

Physique des atmosphères planétaires Relation avec l'habitabilité

Emmanuel Marcq

LATMOS, Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines

École Doctorale SMEMAG

21 janvier 2025

- Définition classique
 - **Stabilité de l'eau liquide à la surface d'une planète**
- Extensions naturelles
 - Autres solvants polaires
 - NH_3 , CH_3OH , etc.
 - Stabilité ailleurs qu'à la surface (atmosphères des géantes, océans souterrains, etc.)
 - **Mais** disponibilité matière organique et énergie plus difficile.
- Définitions locales
 - Temporelle** Stabilité à long terme
 - Spatiale** Planètes partiellement habitables ?

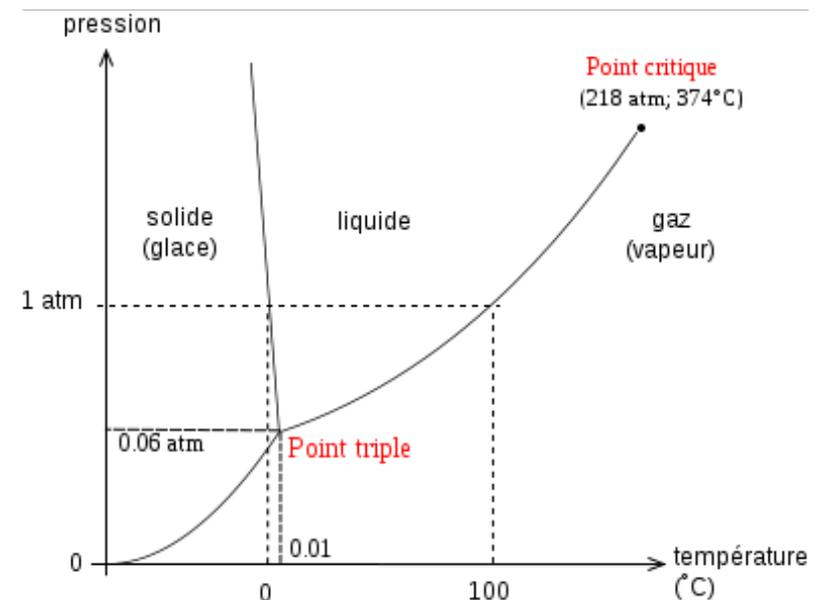


Diagramme des phases de l'eau

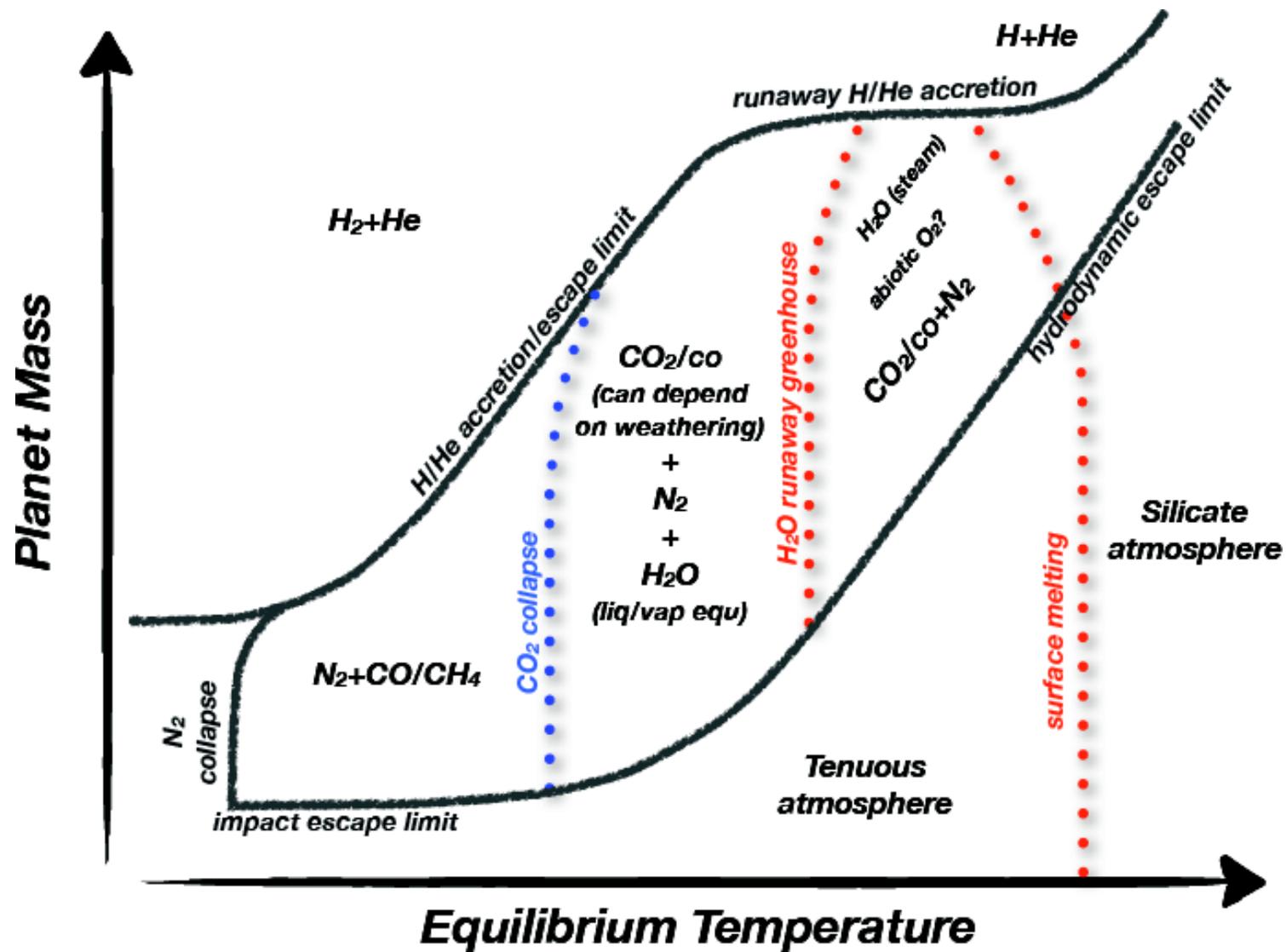


Figure: Diagramme de Forget-Leconte (2013)

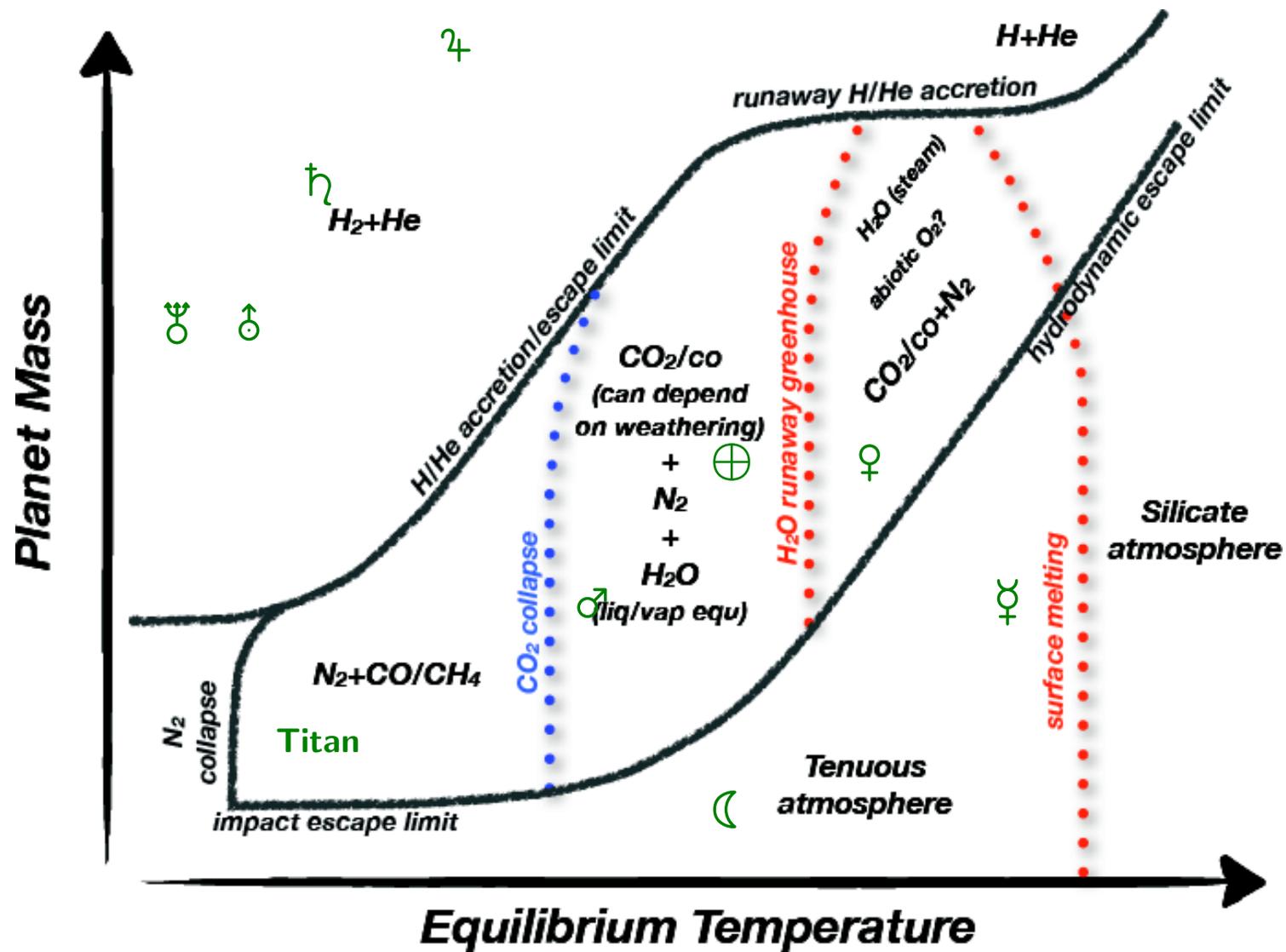
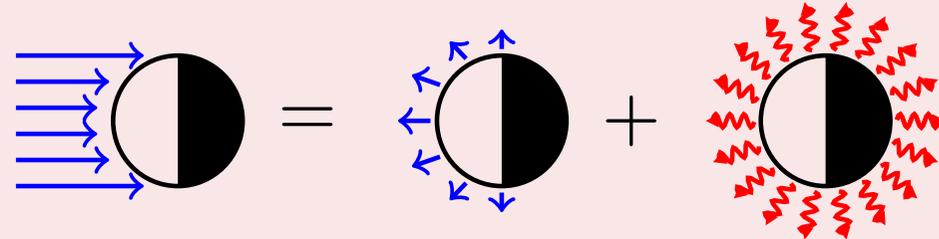


Figure: Diagramme de Forget-Leconte (2013)

Température d'équilibre T_{eq}

$$\pi R^2 F_{\odot} = \pi R^2 A_b F_{\odot} + 4\pi R^2 \sigma T_{eq}^4$$

$$T_{eq} = \left[\frac{(1-A_b) F_{\odot}}{4\sigma} \right]^{1/4}$$



A_b : albédo *bolométrique*

$$F_{\odot} = \sigma T_{\odot}^4 \left(\frac{R_{\odot}}{D} \right)^2 : \text{flux stellaire}$$

	♀	⊕	♂	Titan
F_{\odot} [W/m ²]	2613,9	1367,6	589,2	15
A_b	0,75	0,31	0,25	0,2
T_{eq} [K]	232	254	210	86

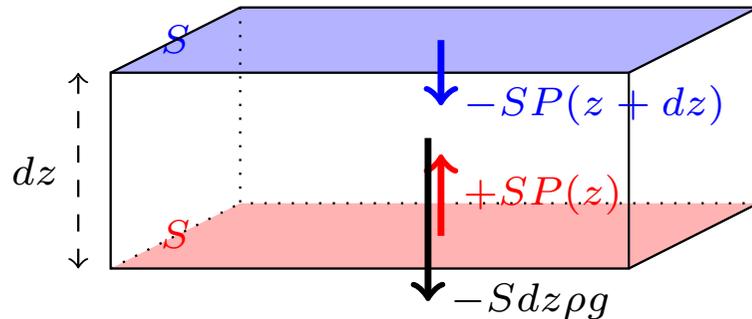
	♃	♄	♅	♆
F_{\odot} [W/m ²]	50,5	15	3,7	1,5
A_b	0,34	0,35	0,31	0,32
T_{eq} [K]	110	81	58	46

Température effective T_{eff}

- Température du corps noir qui rayonnerait la même énergie que la planète.
- Si l'on néglige les sources d'énergie interne : $T_{\text{eff}} \simeq T_{\text{eq}}$
- Sinon, on a $T_{\text{eff}} > T_{\text{eq}}$
 - planètes telluriques jeunes (flux géothermique)
 - géantes (contraction gravitationnelle)
 - loin de leur étoile (flux stellaire faible)

	T_{eq} [K]	T_{eff} [K]
♀	232	232
⊕	254	254
♂	210	210
Titan	86	86
♃	110	124
♄	81	95
♅	58	59
♆	46	59

- Approximation plan-parallèle



$$-dP - \rho g(z) dz = 0 \text{ et } \rho = \frac{MP}{RT},$$

$$\text{d'où } \frac{dP}{P} = -\frac{dz}{H(z)}$$

Échelle de hauteur

$$H(z) = \frac{RT(z)}{Mg} \text{ avec } P(z) = P_0 \exp \left[-\int_{z_0}^z \frac{dz}{H(z)} \right]$$

Si $T(z)$ uniforme, $P(z) = P(z_0) \exp \left(-\frac{z-z_0}{H} \right)$

	♀	⊕	♂	♃	♄	♅	♆	Titan	Triton	♁	♃
M [g/mol]	43,4	29,0	43,3	2,2	2,3	2,6	2,5	27	28	28	64
g^* [m/s ²]	8,9	9,8	3,7	24	10	9	11	1,35	0,8	0,62	1,8
T_{surf}^* [K]	735	288	214	165	135	76	72	94	38	42	110
H [km]	16	8,4	11	25	48	27	22	21	14	20	7,9

*: pour les géantes, g et T_{surf} sont considérés à $P = 1$ bar.

Vitesse thermique V_{th}

Vitesse d'une molécule atmosphérique (masse molaire M) d'énergie cinétique de translation $\frac{1}{2}mV_{th}^2 = \frac{3}{2}kT$ (milieu à l'équilibre thermique)

$$V_{th} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Vitesse d'échappement V_e

Vitesse d'une molécule permettant de se libérer de l'attraction de la planète de masse M_P et de rayon a depuis l'altitude h .

$$V_e = \sqrt{\frac{2GM_P}{a+h}}$$

	♀	⊕	♂	Titan	♃	♄	♅	♁
V_e [km/s]	10,3	11,2	5,0	2,6	57,6	23,3	4,3	2,4
$V_{th}(H)$ [km/s]	2,2	4,1	2,4	1,8	4,5	3,0	3,3	2,6

Exobase

Niveau auquel une molécule a une probabilité $1/e \approx 37\%$ de s'échapper de la planète sans subir de collisions.

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

$P_e = \frac{Mg}{N_a Q} = \frac{mg}{Q} \sim 10^{-11} \text{ bar}$ (telluriques) ; $\sim 10^{-12} \text{ bar}$ (Titan & géantes)

	♀	♁	♂	Titan	♃	♅	♁	♃
Exobase [km]	150 – 200	400 – 500	250	1300	2000	3500	6000	3000

Exosphère

$z > z_e$, libre parcours moyen $l > H_e$.

- Trajectoires balistiques d'énergie $E = E_c + E_p = \frac{mv^2}{2} - \frac{mgsr_s^2}{r}$
- Équilibre hydrostatique encore réalisé dans la partie basse avec $T = T_e : n(r,v) \propto \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT_e} + \frac{mgr_s^2}{kT_e r}\right)$
Statistique de Maxwell-Boltzmann dans l'espace des phases.
- P et T deviennent mal définis plus haut.

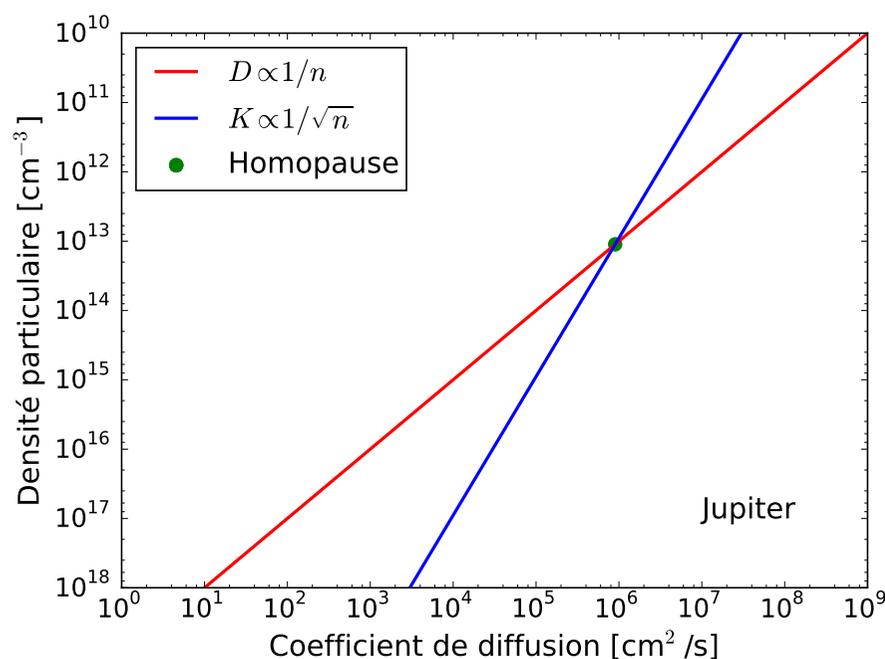
Diffusion moléculaire

- Chaque espèce i suit sa propre échelle de hauteur H_i
- Coefficient de diffusion $D_i \propto \frac{1}{n}$
- Temps caractéristique $\tau_D \approx \frac{H^2}{D}$

Diffusion turbulente

- Coefficient de diffusion K commun à toutes les espèces
- Dans la haute atmosphère, $K \propto \frac{1}{\sqrt{n}}$ (ondes de gravité)
- Temps caractéristique $\tau_K \approx \frac{H^2}{K}$

- $z < z_h$ Échelle de hauteur commune H : Homosphère de composition (majoritaire) uniforme.
- $z = z_h$ Homopause
- $z > z_h$ Équilibre diffusif, chaque espèce suit son échelle de hauteur : Hétérosphère



	z_h [km]	P_h [μbar]
♀	130	0,02
⊕	100	0,3
♂	130	0,0005
Titan	750	0,01
♃	450	1
♄	1000	0,01
♅	400	20
♆	750	0,05

Échappement thermique

- Négligeable si $\lambda = \left(\frac{V_e}{V_{th}}\right)^2 \gg 1$
- Flux de Jeans $\Phi_e = \frac{n_c}{2\sqrt{\pi}} V_{th} (1 + \lambda) e^{-\lambda}$
- Temps caractéristique $\tau_e = \frac{n_i H_i}{\Phi_e}$
- Important sur la Terre, Mars et Titan pour H₂, H, D

	♀	⊕	♂	Titan
λ_H	22	7	4	1,4
τ_e	2000 a	1 j	2 h	2 h
λ_{H_2}	44	14	8	2,9
τ_e	$3 \cdot 10^{12}$ a	1,5 a	2 j	5 h

Échappement non thermique

Processus	Exemples	
Échange de charge	$H + H^{+*} \rightarrow H^+ + H^+$	♁, ♀
	$O + H^{+*} \rightarrow O^+ + H^*$	
Recombinaison dissociative	$O_2^+ + e^- \rightarrow O^* + O^*$	♀, ♂, ♁, Titan (H ₂)
	$OH^+ + e^- \rightarrow O + H^*$	
Dissociation par impact	$N_2 + e^- \rightarrow N^* + N^* + e^-$	♂, Titan
Photodissociation	$O_2 + h\nu \rightarrow O^* + O^*$	
Réaction ion-neutre	$O^+ + H_2 \rightarrow OH^+ + H^*$	♁ (H, He)
Échappement d'ions	H^{+*}	

Flux limite

- Indépendamment du mécanisme, le flux d'échappement ne peut excéder le flux d'approvisionnement de l'exosphère.
- $\Phi_l \approx \frac{b_i q_i}{H}$ où b_i est le paramètre binaire de collision.

Facteur de fractionnement f

Soient deux isotopes 1 et 2 d'une même espèce ($m_1 < m_2$).

$$f = \frac{(dN_1/dt)/N_1}{(dN_2/dt)/N_2} \text{ où } N_1 \text{ et } N_2 \text{ sont les densités de colonne (\#/m}^2\text{)}.$$

- On a donc :

$$f = \frac{1/N_1 dN_1^{\text{exo}}/dt}{1/N_2 dN_2^{\text{exo}}/dt} = \frac{1/N_1^{\text{exo}} dN_1^{\text{exo}}/dt}{1/N_2^{\text{exo}} dN_2^{\text{exo}}/dt} \frac{N_1^{\text{exo}}/N_2^{\text{exo}}}{N_1/N_2} = (1 + y)(1 + x)$$

- $(1 + y) \geq 1$: représente le fractionnement dû à l'échappement.

- $(1 + x) = \exp \left[-\Delta z \left(\frac{1}{H_1} - \frac{1}{H_2} \right) \right] = \exp \left[\frac{\Delta z (M_2 - M_1) g}{RT} \right]$ où Δz est la différence d'altitude entre l'homopause et l'exobase :
fractionnement dû à l'équilibre diffusif.

- Exemples

$$\begin{aligned} \text{H/D} & y \approx 7 \text{ (Vénus)}, y \approx 2 \text{ (Mars)} \\ {}^{14}\text{N}/{}^{15}\text{N} & y \approx 0,6 ; x \approx 0,15 \text{ (Mars)} \\ {}^{16}\text{O}/{}^{18}\text{O} & x \approx 0,3 \text{ (Mars)} \end{aligned}$$

Évolution du rapport isotopique $R = N_1/N_2$

Sans source de matière : fractionnement *Rayleigh*

$$R(t)/R^0 = (N_2/N_2^0)^{f-1} = (N_1/N_1^0)^{(f-1)/f} = \exp [(1 - f)t/\tau_2]$$

- Si l'atmosphère est alimentée épisodiquement ou en continu (dégazage, flux météoritique), R/R^0 varie plus faiblement que par fractionnement Rayleigh.
 - Si l'approvisionnement est continu et le réservoir important de rapport isotopique R' , on a en **régime permanent** : $R = fR'$.
- Observations
 - ♀ $D/H = 150\oplus$. Or une source cométaire ($D/H \approx 2\oplus$) ne peut enrichir que d'un facteur $2f \approx 15$. Trace d'un réservoir primordial ?
 - ♂ $D/H = 6\oplus$: échappement de l'eau primordiale $> 90\%$.
 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 1,6\oplus$: la majeure partie du N_2 originel a disparu.
 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O} = 1\oplus$: un réservoir important de O (calottes de CO_2 ?) permet de compenser l'enrichissement.

Rayonnement solaire

- Absorbé par la surface, l'atmosphère, les nuages
- *Domaines* IR proche, visible, UV (en particulier Ly_{α})
- Flux UV solaire très variable en deçà de 150 nm

Milieu interstellaire

- Le flux Ly_{α} diffusé par le milieu interstellaire devient comparable au flux Ly_{α} solaire au niveau de Neptune.

Sources internes

- Contraction gravitationnelle
- Séparation de phase H/He (vers 1 – 3 Mbar) : ζ, η

	ζ	η	θ	ψ
$F_{\text{int}} [\text{W}/\text{m}^2]$	5,6	1,9	$0,04 \pm 0,05$	0,43
$F_{\text{int}}/F_{\odot}^{\text{abs}}$	0,67	0,79	$0,06 \pm 0,08$	1,61

Ionosphère

- Interactions avec vent solaire/magnétosphère
 - Précipitation d'électrons et d'ions piégés dans la magnétosphère (aurores)
 - Chauffage (effet Joule) dans l'ionosphère $\mathcal{P} = \vec{j} \cdot \vec{E}$ (\oplus : $0,14 \text{ W/m}^2$)
 - **Ionosphère** région partiellement ionisée de la haute atmosphère

- Forte photo-ionisation
- Taux de recombinaison faibles
- Pic de densité électronique très dépendant du cycle solaire, de la latitude, de l'heure

- $\text{O} + h\nu \rightarrow \text{O}^+ + e^-$ (\oplus)
- $\text{CO}_2 + h\nu \rightarrow \text{CO}_2^+ + e^-$ puis
 $\text{CO}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{CO}$ (\ominus, σ)
- $\text{H}_2 + h\nu \rightarrow \text{H}_2^+ + e^-$ puis
 $\text{H}_2^+ + \text{H} \rightarrow \text{H}^+ + \text{H}_2$ ou
 $\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^+ + \text{H}$ (Géantes)
- $\text{N}_2 + h\nu \rightarrow \text{N}_2^+ + e^-$ (Titan)

	\ominus	\oplus	σ	Titan	τ	η	δ	\varnothing
z_{iono} [km]	140	300	130	1000	~ 1000	2 – 3000	700 – 1500	~ 1400

Volcanisme et dégazage

♀ SO₂ ?

Io SO₂, S₂

⊕ H₂O (≈ 97%), CO₂ (2%), SO₂ (0,1%), N₂, Cl, H₂, H₂S, ...

Évaporation, sublimation

⊕ H₂O(*l,s*) ♂ CO₂(*s*) Titan CH₄(*l*) ♃, Triton N₂(*s*), CO(*s*), CH₄(*s*)

Activité biologique

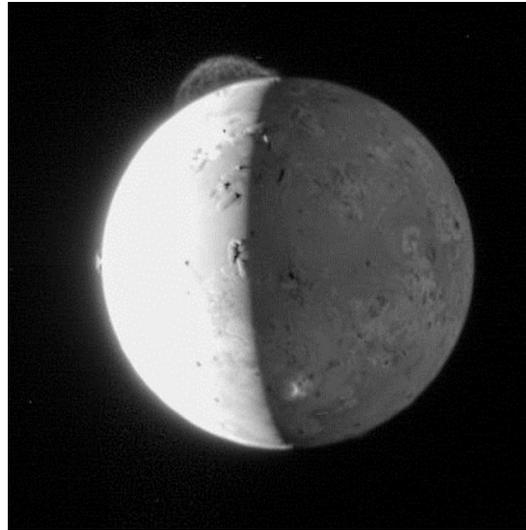
⊕ O₂, CH₄, CFCs, CO₂, N₂O ?

♂ CH₄ ??

Apports externes

Météorites Sources de composés oxygénés (H₂O, CO, CO₂) pour Titan et les géantes (Saturne : 50 L/s de H₂O)

Comètes Sources de nouveaux composés par chimie de choc (SL9 sur Jupiter : CO, HCN et CS encore détectables 10 ans plus tard)



Volcanisme sur Io



Éruption du Pinatubo



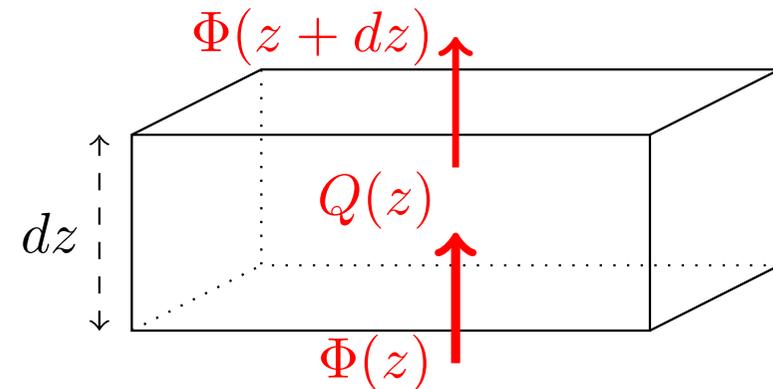
Lacs sur Titan et sur Terre



Impacts de SL9 sur Jupiter

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q(z) - \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

En régime permanent et sans source locale de chauffage \Rightarrow
 $\Phi(z)$ constant : flux conservatif.



$\Phi(z)$ peut se décomposer en $\Phi(z) = \Phi_r(z) + \Phi_{\text{conv}}(z) + \Phi_c(z)$:

Flux radiatif Φ_r

Flux convectif Φ_{conv}

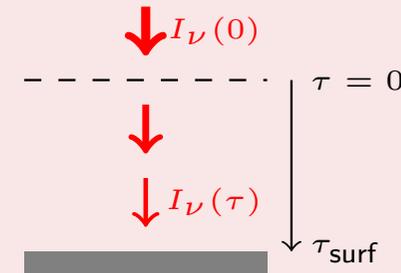
Flux conductif Φ_c

Transfert radiatif en plan-parallèle

Profondeur optique d'extinction (absorption et diffusion) τ_ν

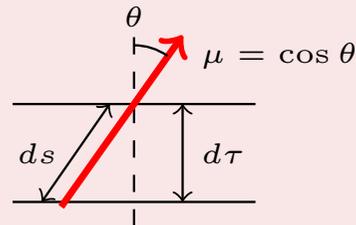
Pour chaque fréquence ν , τ_ν est défini par l'équation de Beer-Lambert (sans terme source) :

$$I_\nu(\tau) = I_\nu(0) \exp(-\tau_\nu) \Leftrightarrow \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu$$



Équation fondamentale

$$\mu \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - S_\nu$$



S_ν : fonction source
 $\mu > 0$ vers le haut ;
 τ_ν croît vers le bas

Moments de l'intensité

$$J = \frac{1}{4\pi} \iint I(\theta, \varphi) d\Omega$$

$$F = \iint I(\theta, \varphi) \cos(\theta) d\Omega$$

Approximation à deux faisceaux

$$I(\mu > 0) = I^+ ; I(\mu < 0) = I^-$$

$$J = \frac{I^+ + I^-}{2} ; F = \pi(I^+ - I^-)$$

Effet de serre

- *Hypothèses* : Atmosphère **grise en IR**, totalement **transparente** dans le visible, en **équilibre radiatif** dans l'approximation à deux faisceaux.

Profil thermique radiatif

$$T^4(\tau_{\text{IR}}) = \frac{T_{\text{eff}}^4}{2} \left(\frac{3}{2}\tau_{\text{IR}} + 1 \right)$$

$$T_{\text{surf}}^4 = T_{\text{eff}}^4 \left(1 + \frac{3}{4}\tau_{\text{surf}} \right)$$

- *Points importants*

- $T_{\text{surf}} > T_{\text{eff}}$ Effet de serre
- $T_{\text{surf}} - T(\tau_{\text{surf}}) > 0$ Discontinuité de température à la surface (source d'instabilité convective).
- $dT/d\tau > 0$ Profil thermique décroissant avec l'altitude

	♀	⊕	♂	Titan
T_{eff} (K)	231	255	210	82
T_{surf} (K)	733	288	215	94*
τ_{surf}	≈ 133	≈ 0,8	≈ 0,15	≈ 2

(* : on devrait avoir $T_{\text{surf}} = 103$ K, mais il y a anti-effet de serre dû aux aérosols.)

Effet de serre divergent

- En présence d'une espèce condensable et absorbante dans l'IR thermique, **équilibre radiatif impossible au-delà d'une valeur seuil de F_{\odot} absorbé.**

H_2O , CO_2 ♀, ⊕, ♂

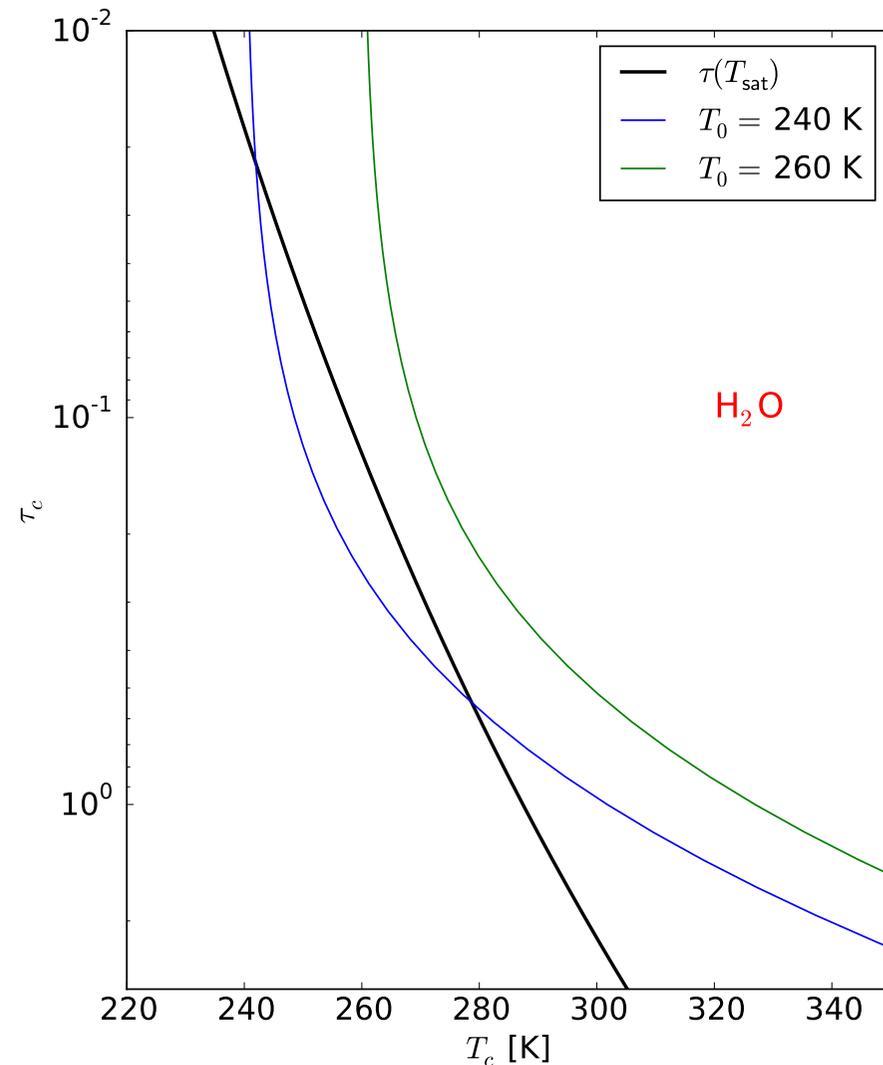
CH_4 Titan

- Pour H_2O et $T_{top} > 250$ K, impossibilité de saturer la basse atmosphère (convective).

- Avec un réservoir de surface (océan), évaporation complète

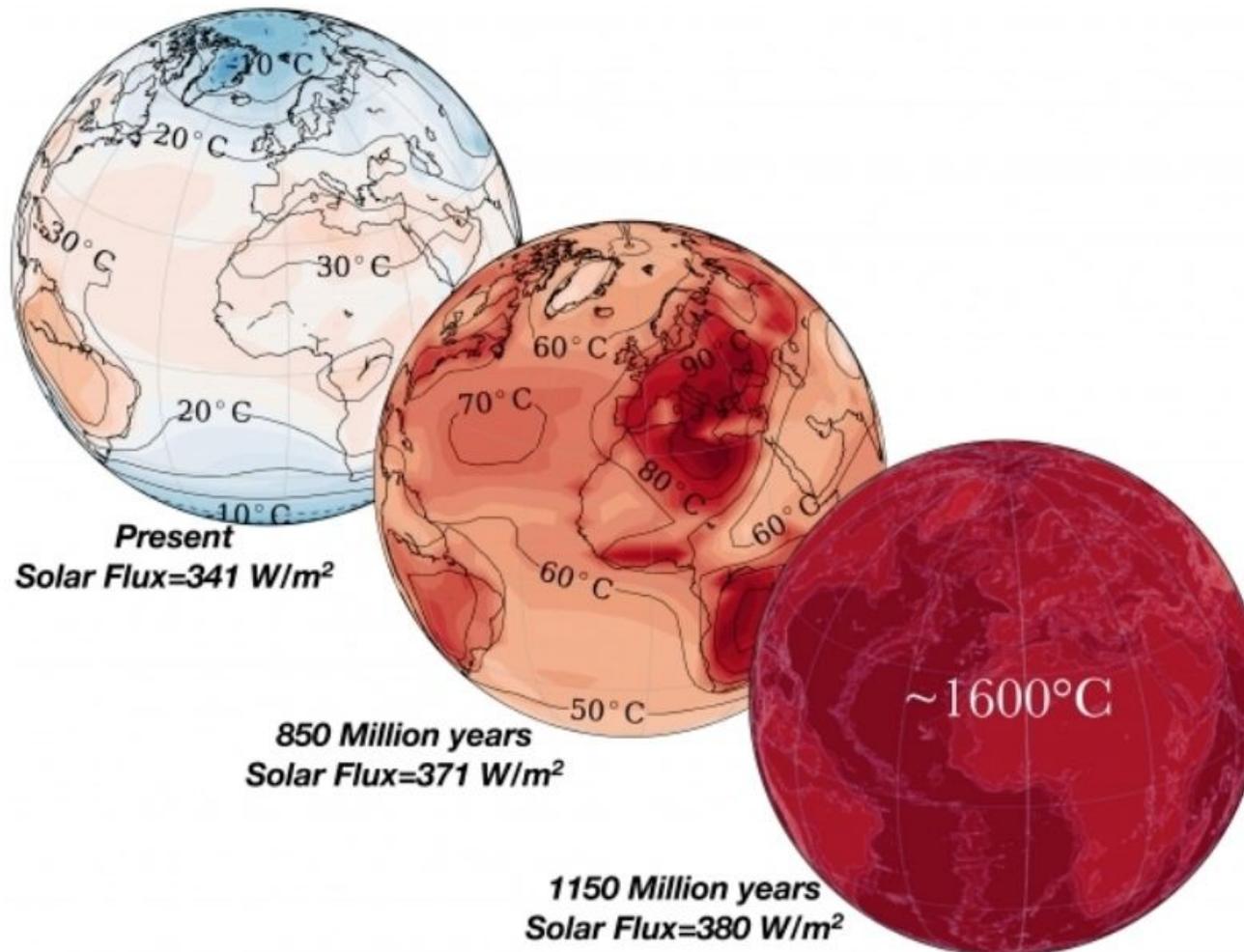
♀ $T_0 = 253$ K avec $A_b = 0,3$

⊕ dans $\sim 10^9$ ans ?



Effet de serre divergent (H_2O)

- En 3D, seuil autour de $T_0 = 220 \text{ K}$
 - Dépend du type spectral de l'étoile, de la taille de la planète, etc.



Stratosphère

Définition Anomalie thermique positive due à l'absorption partielle du rayonnement solaire incident par l'atmosphère.

Condition d'existence sur un intervalle vertical donné

$$\sqrt{1 - \varpi} \Delta\tau_{SW} > \Delta\tau_{IR}$$

τ_{SW} : profondeur optique visible et UV

ϖ : albédo de simple diffusion

$\varpi = 0$ pas de diffusion, extinction = absorption seule

$\varpi = 1$ pas d'absorption, extinction = diffusion seule

♀ , ♂ Pas de stratosphère ($\tau_{IR} \gg \tau_{SW}$ pour CO_2)

⊕ Stratosphère (τ_{SW} de $\text{O}_3 \gg \tau_{IR}$ de CO_2)

Titan Stratosphère (τ_{SW} de CH_4 et aérosols $\gg \tau_{IR}$ de CH_4)

Géantes Stratosphères dues à CH_4 (absorbant visible et IR proche, peu émetteur en IR thermique)

Au-dessus, **mésosphère** jusqu'à la limite de l'ETL.

Temps radiatif

- Temps de résorption radiative t_{rad} d'une anomalie de température ΔT par rapport au profil d'équilibre : $\frac{\partial \Delta T}{\partial t} = -\frac{\Delta T}{t_{\text{rad}}}$

$$t_{\text{rad}} = \frac{C_p P}{16g\sigma T^3} f(\tau_{\text{IR}}) \text{ avec } f(x) \approx \left(\sqrt{3x} + \sqrt{2/x} \right)^2$$

- Ordres de grandeur

♀ $t_{\text{rad}} \sim 30$ ans (surface), plus court (quelques jours) au niveau des nuages

⊕ $t_{\text{rad}} \sim 1$ mois : cycles saisonniers marqués, diurnes faibles (~ 5 K)

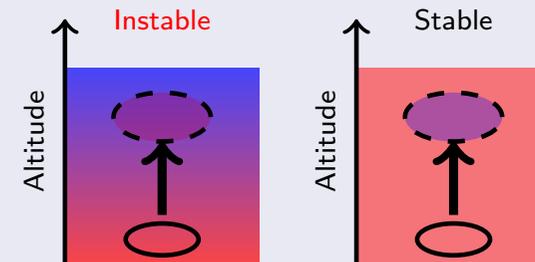
♂ $t_{\text{rad}} \sim 1$ jour : cycles diurnes et saisonniers très marqués.

♃, ♃, ♂, ♃, Titan $t_{\text{rad}} \propto \frac{1}{T^3}$ très longs. Pas de contrastes diurnes, seulement saisonniers dans la stratosphère.

Gradients adiabatiques

Gradient adiabatique sec Γ

- $\Gamma = \frac{-g}{C_p} < 0$ est le gradient limite en-deça duquel la convection se développe jusqu'à rétablir un $\frac{dT}{dz} = \Gamma$ moins raide.



Gradient adiabatique humide Γ'

- En présence d'une espèce condensable, la condensation libère de l'énergie supplémentaire (H_2O : \oplus ; CH_4 : $\hat{\circ}$, Ψ , Titan)
- $\Gamma' = \frac{\Gamma}{1 + (L/C_p)dw/dT} > \Gamma$
 L : chaleur latente massique de condensation
 w : fraction massique de l'espèce gazeuse condensable

	♀	⊕	♂	Titan	♃	♅	♁	♃
$ \Gamma $ [K/km]	10,5	9,8	4,5	1,3	2	1,7	0,7	0,9
$ \Gamma' $ [K/km]	/	5	/	0,5	/	/	?	?

Sur Terre, on observe en moyenne $-6,5$ K/km.

Profil radiatif-convectif

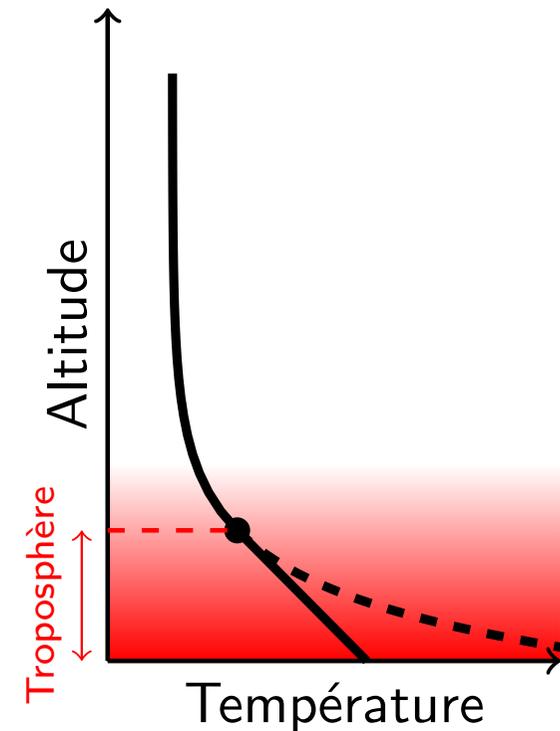
L'équilibre radiatif tend à imposer un gradient dT/dz trop pentu quand τ_{IR} devient trop important

- Dès que $\tau_{IR} \gtrsim 2/3$
- ⊕, ♂ Convection due en partie à la discontinuité de température entre surface et atmosphère.

Troposphère

Couche atmosphérique où $dT/dz \simeq \Gamma$

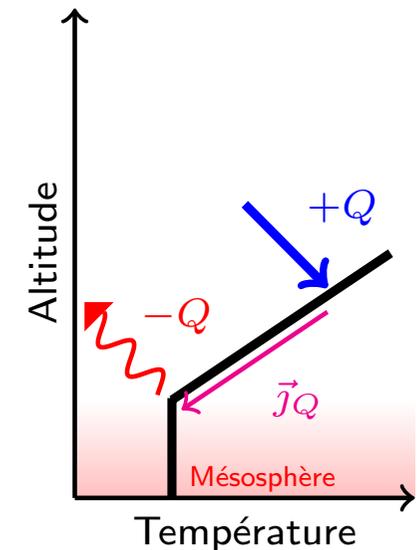
- Transport d'énergie principalement **convectif**
- $F_{\text{conv}} \neq 0$
- $F_{\text{conv}} + F_{\text{rad}}$ constant selon z .



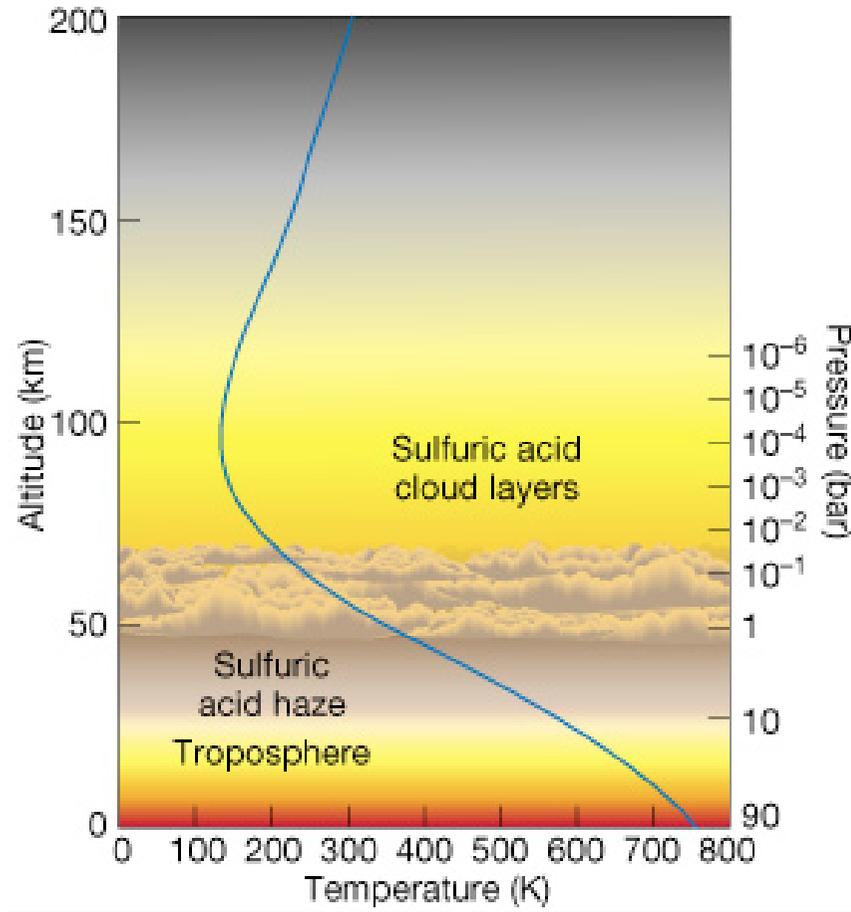
Thermosphère

- $dT/dz \gg 0$ dû à une source de chaleur à haute altitude
- La chaleur est transportée par **conduction** jusqu'à la mésosphère où elle peut être rayonnée.
- En régime permanent, $K_c \frac{\partial T}{\partial z} = \int_z^\infty q(z) dz = Q(z)$.
- En supposant une source à haute altitude $+Q$ à $z = z_1$ et un puits mésosphérique (radiatif) $-Q$ à $z = z_0$ avec une conductivité thermique de la forme $K_c = AT^s$, on obtient

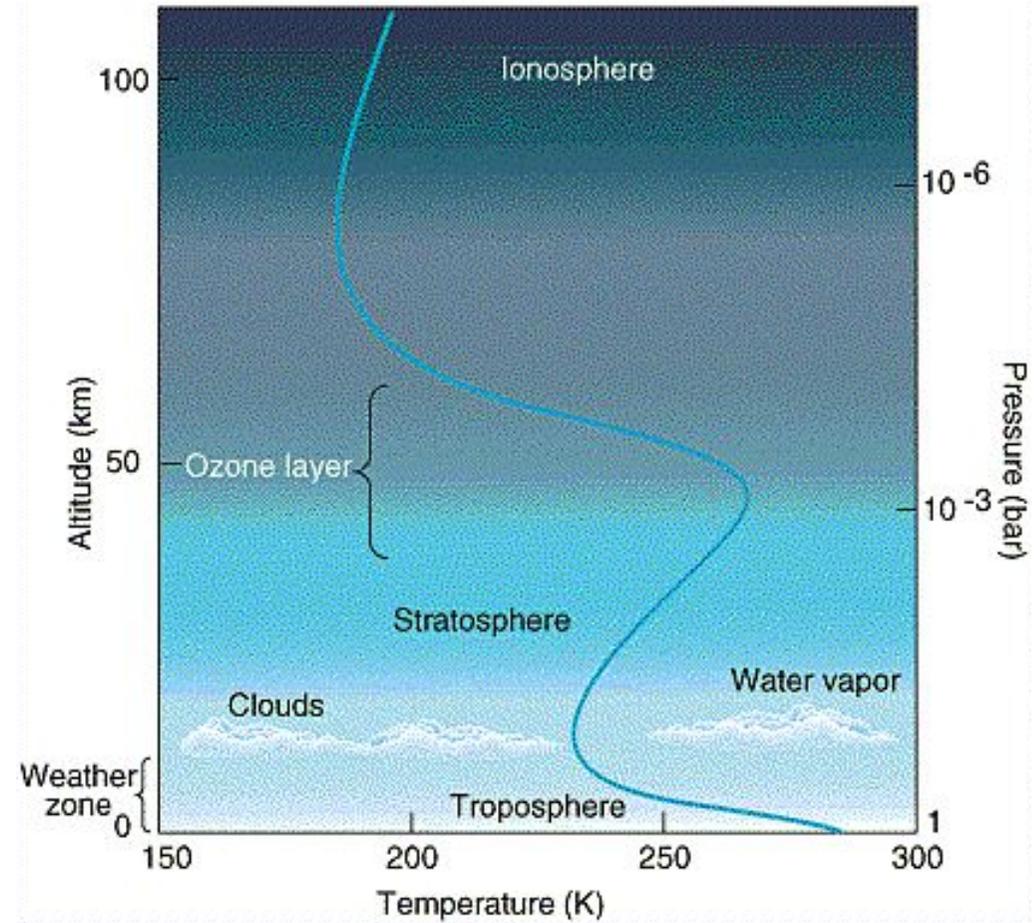
$$T(z)^{s+1} - T_0^{s+1} = \frac{(s+1)Q}{A} (z - z_0)$$
- On peut alors estimer la température $T_1 = T(z_1)$.



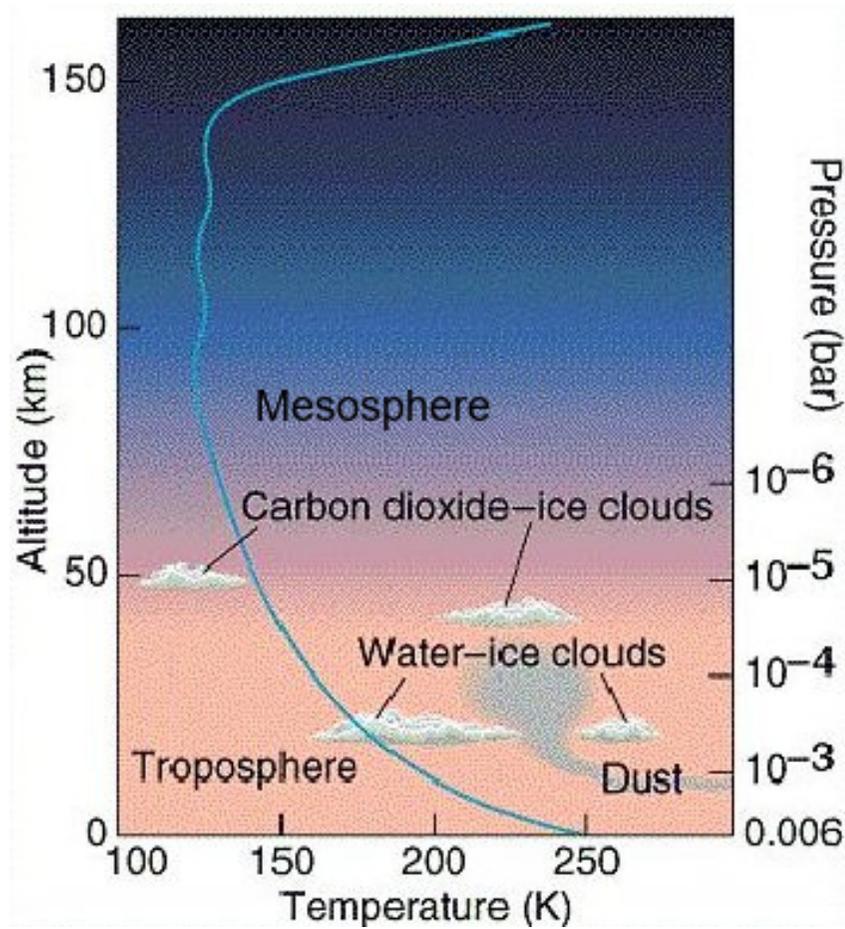
	T_1 (K)	
♀	110 – 300	♀, ♂ $\text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2$ photolysé, mais CO_2 bon radiateur même hors ETL
⊕	1000	
♂	200	⊕ Photodissociation UV de O_2 , peu de CO_2 : thermosphère chaude !
Titan	~ 180	Titan Absorption EUV, mais bon refroidissement (HCN).
♃	1000	
♅	420	
♁	800	♃, ♅, ♁, ♃ Effet Joule, précipitations d'ions et e^- , dissipation d'ondes de gravité.
♃	750	



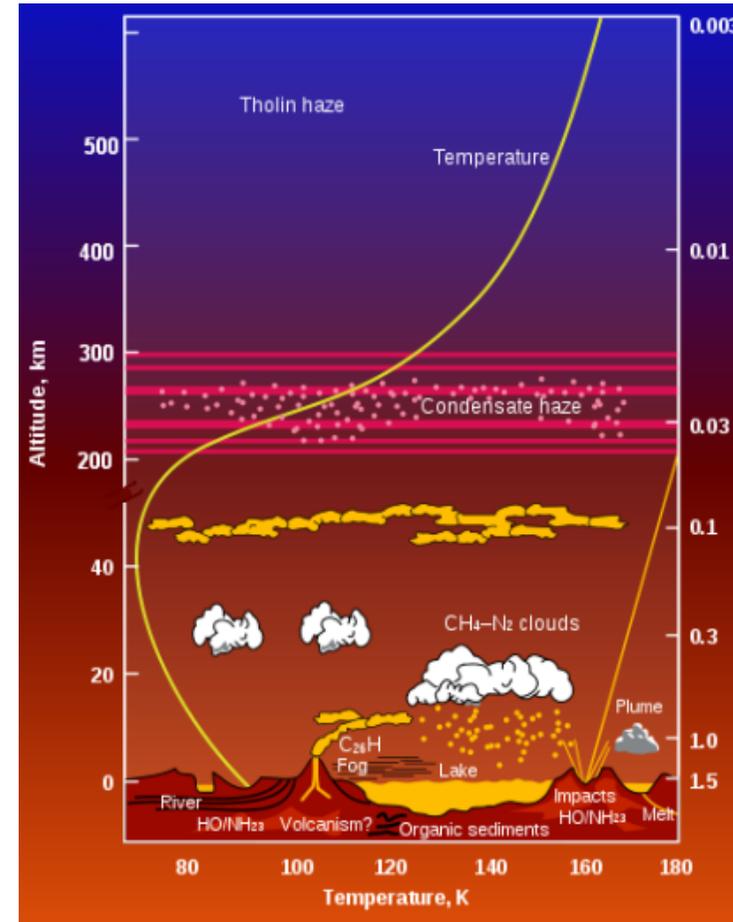
♀



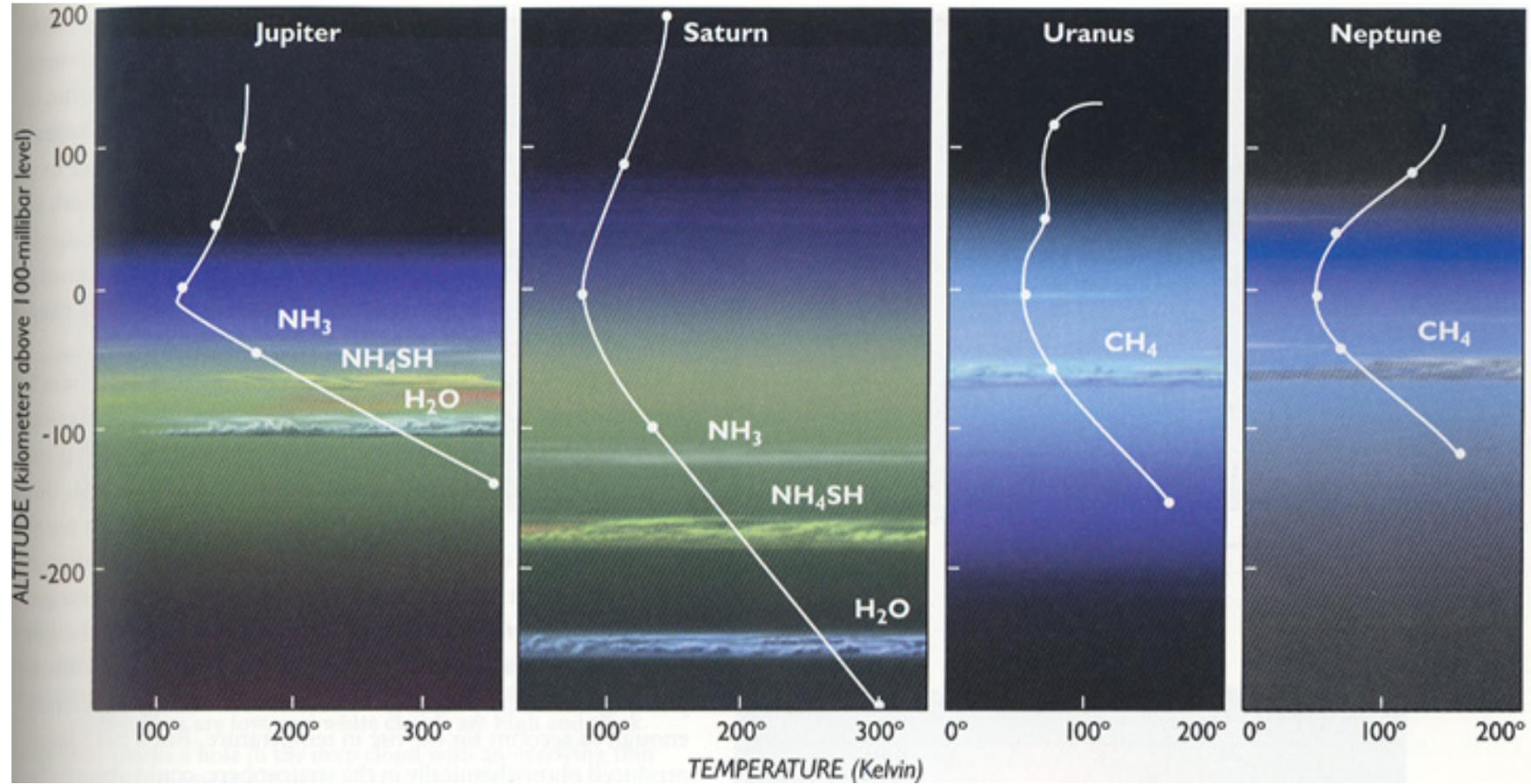
⊕



♂



Titan



- L'équilibre radiatif local $F_{\odot}^{\text{net}} = \sigma T_{\text{eff}}^4$ prédit de fortes variations de température avec la latitude.
- Les variations observées sont bien plus faibles.

La dynamique réduit les contrastes engendrés par le forçage radiatif.

- Les différences de température dues aux variations d'ensoleillement constituent le moteur de la circulation atmosphérique (transfert de chaleur des régions chaudes vers les régions froides).

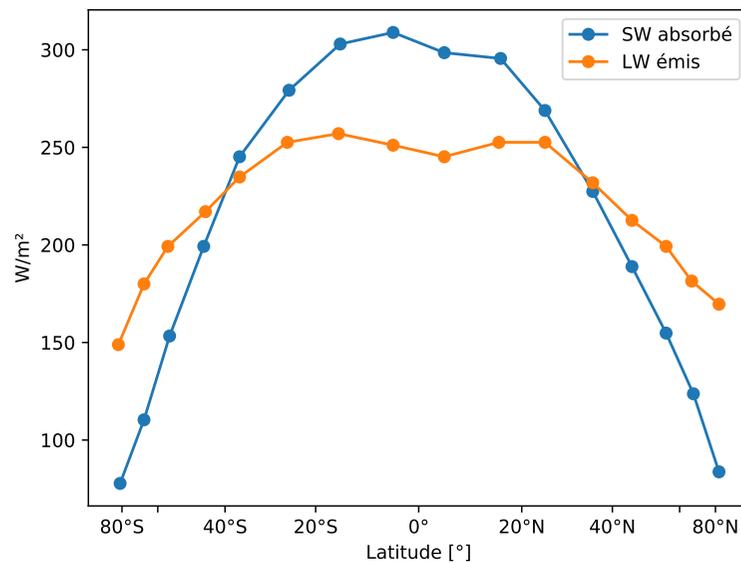


Figure: Terre

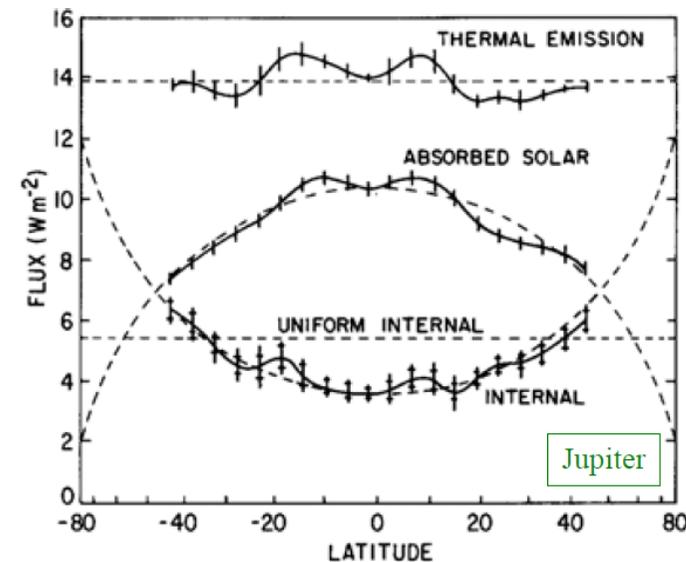


Figure: Jupiter

Coordonnées sphériques locales

$$\vec{V}(x,y,z) = \begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases} \quad \begin{array}{l} x : \text{Est-Ouest} ; y : \text{Nord-Sud} ; z : \text{Haut-Bas} \\ u : \text{vent zonal} ; v : \text{vent méridien} \end{array}$$

Approximations courantes

- Incompressibilité horizontale (approximation Boussinesq)
- Échelle des phénomènes $L \gg H \Rightarrow w \ll u, v$

Équation du vent gradient

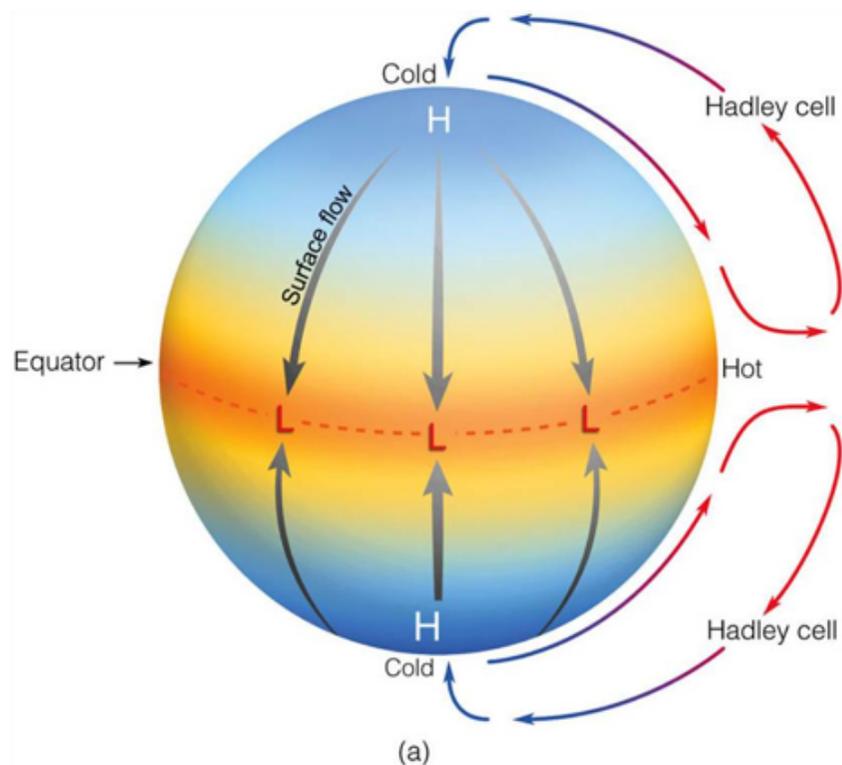
$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = f\vec{V} \wedge \vec{k} - \frac{\vec{\nabla}_{(x,y)}P}{\rho} + \frac{\vec{F}}{\rho}$$

Paramètre de Coriolis $f = 2\Omega \sin \lambda$, $\Omega = 2\pi/T_{\text{rot}}$, λ : latitude

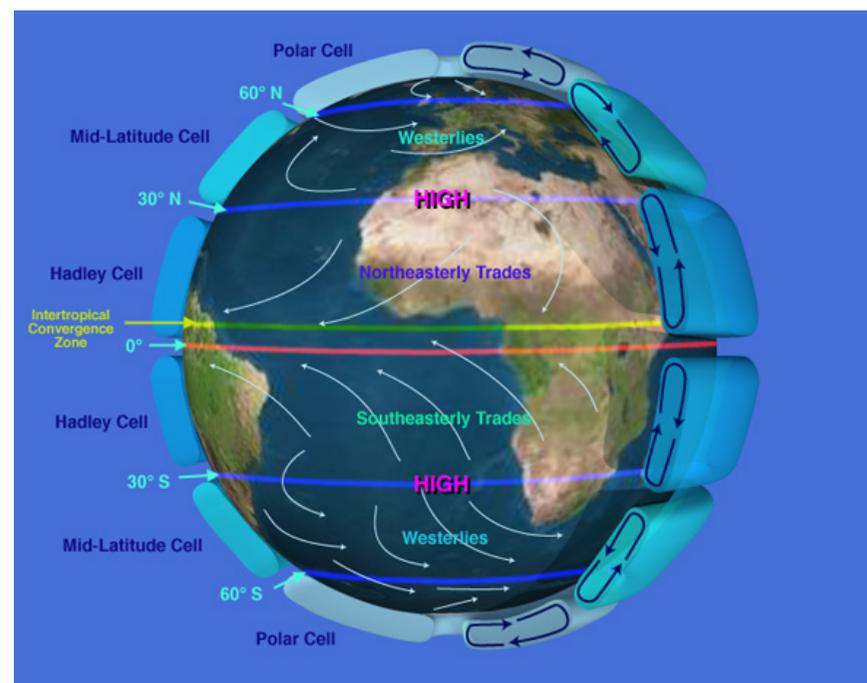
Friction \vec{F} , souvent paramétrée par $\vec{F}/\rho = -\vec{V}/\tau_F$
(friction Rayleigh)

Cellules de Hadley

- Cellules de convection (forçage solaire)
- Extension en latitude limitée par les forces de Coriolis (provoquent alizés et vents d'ouest)



© 2007 Thomson Higher Education

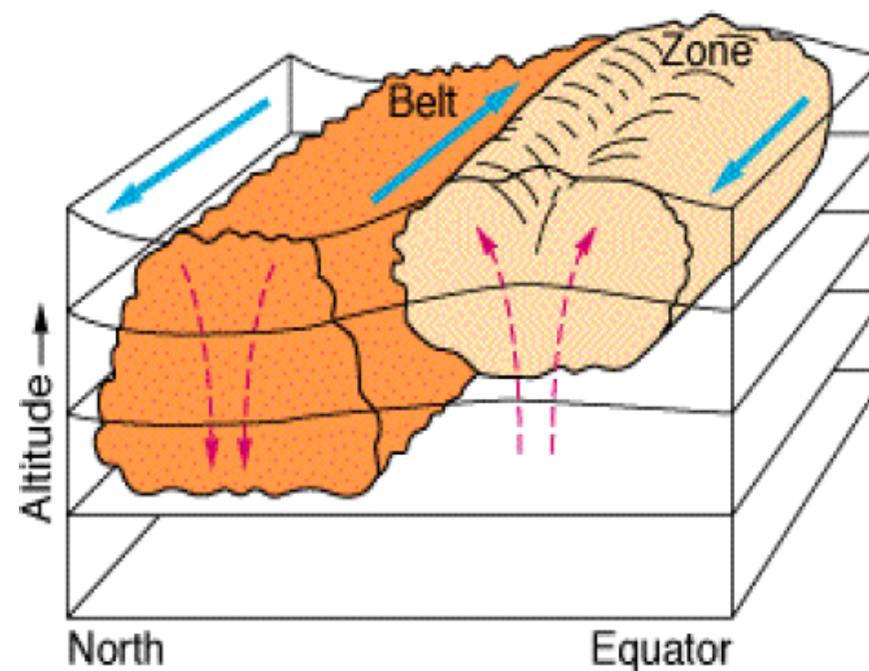
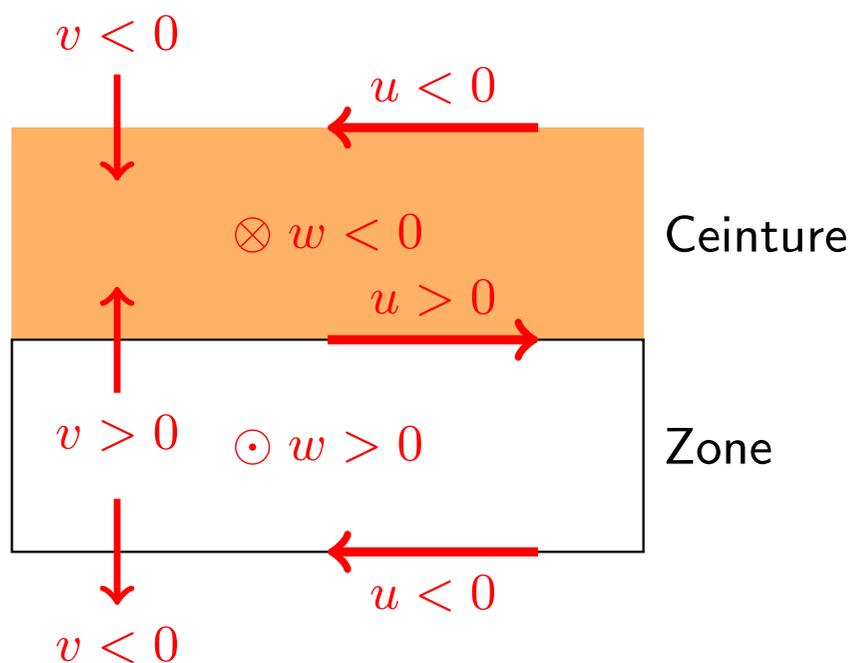


Géantes : Ceintures & Zones

Ceintures $w < 0$, évaporation des nuages. Foncé

Zones $w > 0$, condensation des nuages. Clair.

- La circulation se referme dans les couches profondes.
- Elle induit des vents méridiens par continuité du flux.



Équilibre entre Coriolis et $\vec{\nabla}P$ ($\frac{D\vec{V}}{Dt} \approx \vec{0}$ à grand rayon de courbure)

$$\rho f u = \partial P / \partial y$$

$$\rho f v = -\partial P / \partial x$$

- Validité

$$\begin{array}{l} \text{♂, ⊕} \quad |\lambda| > 10^\circ, \quad z > 1 \text{ km} \\ \text{♀, ♁, ♂, ♀} \quad |\lambda| > 5^\circ \\ \text{♀, Titan} \quad \text{Invalide !} \end{array}$$

- Vent parallèle aux isobares

- Sens dépendant de l'hémisphère !

- Déviation par friction

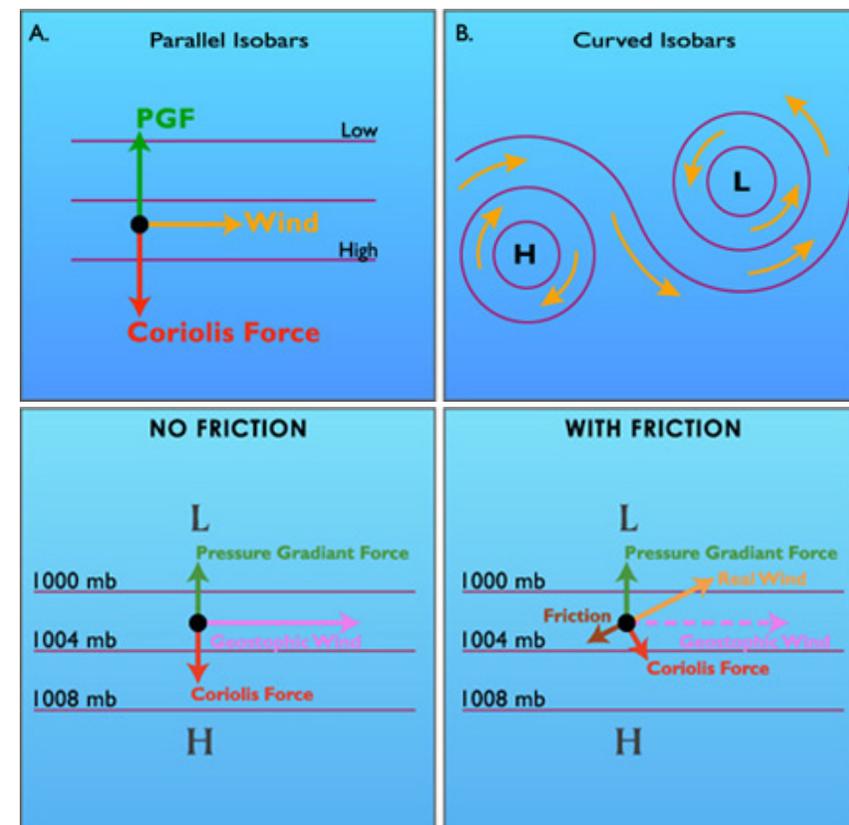
⇒ Apparition de vents verticaux par continuité

- Friction près de la surface pour les telluriques

$$\Rightarrow L : w > 0 ; H : w < 0$$

- Friction dans la haute troposphère pour les géantes

$$\Rightarrow \text{Sens opposé !}$$



Jet streams

Équation du vent thermique

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{g}{fT} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_P$$

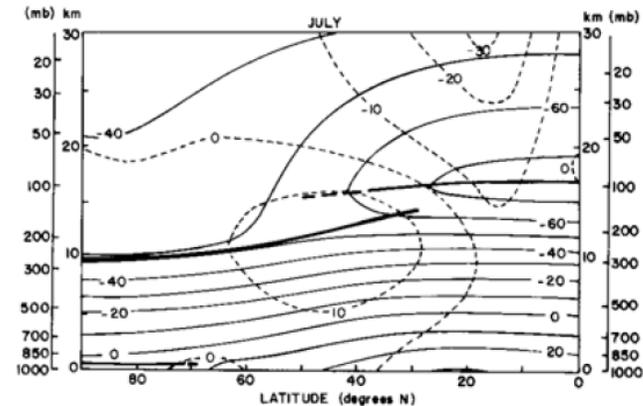
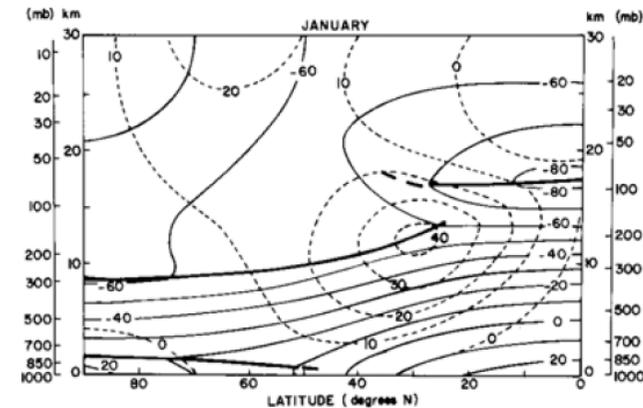
$$\frac{\partial v}{\partial z} = +\frac{g}{fT} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_P$$

- Origine

- $\nabla_{(x,y)} T \Rightarrow \nabla_{(x,y)} H \Rightarrow$
 $\nabla_{(x,y)} P \Rightarrow$ vent géostrophique

- Cisaillement vertical du vent sur les planètes en rotation rapide

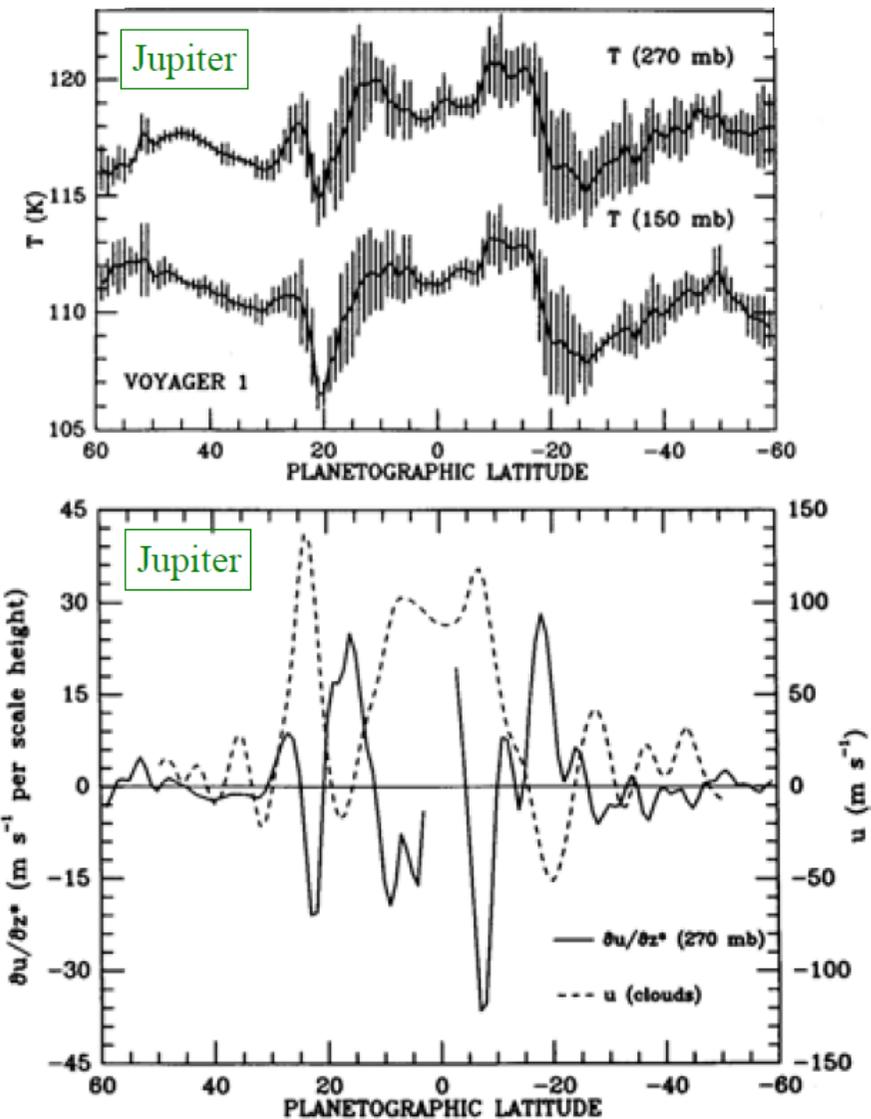
- Variations saisonnières de T en latitude \Rightarrow variations saisonnières de la circulation zonale.



Jets streams terrestres en janvier et juillet (hémisphère nord)

Circulation zonale des géantes

- Les vents zonaux décroissent avec l'altitude
 - Constaté par *Galileo* jusqu'à environ 2 bar.
- Friction Rayleigh importante dans la troposphère supérieure



Équation cyclostrophique

$$\rho V^2 / r = \partial P / \partial r$$

- Équilibre entre $\vec{\nabla}P$ et l'accélération centripète en négligeant la force de Coriolis.
- Validité
 - à fort rayon de courbure ;
 - près de l'équateur ;
 - pour la circulation générale de Vénus et Titan.
- Le régime (cyclostrophique ou géostrophique) est fonction du nombre de Rossby

Nombre de Rossby

$$R_o = \frac{V}{fL}$$

$R_o \ll 1$: géostrophique

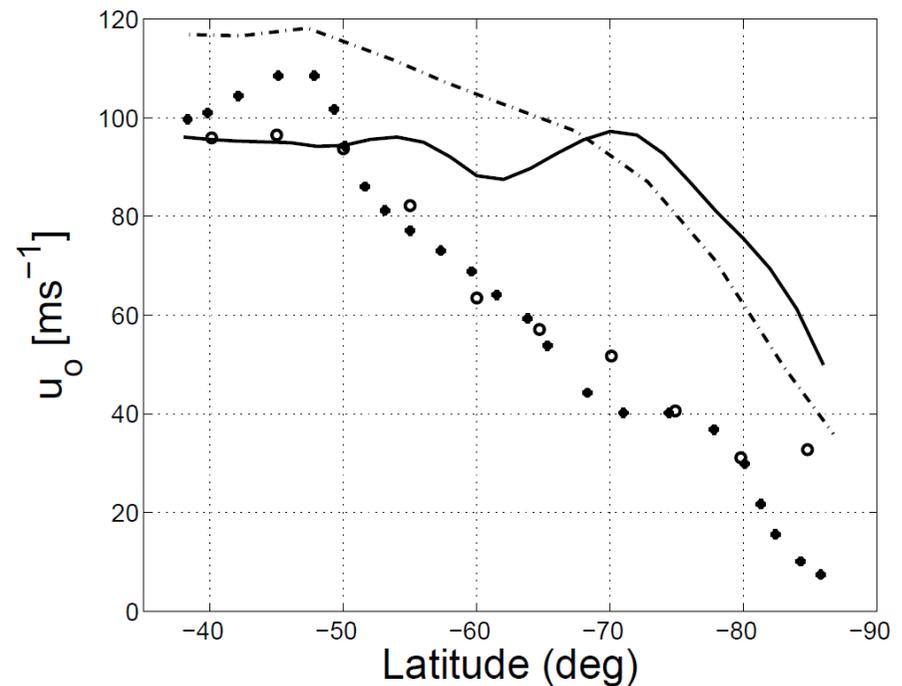
$R_o \gg 1$: cyclostrophique

- Rotation de sens indifférent autour d'un centre dépressionnaire.

Vent thermique cyclostrophique (φ , Titan)

$$2u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{g}{T \tan \lambda} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_P$$

- $|u|$ croît avec z si T décroît vers les pôles.
- Lié au phénomène de **super rotation** (fort vent zonal permanent).



Simulations numériques de l'ensemble du système climatique

Cœur dynamique (universel)

- Résolution des équations hydrodynamiques sur une grille spatiale ou par harmoniques sphériques
- Division verticale en couches selon z ou P

Physique (spécifique)

- Calcul dans une cellule de la physique spécifique à cette atmosphère
 - Transfert radiatif, couplages avec surface, condensation/nucléation, mouvements sous-grille (turbulence, convection, frottement avec surface ou ondes de gravité), etc.

