(1) Chap 4

processus interaction ray^t $\leftrightarrow$ matière

Atmosphère

(1) Emission thermique $L(\lambda, \vec{\Omega}) = \varepsilon(\lambda, \vec{\Omega})\, B(\lambda, T)$

émittance — C.N.

(2) Absorption

- gaz atmosphériques (souvent les minoritaires)
- particules (aérosols et nuages)

(1) et (2)
échanges énergie
entre radiative
et interne
$\Rightarrow$ chgt de λ

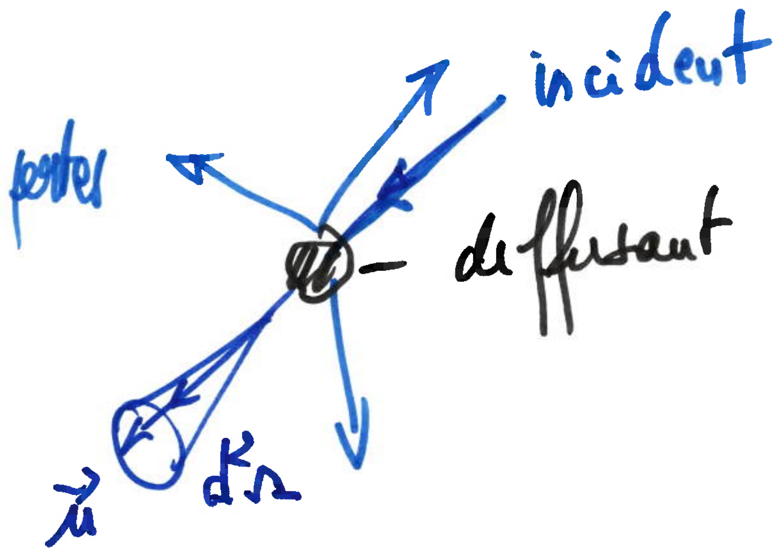
(3) Diffusion

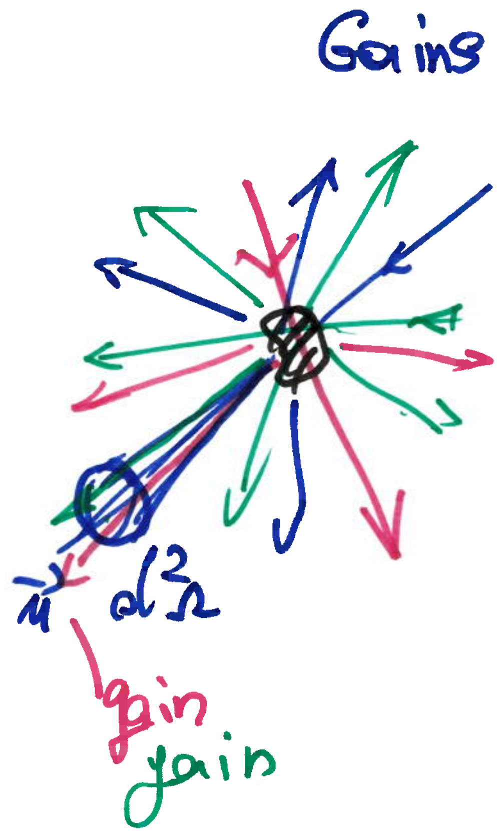
- gaz atmosphère (majoritaires)
- particules (aérosols et nuages)

à λ fixé
redistribution
angulaire du ray^t

+ Source solaire
+ Surface terrestre — émission, absorption, réflexion

② Gains et pertes par diffusion





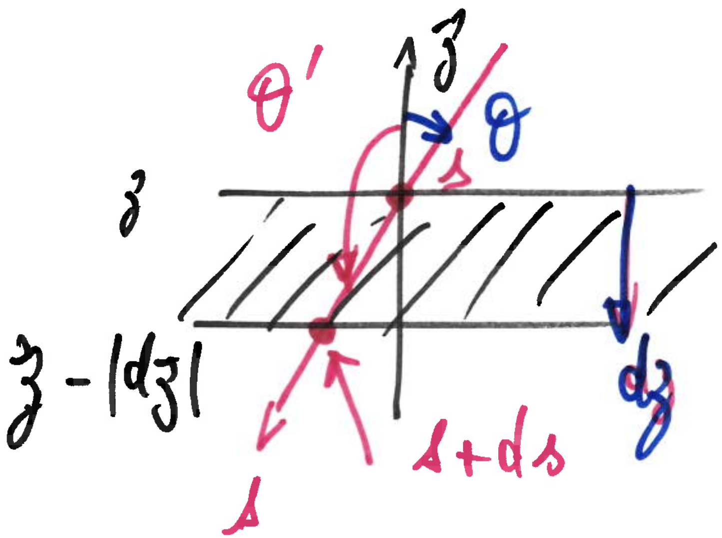
pertes seulement si
- flux incident parallèle
- pas de diffusion multiple

3

I Absorption : répartition verticale du flux incident //

- éclairement
- pertes par absorption (idem si pertes par diffusion)

I.1 Loi de Lambert et épaisseur optique atmosph plan //



$\pi/2 < \theta' < \pi$ $\cos\theta' < 0$

θ : angle zénithal $0 < \theta < \pi/2$

$\cos\theta > 0$

$ds > 0$ $dz < 0$

$dz = ds \cos\theta'$

$dz = - ds \cos\theta$

$$F_\nu(s) = \frac{d^3\phi}{d^2\Sigma\, d\nu} = \frac{d^2\Phi_\nu}{d^2\Sigma} \quad (W m^{-2}\ Hz^{-1})$$

4

Loi de Lambert $\dfrac{dF_\nu}{ds} = - k_\nu F_\nu$

$k_\nu \{m^{-1}\}$ $k_\nu(s) = \sigma_\nu \times n(s)$ σ_ν section efficace d'absorption

$m^{-1} = m^2 \times m^{-3}$

Épaisseur optique élémentaire $d\tau_\nu(s) = k_\nu(s)\, ds$

sans unité

= Proba qu'un photon à ν soit absorbé dans cette couche

$$\frac{dF_\nu}{F_\nu} = - d\tau_\nu$$

épaisseur optique d'une couche selon direction $\vec{s}$

$$\tau_\nu(s_1, s_2) = \int_{s_1}^{s_2} k_\nu\, ds = \int_{s_1}^{s_2} \sigma_\nu n(s)\, ds$$

$\Rightarrow$ $\ln F_\nu = -\tau_\nu + cte$

Transmission $T_\nu(s_1 \to s_2) = \dfrac{F_\nu(s_2)}{F_\nu(s_1)} = \exp\left[-\tau_\nu(s_1, s_2)\right]$

5 Absorption dans la couche $\quad A_\nu = 1 - T_\nu$

$A_\nu = 1 - e^{-\tau_\nu}$ si $\tau_\nu \ll 1$ $\quad A_\nu \simeq \tau_\nu$

Cas où σ_ν indépt de z

$$\tau_\nu(s_1, s_2) = \int_{s_1}^{s_2} \sigma_\nu \, n(s)\,ds = \sigma_\nu \underbrace{\boxed{\int_{s_1}^{s_2} n(s)\,ds}}_{N(s_1, s_2)} \quad (m^{-2})$$

contenu intégré entre s_1 et s_2

$$\tau_\nu(s_1, s_2) = \sigma_\nu \, N(s_1, s_2)$$

$$\tau_\nu(z_1, z_2; \theta) = \tau_\nu(z_1, z_2; \theta = 0) \times \underbrace{\boxed{\frac{1}{\cos\theta}}}_{} = \sec\theta$$

avec θ

⑤ bis Cas où absorbant à répartition exponentielle

$$n(z) = n(z_0) \exp\left(-\frac{z-z_0}{H}\right) \qquad H \text{ échelle de hauteur}$$

$$\frac{d\,\ln(n(z))}{dz} = \boxed{\frac{1}{n}\frac{dn}{dz} = -\frac{1}{H}}$$

à la verticale

$$N(z_1, z_2) = n(z_0)\, H \int_{z_1}^{z_2} \exp\left(-\frac{z-z_0}{H}\right) \frac{dz}{H}$$

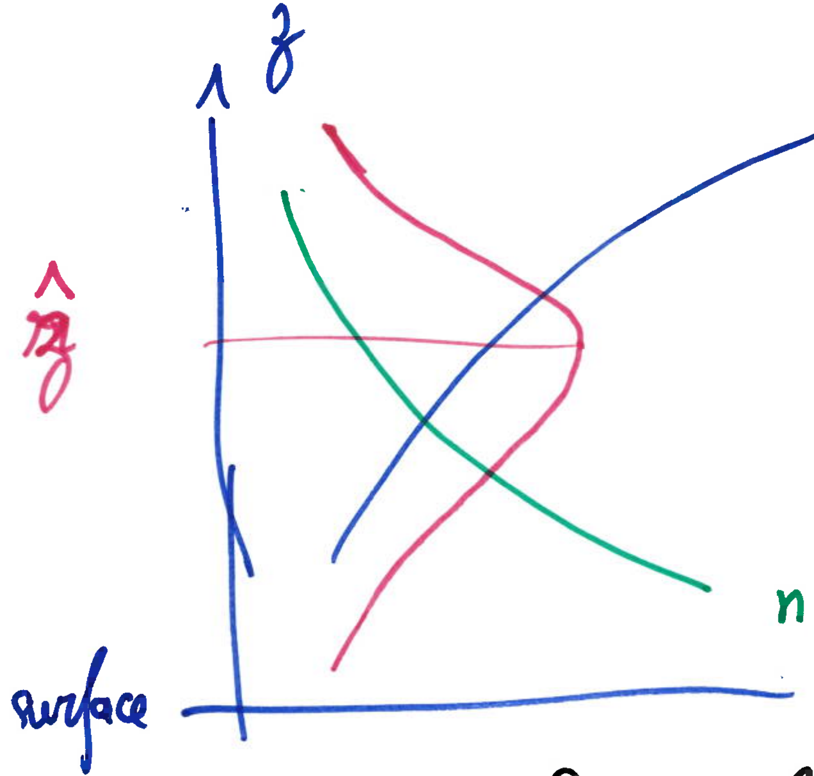
$$N(z_1, z_2) = n(z_1)\, H \int_0^{\frac{z_2-z_1}{H}} \exp(-u)\, du$$

$$= n(z_1)\, H \left[1 - \exp\left(-\frac{z_2-z_1}{H}\right)\right]$$

$$N(z, \infty) = n(z)\, H$$

$$\tau_v = \sigma_v N \qquad \frac{1}{\tau_v}\frac{d\tau_v}{dz} = -\frac{1}{H}$$

⑥ ## I.2 Profil de Chapman



$\hat{z}$: altitude z du max de $q_\nu(z)$

interaction $q_\nu(z) \sim F_\nu(z)\, n(z)$

Hyp
- atmosphère plan //
- un seul absorbant
- σ_ν indépendante de z
- absorbant en répart exponentielle

(7)

$$\tau_\nu(z,\theta) = \sigma_\nu \, N(z) \sec\theta = \sigma_\nu \, n(z) \, H \sec\theta$$

au dessus de z

$z \to \infty$

τ oblique entre 0 et ∞

$$= \sigma_\nu \, \underbrace{n(\cancel{z_0}\,0) \, H \sec\theta}_{\text{cont. int. oblique total}} \, e^{-z/H}$$

colonne intégrée verticale de $z = 0$ à l'∞

$$F_\nu(z,\theta) = F_\nu(z=\infty) \exp\left[-\tau_\nu(0;0) \sec\theta \, e^{-z/H}\right]$$

$$q_\nu(z) = -\frac{d^3\Phi_\nu}{d^2\Sigma \, ds} = -\frac{dF_\nu}{ds} = \frac{dF_\nu}{dz} \cos\theta > 0 \quad \text{avec } z \nearrow$$

(8) Loi de Lambert

$$q_\nu(z) = -\frac{dF_\nu}{ds} = -\frac{dF_\nu}{d\tau_\nu}\frac{d\tau_\nu}{ds} = \sigma_\nu\, n(z)\, F_\nu(z, \theta)$$

$$q_\nu \sim n(z) \times F_\nu(z)$$

F_ν

$\mathrm{Max}\,(q_\nu)$ à $z = \hat{z}$

$$\frac{d \ln q_\nu}{dz} = 0$$

$$\frac{1}{n}\frac{dn}{dz} + \frac{1}{F_\nu}\frac{dF_\nu}{dz} = 0$$

$$-\frac{1}{H} + \underbrace{\frac{1}{F_\nu}\frac{dF_\nu}{d\tau_\nu}}_{-1}\ \underbrace{\frac{d\tau_\nu}{dz}}_{-\frac{\tau_\nu}{H}} = 0$$

$$\Rightarrow -\frac{1}{H} + \frac{\tau_\nu}{H} = 0$$

$$\tau_\nu(\hat{z}) = 1$$

suppose que

$$\tau_\nu(0, \infty; \theta) > 1$$

(9)

$$\tau_\nu(\hat{z}) = 1 = \sigma_\nu\, n(0)\, H \sec\theta\, e^{-\hat{z}/H}$$

$$\hat{z} = H \ln\big(\underbrace{\sigma_\nu\, n(0)\, H}_{\tau_\nu(0,\infty;0)}\big) + H \ln\sec\theta$$

$\nearrow$ si $\tau_\nu(0,\infty;0)$ $\nearrow$

$$\hat{z} = \hat{z}_0 + H \ln\sec\theta$$

$\nearrow$ si θ $\nearrow$

$$\hat{r}_\nu = r_\nu(\hat{z}) = \sigma_\nu\, n(\hat{z})\, F_\nu(\hat{z};\theta)$$

$$\hat{r}_\nu = \frac{F_\nu(\infty)}{e\,H}\, \underbrace{\sigma_\nu\, n(\hat{z})\, H \times \sec\theta}_{\hat{\tau}_\nu(\hat{z},\theta)=1} \times \cos\theta$$

$$\boxed{\hat{r}_\nu = \frac{F_\nu(\infty)}{e\,H} \cos\theta}$$

(10) Profil de Chapman normalisé

$Z = \dfrac{z - \hat{z}_0}{H}$ $\quad R = \dfrac{r}{\hat{r}_0}$

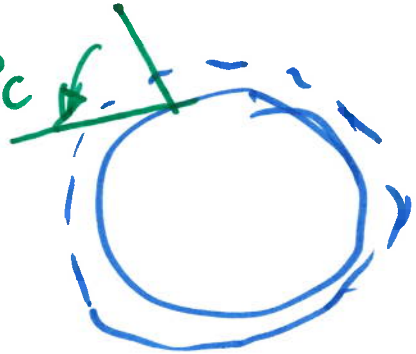
0 pour $\theta = 0$

$$R(Z) = \exp\left(1 - Z - \sec\theta \, e^{-Z}\right)$$

à très h^te altitude $R(Z)$ ind^te de la direction

$\hat{z} \nearrow$ si $\theta \nearrow$

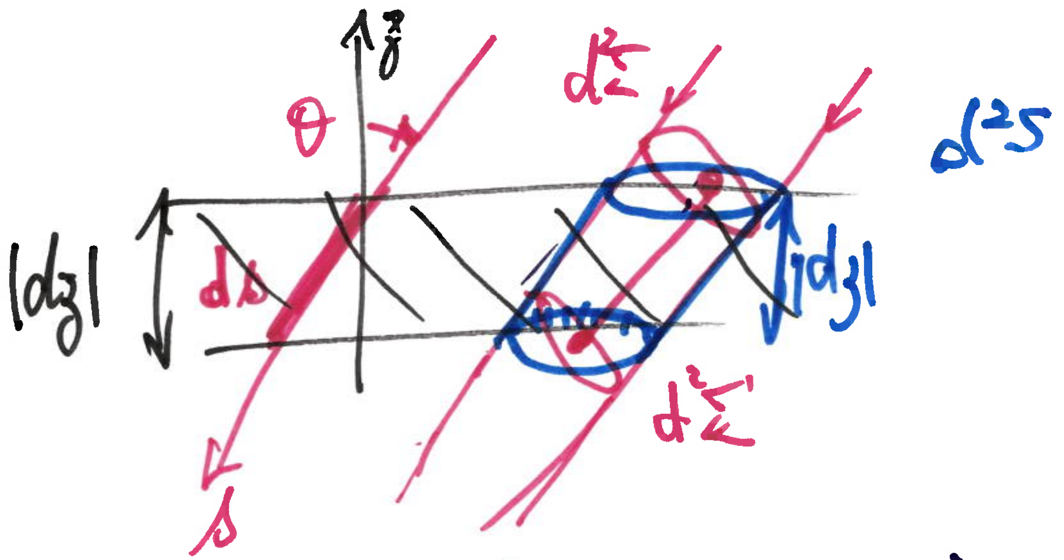
N.B. : au delà de 70°, pb rotondité de la Terre



(11) Taux de chauffage par absorption

Intégrer dans tte la bande d'absorption $F = \int_{\nu_1}^{\nu_2} F_\nu \, d\nu$

F en $W m^{-2}$ $\quad \eta = -\dfrac{dF}{ds}$ $(W m^{-3})$



volume d^3V découpé par un tube de lumière traversant la couche avec angle zénithal θ

$$d^3V = d^2\Sigma \, |ds| = d^2S \times dz$$

$$d^2\Sigma = d^2S \cos\theta \qquad |ds| = \frac{dz}{\cos\theta}$$

$$+ F(s)\, d^2\Sigma$$
$$- F(s+ds)\, d^2\Sigma$$
$$= \frac{dH}{dt}\, d^3V$$

H enthalpie volumique

12

$$-\frac{dF}{ds}\, ds\, d^2\Sigma = \frac{dH}{dt}\, \cancel{d^3V}$$

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{dF}{ds} \quad (W\,m^{-3}) \qquad dH = \rho\, C_p\, dT$$

$$\rho\, C_p \frac{dT}{dt} = -\frac{dF}{ds} > 0$$

taux de chauff. par absorption

$$\boxed{\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\rho C_p}\frac{dF}{ds} = +\frac{\cos\theta}{\rho C_p}\frac{dF}{dz}}$$

majoritaires

⚠ $n_{abs}(z)$ désignant l'absorbant

H_{abs} ——— son échelle de hauteur

absorbant

$\neq n_{air}$ et H_{air} majoritaires

(13) x_{abs} = rapport de mélange de l'absorbant

$$x_{abs}(z) = \frac{n_{abs}(z)}{n_{air}(z)} \qquad \rho C_p = n_{air}\, c_p$$

massique — par molécule

radiatif

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sigma_{abs}}{c_p} \frac{n_{abs}(z)}{n_{air}(z)} F(z) = \frac{\sigma_{abs}}{c_p} x_{abs}(z)\, F(z)$$

énergie interne

max de $\frac{dT}{dt}$ = max $x(z) \times F(z)$ max

hypothèses $n_{abs}(z) \sim \exp(-z/H_{abs})$

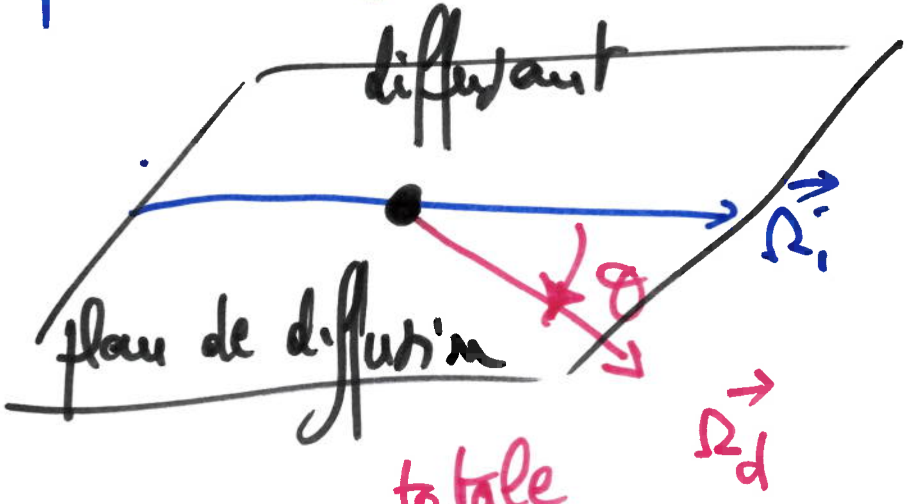
$n_{air}(z) \sim \exp(-z/H_{air})$

$H_{abs} < H_{air}$

(14) II. Diffusion (scattering)

II.1 Caractérisation de la diffusion

Hypothèse : rayon^t incident parallèle direction $\vec{\Omega}_i$



θ = angle de diffusion

section efficace totale de diffusion par un diffusant σ_{scatt} (m^2)

$$\frac{dF_i}{ds} = - n_{scatt} \, \sigma_{scatt} \, F_i \qquad F_i \text{ éclairement } W m^{-2}$$

$$(W m^{-3}) = m^{-3} \; m^{2} \; W m^{-2}$$