

# Physique des atmosphères telluriques

## I

### Généralités

Emmanuel Marcq

LATMOS, Université Paris-Saclay

EN2984 – 2024-2025

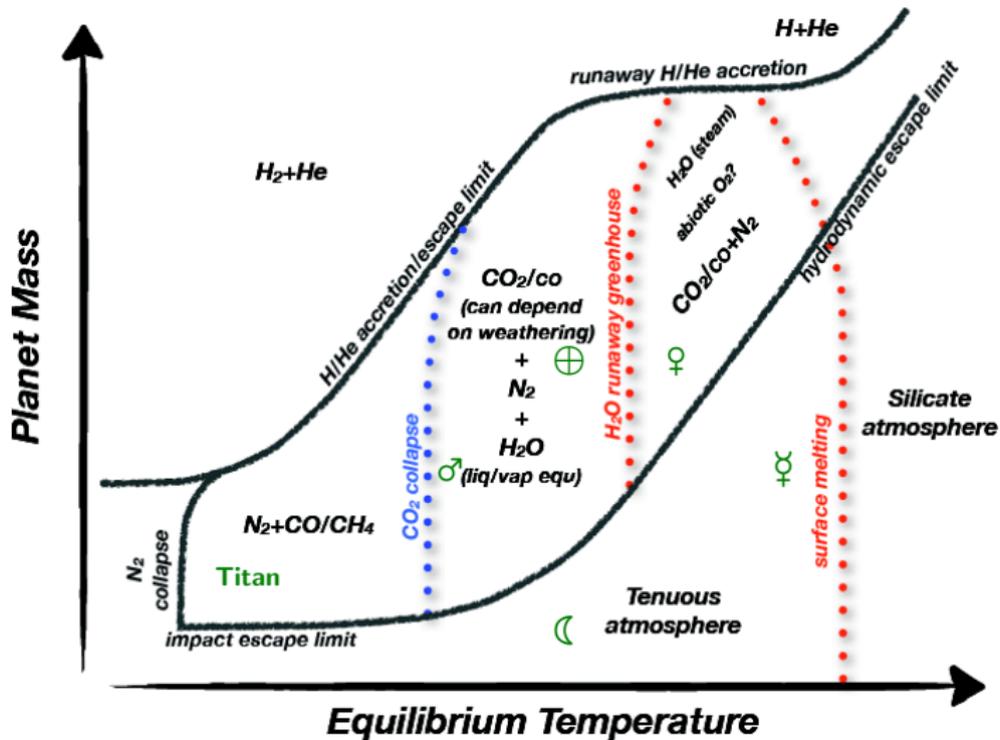


Figure – Diagramme de Forget-Leconte (2013)

## Lois de Képler

- 1 Orbites : **ellipses** de demi-grand axe  $a$  et d'excentricité  $e$  ( $e = 0$  : cercle)  
Corps central de masse  $M$  au foyer
- 2 Aires égales balayées en temps égaux
- 3 **Période**  $T$  telle que  $a^3/T^2 = \mathcal{G}M/4\pi^2$

## Rotation synchrone (verrouillage par effet de marée)

**Origine** Forces de marées exercée par le corps central sur la planète/satellite.

**Conséquence**  $T_{\text{rot}} = T$  : l'objet montre toujours la même face au corps central

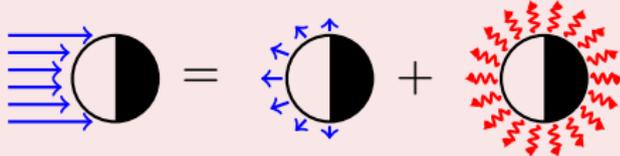
- exemple : Lune – Terre

**Condition**  $a < a_{\text{lock}}$

## 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

$$F_{\odot} = \sigma T_{\odot}^4 \left( \frac{R_{\odot}}{D} \right)^2 : \text{flux stellaire reçu à la distance } D \text{ de l'étoile}$$

$$\Rightarrow T_{eq} = T_{\odot} (1 - A_b)^{1/4} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2D}}$$

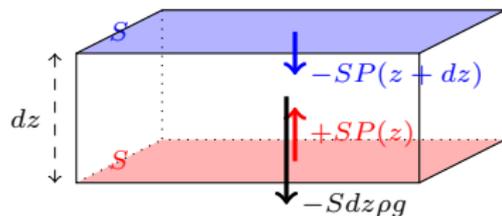
	♀	⊕	♂	Titan
$D$ [UA]	0,72	1	1,52	9,55
$F_{\odot}$ [ $W/m^2$ ]	2613,9	1367,6	589,2	15
$A_b$	0,75	0,31	0,25	0,2
$T_{eq}$ [K]	232	254	210	86

## Température efficace $T_{\text{eff}}$

- 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)

	$T_{\text{eq}}$ [K]	$T_{\text{eff}}$ [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,  $P(z) = P(z_0) \exp \left( -\frac{z-z_0}{H} \right) = P_{\text{surf}} \exp \left( -\frac{z}{H} \right)$

	♀	⊕	♂	Titan	Triton	♁	♁
$M$ [g/mol]	43,4	29,0	43,3	27	28	28	64
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	8,9	9,8	3,7	1,35	0,8	~ 0,7	1,8
$T_{\text{surf}}$ [K]	735	288	214	94	38	~ 40	110
$H$ [km]	16	8,4	11	21	14	~ 18	7,9

## Vitesse thermique $V_{th}$

Vitesse d'une molécule atmosphérique (masse molaire  $M$ ) d'énergie cinétique de translation  $\frac{3}{2}kT$  (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	♀	Io	♃
$V_e$ [km/s]	10,3	11,2	5,0	2,6	4,3	2,6	2,4
$V_{th}(H)$ [km/s]	2,2	4,1	2,4	1,8	3,3	1,8	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 ( $Q \sim 3 \times 10^{-15} \text{cm}^2$ )

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

	♀	⊕	♂	Titan
Exobase [km]	150 – 200	400 – 500	250	1300

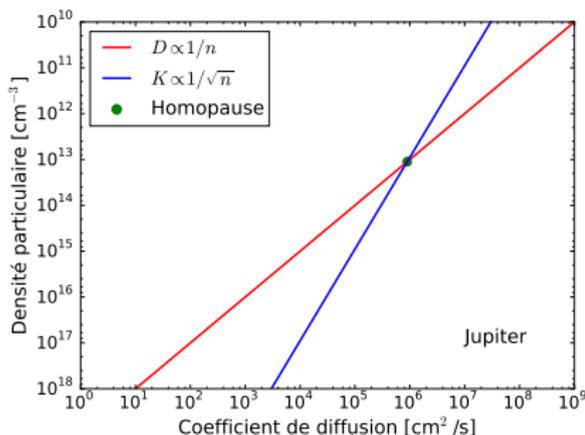
## Exosphère

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

- Les particules suivent des trajectoires balistiques (« orbites ») : ellipses, paraboles, hyperboles
- Équilibre hydrostatique encore réalisé dans la partie basse, mais  $P$  et  $T$  deviennent mal définis plus haut.

## Homopause d'altitude $z = z_h$

- $z < z_h$  Coefficient de diffusion turbulente  $K > D_i$  : échelle de hauteur  $H$  commune à toutes les espèces : **homosphère** de composition (majoritaire) uniforme.
- $z > z_h$  Coefficient de diffusion moléculaire  $D_i > K$  : équilibre diffusif, chaque espèce  $i$  suit sa propre échelle de hauteur : **hétérosphère**



	$z_h$ [km]	$P_h$ [ $\mu\text{bar}$ ]
♀	130	0,02
⊕	100	0,3
♂	130	0,0005
Titan	750	0,01

## Échappement thermique (flux de Jeans)

- Négligeable si  $V_e \gg V_{th}$
- $\oplus$ ,  $\sigma$ , Titan :  $H_2$ , H, D
- Vénus : négligeable (exosphère froide et gravité forte)

## Échappement non thermique

- Processus variés : échanges de charge, recombinaison dissociative, dissociation par impact, réaction ion-neutre, échappement d'ions, ...
- Complexe à calculer, mais deux limites strictes
  - Énergie limité par le flux X/UV reçu de la part de l'étoile
  - Flux limité par l'approvisionnement de l'exosphère (via diffusion moléculaire à l'exobase).

## Facteur de fractionnement $f$

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

$f = \frac{(dN_1/dt)/N_1}{(dN_2/dt)/N_2}$  où  $N_1$  et  $N_2$  sont les densités de colonne.  $f > 1$  car :

- isotope léger plus rapide  $\Rightarrow$  s'échappe plus facilement ;
- isotope léger surreprésenté dans l'exosphère (située au-dessus de l'homopause).

## Évolution du rapport isotopique $R = N_1/N_2$

- Sans source (fractionnement Rayleigh) :  $R(t)/R^0 = \exp [(1 - f)t/\tau_2]$
- En régime permanent (compensation par un réservoir de rapport isotopique  $R'$ ) :  $R = R'/f$

## Observations

- ♀ D/H =  $150 \oplus$ . En régime permanent (source cométaire  $R' = 2 \oplus$ ), D/H  $\rightarrow 15 \oplus$  : trace d'un réservoir primordial ?
- ♂ D/H =  $6 \oplus$ , ;  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 1,6 \oplus$  : échappement de la majorité de  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{N}_2$ , mais  $^{16}\text{O}/^{18}\text{O} = 1 \oplus$  : réservoir de O (calottes de  $\text{CO}_2$  ?) compensant l'échappement.

## Bilan d'enthalpie sur une couche verticale

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

En régime permanent et sans source locale de chauffage  $\Rightarrow$

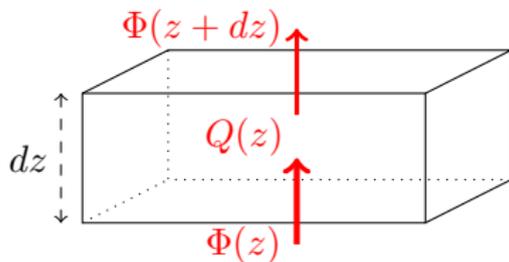
$\Phi(z)$  constant : flux conservatif.

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

Flux radiatif  $\Phi_r$

Flux convectif  $\Phi_{\text{conv}}$

Flux conductif  $\Phi_c$



# Effet de serre

**Hypothèses** Atmosphère **grise en IR** thermique, où la profondeur optique  $\tau_{IR}$  est comprise entre 0 (espace) et  $\tau_{surf}$ , totalement **transparente** pour la lumière stellaire, en **équilibre radiatif** dans l'**approximation à deux faisceaux**.

## Profil thermique radiatif

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

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

## Points importants

$T_{surf} > T_{eff}$  Effet de serre

$T_{surf} - T(\tau_{surf}) > 0$  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*
$\tau_{surf}$	≈ 133	≈ 0,8	≈ 0,15	≈ 2

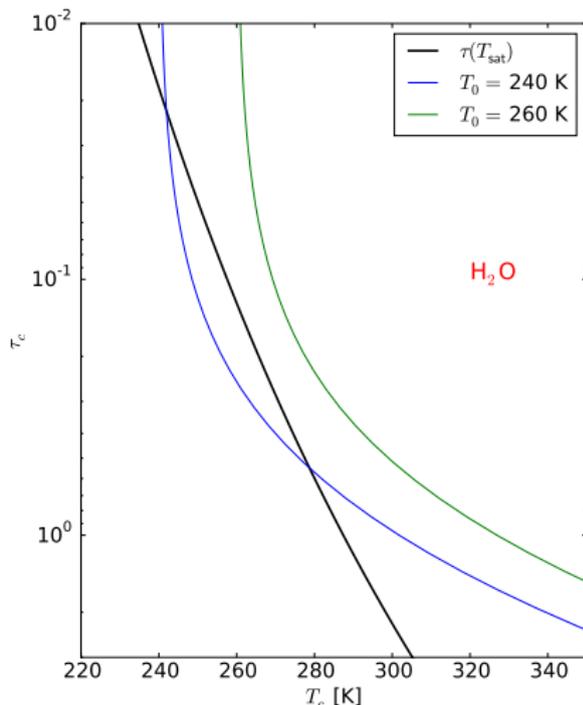
(\* : on devrait avoir  $T_{surf} = 103$  K, mais il y a anti-effet de serre dû aux aérosols.)

## 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.**

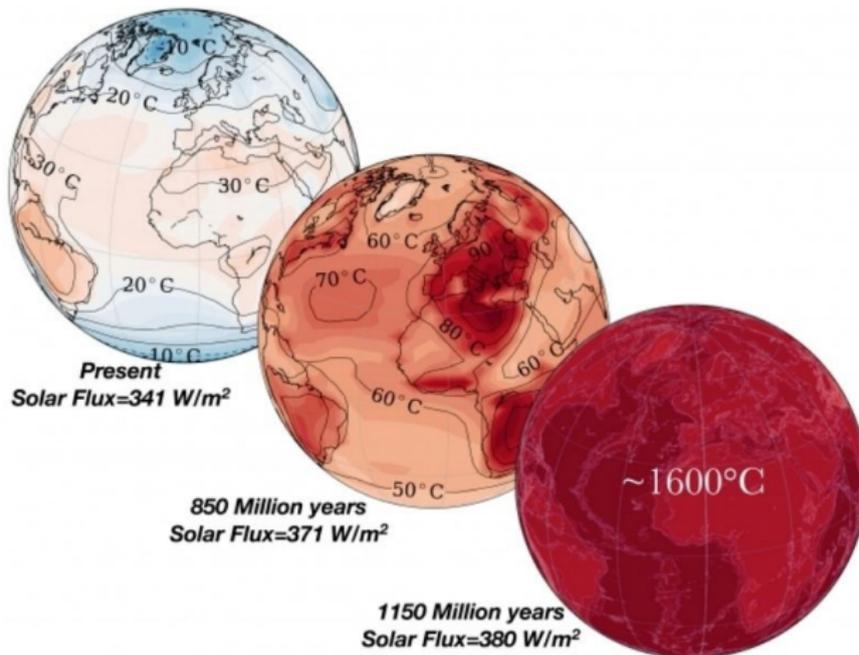


- Pour  $\text{H}_2\text{O}$  et  $T_{\text{top}} > 250 \text{ K}$ , impossibilité de saturer la basse atmosphère (convective).
  - Avec un réservoir de surface (océan), évaporation complète
    - ♀  $T_0 = 253 \text{ K}$  avec  $A_b = 0,3$
    - ⊕ dans  $\sim 10^9$  ans?



## Effet de serre divergent

- 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

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

$\tau_{SW}$  : profondeur optique visible et UV

$\varpi$  : 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  $\text{CO}_2$ )

⊕ Stratosphère ( $\tau_{SW}$  de  $\text{O}_3 \gg \tau_{IR}$  de  $\text{CO}_2$ )

**Titan** Stratosphère ( $\tau_{SW}$  de  $\text{CH}_4$  et aérosols  $\gg \tau_{IR}$  de  $\text{CH}_4$ )

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

# Temps radiatif

- Temps de résorption radiative  $t_{\text{rad}}$  d'une anomalie de température  $\Delta T$  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

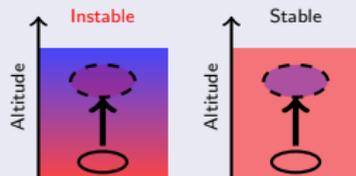
- ♀  $t_{\text{rad}} \sim 30$  ans (surface), plus court (quelques jours) au niveau des nuages
- ⊕  $t_{\text{rad}} \sim 1$  mois : cycles saisonniers marqués, diurnes faibles ( $\sim 5$  K)
- ♂  $t_{\text{rad}} \sim 1$  jour : cycles diurnes et saisonniers très marqués.

**Titan**  $t_{\text{rad}} \propto \frac{1}{T^3}$  très long ( $\sim 500$  ans). Pas de contrastes diurnes, seulement saisonniers dans la stratosphère.

# Gradients adiabatiques

## Gradient adiabatique sec $\Gamma$

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



## Gradient adiabatique humide $\Gamma'$

- En présence d'une espèce condensable, la condensation libère de l'énergie supplémentaire ( $\text{H}_2\text{O}$  :  $\oplus$ ;  $\text{CH}_4$  : 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
$ \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  $\tau_{IR}$  devient trop important

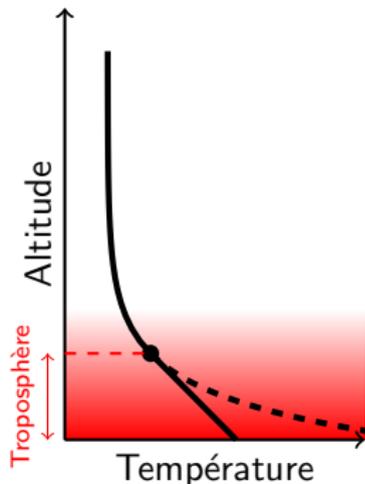
- Dès que  $\tau_{IR} \gtrsim 2/3$

⊕, ♂ Convection due en partie à la discontinuité de température entre surface et atmosphère.

### Troposphère

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

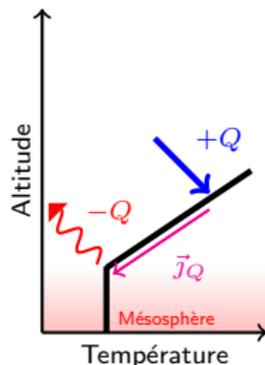
- Transport d'énergie principalement **convectif**
- $F_{\text{conv}} \neq 0$
- $F_{\text{conv}} + F_{\text{rad}}$  constant selon  $z$ .



# 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
⊕	1000
♂	200
Titan	~ 180

♀, ♂  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2$  photolysé, mais  $\text{CO}_2$  bon radiateur même hors ETL

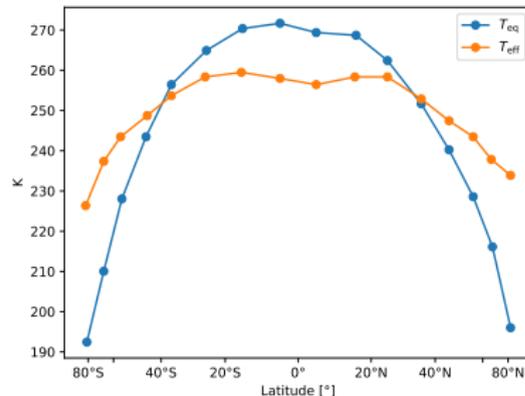
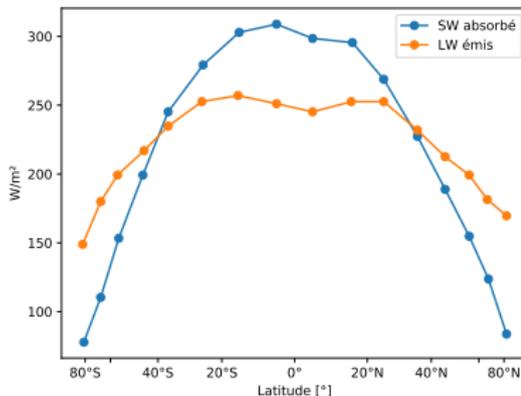
⊕ Photodissociation UV de  $\text{O}_2$ , peu de  $\text{CO}_2$  : thermosphère chaude !

**Titan** Absorption EUV, mais bon refroidissement (HCN).

- L'équilibre radiatif local  $F_{\text{net}}^{\text{net}} = \sigma T_{\text{eff}}^4$  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).



### Bilan radiatif terrestre

## Coordonnées sphériques locales

$$\vec{V}(x,y,z) = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

$x$  : Est-Ouest ;  $y$  : Nord-Sud ;  $z$  : Haut-Bas  
 $u$  : vent zonal ;  $v$  : vent méridien

## Approximations courantes

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

## Équation du vent gradient

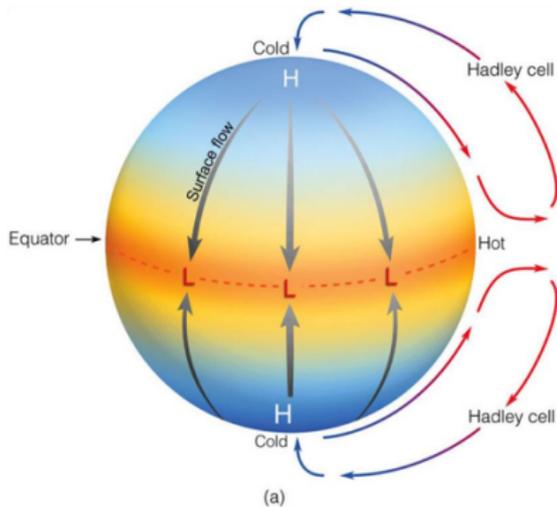
$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = f\vec{V} \wedge \vec{k} - \frac{\vec{\nabla}_{(x,y)}P}{\rho} + \frac{\vec{F}}{\rho}$$

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

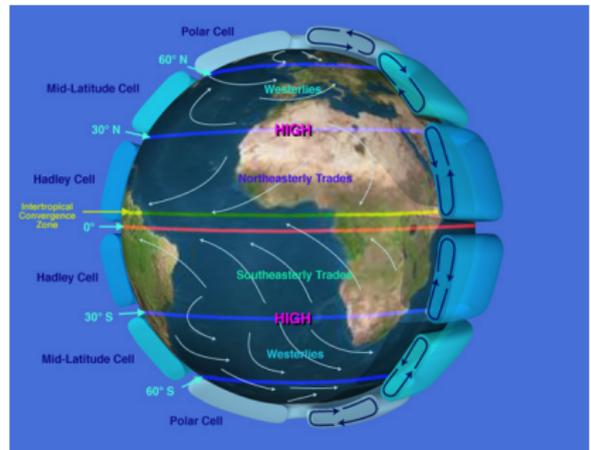
**Friction**  $\vec{F}$ , souvent paramétrée par  $\vec{F} = -\vec{V}/\tau_F$  (Friction Rayleigh)

## 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



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

♂, ⊕  $|\lambda| > 10^\circ$ ,  $z > 1$  km  
 ♀, Titan Invalide!

- Vent parallèle aux isobares

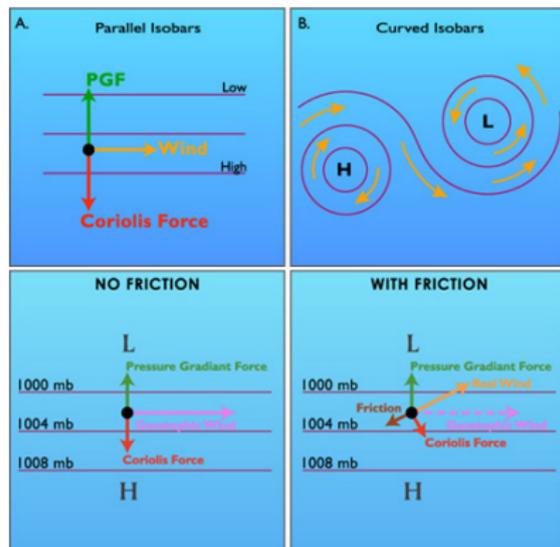
- Sens dépendant de l'hémisphère!

- Déviation par friction

⇒ Apparition de vents verticaux par continuité

- Friction près de la surface pour les planètes telluriques

⇒ L :  $w > 0$ ; H :  $w < 0$



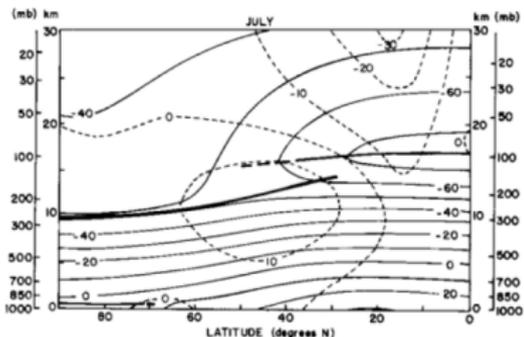
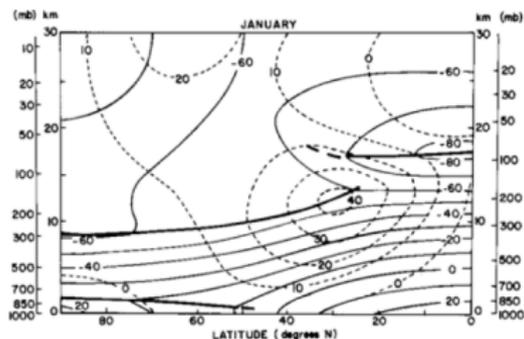
# Jet streams

## 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)*

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

## Vent thermique cyclostrophique (♀, Titan)

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

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

