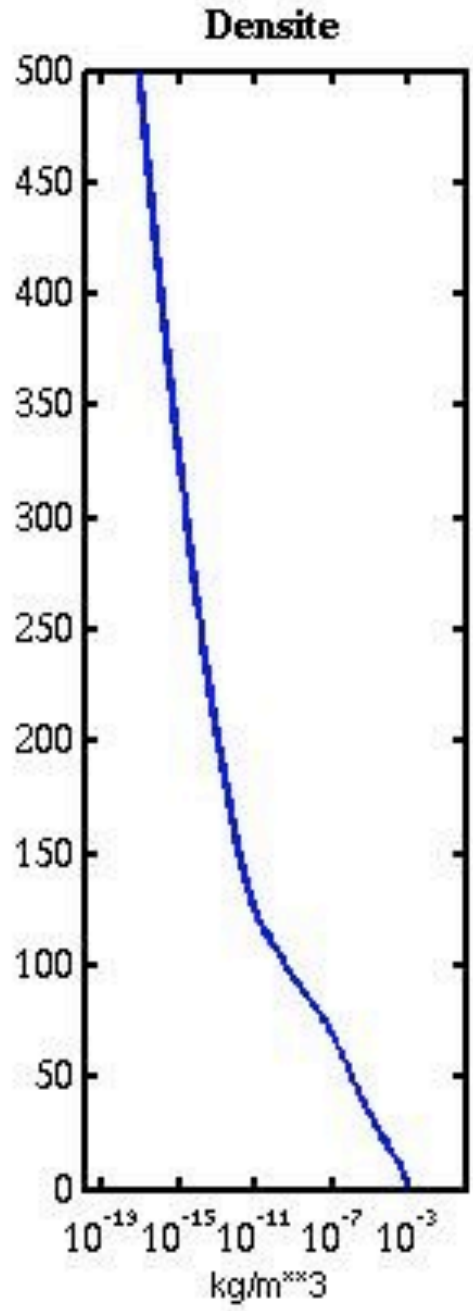
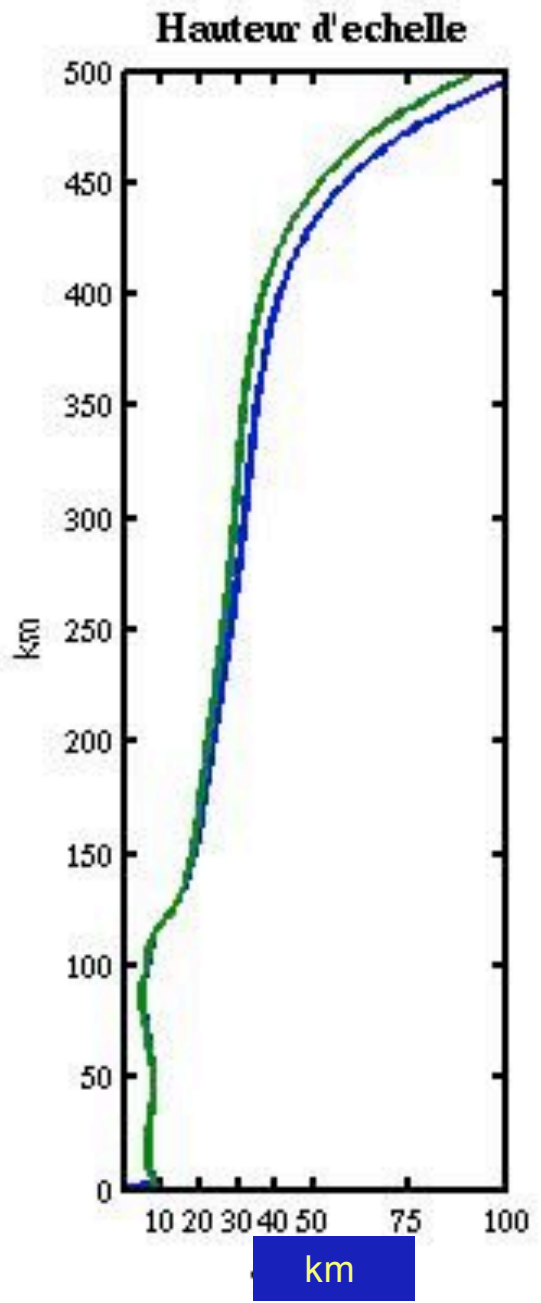
- ◆ Gaz parfaits

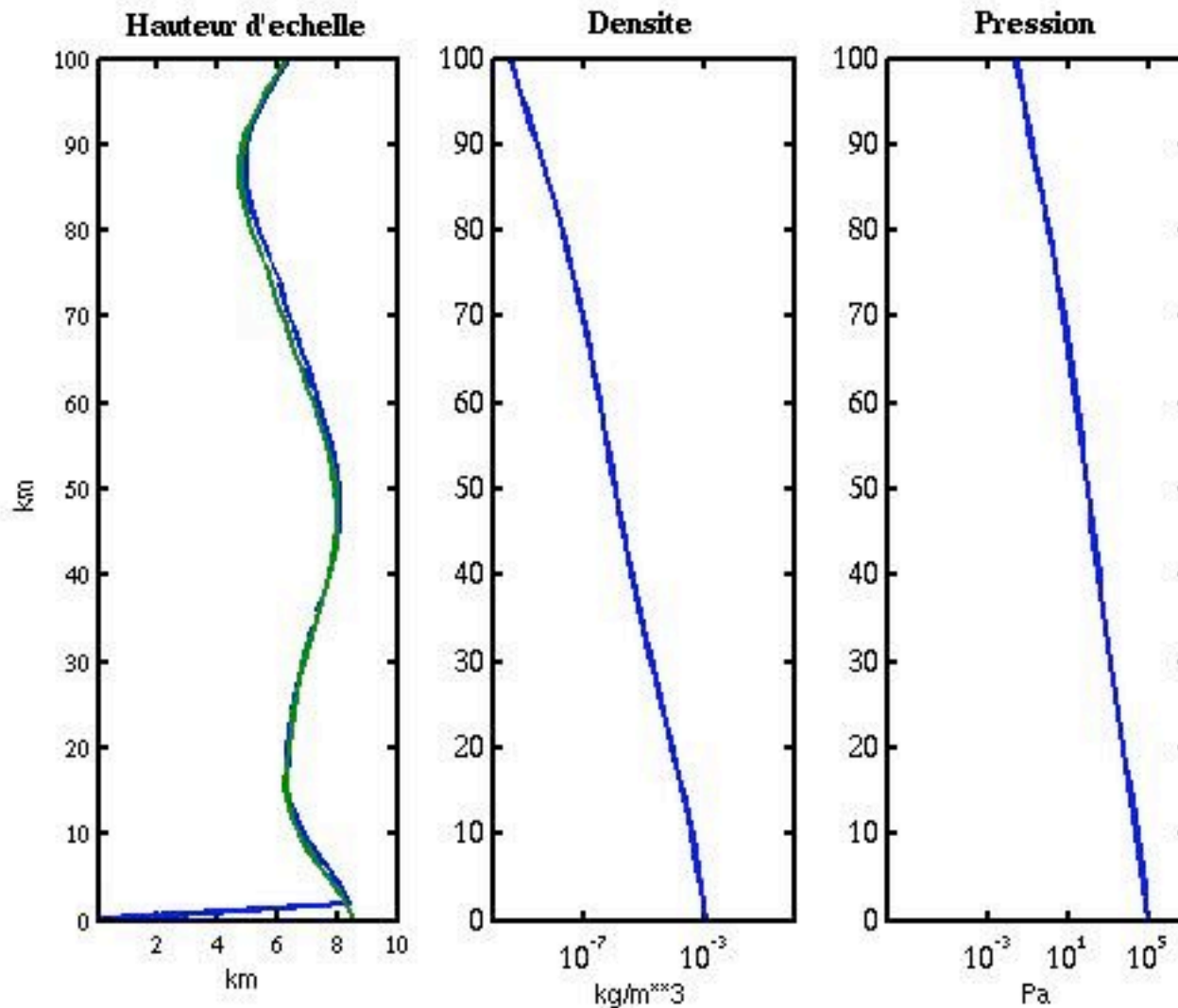
$$P = \frac{\rho RT}{M}$$

- M (masse molaire moyenne), R constante des gaz parfaits, T température

$$P(z) = P_0 \exp\left(-\frac{Mgz}{RT}\right)$$







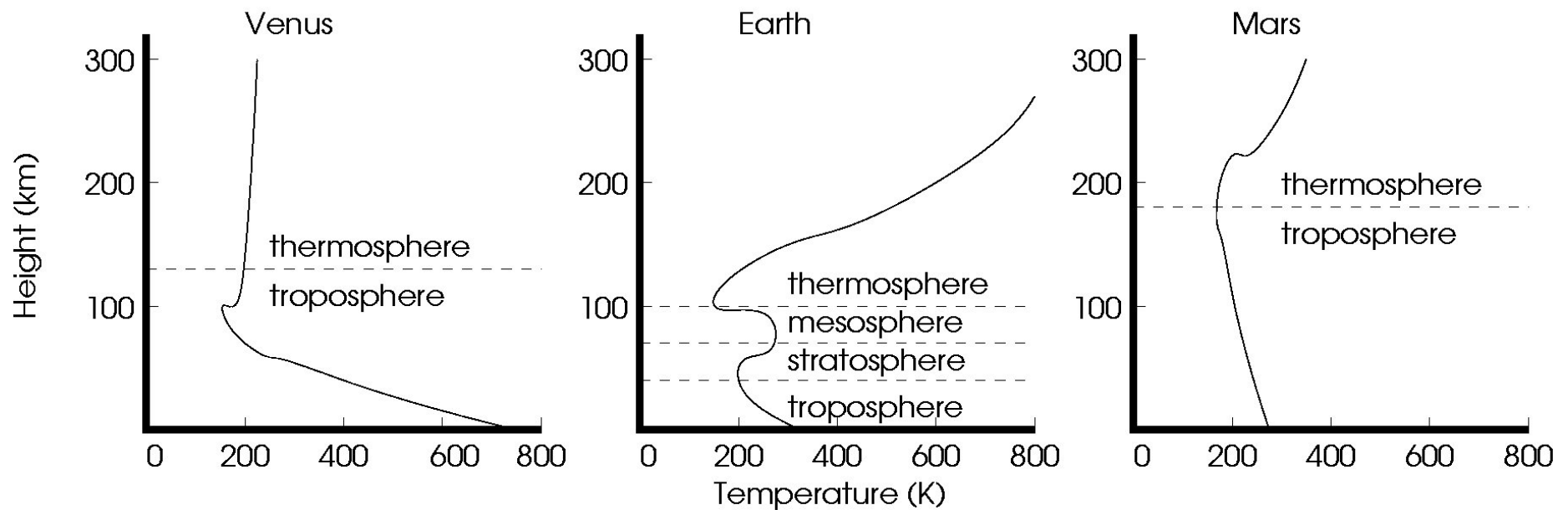
- ◆ Hauteur d'échelle  $\sim 8$  km dans les 100 premiers km
- ◆ Hypothèse isotherme localement bonne ( avec la température locale)

# Structure thermique dans la basse atmosphère

- ◆ Dans les premiers km, effet de décompression (température diminue)
- ◆ Si l'atmosphère est à l'équilibre... la décompression est a priori adiabatique

$$\frac{dT}{dz} = - \frac{g}{c_p}$$

	Terre	Mars	Venus		A	B (kK)-1	C (kK)-2
M (gr)	29	44	44		N2	3,247	7,12E-01
	288	218	730		O2	3,068	1,638
Cp/R	3,45894	4,2324	6,0025		CO2	3,206	5,082
g	9,78	3,71	8,87		Air	3,209	0,907897
dT/dz	-9,8553	-4,6357	-7,8149				-0,1406



- Comparaison Observation/gradient adiabatique

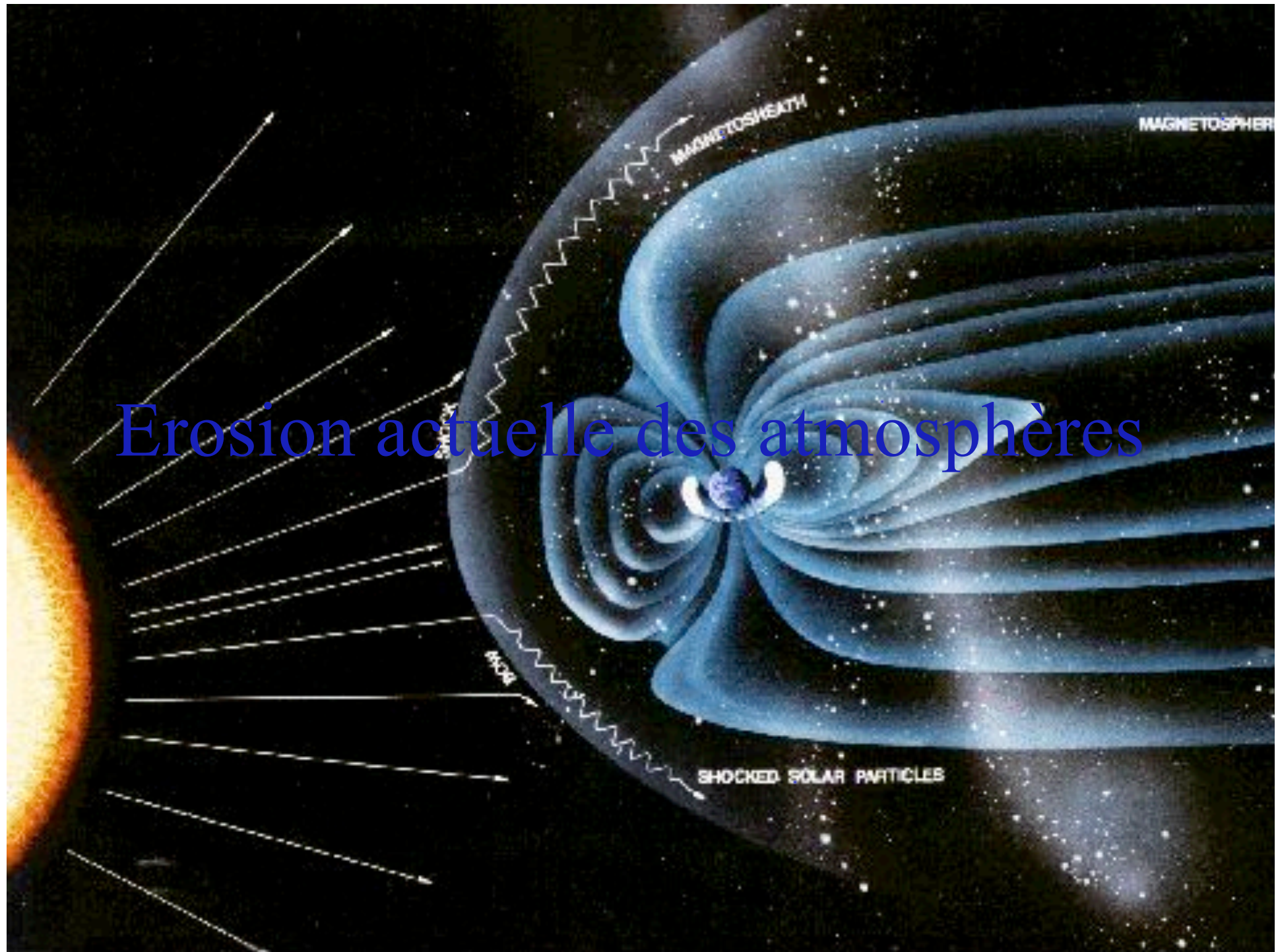
Terre:  $-6.5 \text{ K/km}$  (  $-9,8 \text{ K/km}$  )

Mars :  $-2.5 \text{ K/km}$  (  $-4,5 \text{ K/km}$  )

Venus :  $-7.7 \text{ K/km}$  (  $-7.8 \text{ K/km}$  )

- Il manque une source « de chauffage » dans la troposphère: effets des nuages

# Erosion actuelle des atmosphères



# Que se passe-t-il dans la thermosphère?

- ◆ Températures très hautes  $T > 600 \text{ K}$
- ◆ Grande agitation des molécules

	H	D	He	N	O
Masse (gr)	1	2	4	14	16
Vitesse moy (m/s)	4468,557	3159,7	2234,3	1194,3	1117,1

# Vitesse de libération

Grandeur liée à l'interaction gravitationnelle :

vitesse minimale (à la surface de la planète) que doit avoir un corps massif pour échapper au champ de gravité de la planète (i.e. énergie mécanique > 0)

$$V_{lib} = \sqrt{2GM_p / R_p}$$

	Mercure	Lune	Mars	venus	Terre	Jupiter
rayon	2440	1738	3389	6051	6371	71492
gravité	3,701	1,71	3,71	8,87	9,81	23,1
libération	4249,81	2438	5014,6	10361	11180	57471,1267

# Echappement thermique

- ◆ Distribution de vitesse

$$f(v)dv = N \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{m}{kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/(2kT)} dv$$

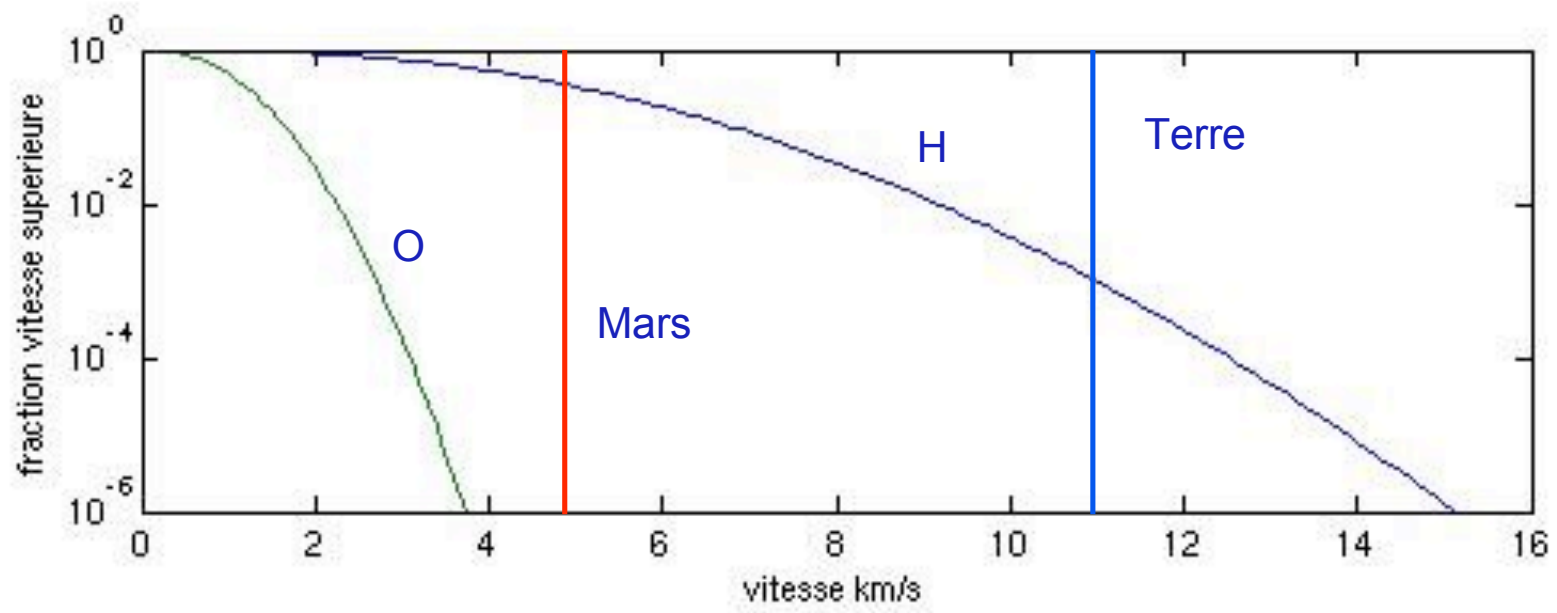
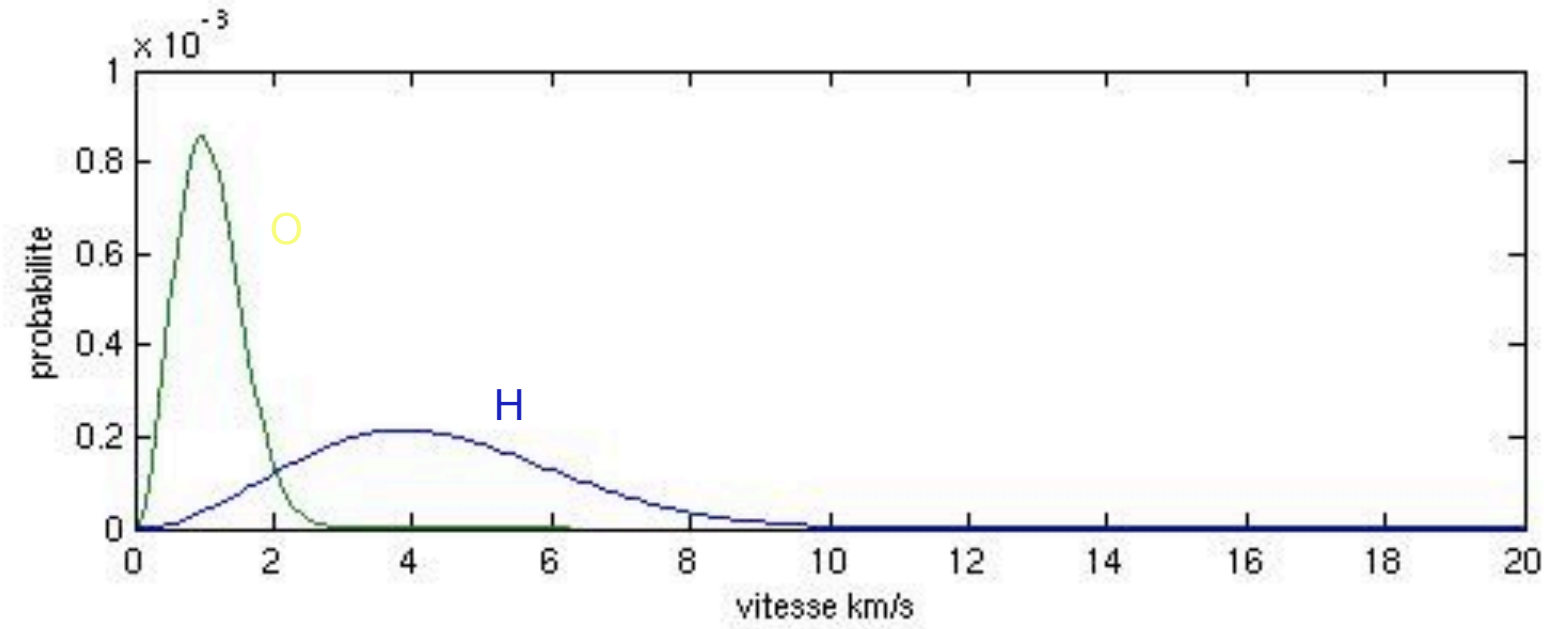
- ◆ Flux sortant

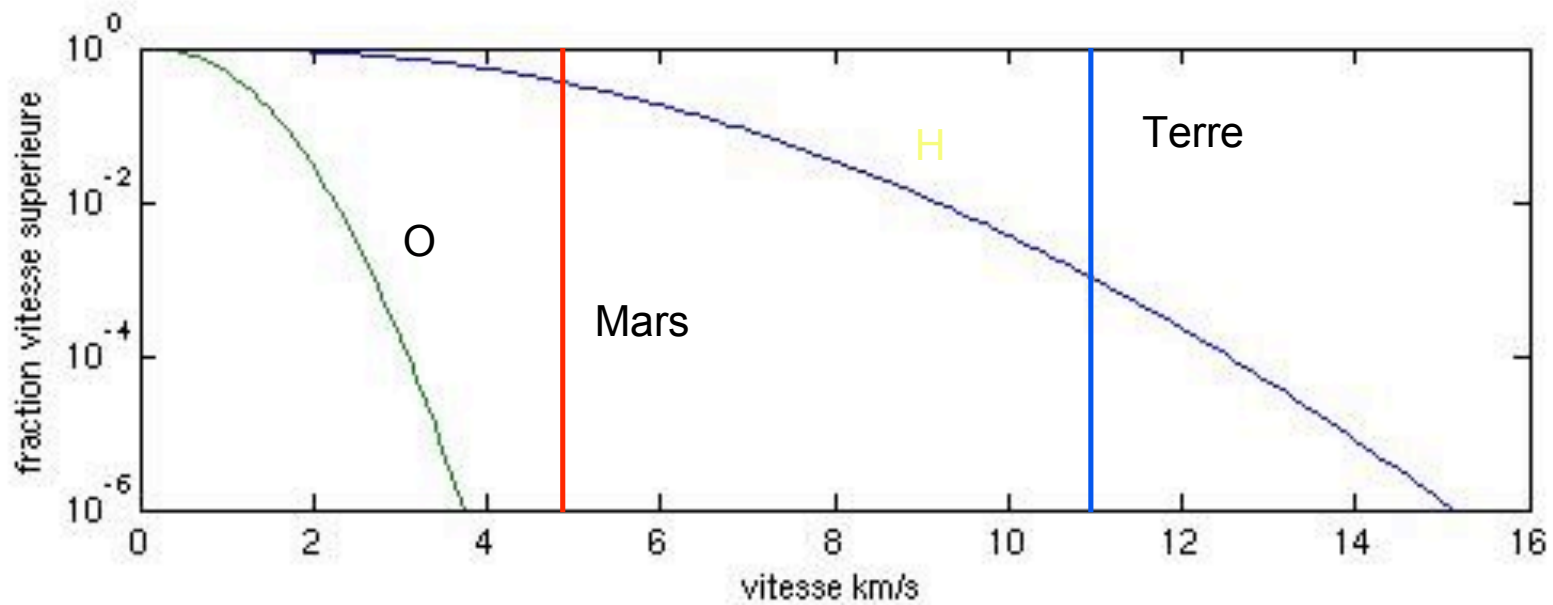
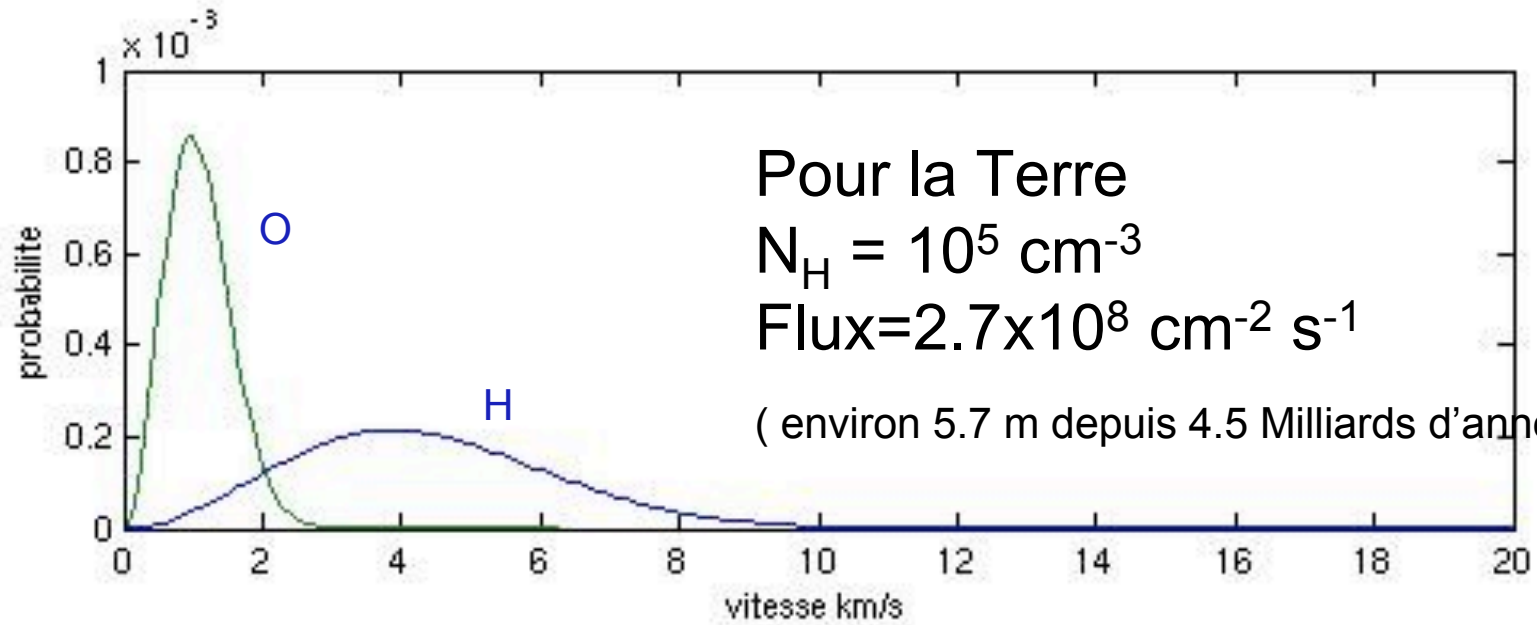
$$\Phi_J = \frac{N_{ex} v_0}{2\sqrt{\pi}} (1 + \lambda_{ex}) e^{-\lambda_{ex}}$$
$$\lambda_{ex} = \left(\frac{v_e}{v_0}\right)^2$$

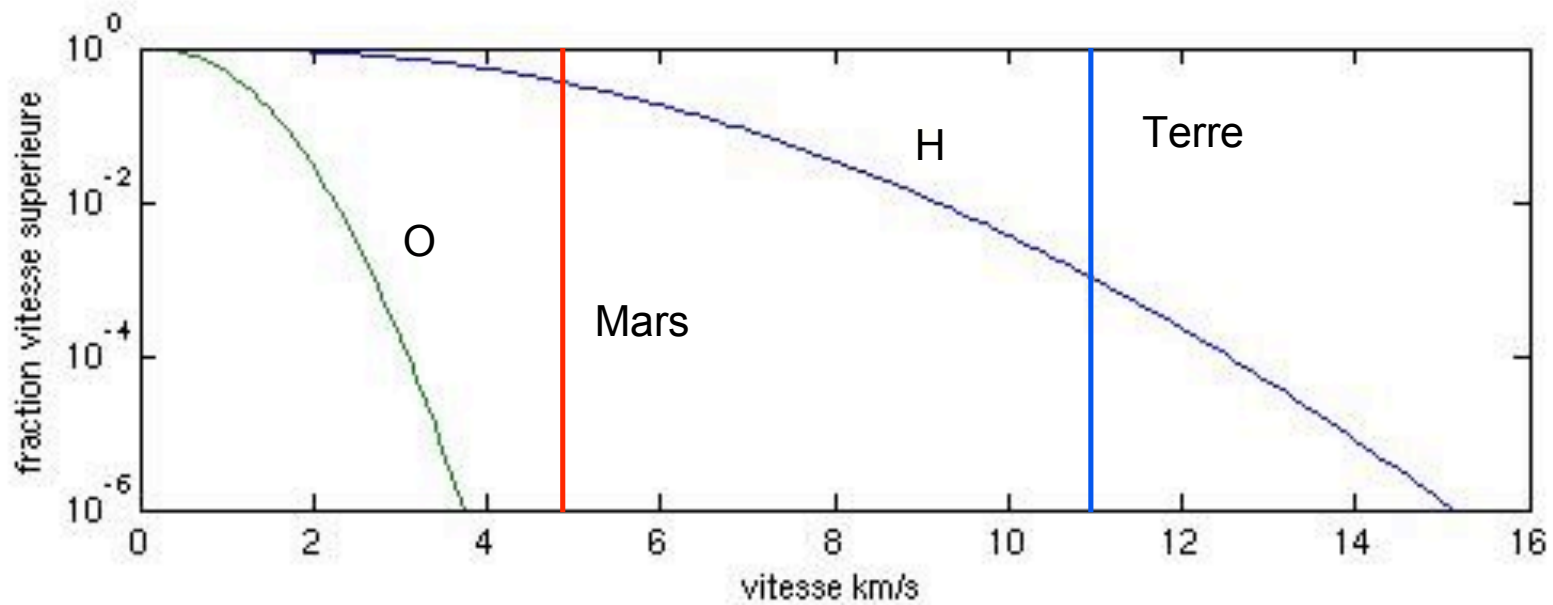
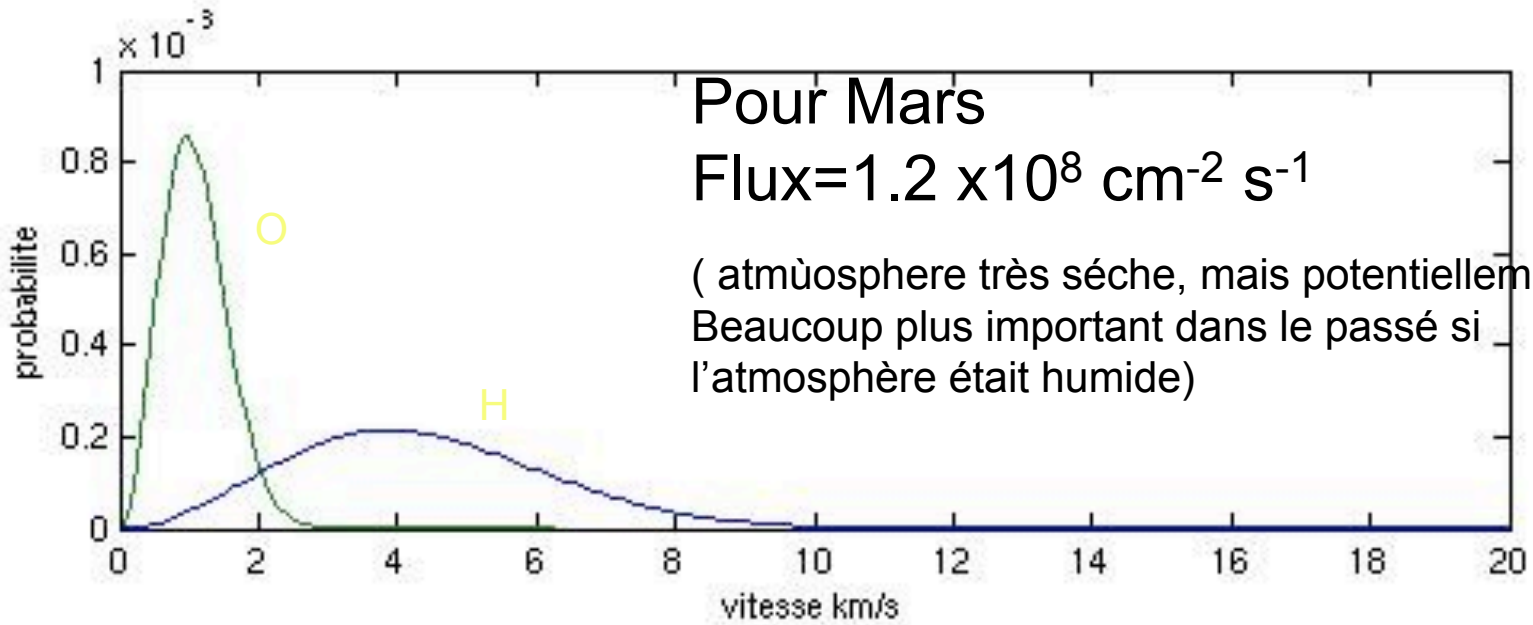
- ◆  $N_{ex} = 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_{ex} = 900\text{K}$ , flux =  $6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



# Echappement thermique







# Autres mécanismes (1/2)

- ◆ Dissociations et recombinaisons

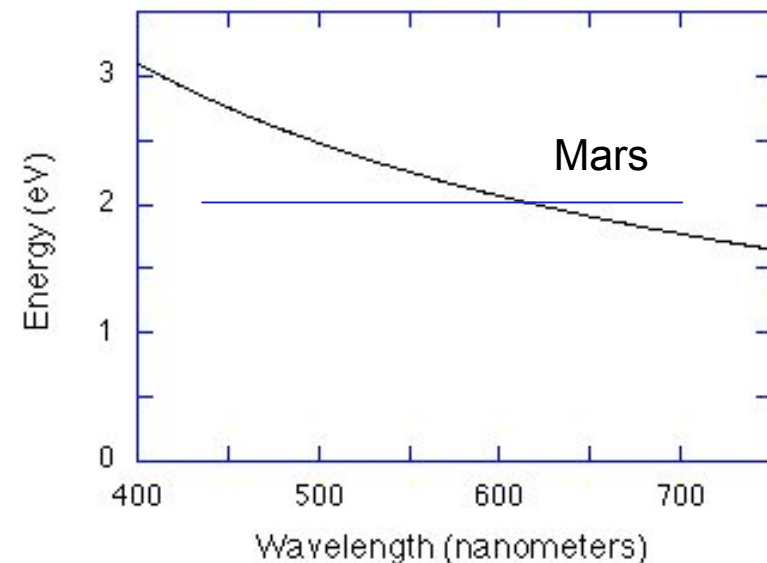


(atomes excités de 3.5 eV à 5.3 eV)

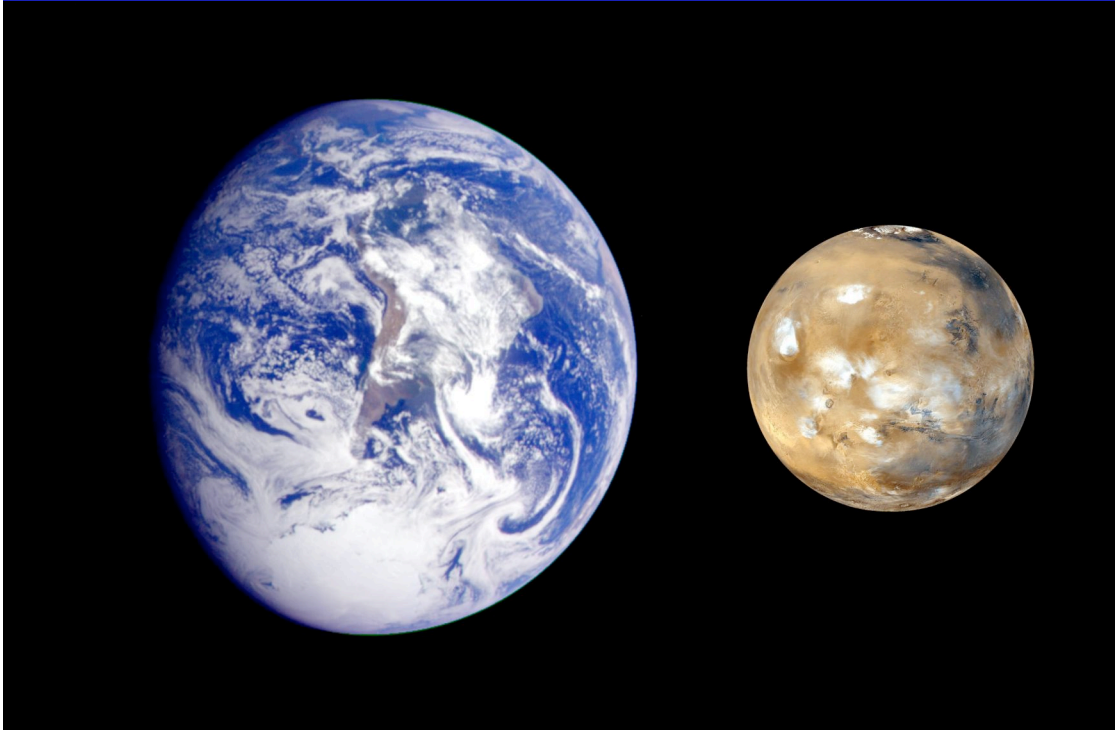


- Les atomes ont une énergie plus grande que l'énergie de libération pour Mars et plus faible pour la Terre
- Perte importante d'Oxygène sur Mars  
(  $6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  )

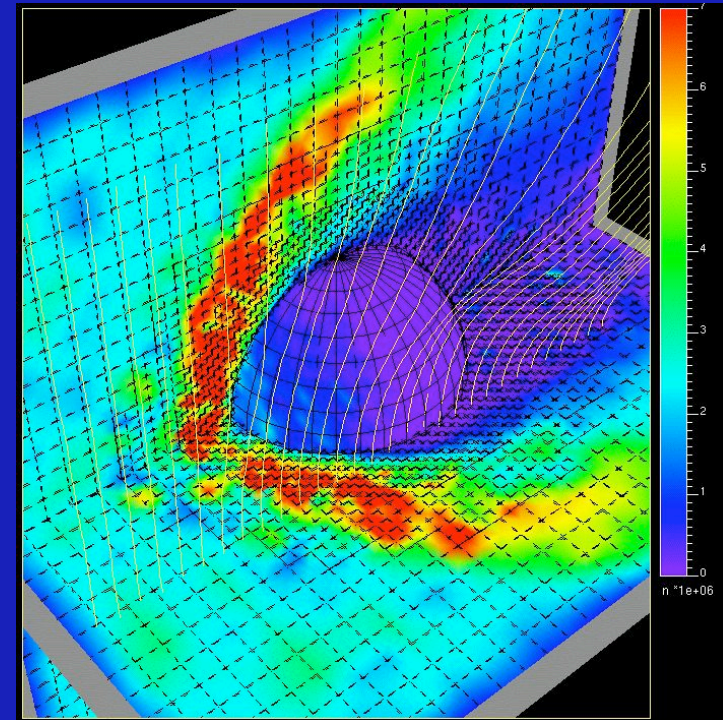
Energie de libération pour l'oxygène sur Mars ~2 eV  
Energie de libération pour l'oxygène sur terre ~10 eV



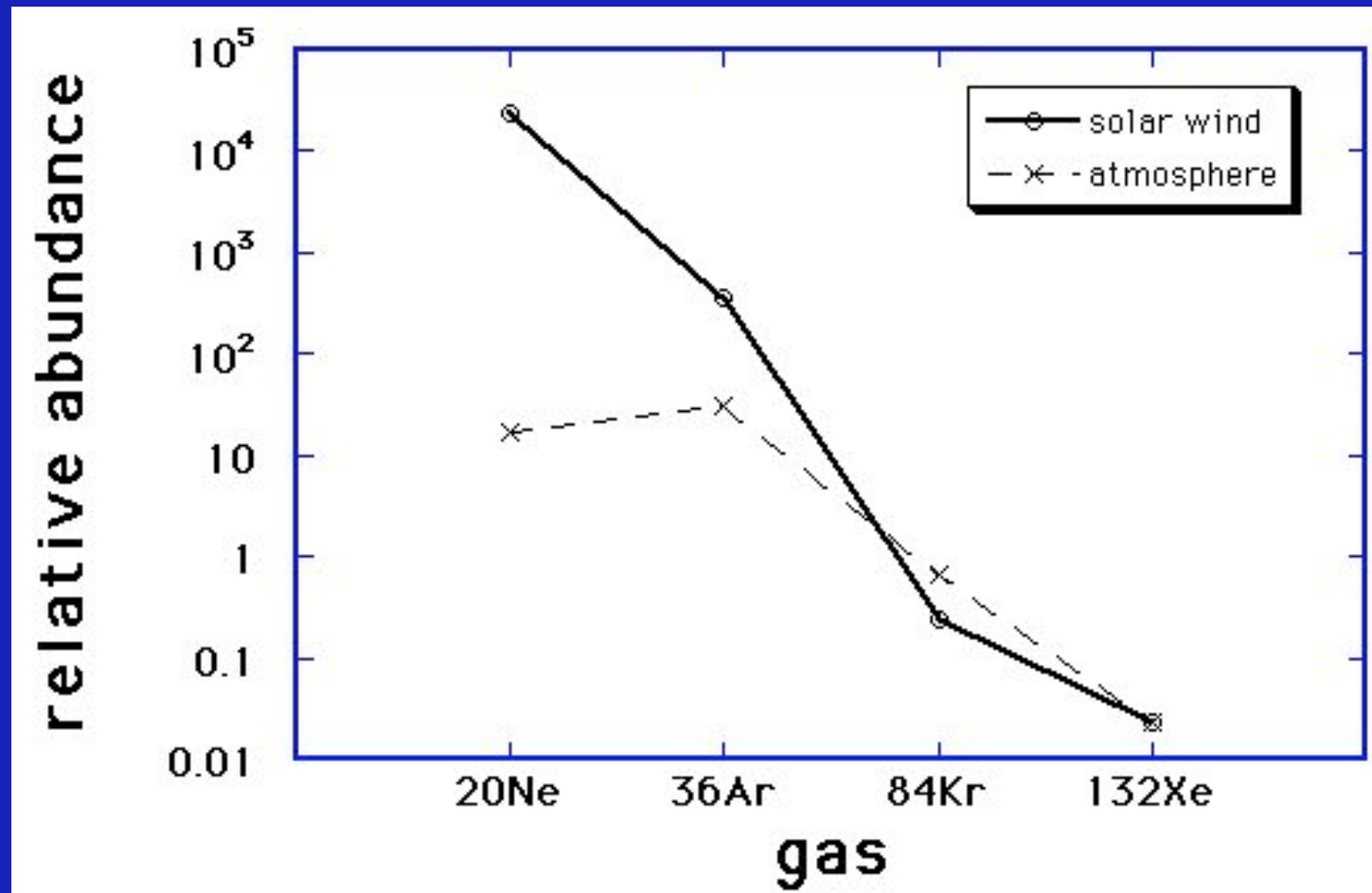
# Autres mécanismes (2/2)



Pas de protection du champ magnétique:  
Le vent solaire entraîne une partie de l'atmosphère



# Où est passée l'atmosphère primitive de la Terre



---

L'atmosphère d'une planète peut  
donc progressivement  
disparaître...

# Bilan des volatils de la Terre

## *Inventaire*

Atmosphere:  $1 \text{ Bar} = 10^4 \text{ kg/m}^2$

Masse totale atmosphere:  $5.1 \cdot 10^{18} \text{ kg}$

Autres volatils ( $\cdot 10^{17} \text{ kg}$ )

	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
--	------------------	-----------------

---

Atmosphere/hydrosphere	14 600	1.6
------------------------	--------	-----

Roches sédimentaires	2 100	2724
----------------------	-------	------

(estimation minimum sans le manteau...)

---

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

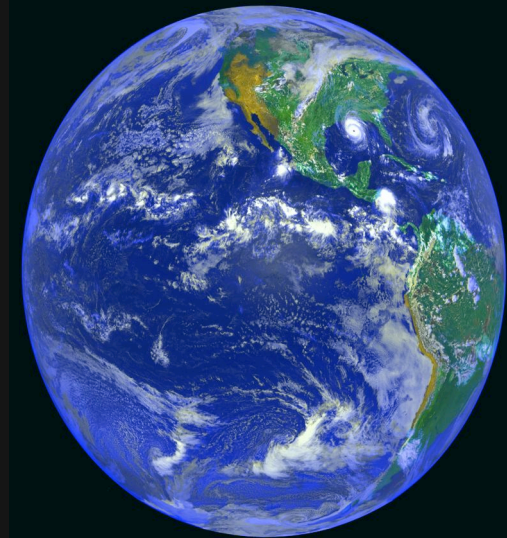
Masse en volatils =  $19.5 \cdot 10^{20} \text{ kg}$  (>380 Bar)

Rapport H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> = 18.1

Echappement : 2-3 kg/s

Avec l'échappement actuel >

Durée de vie:  $\approx 50 \text{ By}$





# Bilan des volatils de Mars

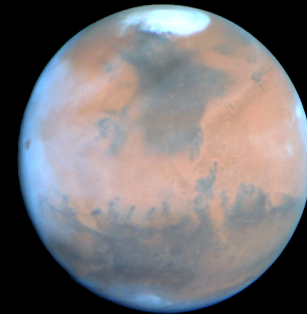
## Inventaire dans l'atmosphère

Atmosphère ( $\text{CO}_2$ )	0.007 Bar (mainly $\text{CO}_2$ )
Masse	$1.0 \cdot 10^{16}$ kg

Phobos-2, ASPERA1 observations:

Pertes,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{CO}_2^+$ ...  $\approx 1$  kg/s

Echappement actuel =>  
Disparition en  $\approx 200$  My



# Bilan CO<sub>2</sub>

---

## ◆ Terre

- Peu de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (<0.1 %), essentiellement du CO<sub>2</sub> stocké dans les carbonates
- Croûte ~6 10<sup>21</sup> moles, manteau ?
- Océans + atmosphère + matières organiques ~3.4 10<sup>18</sup> moles

## ◆ Vénus

- Atmosphère dense de CO<sub>2</sub> (à 95,5 %), densité au sol de 65 kg/m<sup>3</sup> et pression de 92 bar
- Atmosphère ~10<sup>22</sup> moles

## ◆ Mars

- Atmosphère peu dense de CO<sub>2</sub> (à 95,32%) ~4,8 10<sup>17</sup> moles
- Calottes polaires mélange de CO<sub>2</sub> et d'eau 2-3 10<sup>17</sup> moles
- Masse cumulée ~ 104 moindre que la Terre ou Venus pour une masse planétaire 10x moindre
  - CO<sub>2</sub> perdu dans l'espace ou stocké dans le sol?

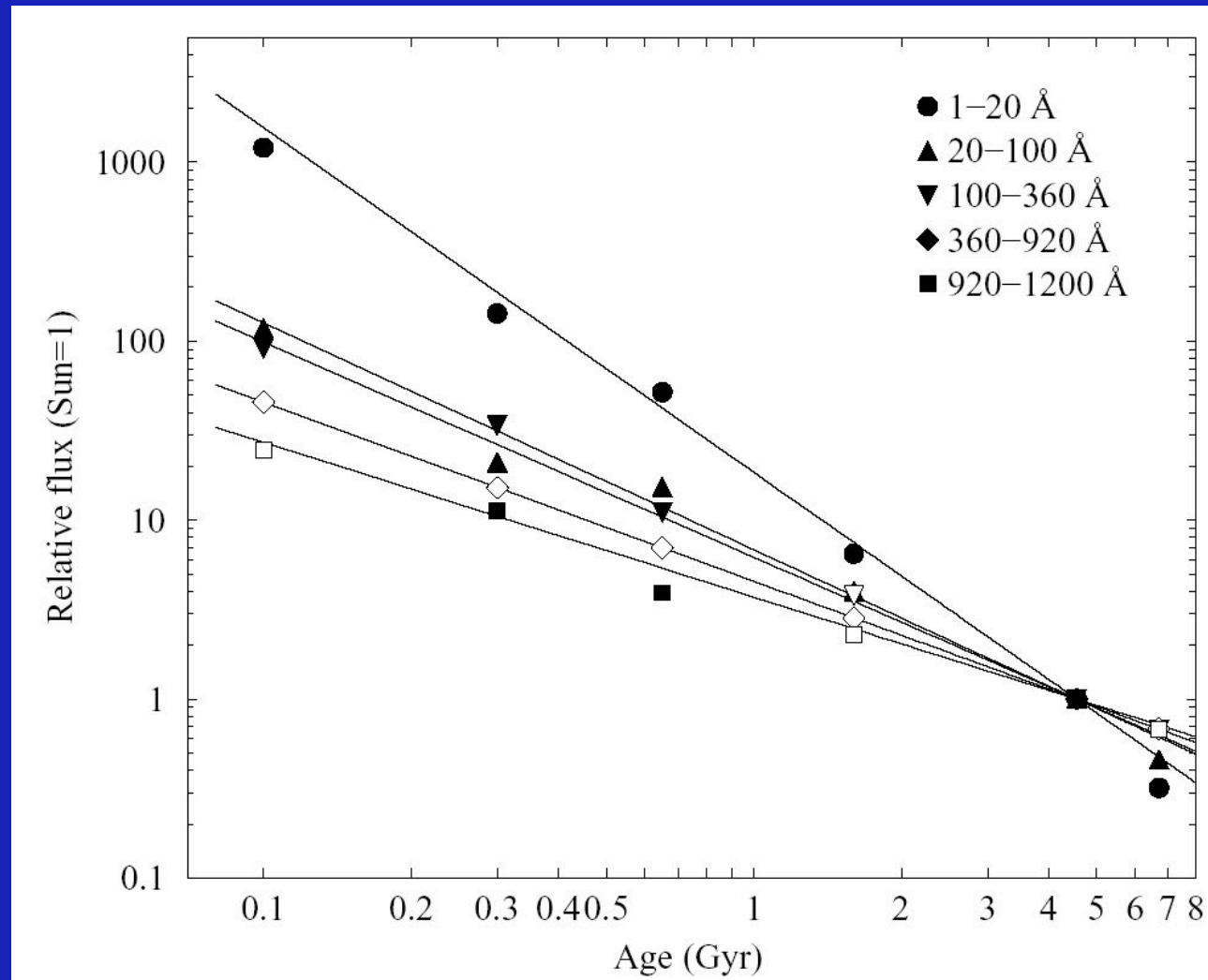
# Volatils: premier bilan

- ◆ 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

	$^{36}\text{Ar}$ ( $10^{-10}$ cm <sup>3</sup> /g)	$^{84}\text{Kr}$ ( $10^{-10}$ cm <sup>3</sup> /g)	H <sub>2</sub> O (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		

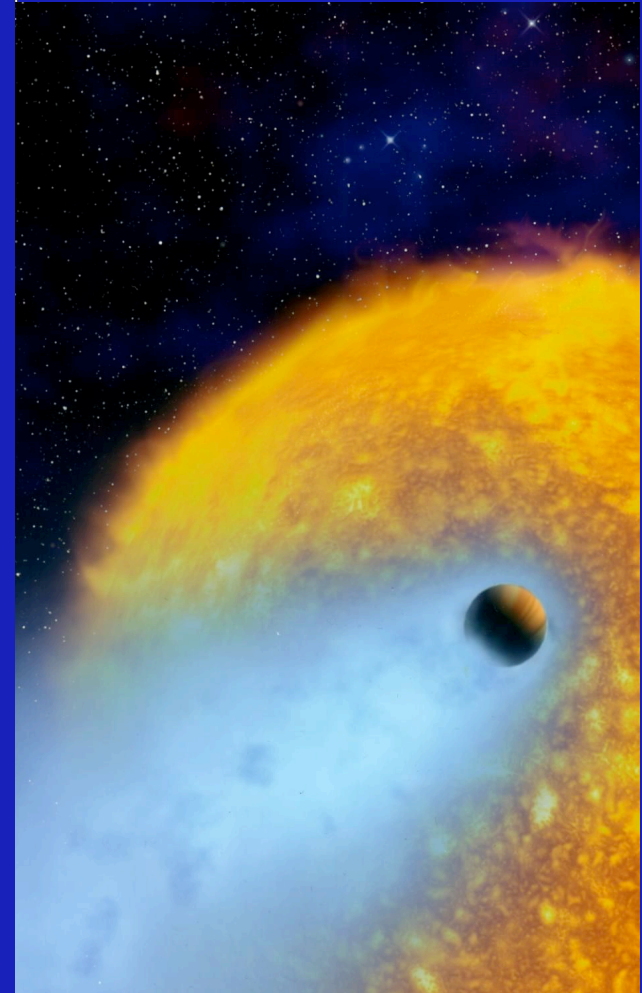
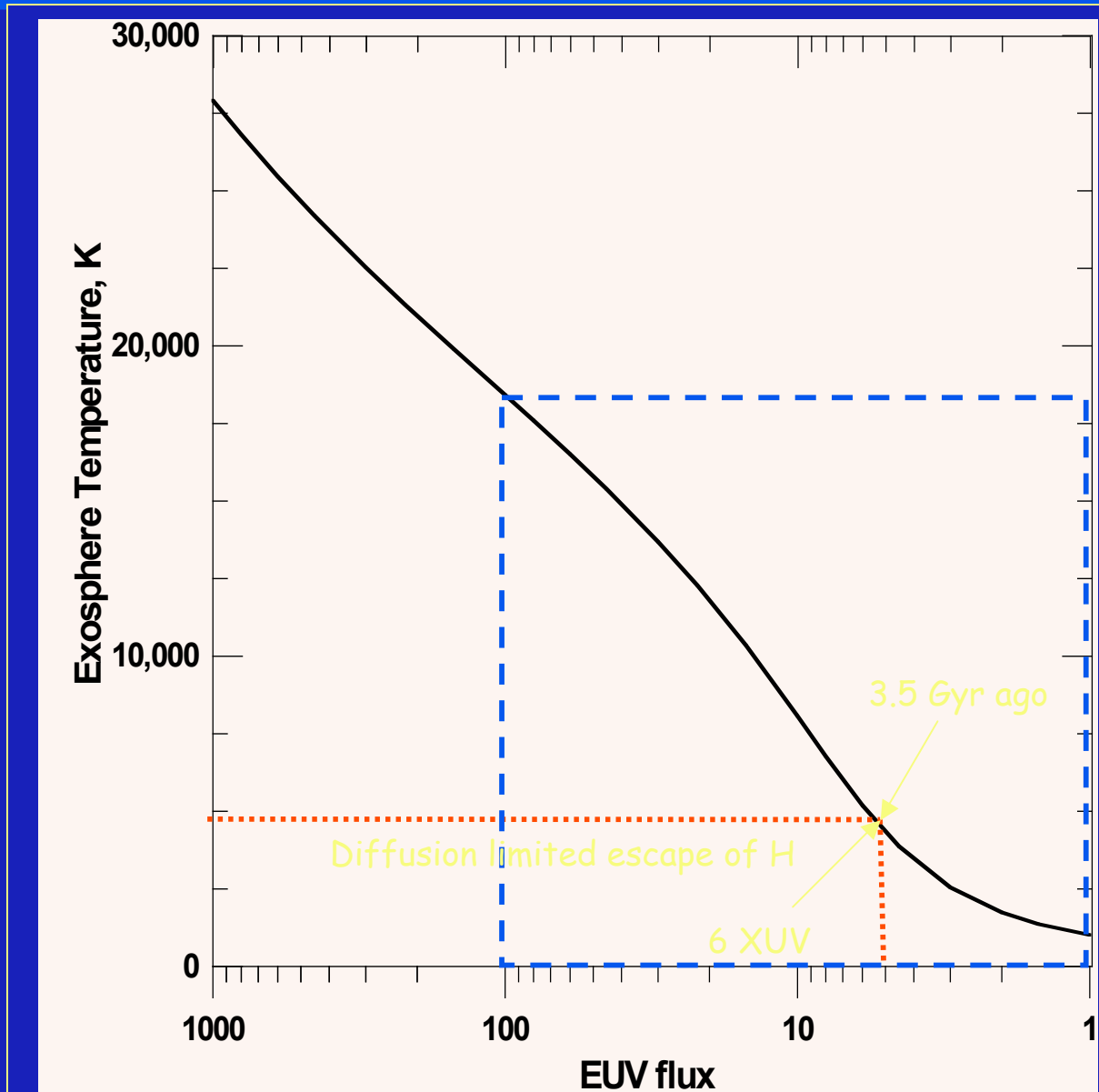
	Stock initial dans les chondrites C1			
	H <sub>2</sub> O (km)	CO <sub>2</sub> (bar)	H <sub>2</sub> O (km)	CO <sub>2</sub> (bar)
Terre	853,032303	130175,9586	3,767851873	126,384426
Mars	324,6966	?	0,20043	?

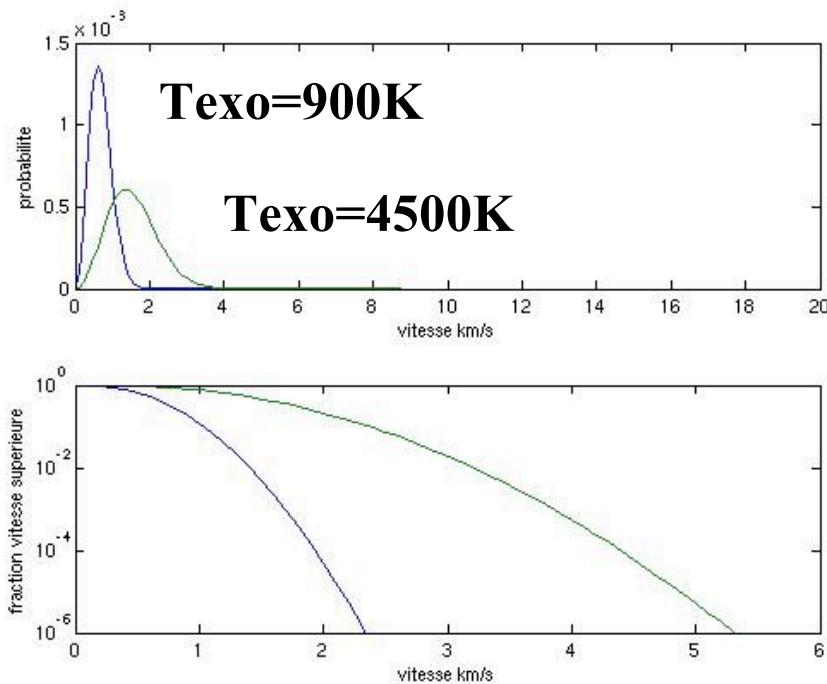
# Un soleil primitif beaucoup plus fort dans les premiers 100 Millions d'années



Ribas et al. (2004)

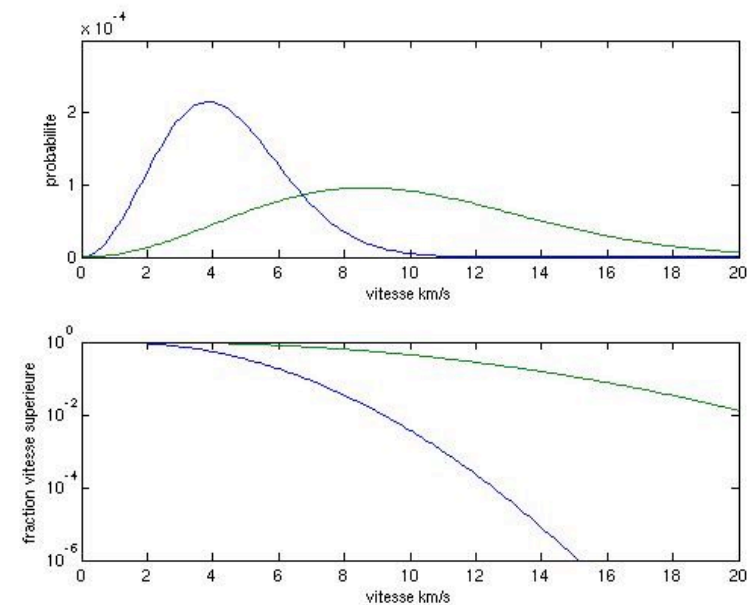
# Thermosphère plus chaude...





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

**Echappement plus important**  
**Exemple de l'Argon {  $M \sim 40$  }**



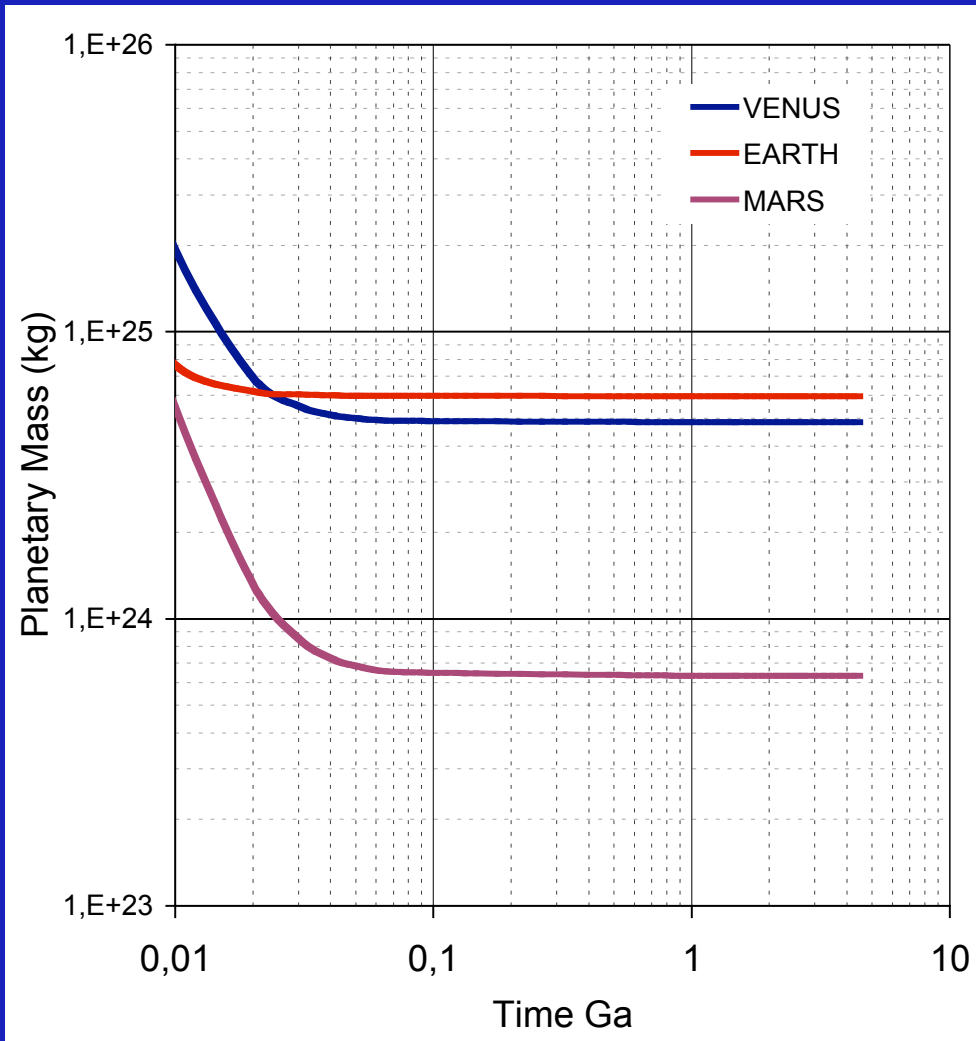
# Echappement hydrodynamique

---

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

$$m_c = m_1 + \frac{NkT}{bg} \Phi_1$$

# Echappement de l'atmosphère



*Calibrées avec les échappements actuels*

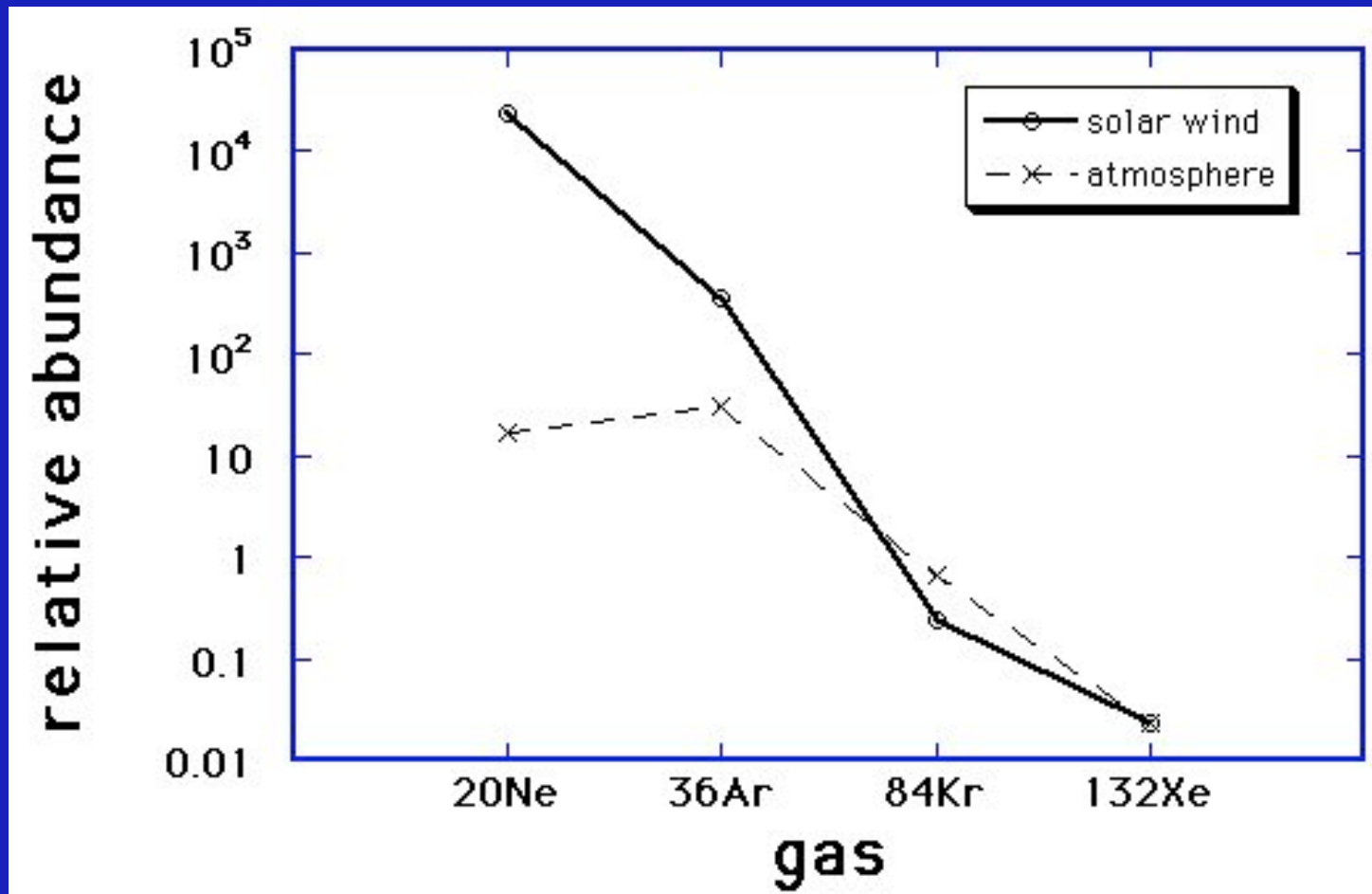
*Terre ( $\approx 2$  kg/s), Mars ( $\approx 1$  kg/s) et estimation de 3 kg/s pour Venus*

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

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



# Echappement initial très important



# Autre perte: érosion par impacts

---

- ◆  $E_v$  = parametre d'évaporation  $\sim 20$

$$M_e = \frac{\pi R^2 P_0}{g_e} \varepsilon_e$$

$$\varepsilon_e = \frac{v_i^2}{v_e^2 (1 + \varepsilon_v)}$$

# Bilan des volatils de Mars

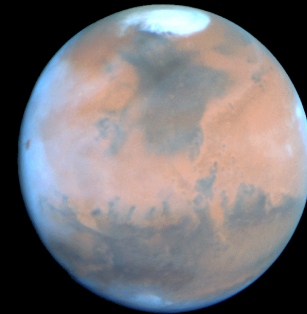
## Inventaire dans l'atmosphère

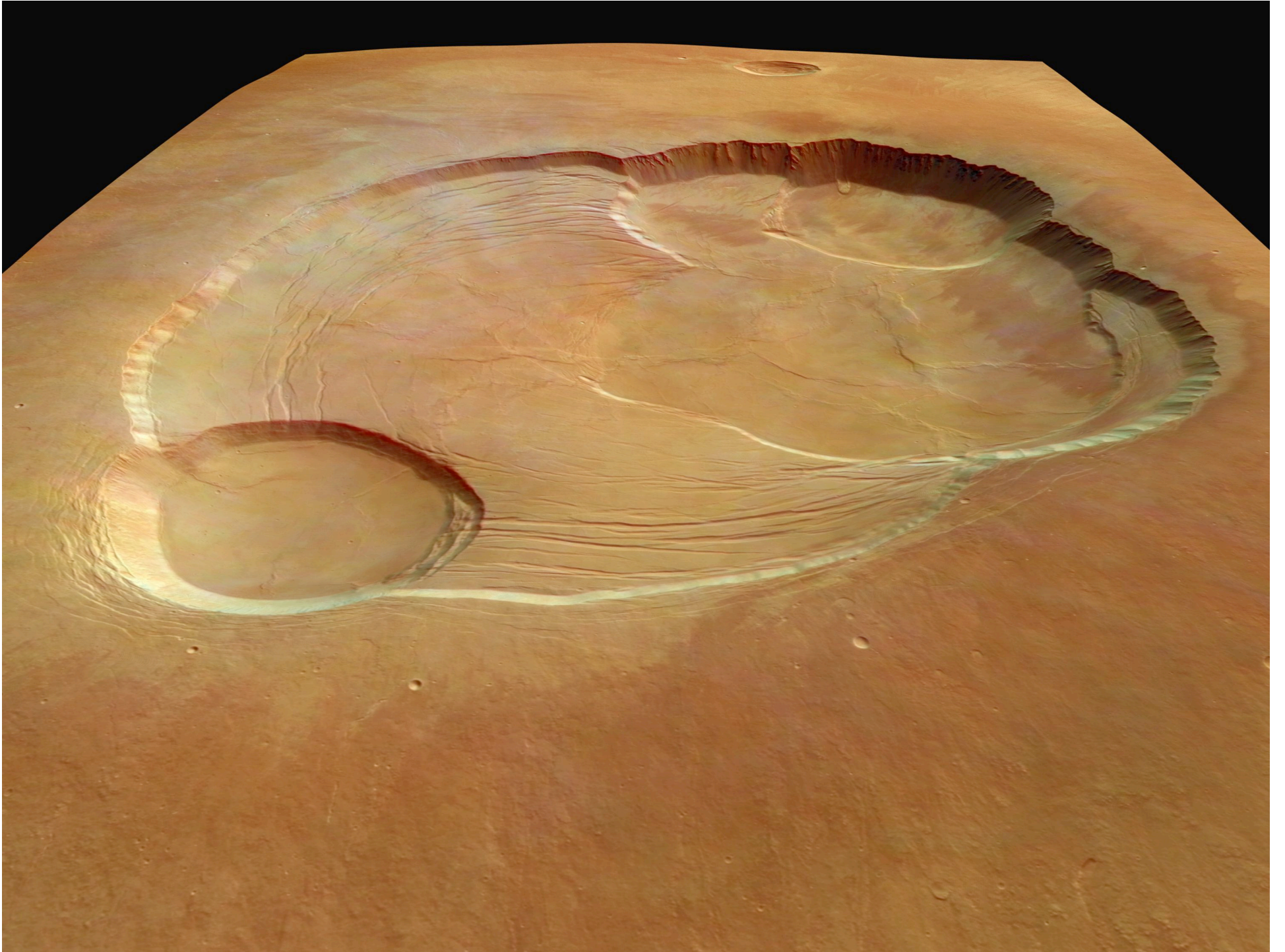
Atmosphère ( $\text{CO}_2$ )	0.007 Bar (mainly $\text{CO}_2$ )
Masse	$1.0 \cdot 10^{16}$ kg

Phobos-2, ASPERA1 observations:  
Pertes,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{CO}_2^+$ ...  $\approx 1$  kg/s

Echappement actuel =>  
Disparition en  $\approx 200$  My

Où est la source d'atmosphère  
secondaire?





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

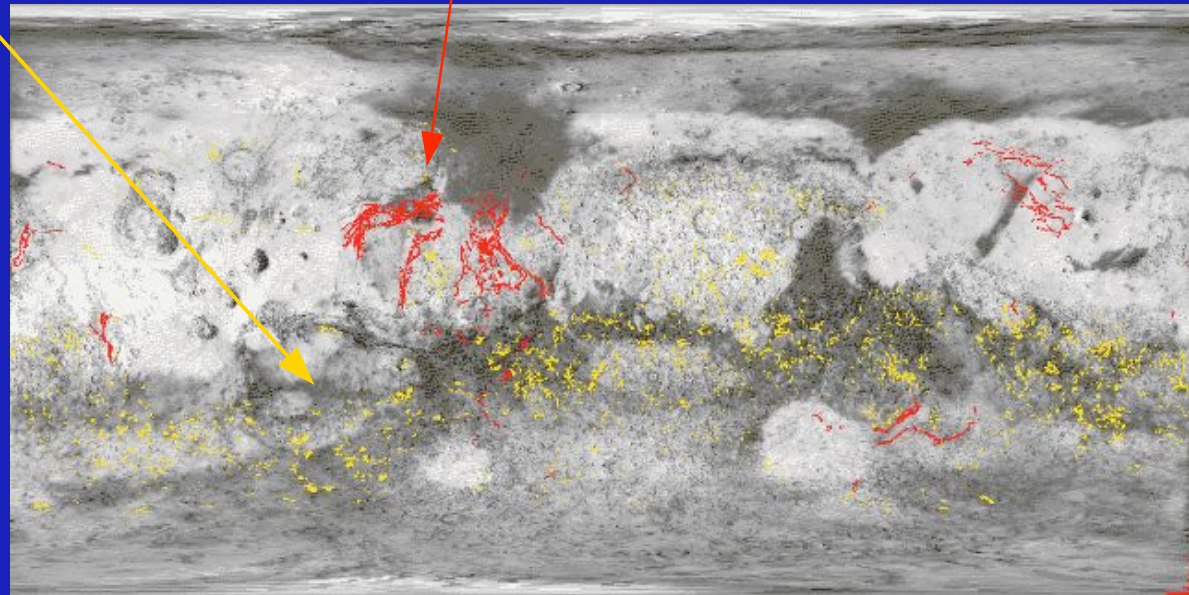
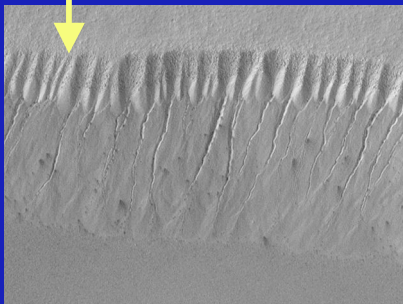
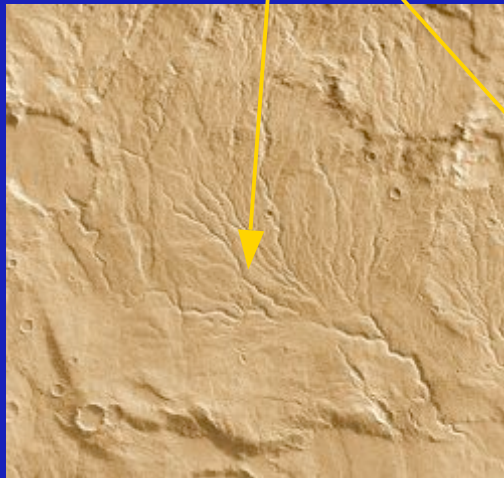
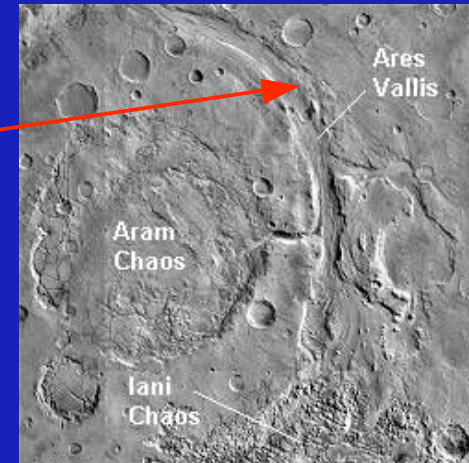


- ◆ 300 millions de kilomètre cube (10 000 fois le volcan de Hawaï)
- ◆ A l'échelle globale:
  - Produit assez de pour une pression atmosphérique en CO<sub>2</sub> moitié plus grande que celle de la Terre (1.5 bar)
  - Produit assez d'eau pour recouvrir Mars de 120m d'eau
- ◆ Tharsis fut peut être à 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

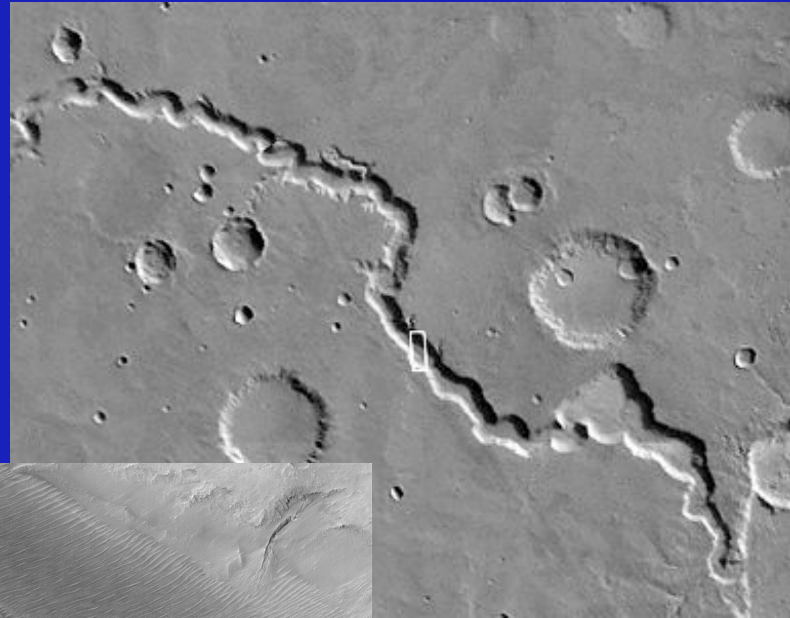
# Rivières, vallées de débâcle et ravines

Trois systèmes bien différents:

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



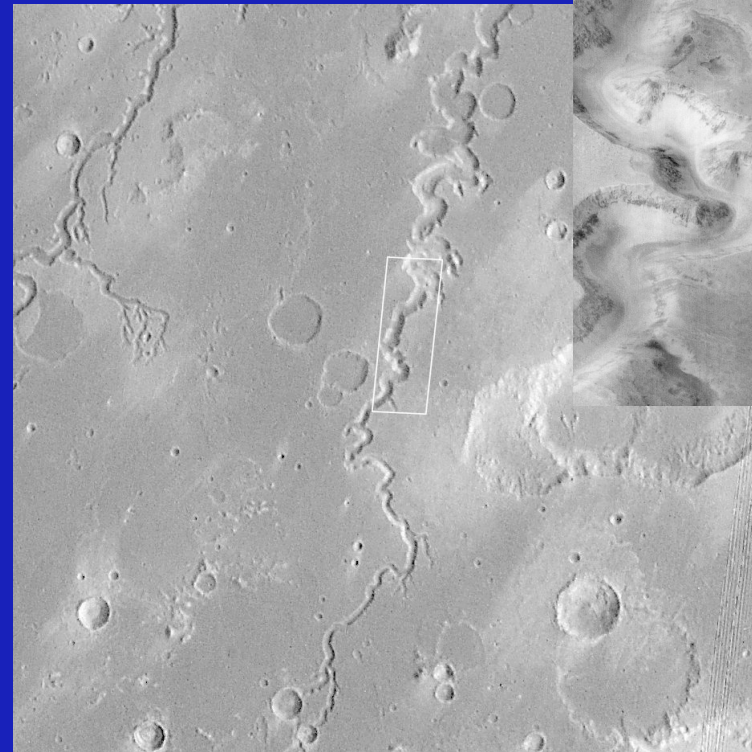
# Les réseaux de vallées



Nirgal Valles



3 km



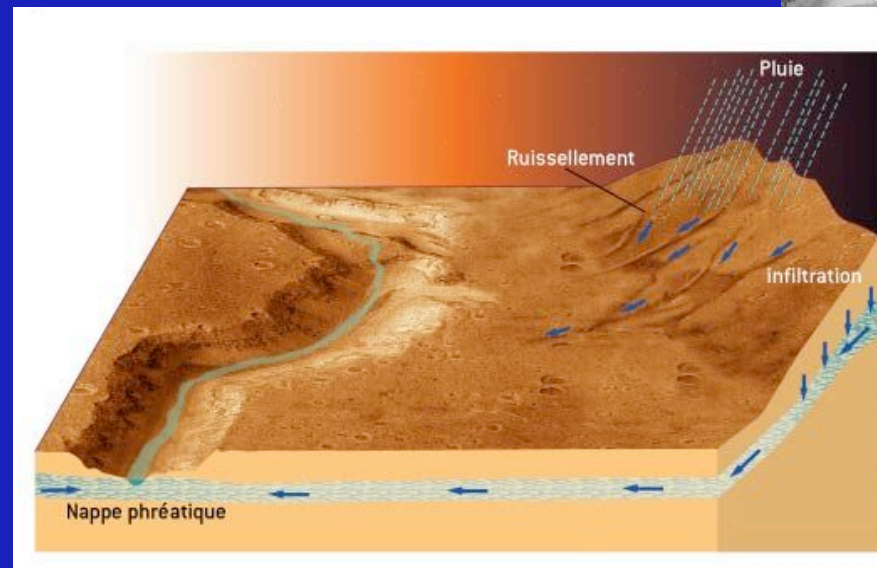
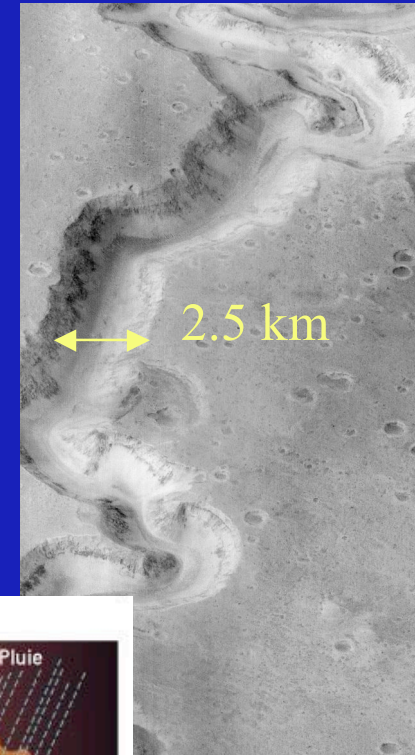
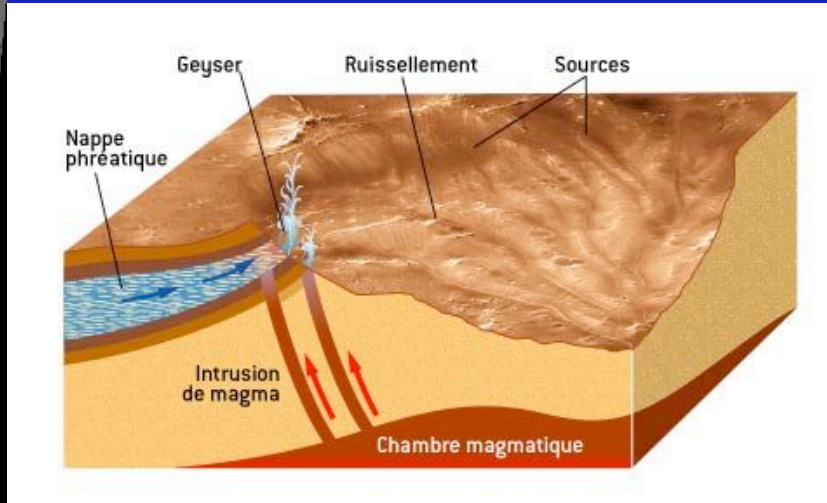
Nanedi Valles



2.5 km



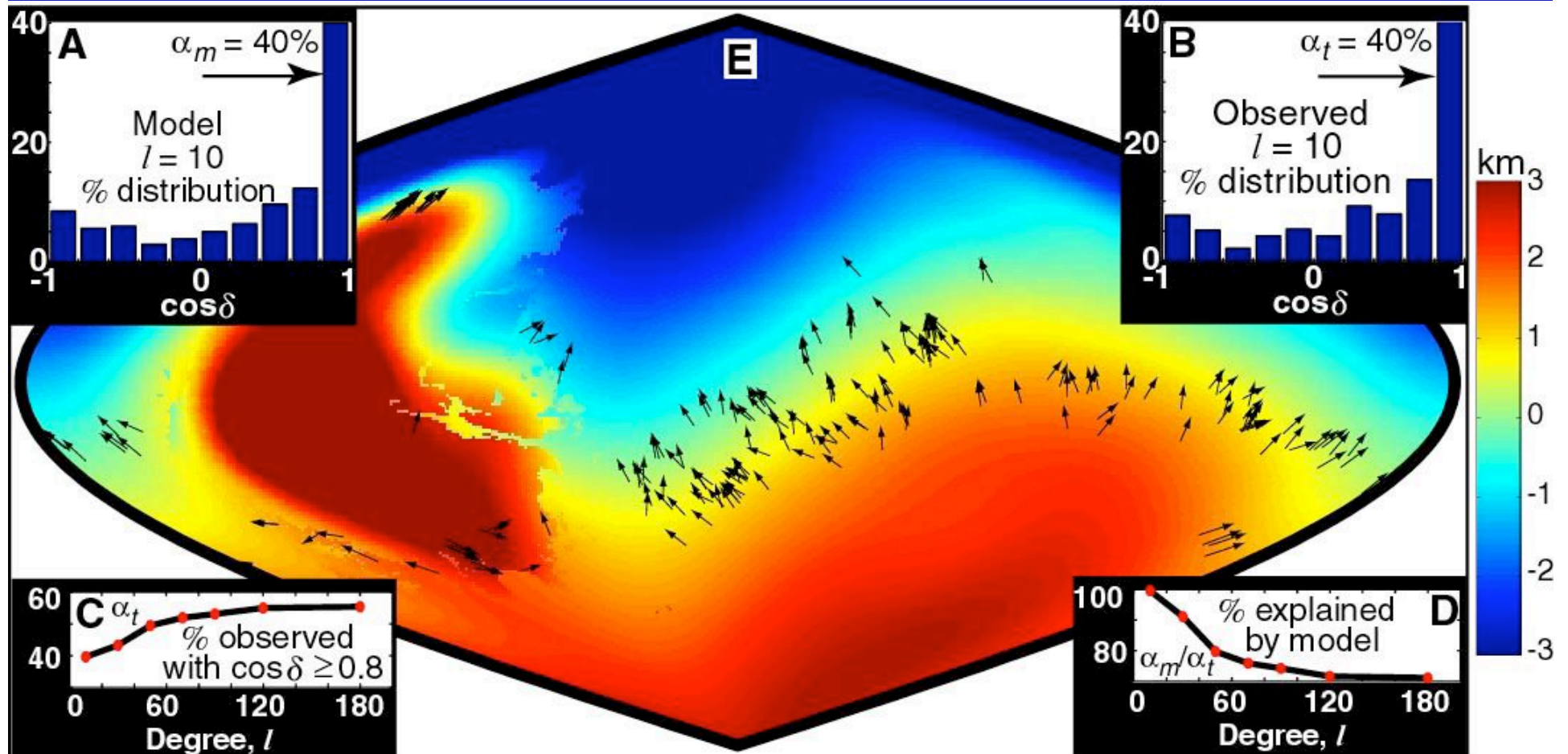
# Les réseaux de vallées



Nanedi  
Valles

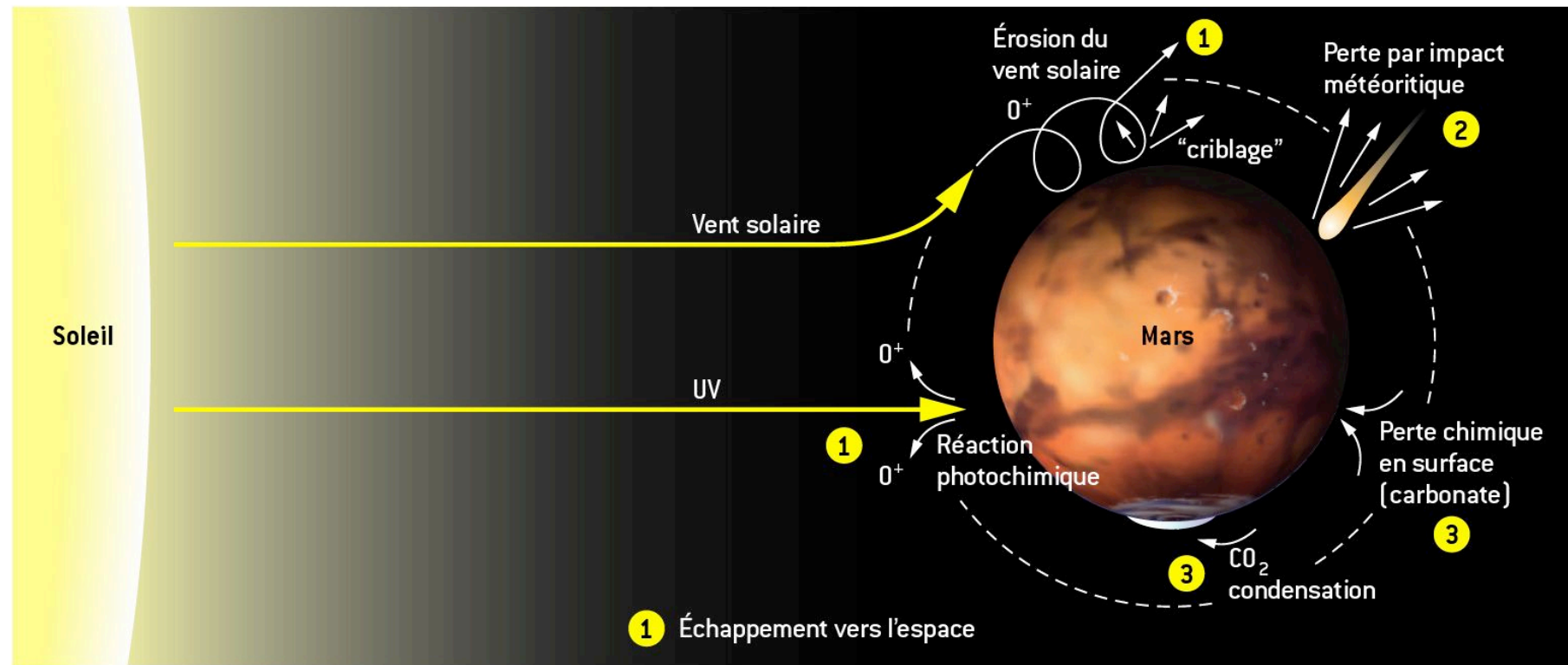


# Tharis et les réseaux de rivières



- 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 à du être formé dans les premiers 500 Millions d'années de la planète

# 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,