

# Atmosphères Planétaires

Bruno Bézard

LESIA, Bât. 18, Bureau 111

e-mail : [Bruno.Bezard@obspm.fr](mailto:Bruno.Bezard@obspm.fr)

Tél : 01 45 07 77 17

- Présentation, idées générales
- Moyens d'étude
- Structure thermique et dynamique
- Chimie et processus d'évolution

# Cours 1

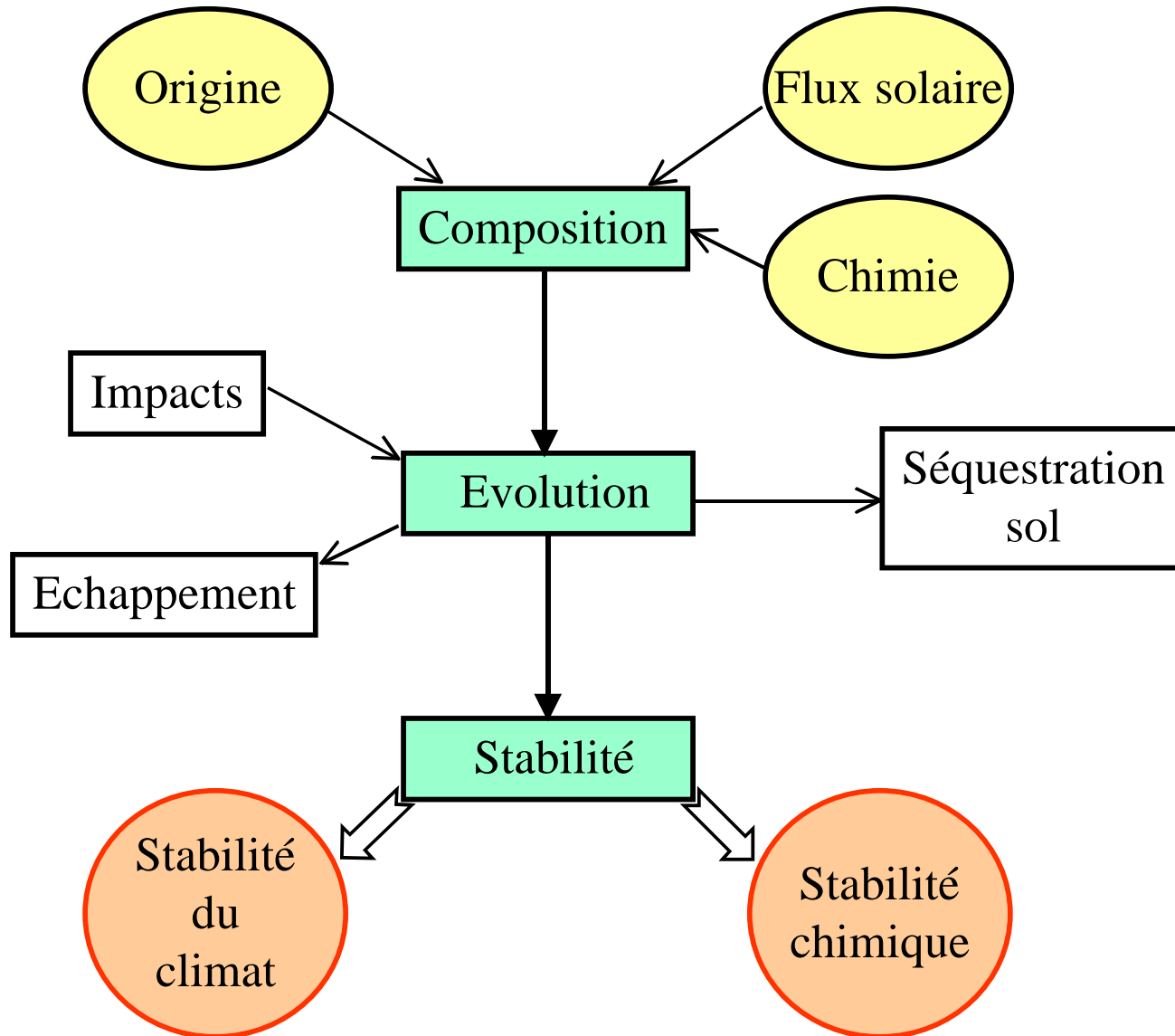
## Présentation, idées générales

---

- Les planètes géantes
- Les planètes telluriques et Titan
- Atmosphères ténues
- Equilibre hydrostatique
- Mélange atmosphérique
- Sources d'énergie et de matière
- Transport d'énergie

# Evolution des atmosphères

---



# Quelques grandeurs utiles

---

- **Température effective** :  $T_{\text{eff}}$

- Flux total émis par la planète  $F = \sigma T_{\text{eff}}^4$   
( $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann =  $5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

- **Albédo bolométrique (' de Bond ')** :  $A_b$

- $A_b = (\text{énergie réfléchie par la planète}) / (\text{énergie reçue du Soleil par la planète})$

- **Température d'équilibre** :  $T_{\text{eq}}$

- $4 \pi R^2 \sigma T_{\text{eq}}^4 = \pi R^2 (1 - A_b) F_{\text{sol}} \longrightarrow \sigma T_{\text{eq}}^4 = (1 - A_b) / 4 \times S / D^2$ 
  - $R =$  rayon de la planète
  - $F_{\text{sol}} = S / D^2$  avec  $S =$  constante solaire ( $1367,6 \text{ W m}^{-2}$ ) et  $D =$  distance au Soleil en UA
- Note : si  $T_{\text{eff}} > T_{\text{eq}}$  la planète possède une source d'énergie interne

- **Vitesse d'échappement** :  $v_e$

- $v_e = \left( \frac{2GM_{pl}}{R_{pl}} \right)^{1/2} = \left( 2g_s R_{pl} \right)^{1/2}$  avec  $g_s =$  accélération de la gravité à la surface

- **Vitesse thermique** :  $v_{\text{th}}$

- $v_{\text{th}} = \left( \frac{2kT}{m} \right)^{1/2}$  avec  $m =$  masse moléculaire

# Les planètes géantes



	Distance orbitale moyenne (UA)	Période orbitale (ans)	Période de rotation (hrs)	Rayon équatorial (km)	Obliquité (°)	Masse ( $M_{\oplus}$ )	Gravité ( $m \text{ sec}^{-2}$ )	$v_e$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	$v_{th}$ [H] ( $\text{km s}^{-1}$ )	$A_b$	$T_{eq}$ (K)	$T_{eff}$ (K)
<b>Jupiter</b>	5,20	11,86	9,92	71492	3,1	317,9	23,1	57,6	4,5	0,343	109,5	124,4
<b>Saturne</b>	9,55	29,46	10,66	60271	26,7	95,15	9,1	34,4	2,6	0,342	82,3	95,0
<b>Uranus</b>	19,22	84,01	17,24	25559	97,9	14,54	8,7	21,1	3,7	0,300	58,2	59,1
<b>Neptune</b>	30,11	164,79	16,11	24766	28,8	17,23	10,9	23,3	3,0	0,31	45,9	59,3

1 UA =  $149,6 \times 10^6$  km ;  $1 M_{\oplus} = 5,98 \times 10^{24}$  kg

# Les planètes géantes

---

- Planètes fluides, sans surface
- Evolution négligeable depuis leur formation
  - Pas d'échappement ( $v_{th} [H] \ll v_e$ )
  - Pas de surface → pas de piégeage de composés dans le sol  
→ recyclage des produits formés par photochimie (pyrolyse)
  - Atmosphères massives → influence globalement faible des impacts météoritiques
- Composition chimique ' proche ' de la nébuleuse solaire primitive
  - Plus de 90% d'hydrogène ( $H_2$ ) et d'hélium (He) - en volume -
  - Atmosphères chimiquement réductrices
    - C sous forme de  $CH_4$ , N sous forme de  $NH_3$ , O sous forme de  $H_2O$
- Source d'énergie interne ( $T_{eff} > T_{eq}$ )
- Se partagent en deux classes :
  - Jupiter et Saturne : masse sous forme de  $H_2$  et He (> 95%)
  - Uranus et Neptune : masse sous forme de ' glaces ' ( $H_2O$ , ...) et ' roches ' (>80%)

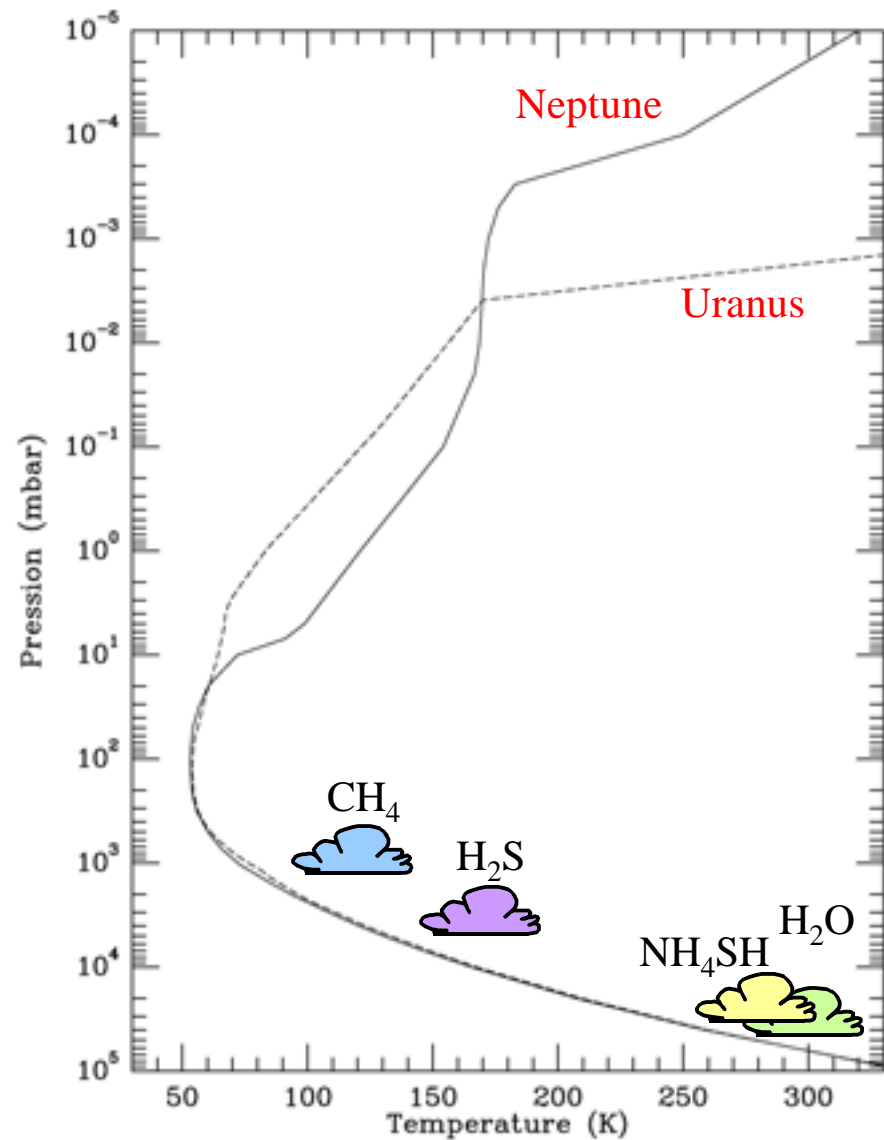
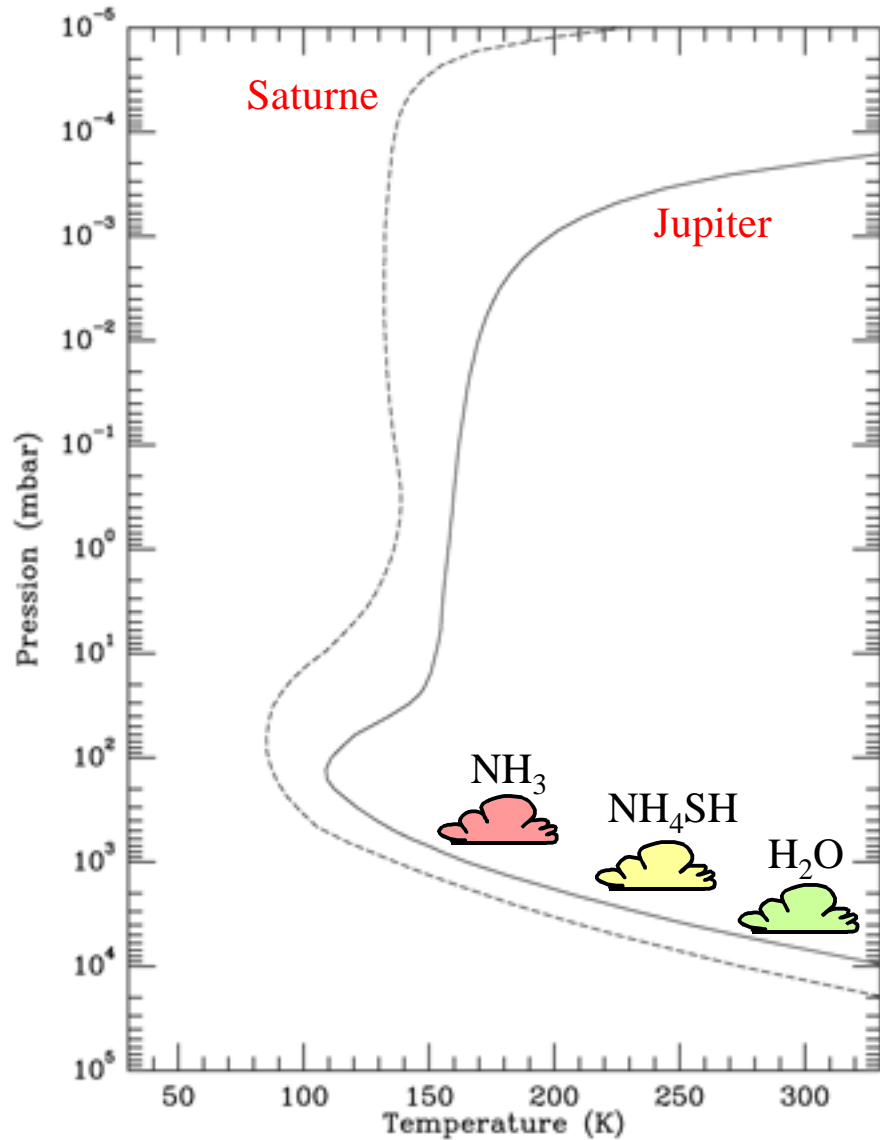
# Les planètes géantes - composition -

	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
H <sub>2</sub> *	86,4%	86-90%	81-86%	77-82%
He *	13,4%	10-14%	12-17%	16-21%
Gaz rares	Ne, Ar, Kr, Xe			
Composés à l'équilibre thermochimique	CH <sub>4</sub> : 0,2% * NH <sub>3</sub> : 5×10 <sup>-3</sup> * H <sub>2</sub> O : > 1×10 <sup>-3</sup> H <sub>2</sub> S : 8×10 <sup>-5</sup> *	CH <sub>4</sub> : 0,3-0,6% NH <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub> : ~2% H <sub>2</sub> S ?	CH <sub>4</sub> : ~2% H <sub>2</sub> S ?
Composés hors équilibre thermochimique	PH <sub>3</sub> , CO GeH <sub>4</sub> , AsH <sub>3</sub>	PH <sub>3</sub> , CO GeH <sub>4</sub> , AsH <sub>3</sub>		CO
Produits photochimiques	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H, C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , CH <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> , HCN
Flux météoritique	H <sub>2</sub> O, CO	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O CO <sub>2</sub> (produit à partir de H <sub>2</sub> O)
Résidus SL9	CO, CO <sub>2</sub> , CS, HCN			

\* He/H protosolaire conduirait à He/H<sub>2</sub> = 16/84

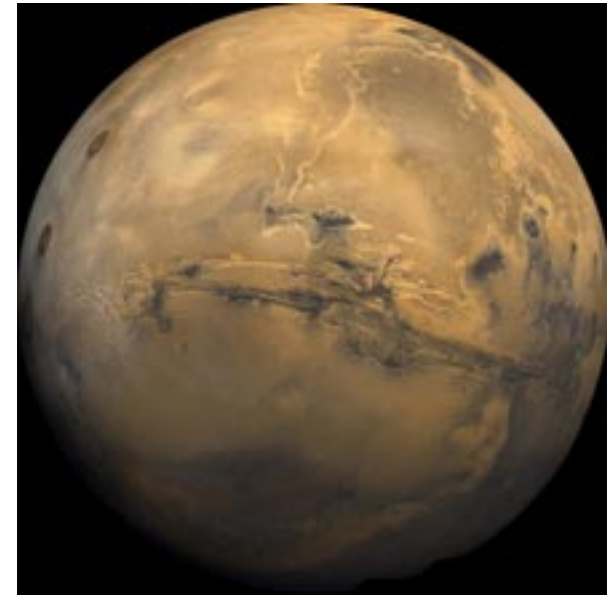
\* enrichis d'un facteur ~ 3 par rapport aux abondances solaires

# Les planètes géantes - profil thermique, nuages -





# Les planètes telluriques



	Distance orbitale moyenne (UA)	Période orbitale (ans)	Période de rotation (hrs)	Rayon équatorial (km)	Obliquité (°)	Masse ( $M_{\oplus}$ )	Gravité ( $m\ sec^{-2}$ )	$v_e$ ( $km\ s^{-1}$ )	$v_{th}$ [H] ( $km\ s^{-1}$ )	$A_b$	$P_{surf}$ (bar)	$T_{surf}$ (K)	$T_{eff}$ ( $= T_{eq}$ ) (K)
<b>Vénus</b>	0,723	0,62	243 <i>jours</i>	6051	177	0,817	8,8	10,3	2,2	0,75	92	733	231
<b>Terre</b>	1,000	1,00	23,93	6378	23,5	1,000	9,8	11,2	4,1	0,30	1,013	288	255
<b>Mars</b>	1,524	1,88	24,63	3397	25,2	0,108	3,7	5,0	2,4	0,25	0,006	215	210

1 UA =  $149,6 \times 10^6$  km ;  $1 M_{\oplus} = 5,98 \times 10^{24}$  kg

# Les planètes telluriques - composition -

	Vénus		Terre		Mars	
Composés principaux	CO <sub>2</sub>	96,5%	N <sub>2</sub>	78,1%	CO <sub>2</sub>	95,3%
	N <sub>2</sub>	3,5%	O <sub>2</sub>	20,9%	N <sub>2</sub>	2,7%
			H <sub>2</sub> O *	< 4%	Ar	1,6%
	SO <sub>2</sub>	150 ppm	Ar	0,93%	H <sub>2</sub> O *	0,03%
	Ar	70 ppm	CO <sub>2</sub>	350 ppm	Ne	2,5 ppm
	H <sub>2</sub> O	30 ppm	Ne	18 ppm	Kr	0,3 ppm
	OCS	15 ppm	He	5 ppm	Xe	0,08 ppm
	He	12 ppm	CH <sub>4</sub>	1,7 ppm		
	Ne	7 ppm	Kr	1,1 ppm		
	H <sub>2</sub> S ?	3 ppm	N <sub>2</sub> O	0,3 ppm		
	HCl	0,6 ppm	Xe	87 ppb		
	Kr	25 ppb	HCl	1 ppb		
	HF	5ppb				
Produits photo-chimiques	CO	(5-30 ppm)	H <sub>2</sub>	(0,55 ppm)	O <sub>2</sub>	(0,13%)
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		CO	(0,125 ppm)	CO	(0,08%)
	SO *		O <sub>3</sub> *		NO	
	O <sub>2</sub> *				O <sub>3</sub> *	

\* variable

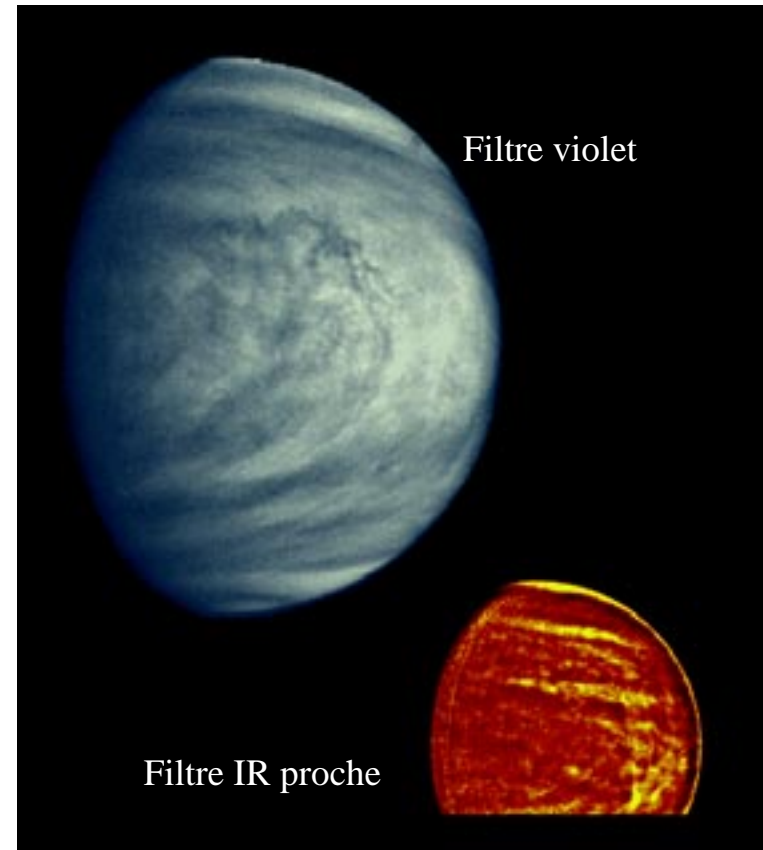
# Les planètes telluriques

---

- Atmosphères ‘ secondaires ’, ayant subi une forte évolution
  - Échappement possible : thermique ( $v_{th} [H] \sim 0,2-0,5v_e$ ) et surtout non thermique (voir Cours 4) → H peut être éliminé
  - Réactions avec la ‘ surface ’ → piégeage de certains composés (CO<sub>2</sub> sous forme de carbonates, N<sub>2</sub> sous forme de nitrates, ...)
  - Volcanisme → source pour l’atmosphère, recyclage possible du CO<sub>2</sub> ...
  - Chauffage solaire + effet de serre → présence ou non d’eau liquide, destin de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> ...
- Atmosphères chimiquement oxydantes
  - CO<sub>2</sub> sur Vénus et Mars (origine : dégazage/volcanisme)
  - O<sub>2</sub> sur Terre (origine biologique), H<sub>2</sub>O (origine : dégazage/volcanisme)
- Extrême diversité des atmosphères telluriques
  - Mais : compositions originelles de ces planètes probablement similaires
  - Les différences dans les paramètres physiques (masse, distance au soleil, ...) ou des événements catastrophiques (impacts) doivent en être responsables

# Vénus

- Atmosphère massive de  $\text{CO}_2$ 
  - Enorme effet de serre ( $T_{\text{surf}} = 733 \text{ K}$ )
- Epaisse couverture nuageuse de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 
  - $\text{H}_2\text{SO}_4$  produit par photochimie à partir de  $\text{SO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$
  - Epaisseur optique  $\tau \sim 20\text{-}30$
- Super-rotation
  - Vents  $> 500 \text{ km/hr}$  au sommet des nuages (alors que  $T_{\text{rot}} = 243$  jours terrestres)
- Cycle du soufre
  - Surface  $\rightarrow \text{COS}$  (et  $\text{H}_2\text{S}$  ?)
  - Volcanisme  $\rightarrow \text{SO}_2$  ?
  - Photochimie  $\rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4, \text{SO}_3, \text{S}_x, \text{SO} \dots$



- *Problèmes :*
  - *Evolution de Vénus; qu'est devenu  $\text{H}_2\text{O}$  ?*
  - *Origine de la super-rotation*
  - *Volcanisme actif ? Stabilité  $\text{SO}_2$  ?*

# Terre

---

- Large réservoir d'eau liquide (océans)
  - Permet l'apparition de la vie
  - Cycles hydrologique et bio-géochimique → dissolution et piégeage du CO<sub>2</sub>
- Volcanisme actif, tectonique des plaques
  - Cycle géochimique → recyclage (régulation ?) du CO<sub>2</sub>
- Activité biologique
  - Affecte fortement la composition atmosphérique
    - O<sub>2</sub> produit par photosynthèse; présence d'une couche d'ozone importante
    - ' Faible ' concentration de CO<sub>2</sub> (grâce à la photosynthèse)
    - Forte abondance de N<sub>2</sub> (bactéries)
    - Présence de CH<sub>4</sub> - gaz réducteur - (biochimie, agriculture)
- *Problèmes :*
  - *T<sub>surf</sub> stable pendant des milliards d'années (eau liquide). Mécanisme de régulation ? CO<sub>2</sub>, biosphère ?*
  - *Stabilité du climat ? Effet de l'augmentation actuelle de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ...?*

# Mars

---

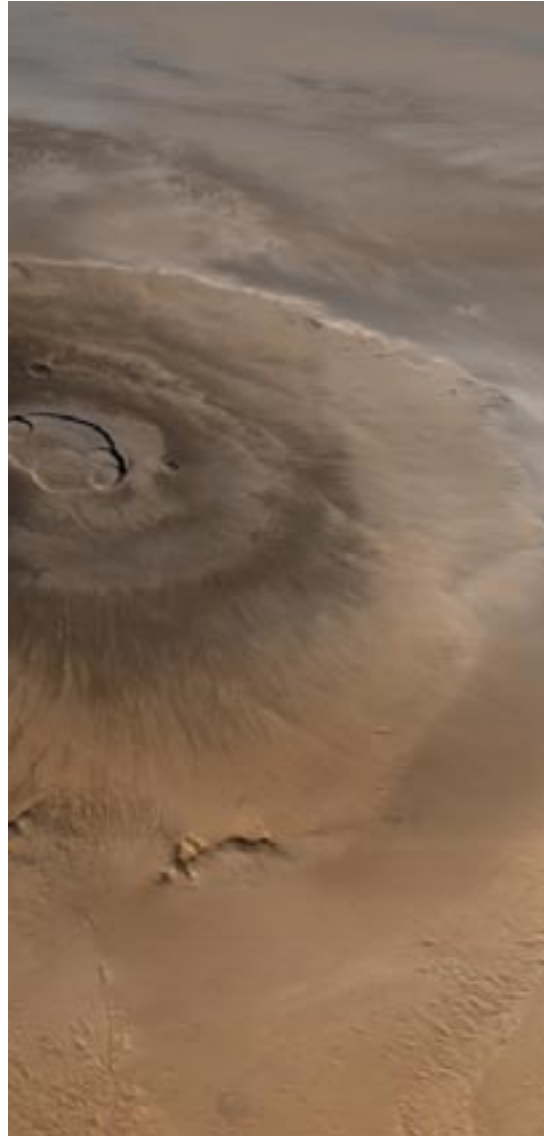
- Planète aride, froide; mince atmosphère de CO<sub>2</sub>
  - Fortes variations saisonnières de l'insolation (45%); températures de surface très variables 150-290 K
  - Gigantesques tempêtes de poussières
  - Condensation saisonnière du CO<sub>2</sub> sur les calottes polaires → pression au sol variant dans un intervalle de 2,5 mbar
- Traces d'eau liquide ayant coulé dans le passé
  - Climat probablement plus chaud dans le passé (atmosphère épaisse de CO<sub>2</sub> ?)
- *Problèmes :*
  - *Histoire climatique de Mars ? Quelle quantité de matériaux volatiles s'est échappée ? Par quel(s) mécanisme(s) ?*
  - *Quantité d'eau dans le sous-sol ( ' pergélisol ' ) et les calottes ? Quelle quantité de carbonates ?*
  - *La vie a-t-elle pu émerger ?*
  - *Effet des poussières sur la circulation atmosphérique; régularité ou non des tempêtes globales*

# L'eau sur Mars

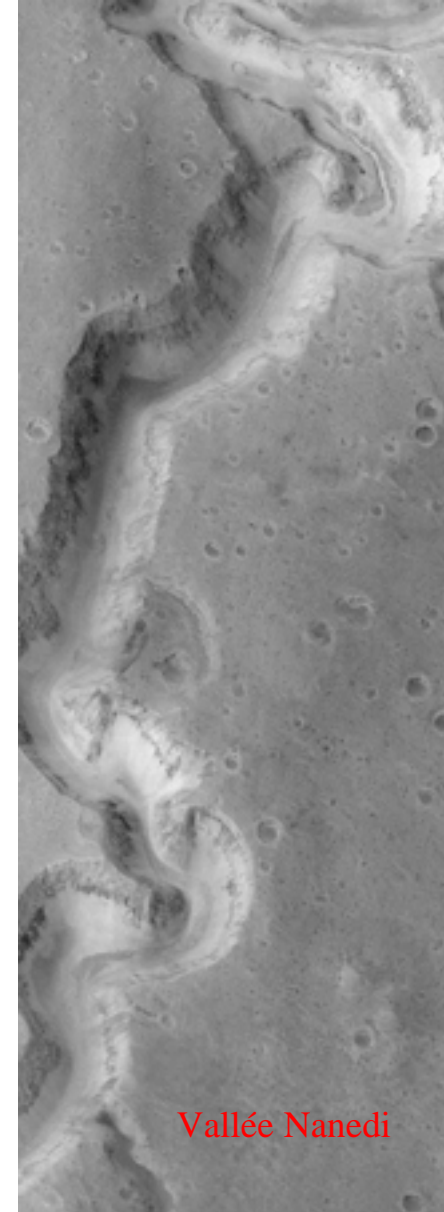
---



Calotte polaire nord  
résiduelle (été)  
glace d'eau



Olympus Mons  
nuages de glace d'eau



Vallée Nani

# Titan, satellite de Saturne

Composés principaux	$N_2$	85-98%
	$CH_4$	2-15%
	$Ar$	< 6%

## Produits Photochimiques

hydrocarbures  $C_2H_6, C_2H_2, C_3H_8,$   
 $C_2H_4, CH_3C_2H,$   
 $C_4H_2^*$   $H_2$

nitriles  $HCN, CH_3CN,$   
 $HC_3N^*, C_2N_2^*,$   
 $C_4N_2^*$

composés oxygénés  $CO, CO_2$

Flux météoritique  $H_2O$

\* très variable

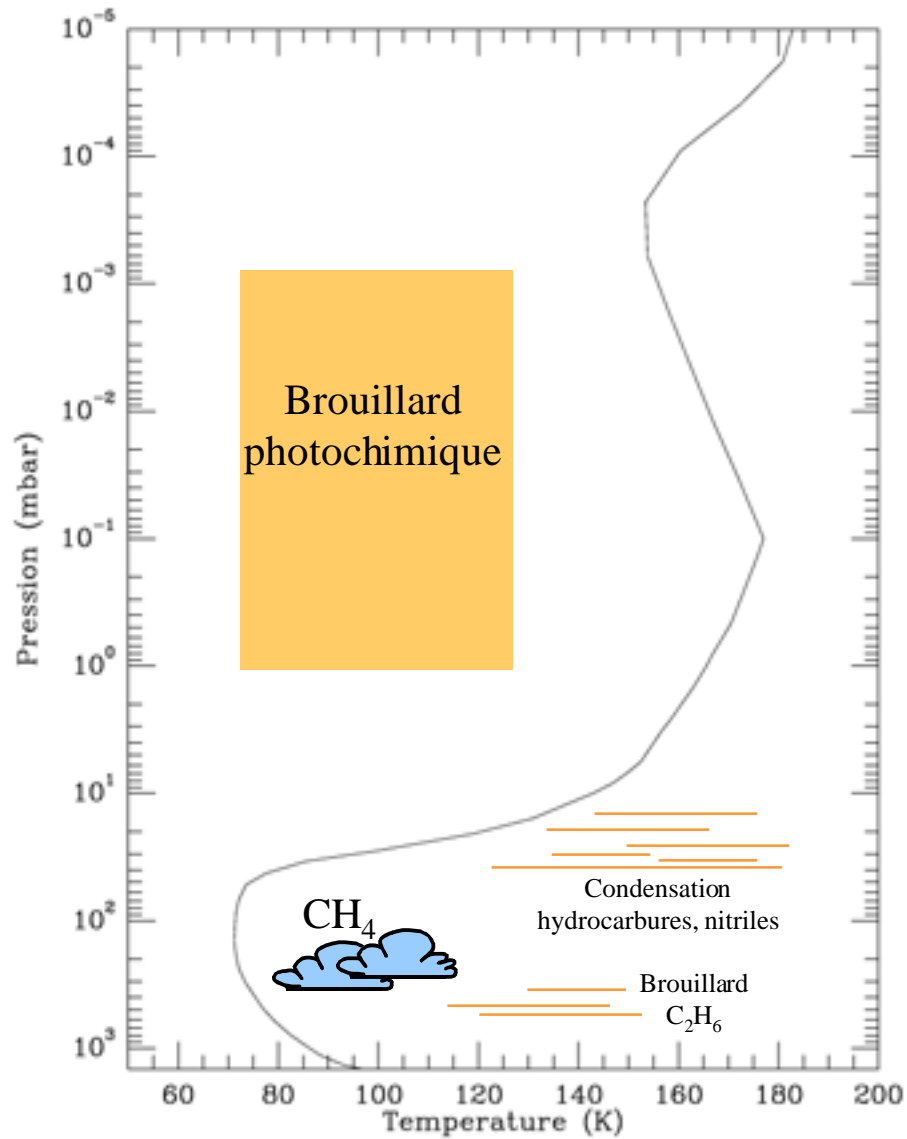


	Période de rotation (jours)	Rayon équatorial (km)	Masse ( $\oplus$ )	Gravité ( $m\ sec^{-2}$ )	$v_e$ ( $km\ s^{-1}$ )	$v_{th}[H]$ ( $km\ s^{-1}$ )	$A_b$	$P_{surf}$ (bar)	$T_{surf}$ (K)	$T_{eff} (= T_{eq})$ (K)
<b>Titan</b>	15,97	2575	0,023	1,35	2,6	1,8	0,29	1,45	94	82



# Titan - structure thermique, nuages -

---



# Titan

---

- Atmosphère épaisse de  $N_2$  avec quelques % de  $CH_4$
- Photochimie complexe produisant hydrocarbures, nitriles et particules
  - Brume photochimique orangée obscurcissant la surface
  - Destruction continue du méthane → production continue de composés organiques s'accumulant sur la surface depuis des milliards d'années
  - Variations saisonnières de la composition gazeuse et des particules
    - Asymétrie nord-sud, saisonnière, de la brume
    - Fort enrichissement de certains composés aux hautes latitudes hivernales
- *Problèmes :*
  - *Origine de l'atmosphère ? Origine de  $N_2$  ?*
  - *Degré de complexité atteint par la photochimie ? Composition de la brume photochimique*
  - *Nature de la surface ? Quel est le réservoir de méthane ? Lacs ?*
  - *Nature de la circulation atmosphérique (super-rotation ?)*

# Atmosphères ténues - Pluton, Triton -

---

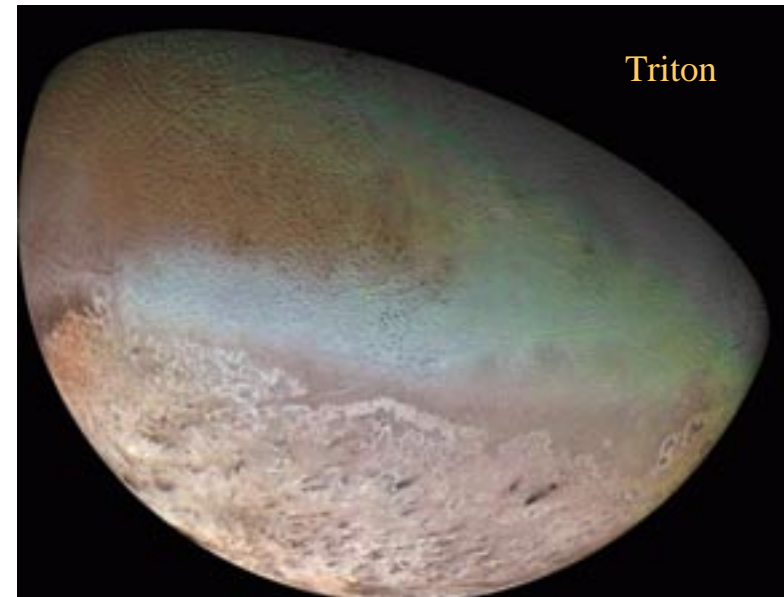
- Pluton

- Atmosphère ténue de  $N_2$ ,  $p_{\text{surf}} \sim 40 \mu\text{bar}$  ?
- Un peu de  $CH_4$  ( $< 1\%$ )
- $T_{\text{surf}}$  variable sur la planète
  - 40 K (glace  $N_2$ )
  - 50-60 K , régions plus sombres
- Orbite très excentrique ( $e=0,25$ )
  - $D_{\text{A}}$  varie entre 29,7 et 49,5 UA



- Triton

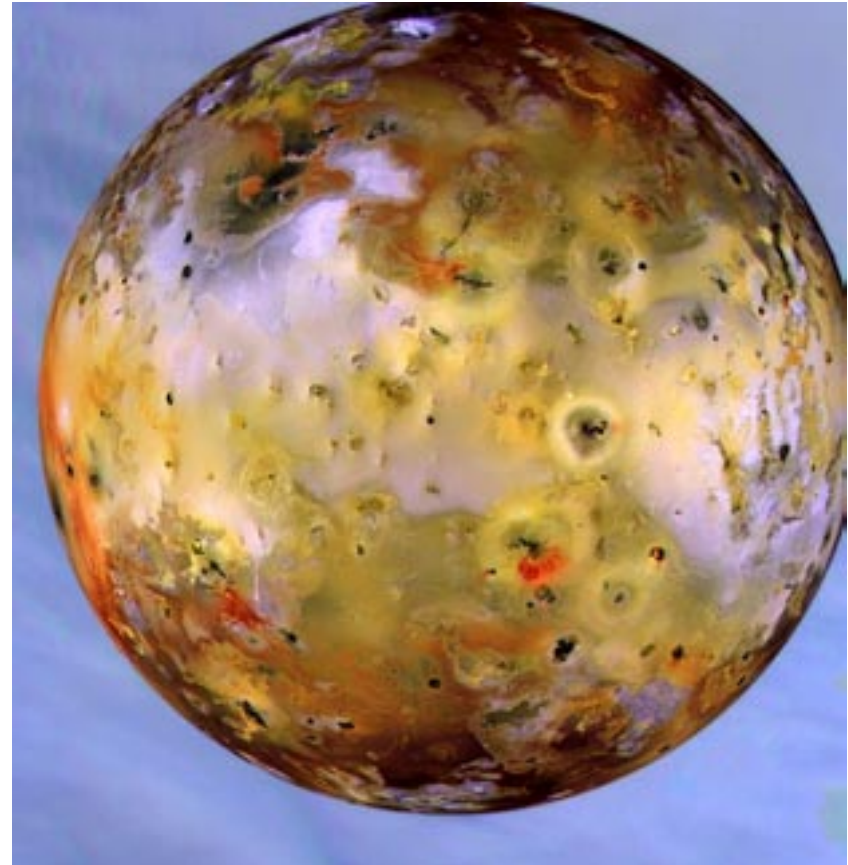
- Atmosphère ténue de  $N_2$ ,  $p_{\text{surf}} \sim 14 \mu\text{bar}$
- Equilibre avec la glace de  $N_2$  à la surface;  $T_{\text{surf}} \sim 38 \text{ K}$
- Traces de  $CH_4$  ( $2-6 \times 10^{-4}$ ), en équilibre avec la surface
- Brume vers 3-6 km (probablement  $N_2$ )
- Cryo-volcanisme



# Atmosphères ténues - Io -

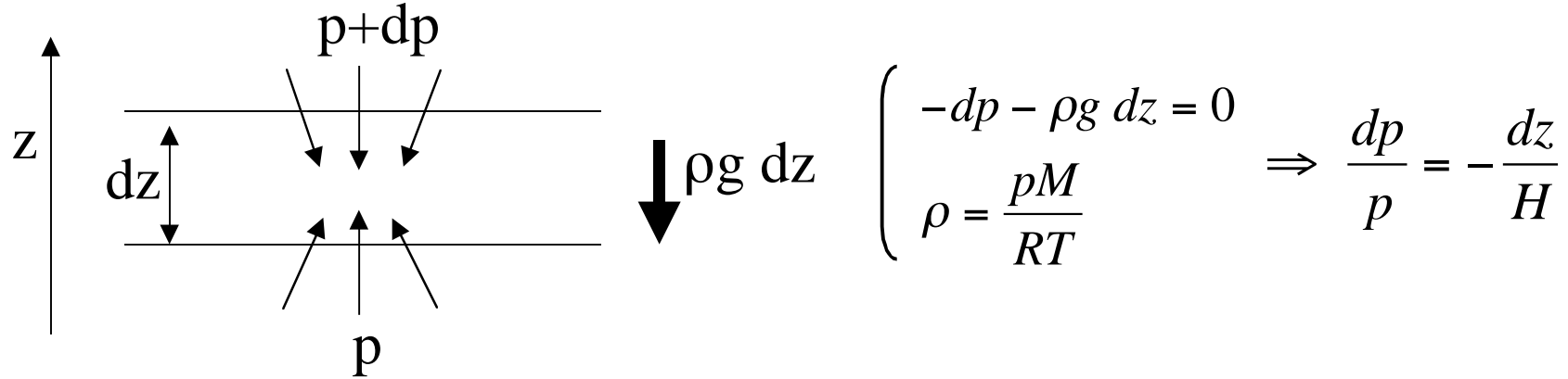
---

- Atmosphère très ténue d'origine volcanique
  - Permanente, variable, côté jour
  - $\text{SO}_2$  composant principal, avec 5-10% de SO (produit par photodissociation)
  - $P \sim 1\text{-}10$  nb dans les régions les plus denses (volcans actifs)
  - Régions denses + fond ténu ( $\sim 0,1$  nb)
- Erosion atmosphérique importante
  - Alimente les nuages neutres et le tore de plasma dans la magnétosphère de Jupiter
  - Faible vitesse d'échappement ( $2,6 \text{ km sec}^{-1}$ )



# Equilibre hydrostatique

- Approximation plan-parallèle



- Echelle de hauteur :  $H = \frac{RT}{Mg}$  avec  $R=8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$$\longrightarrow p = p_0 e^{-\int_{z_0}^z dz/H} \quad (1) \quad ; \quad \text{si } T = \text{constante} \longrightarrow p = p_0 e^{-\frac{(z-z_0)}{H}} \quad (2)$$

	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Vénus	Mars	Terre	Titan	Triton	Pluton	Io
M (g)	2,3	2,3	2,6	2,5	43,4	43,3	29,0	27	28	28	64
g ( $m \text{ s}^{-2}$ )	24	10	9	11	8,9	3,7	9,8	1,35	0,8	~ 0,7	1,8
T <sub>surf</sub> (K) <sup>a</sup>	165	135	76	72	735	214	288	94	38	~ 40	110
H (km)	25	48	27	22	16	11	8,4	21	14	~18	7,9

a : 1 bar pour les planètes géantes

# Equilibre hydrostatique

- Densité de colonne (plan parallèle)

$$a(z) = \int_z^{\infty} n(z') dz' \quad \text{avec} \quad n(z') = \frac{p'}{kT'} \quad dz' = \frac{-dp'}{p' \frac{Mg}{RT'}} \quad \text{on obtient}$$

$$a(z) = \int_0^p \frac{N_a}{Mg} dp' = \frac{N_a p(z)}{Mg} = N_a H_0 \frac{(p/p_0)}{RT_0} p_0 \quad \text{où } N_a = \text{nombre d'Avogadro}$$

$H_0 = \text{échelle de hauteur à } p_0 = 1,013 \text{ bar}$   
 $T_0 = 273,15 \text{ K}$

$$a[\text{molecules cm}^{-2}] = N_0 p[\text{atm}] H_0[\text{cm}] \quad (3)$$

où  $N_0 = \frac{N_a P_0}{RT_0} = 2,687 \times 10^{19} \text{ molecules cm}^{-3}$  est le nombre de Loschmidt, soit la densité d'un gaz dans les conditions STP (= 1 amagat)

$a$  peut aussi s'exprimer en cm-amagat :  $a[\text{cm} - \text{amagat}] = p[\text{atm}] H_0[\text{cm}]$

- Extension à la symétrie sphérique

$$\nabla p + \rho g = 0$$

Cas isotherme :  $p = p_s e^{\frac{r_s}{H_s} \left( \frac{r_s}{r} - 1 \right)}$  (4)

avec  $g = g_s \left( \frac{r_s}{r} \right)^2 \rightarrow \frac{dp}{p} = -\frac{1}{H_s} \left( \frac{r_s}{r} \right)^2 dr$

# Equilibre hydrostatique

---

- Limite de validité de l'équilibre hydrostatique

- Expansion de l'atmosphère

- Eq.(4) conduit à  $p(r = \infty) = p_s e^{-r_s/H_s} \neq 0 \longrightarrow$  résultat incorrect

- En supposant  $p(\infty) \approx 0$  (milieu interplanétaire)  $\longrightarrow$  l'atmosphère s'étend dans le vide (échappement hydrodynamique)

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p - \rho g > 0 \quad (\text{où } \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V \cdot \nabla \text{ dérivée totale})$$

On montre que tant que  $mv^2 \leq kT$ , l'équilibre hydrostatique est à peu près réalisé  
lorsque  $mv^2 \geq kT$ , le fluide est supersonique, l'équilibre est rompu

Ceci a lieu à  $r =$  plusieurs rayons planétaires

Exemple : vent solaire  $mv^2/kT = 1$  vers  $4 r_{\oplus}$

# Equilibre hydrostatique

- Nombre insuffisant de collisions pour maintenir  $p$  [omnidirectionnelle] et  $T$  [distribution maxwellienne des vitesses]
  - **Exobase** : niveau auquel une molécule rapide a une probabilité  $1/e$  de s'échapper de la planète sans subir de collisions

$$\int_{z_e}^{\infty} Q n(z) dz = 1 \Rightarrow \underbrace{Q n_e H_e}_{1/l} = 1 \quad \left( e^{-\int_{z_e}^{\infty} Q n(z) dz} \text{ est la probabilité de non-collision au-dessus de } z_e \right)$$

( $Q$  est la section efficace de collision  $\approx 3 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2}$ )

D'où 
$$p_e = \frac{mg}{Q} \quad (5)$$

$p_e \approx 1 - 2 \times 10^{-11} \text{ bar}$  **Terre, Vénus, Mars**

$1 - 3 \times 10^{-12} \text{ bar}$  **Titan, planètes géantes**

Altitudes exobase : (km)	Vénus	Terre	Mars	Titan	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
	150-200	400-500	250	1300	2000	3500	6000	3000

- **Exosphère** :  $z > z_e$ , le libre parcours moyen  $l$  est supérieur à l'échelle de hauteur  $H_e$ 
  - Les trajectoires des particules ne s'échappant pas sont ballistiques  $E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{mg_s r_s^2}{r}$
  - L'équilibre hydrostatique est encore réalisé dans une partie de l'exosphère avec une température  $T=T_e$   $\hookrightarrow n(r, v) \propto e^{-\frac{1}{2} \frac{mv^2}{kT_e} + \frac{mg_s r_s^2}{kT_e r}}$
  - $p$  et  $T$  deviennent mal définis plus haut dans l'exosphère



# Mélange atmosphérique

Mélange de gaz (i) de fractions molaires  $q_i = p_i / p$  ;  $p = \sum p_i$  ;  $p_i = n_i kT$

- Diffusion moléculaire

- Equilibre diffusif

- $\frac{dp_i}{p_i} = -\frac{dz}{H_i}$  avec  $H_i = \frac{RT}{M_i g}$  → chaque gaz suit sa propre loi hydrostatique caractérisée par sa propre échelle de hauteur

- Autre point de vue : équilibre thermodynamique dans un gaz isotherme

$$dn_i \propto e^{-\frac{E_i}{kT}} = e^{-\frac{1}{2} \frac{m_i v^2}{kT} - \frac{m_i g z}{kT}} = e^{-\frac{v^2}{v_{th}^2}} e^{-\frac{z}{H_i}}$$

- Assuré par la diffusion moléculaire

- Gaz à l'équilibre  $p, T$  :  $\Phi_i^d = -D_i \frac{\partial n_i}{\partial z} = -D_i n \frac{\partial q_i}{\partial z}$  avec  $D_i = \frac{3\pi\sqrt{2}}{16} l_i v_i^{th} = \frac{b_i}{n}$

- Gaz atmosphérique :  $\Phi_i^d = -D_i n_i^e \frac{\partial (n_i / n_i^e)}{\partial z} = -D_i n_i \left( \frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{m_i g}{kT} + \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right)$  (6)

(e ↔ équilibre diffusif)

- $D$  peut être représenté sous la forme  $A T^s / n$   $s \approx 0,7 - 0,8$

à 200 K,  $p = 10^{-6}$  bar (1  $\mu$ bar) →  $D_{CH_4-H_2} = 4 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$      $D_{H-H_2} = 1 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

$$D_{CH_4-N_2} = 1 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad D_{H-N_2} = 5 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

# Mélange atmosphérique

- Constante de temps : on perturbe  $n_i^e \rightarrow n_i^e + \Delta n_i^e$  sur une hauteur  $H_*$  ;

par exemple  $\Delta n_i^e = \varepsilon n_i^e e^{-(z-z_0)^2/2H_*^2}$

$$\frac{1}{\tau_d} = -\frac{1}{\Delta n_i^e} \frac{\partial \Delta n_i^e}{\partial t} = \frac{1}{n_i} \frac{\partial \phi_i^d}{\partial z} = \frac{1}{n_i} \frac{\partial}{\partial z} \left[ -D_i n_i^e \frac{\partial (\Delta n_i^e / n_i^e)}{\partial z} \right] = \frac{D_i}{H_*^2} \quad \tau_d \approx \frac{H^2}{D_i} \quad \text{si } H_* \approx H$$

- Exemples : CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> à 1 μbar (Jupiter) :

$$\tau_d \approx \frac{(3 \times 10^6)^2}{4 \times 10^5} \approx 2 \times 10^7 \text{ sec } (\approx 8 \text{ mois})$$

H-N<sub>2</sub> à 1 μbar (Terre) :

$$\tau_d \approx \frac{(6 \times 10^5)^2}{5 \times 10^5} \approx 8 \times 10^5 \text{ sec } (\approx 10 \text{ jours})$$

- Diffusion turbulente

- Paramétrisée par un coefficient de diffusion turbulente  $K$  tel que  $\Phi_i^K = -Kn \frac{\partial q_i}{\partial z}$  (7)

- Théorie de la longueur de mélange :  $K = l v$ ,  $l$  étant une longueur caractéristique de la turbulence,  $v$  une vitesse caractéristique de la turbulence

- *Basse atmosphère* : convection thermique  $l \approx H$ ,  $v \approx \left( \frac{RF_{conv}}{\rho C_p} \right)^{1/3}$  (voir plus loin)

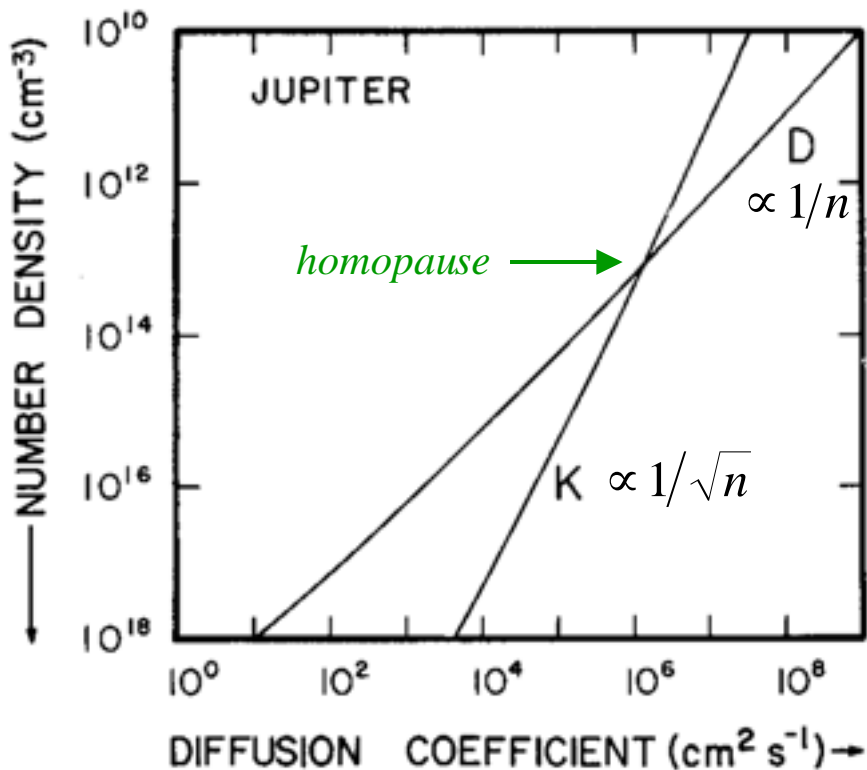
- *Haute atmosphère* : turbulence engendrée par ondes de gravité,  $K \sim n^{-0.5}$

- Constante de temps :  $\tau_K \approx \frac{l}{v} \approx \frac{H^2}{K}$

# Mélange atmosphérique

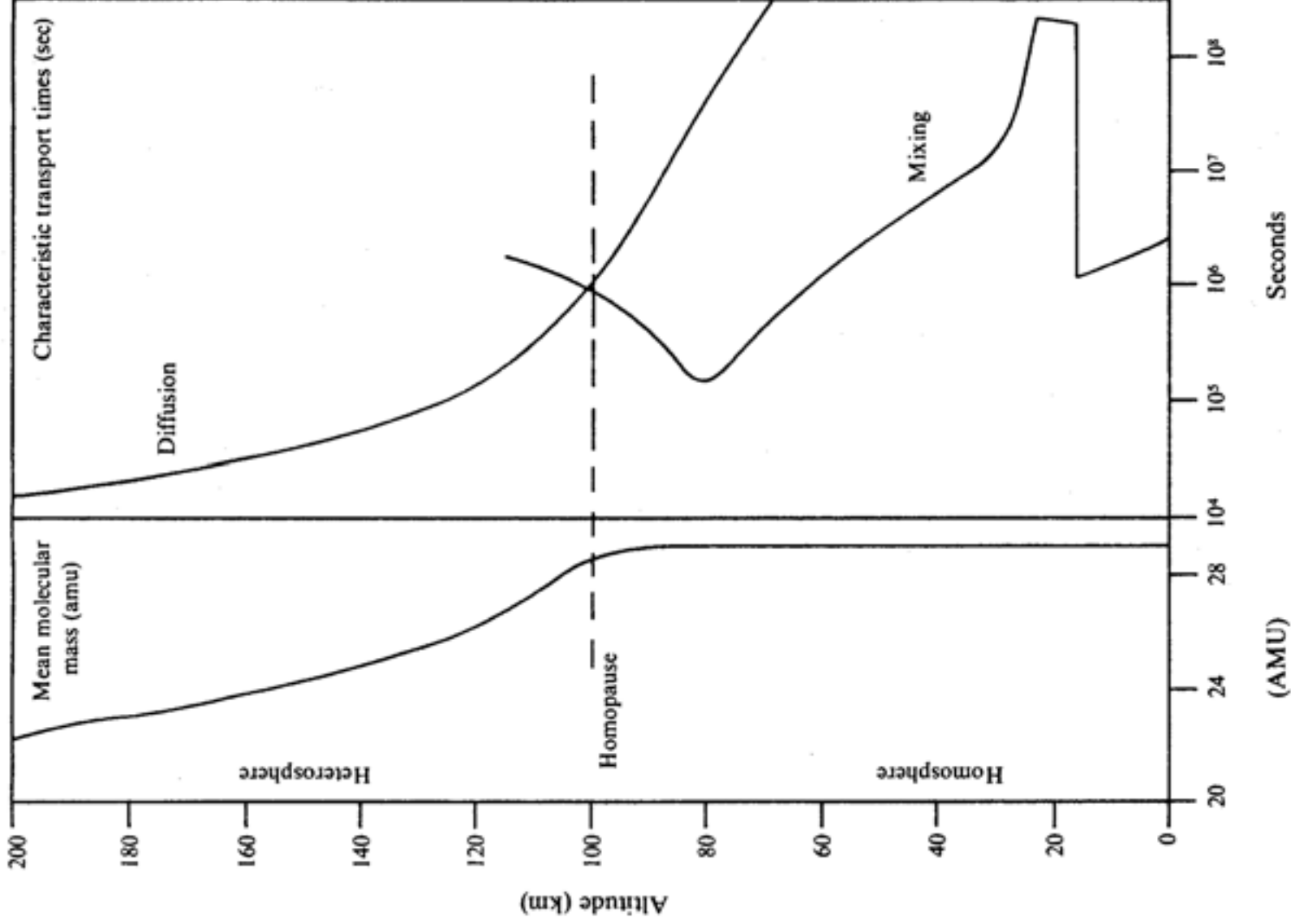
- Homosphère/Hétérosphère, Homopause

- $K > D_i$  : homosphère  $\Rightarrow H_i \rightarrow H$  pour tout constituant  $i$
- $K = D_i$  : homopause (ou turbopause)
- $K < D_i$  : hétérosphère  $\Rightarrow$  l'équilibre diffusif prévaut



	$z$ (km)	$P$ ( $\mu\text{bar}$ )	$K_h$ ( $\text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$ )
<b>Vénus</b>	130	0,02	$10^7$
<b>Terre</b>	100	0,3	$10^6$
<b>Mars</b>	130	$5 \times 10^{-4}$	$10^8$
<b>Jupiter</b>	450	1	$10^6$
<b>Saturne</b>	1000	0,01	$5 \times 10^7$
<b>Uranus</b>	400	20	$10^4$
<b>Neptune</b>	750	0,05	$10^7$
<b>Titan</b>	750	0,01	$10^7$

# Diffusion moléculaire et diffusion turbulente sur Terre

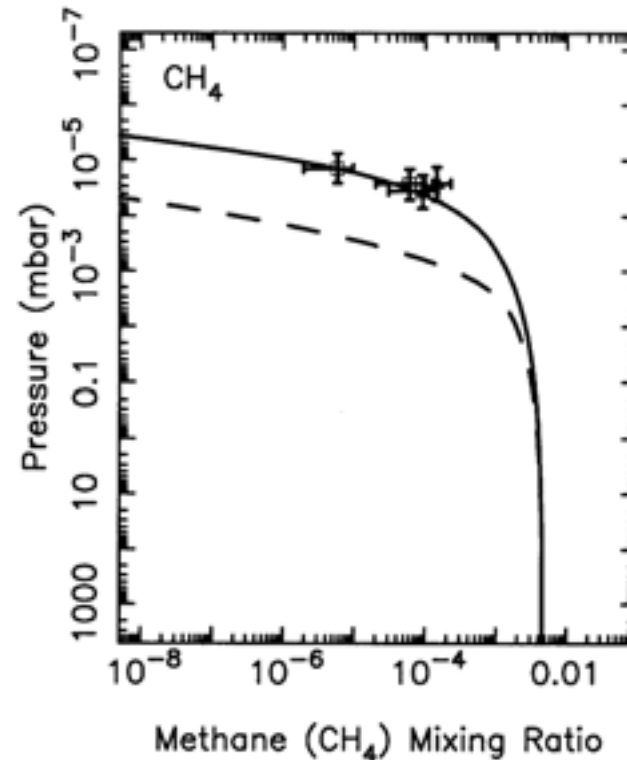
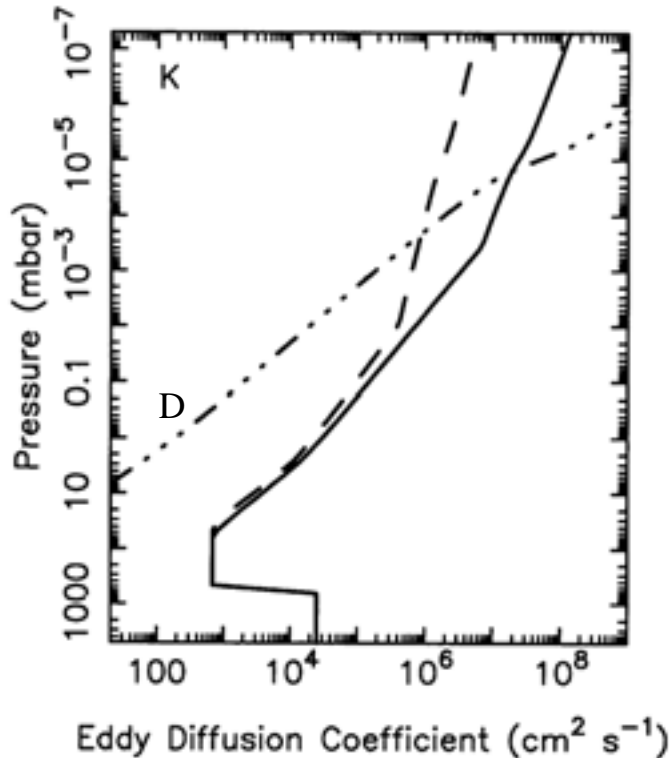


# Mélange atmosphérique

- Cas général :

- $\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}(\Phi_i^d + \Phi_i^K)$  (8) en l'absence de sources/puits chimiques

- En régime permanent  $\rightarrow \Phi_i^d + \Phi_i^K = C^{te} = 0$  si pas d'échappement
  - $\Rightarrow$  On peut déterminer  $K$  à partir du profil vertical d'un tel corps



Saturne

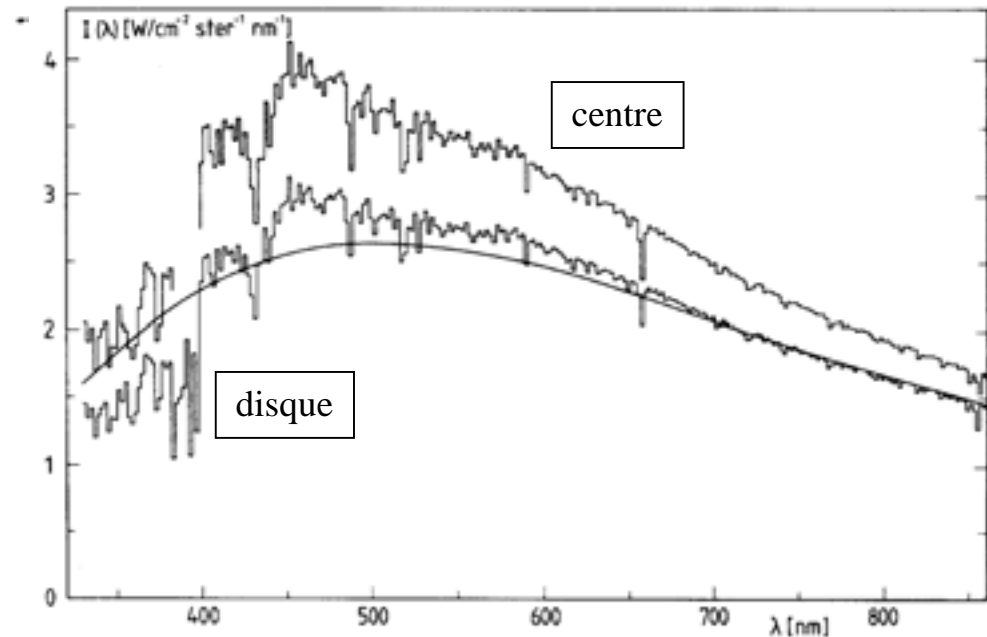
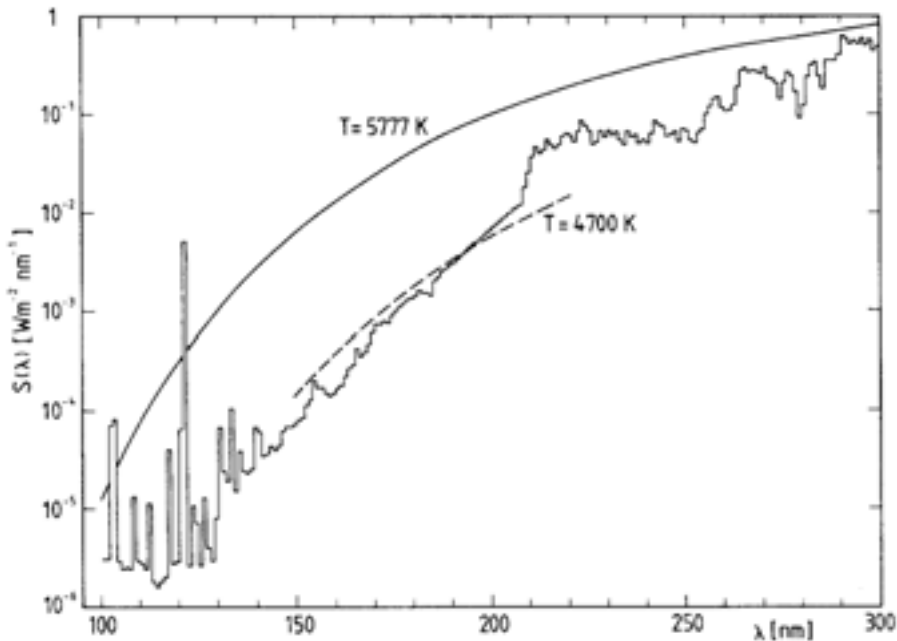
# Sources d'énergie et de matière

- Energie

- Rayonnement solaire

- Absorbé par la surface, l'atmosphère, les nuages
    - Domaines : IR proche, visible, UV (en particulier  $Ly_{\alpha}$  à 121.6 nm  $\rightarrow$  autant de flux que  $< 150$  nm ; très variable :  $max/min = 1.2-1.5$  en-deçà de 150 nm)

Spectre solaire de 100 à 800 nm



# Sources d'énergie et de matière

---

- Milieu interstellaire (pour les planètes au-delà d'Uranus)
  - Le flux  $Ly_\alpha$  diffusé par le milieu interstellaire est comparable au flux  $Ly_\alpha$  solaire au niveau de Neptune
- Sources d'énergie interne
  - Contraction gravitationnelle - et refroidissement associé -  $\Rightarrow$  **Planètes géantes**
  - Séparation de phase hydrogène/hélium (vers 1-3 Mbar)  $\Rightarrow$  **Jupiter, Saturne**

	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
$F_{\text{int}} \text{ (W m}^{-2}\text{)}$	5,6	1,9	0,04±0,05	0,43
$F_{\text{int}}/F_{\text{A}}^{\text{abs}}$	0,67	0,79	0,06±0,08	1,61

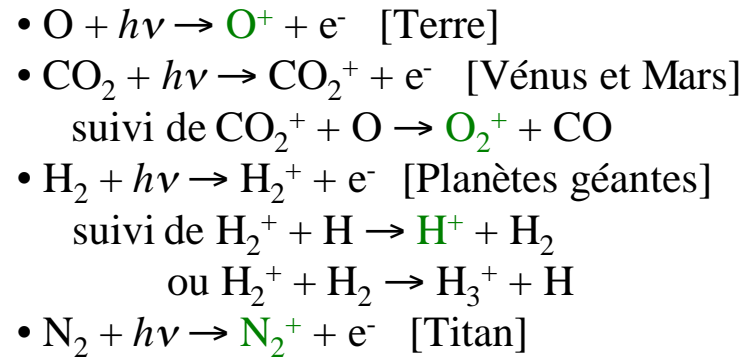
# Sources d'énergie et de matière - Ionosphère

---

## – Interaction avec le vent solaire/la magnétosphère

- Précipitation d'électrons et d'ions piégés dans la magnétosphère (zones aurorales)
- Chauffage par effet Joule dans l'ionosphère (sur Terre :  $0,14 \text{ W m}^{-2}$ )
  - $P = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} = \sigma E^2$  ( $\sigma$  = conductivité - tenseur -)
- **Ionosphère** : région de la haute atmosphère partiellement ionisée

- Forte photo-ionisation
- Taux de recombinaison faibles



- Pic de densité électronique :

très dépendant du cycle solaire, de la latitude, de l'heure

	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Titan
<u>z (km)</u>	140	300	130	~1000	2000-3000	700-1500	~1400	1000



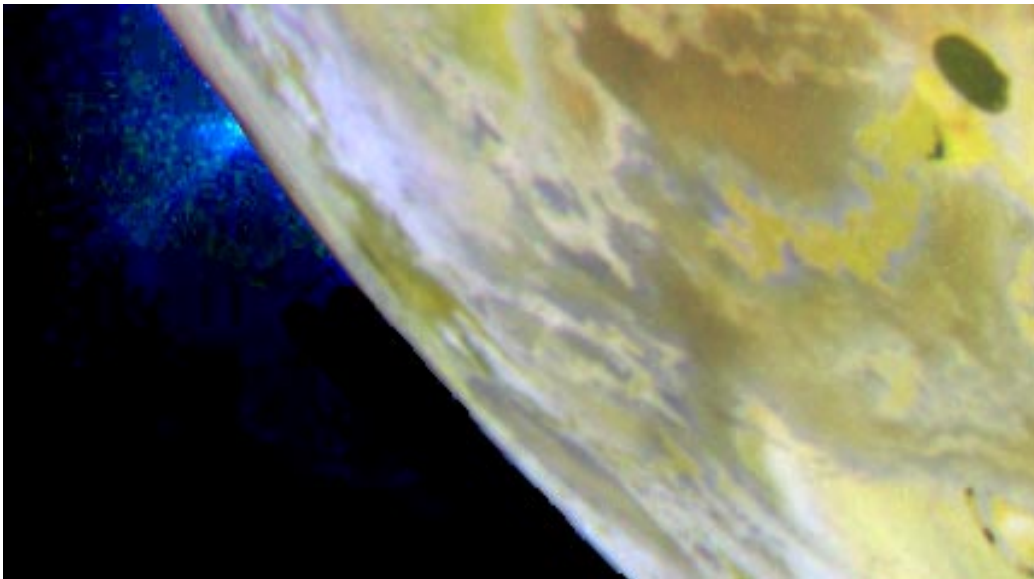
# Sources d'énergie et de matière

---

- Matière (source interne)
  - Volcanisme, dégazage lent
    - Vénus :  $\text{SO}_2$  ?
    - Terre : composition observée des fumerolles

<u><math>\text{H}_2\text{O}</math></u>	<u><math>\text{CO}_2</math></u>	<u><math>\text{SO}_2</math></u>	<u><math>\text{N}_2</math></u>	<u><math>\text{Cl}</math></u>	<u><math>\text{H}_2</math></u>	<u><math>\text{H}_2\text{S}</math></u>	<u>...</u>
~97%	2-3%	0,1%					

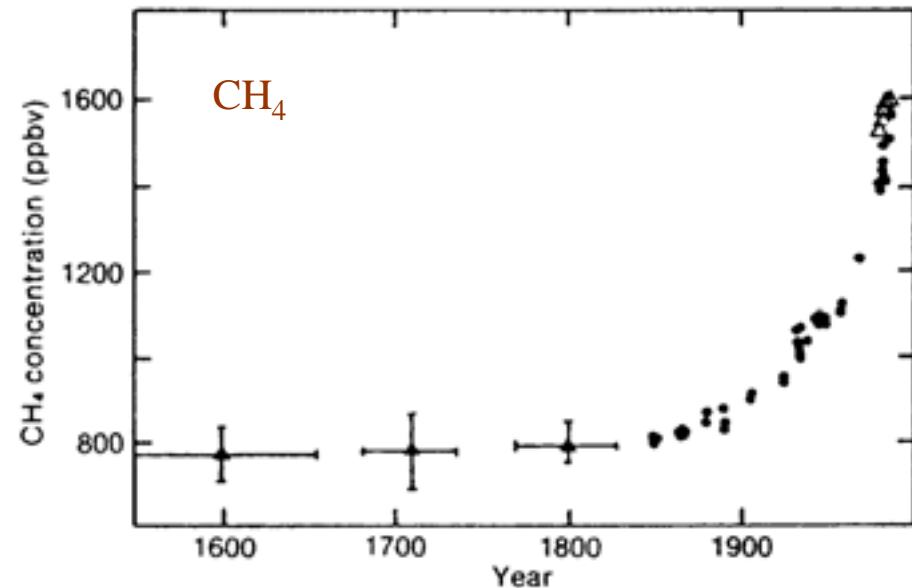
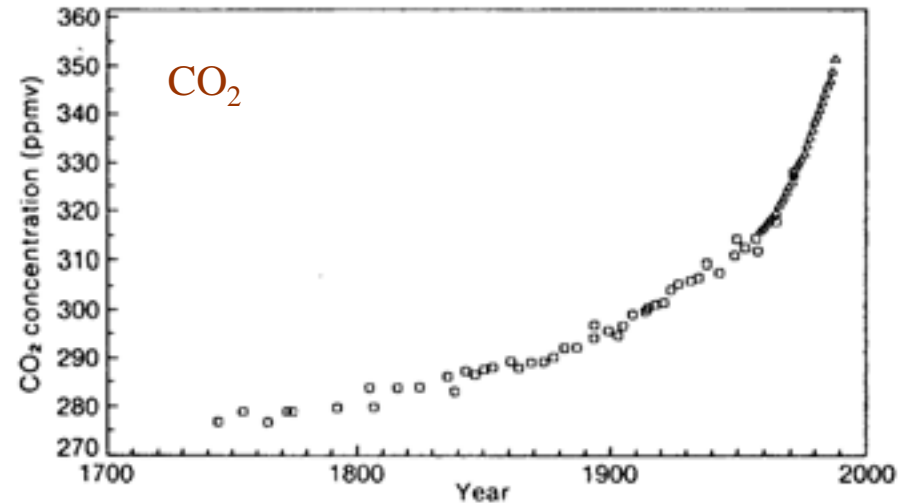
- Io :  $\text{SO}_2$ ,  $\text{S}_2$



# Sources d'énergie et de matière

---

- Evaporation, sublimation
  - Terre :  $\text{H}_2\text{O}$       Titan :  $\text{CH}_4$  (liquide)  
Pluton, Triton :  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  (solide)
- Activité biologique
  - Terre :  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$  (photosynthèse, bactéries)  
CFCs,  $\text{CO}_2$  (industrie),  $\text{CH}_4$ ,  
 $\text{N}_2\text{O}$  ? (agriculture)

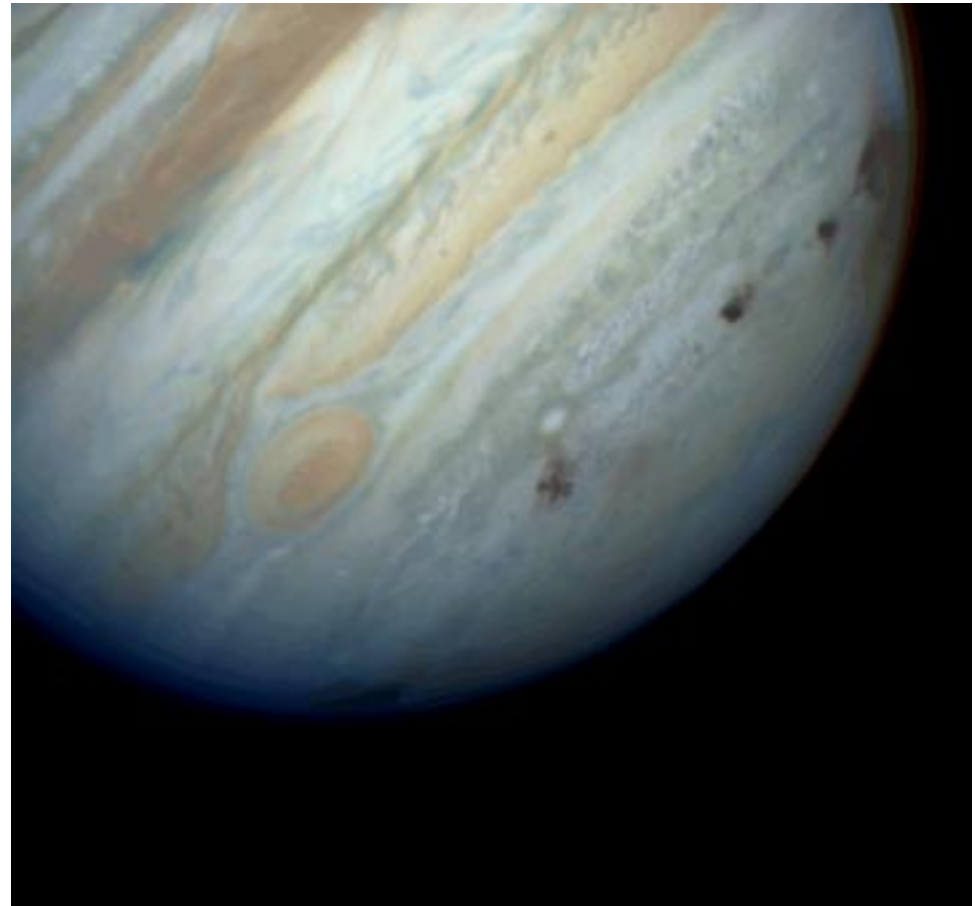
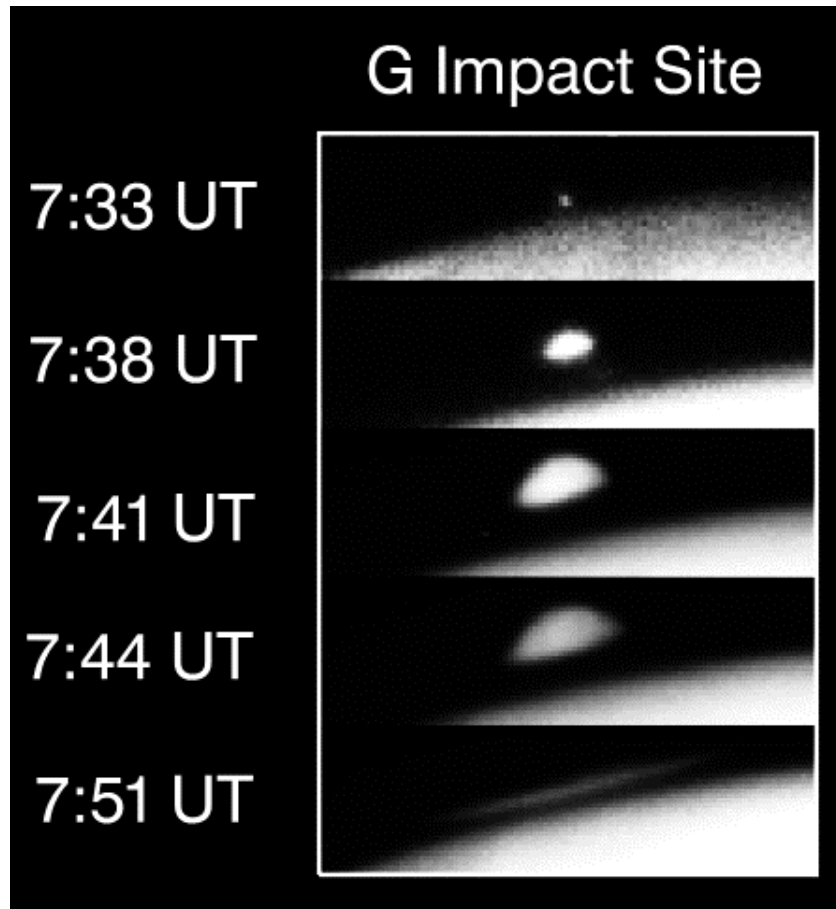


# Sources d'énergie et de matière

---

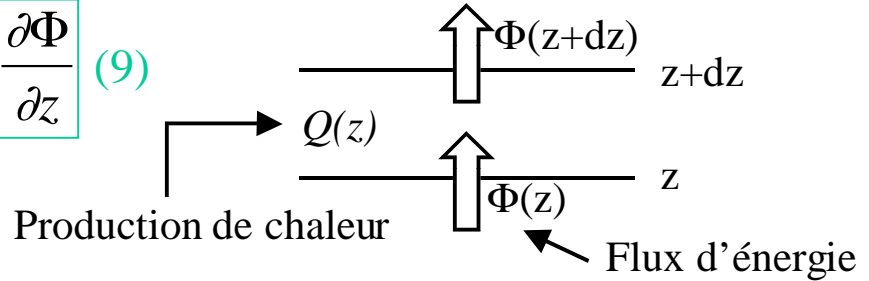
- Matière (source externe)
  - Flux météoritique
    - Source de composés oxygénés dans la haute atmosphère des planètes géantes et de Titan : H<sub>2</sub>O, CO et CO<sub>2</sub> par photochimie
      - Exemple : **Saturne**,  $\sim 4 \times 10^6$  atomes de O cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> ↔ 50 litres sec<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>O sur toute la planète
  - Flux cométaire
    - Source de nouveaux composés créés dans l'atmosphère par chimie de choc
      - Exemple : **Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter**, → CO, HCN, CS encore détectables aujourd'hui !

## Collision Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter (Juillet 1994)



# Transport d'énergie

- Equation générale :  $\rho C_p^* \frac{\partial T}{\partial t} = Q(z) - \frac{\partial \Phi}{\partial z}$  (9)
  - En régime permanent, en l'absence de source locale de chauffage,  $\Phi(z)$  est constant  $\Rightarrow$  flux conservatif
- Rayonnement
  - Chauffage par absorption du flux solaire (UV, visible, IR proche [ $\leq 4 \mu\text{m}$ ])
  - Refroidissement par émission thermique (domaine IR [ $\geq 5 \mu\text{m}$ ])
  - $\Phi(z) = \Phi_{\text{rad}}(z) = \text{constante} \Rightarrow$  équilibre radiatif
    - Approximativement réalisé jusqu'à  $\approx 0.1-10 \mu\text{bar}$  (atmosphère à l'ETL)
    - ETL : (1)  $\eta = a/A > 1$  où  $A$  est le coefficient d'Einstein,  $[S = \text{intensité de bande, } \omega_0 \text{ et } \omega = \text{dégénérescence des niveaux bas et haut}]$  et  $a$  est le taux de désactivation par collisions [ $\text{varie en } n$ ],  $A = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} S$ ,  
ou (2)  $\tau \geq 1$  (atmosphère optiquement épaisse)
    - Exemple :  $\text{CO}_2$  à  $15 \mu\text{m}$  sur Terre  
 $A = 1,35 \text{ sec}^{-1}$  et  $a = a_0 \times n$  avec  $a_0 = 2,5 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$   
 $\eta > 1$  réalisé pour  $n \geq 10^{15} \text{ cm}^{-3} \rightarrow z \leq 70-75 \text{ km}$  ( $\sim 40 \mu\text{bar}$ )  
 ETL valide pour  $z \leq 80 \text{ km}$  ( $\sim 10 \mu\text{bar}$ )



# Transport d'énergie

- Convection

- Dans la basse atmosphère,  $\tau_{IR} \mathbf{k}$ , [ $\tau_{IR} > 1$ ], et  $dT/dz (<0)\mathbf{m}$  ( $T$  croit de plus en plus vite avec la profondeur)

⇒ l'atmosphère devient instable face à la convection

- Pour une masse d'air se déplaçant adiabatiquement :

$$dH = nmC_p^* dT = V dp \quad \text{avec } V = nm/\rho \text{ et } C_p^* = \text{chaleur massique à pression constante}$$

$$C_p^* dT = \frac{1}{\rho} dp = -g dz \quad \Rightarrow \quad \boxed{\left. \frac{dT}{dz} \right|_{ad} = -\frac{g}{C_p^*}} \quad (10)$$

$$\Gamma_{ad} = -g/C_p^* \quad \text{gradient adiabatique sec} \quad (\text{Terre} : -9,8 \text{ K/km})$$

- Si l'air est 'humide' ( $H_2O$  sur Terre,  $CH_4$  sur Uranus et Neptune) :

$$C_p^* dT = \frac{1}{\rho} dp - L^* dw_s \quad \text{avec } w_s = \text{fraction de masse de gaz saturé par masse d'air} = n_s m_s / n m$$

$$L^* = \text{chaleur latente de vaporisation}$$

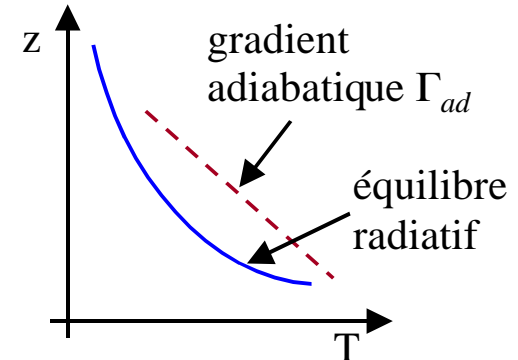
$$\Rightarrow \boxed{\left. \frac{dT}{dz} \right|_{ad} = \frac{-g/C_p^*}{1 + L^*/C_p^* dw_s/dT}} \quad (11)$$

(gradient adiabatique humide)

Terre : air saturé en  $H_2O \rightarrow -5 \text{ K/km}$

conditions moyennes observées :

-6,5 K/km



# Transport d'énergie

- Si  $\left| \frac{dT}{dz} \right| < |\Gamma_{ad}|$ , une masse d'air montante est plus froide ( $\rightarrow$  dense) que l'environnement, elle redescend et se met à osciller (**voir exercice**)
- Si  $\left| \frac{dT}{dz} \right| > |\Gamma_{ad}|$ , une masse d'air montante est plus chaude ( $\rightarrow$  légère) que l'environnement, elle continue à monter  $\Rightarrow$  *atmosphère instable*
- Un flux convectif se développe :  $\Phi_K = -K \rho C_p^* \left( \frac{dT}{dz} - \Gamma_{ad} \right)$  où  $K$  est le coefficient de diffusion turbulente ;  $\Phi_K = 0$  si  $(dT/dz - \Gamma_{ad}) > d\theta$ . Ce flux ramène rapidement le gradient très près de sa valeur adiabatique
- $K$  peut être estimé dans le cadre de la convection libre + théorie de la longueur de mélange :  $K = \nu l$  avec  $l \sim H$  et  $\nu \sim (R \Phi_K / \rho C_p)^{1/3}$ , où  $\Phi_K$  est le flux montant transporté par convection et  $C_p$  est la chaleur molaire à  $p$  c<sup>te</sup>.

	<b>Jupiter</b>	<b>Saturne</b>	<b>Uranus</b>	<b>Neptune</b>
$\Phi_{\text{int}}$ (W m <sup>-2</sup> )	5,6	1,9	0,04	0,43
$K$ (cm <sup>2</sup> sec <sup>-1</sup> )	$6 \times 10^8$	$9 \times 10^8$	$1 \times 10^8$	$2 \times 10^9$
$\tau_K = H^2/K$ (sec)	$4 \times 10^4$	$1 \times 10^5$	$3 \times 10^5$	$1 \times 10^5$

# Transport d'énergie

---

- Conduction

- Important dans la haute atmosphère (hors ETL)

$$\Phi_c = -K_c \frac{\partial T}{\partial z} \quad (12)$$

$K_c$  = coefficient de conductivité thermique

$K_c$  peut être représenté sous la forme  $AT^s$  ( $s \sim 0,7-0,8$ )

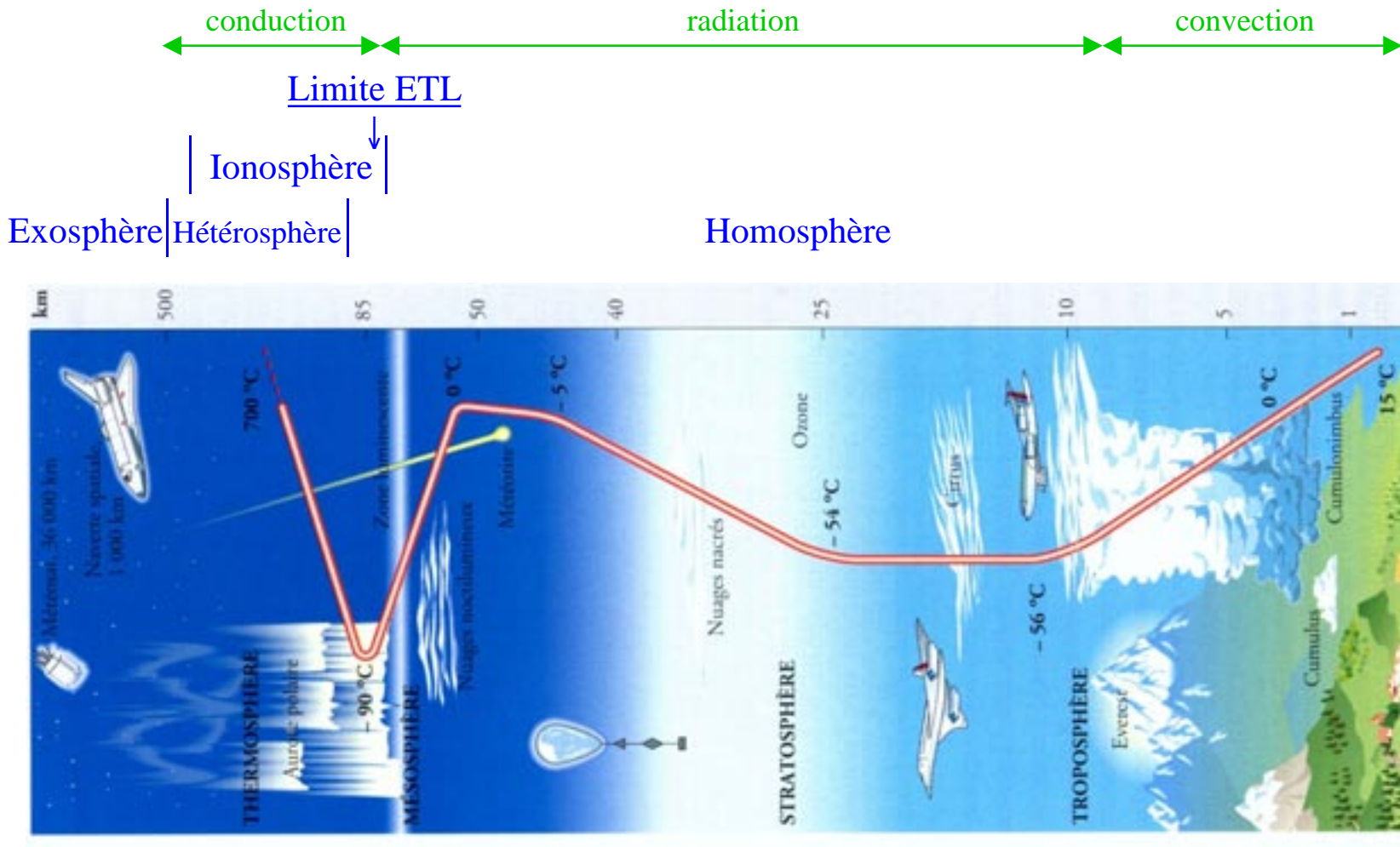
Exemple :

$H_2$	$2,5 \times 10^{-5} T^{0,75} \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$N_2, O_2$	$3,6 \times 10^{-6} T^{0,75} \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$



# Structure verticale d'une atmosphère

TERRE



Thermosphère

Mésopause

Mésosphère

Stratopause

Stratosphère

Tropopause

Troposphère