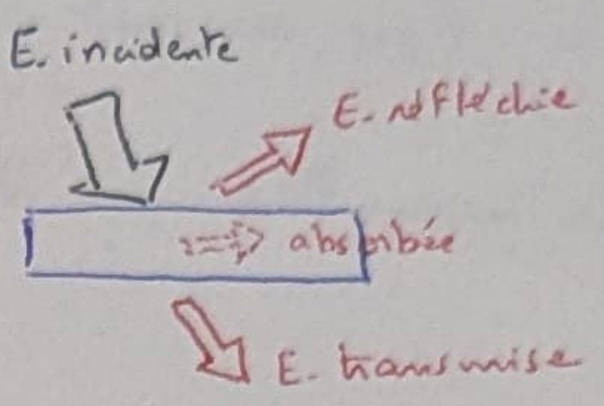
Rayonnement Thermique

Dunod 2022
PC-PC*
Rayon. Therm.
1

Ce transf. thermique est ≠ des transf. par diffusion ou convection
c un transfert par champ EM existant ds milieu q— les sépare
↓ entre 2 syst

1] Corps Noir



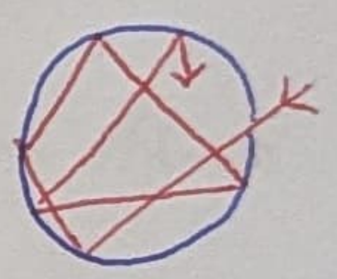
Lorsqu'un corps reçoit rayonnement EM, il y a 3 phénomènes

corps noir = corps qui absorbe l'intégralité du rayonne. EM qu'il reçoit
(c un modèle idéalisé)
= transmet rien et ne réfléchit rien

/!\ En pratique ∄ matériau q— absorbe tout le spectre EM mais ∃ q— absorbe presque 100% à 99 [ ] de λ comme brique ds IR

Vantablack absorbe 99,965% du visible formé par nanotube de carbone

La meilleure réalisation pratique d'un corps noir = enceinte vide (ou à air) dont parois sont maintenues à T fixe et contient ouverture S de faible dim
= rayon entre par S et subit plusieurs réflexion et à chaque il y a absorption partielle par les parois intérieures de la cavité, ∴ tout rayon absorbé avant de ressortir
= petite surf S approche de très près le corps noir idéal à temp. T



2] Rayonnement d'éq. thermique

c un modèle idéal qu'on va comparer au rayonne. therm. émis par un corps

- Imaginons cavité vide où est réalisé éq. thermo entre parois et rayonne. EM prisonnier de la cavité
L'agitation therm. met en mouv les charges ds matière des parois = produisent un rayonne. EM
q— agit en retour sur leur mouv ∴ on atteint éq. entre matière et rayonnement
= pas de transfert d'E net entre ces 2 syst
= toute E_{syst} se répartit entre $\underbrace{U}_{E\ interne}$ parois et E_{EM}

- Le rayonne. = N photons ds vol. enceinte V, d'énergie $h\nu$ et sont répartis uniformément et se déplacent à c, ds toutes directions avec proba =
(comme pour atomes ds modèle GP)

- Champ EM ds enceinte caractérisé par $\begin{cases}\text{densité vol. d'E } u_{EM} \\ \text{Flux surf. d'E } \varphi\end{cases}$

- E. volumique u_{EM} : $dU_{EM} = u_{EM}\, d\tau$ ds vol. $d\tau$. Elle est unif. car
et ne dépend que de T d'éq ∴ $u^{\circ}_{EM}(T)$

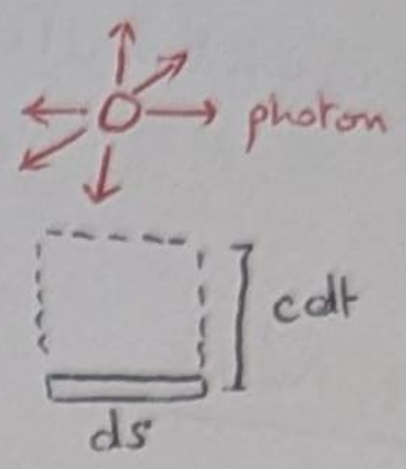
- Flux surf. : tq dS d'un corps placé ds l'enceinte reçoit puissance EM $d\Phi = \varphi\, dS$
Flux = puissance
φ surfacique
et ne dépend ni de position de dS ni son orientation ∴
que de T d'éq $\varphi^{\circ}(T)$

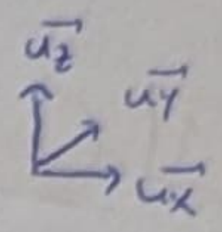
22

comment $u^\circ_{EM}(T)$ et $\varphi^\circ_{EM}(T)$ sont liés ?

- soit $dS \perp \vec{u_z}$ et que photons se déplacent ds 6 directions
- photons frappant ds entre t et t+dt sont ceux q- se déplacent ds $-\vec{u_z}$ et contenus ds cylindre de base dS et hauteur $c\,dt$

- E_{EM} arrivant à $dS = \frac{1}{6}$ E contenue ds ce vol.





par puissance $\Phi = \frac{E}{t}$: $\quad d^2U_{EM} = d\Phi\, dt = \frac{1}{6} u^\circ_{EM}(T)\, \underbrace{c\,dt\,dS}_{dV}$

$= \varphi^\circ(T)\, dS\, dt$

$\Rightarrow \varphi^\circ(T) = \frac{c}{6} u^\circ_{EM}(T)$

calcul + réaliste, tenant compte de toutes directions possibles des photons, donne :

$$\boxed{\varphi^\circ(T) = \frac{c}{4} u^\circ_{EM}(T)}$$

- Les photons ds enceinte ont toutes ν possibles $\therefore$ toutes λ. Densité spectrale donne répartition des photons par fréq (ou par λ)

densité spectrale en long. d'onde d'énergie volumique $u^\circ_\lambda(\lambda,T)$ = la contribution à la densité vol. d'E des photons de long. d'onde appartenant à $[\lambda, \lambda+d\lambda]$ $\quad du^\circ_{em} = u^\circ_\lambda(\lambda,T)\, d\lambda$

$\therefore$ dens. vol. d'E totale : $\quad u^\circ_{EM}(T) = \int_0^\infty u^\circ_\lambda(\lambda,T)\, d\lambda$ $\quad$ $J.m^{-3}.m^{-1}$

m̂ chose pour ν

Lien entre u°_λ et u°_ν : un $\in [\lambda, \lambda+d\lambda]$ et l'autre $\in [\nu - d\nu, \nu]$

par $\nu = \frac{c}{\lambda}$ $\rightarrow$ $d\nu = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{car } \lambda \text{ et } \nu \\ \text{varient de sens inverse}}}{-}\, d\left(\frac{c}{\lambda}\right) = \frac{c}{\lambda^2} d\lambda$ $\rightarrow$ $u^\circ_\nu\, d\nu = u^\circ_\lambda\, d\lambda$

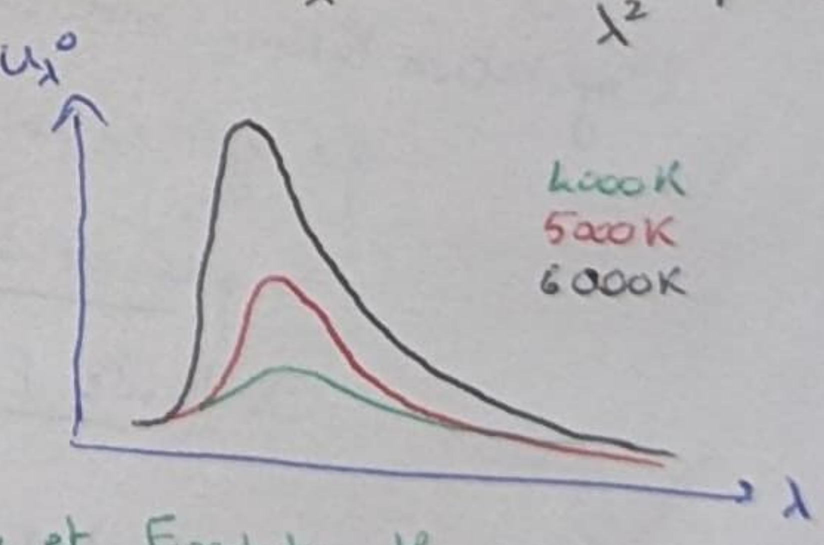
$\therefore u^\circ_\lambda(\lambda,T) = \frac{c}{\lambda^2} u^\circ_\nu(\nu,T)$

(pour ν : $\frac{8\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_BT}} - 1}$)

Loi de Planck (1900) $\quad u^\circ_\lambda(\lambda,T) = \frac{8\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$

$J.m^{-3}.m^{-1}$

↳ rapport entre Ephoton et Eagitation thermique



il a réussit à retrouver la loi de Stefan-Boltzmann (1879) et la loi du déplacement de Wien (1893)

trouvée expérimentalement $\quad$ calcul théorique (1884)

Loi de Stefan-Boltzmann $\quad$ par Planck et relat° entre φ° et u°_{EM} :

Le flux surf. du rayonne. d'éq : $\quad \varphi^\circ(T) = \frac{c}{4} \int_0^\infty u^\circ_\lambda(\lambda,T)\, d\lambda$

$\varphi^\circ(T) = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15 h^3 c^2} T^4$ $\qquad \varphi^\circ(T) = \sigma T^4$

cste de Stefan $= 5{,}67 \times 10^{-8}$ $W.m^{-2}.K^{-4}$

Loi du déplacement de Wien : u_λ° passe par un max à λ_m tq λ_m dépend de T

Dunod 2022
Rayon. Therm
2

Soit $f(u) = \frac{u^5}{e^u - 1}$ tq cette f est max à $u_m = \frac{hc}{\lambda_m k_B T}$

$$f'(u) = \frac{5u^4(e^u-1) - u^5 e^u}{(e^u-1)^2} = 0 \Rightarrow u_m \approx 4,965$$

$$\lambda_m T = \frac{1}{4,965}\frac{hc}{k_B} = 2898 \ \mu m\, K \rightarrow \boxed{\lambda_m T = 2900 \ \mu m . K}$$

/!\ pour u_ν°, c'est max à ν_m qui $\neq \frac{c}{\lambda_m}$

Donc émission thermique d'un corps opaque est caractérisée par flux surfacique émis φ_e tq puissance émise par surf. élémentaire autour pt P est : $d\Phi_e = \varphi_e(P)\, dS_P$
$\hookrightarrow$ $W.m^{-2}$

pour corps noir, à l'éq. thermo, à temp T : $\varphi_e^{CN} = \varphi^\circ(T) = \sigma T^4$
flux du rayonne. d'éq.

pour corps gris (absorbe et réémet une fraction α $(0 \leq \alpha \leq 1)$ du rayonne. reçu) $\varphi_e^{CG} = \alpha \varphi^\circ(T)$

∴ composition spectrale du rayonne. du CN est identique à la compo. spect. du rayonne. d'éq.

En observant CN, on voit juste rayonne. qu'il émet (car ne réfléchit pas) ∴ CN a la couleur du rayonne. d'éq. correspondant à sa T

À 300K → rayonne. IR invisible donc une apparence noire (d'où son nom)

À T > 2000K → rayonne. visible

si T ↗ ∴ luminosité augmente très rapidement (loi Stefan)
et sa couleur évolue du rouge au blanc (loi de Wien)

- Soit CN de surf d'aire totale S ∴ émet flux de rayonne. thermique $\Phi_e = \sigma T^4 S$

S'il est placé ds environnement de temp. T_a qui l'entoure entièrement
∴ échange thermique entre CN et son environ. : $\Phi_{CN\to ext} = \sigma S (T^4 - T_a^4)$

en général $|T - T_a| \ll T_a$ ∴ $\Phi_{CN \to ext} = 4\sigma T_a^3 (T - T_a) S$

résistance thermique radiative (ou de rayonne.) : $R_{th}^{rad} = \frac{1}{4\sigma T_a^3 S}$

∵ $|T - T_a| \ll T_a$ ∴ $T = T_a + \Delta T \rightarrow T^4 = (T_a + \Delta T)^4 \overset{\text{Taylor}}{\simeq} T_a^4 + 4T_a^3 \Delta T$

∴ $T^4 - T_a^4 \simeq 4T_a^3 \Delta T \simeq 4T_a^3 (T - T_a)$

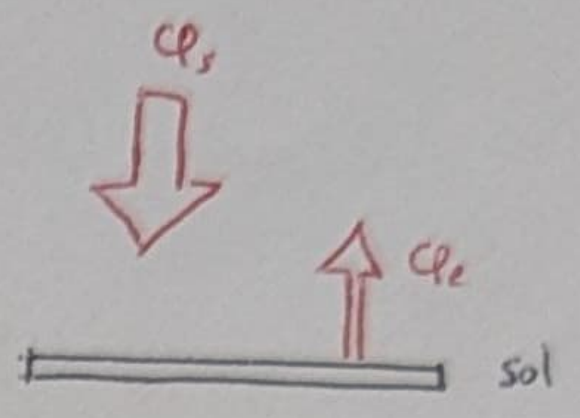
3] Application à l'effet de Serre

1] Effet de serre d'une vitre idéale

- Le sol est assimilable à CN émettant rayonne. therm. de flux surf. φ_e
  Il reçoit rayonne.-solaire de flux surf φ_s

  ∴ surf. du sol reçoit $P_{reçu} = \varphi_s S$ et émet $P_{émis} = \varphi_e S = \sigma T_0^4 S$

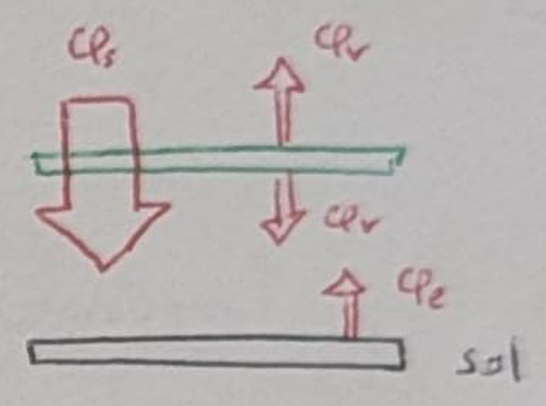
  À l'éq. $P_r = P_e \rightarrow T_0 = \left(\frac{\varphi_s}{\sigma}\right)^{1/4}$



  $\varphi_s \simeq 1\ kW.m^{-2} \longrightarrow T_0 \simeq 90°C$ cela correspond à surf. Lune où pas d'atm (côté éclairé par le soleil)

- si on ajoute vitre au-dessus de surf. sol q-i est supposé 100% transparente au rayonne. solaire (principalement visible et ds proche IR)
  et 100% absorbante du rayonne. émis par sol (IR lointain)

  ∴ sont tous à éq. ∴ Pémise = Pabsorbée et vitre ≡ CN à T_v



  bilan énergétique : pour vitre : $\sigma T_0^4 = 2\sigma T_v^4$

  pour sol : $\varphi_s + \sigma T_v^4 = \sigma T_0^4$ $T_0 = \left(\frac{2\varphi_s}{\sigma}\right)^{1/4}$

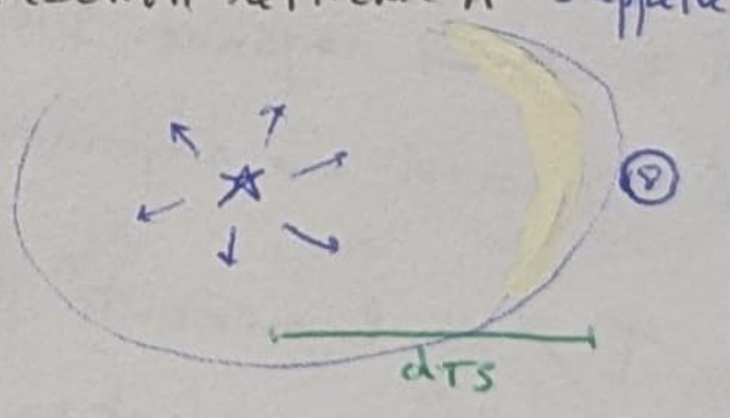
  T_0 est $2^{1/4} \simeq 1,2$ fois + grande $\longrightarrow$ effet de serre

2] $T_{éq.}$ Terre sans atm

La Terre réfléchie une partie de l'E reçue du Soleil tq fraction réfléchie A s'appelle albedo

$P_{soleil} = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 = 4\times10^{26}\ W$

R_s : $7\times10^5\ Km$; T_s : $5800\ K$



le terre reçoit $P_{surf} = \frac{P_{soleil}}{4\pi d_{TS}^2}$

surfacique

d_{TS} : dist Terre-Soleil $1,5\times10^{11}\ m$

∴ Terre loin du Soleil ∴ rayons sont //

∴ Preçue par Terre ≡ Preçue par disque de rayon R_T

$P = P_{surf} \times \pi R_T^2 = 1,8\times10^{17}\ W$

∴ Flux reçue : $\Phi = \frac{P}{4\pi R_T^2} = 3,5\times10^2\ W.m^{-2}$

La terre reçoit $(1-A)P$ et émet $P_e = \sigma T_0^4\, 4\pi R_T^2$

T_0 : T de surface

∴ bilan énergétique : $(1-A)P = \sigma T_0^4\, 4\pi R_T^2$ ∴ $T_0 = (1-A)^{1/4}\sqrt{\frac{R_s}{2d_{TS}}}\,T_s$

$\langle A_{Terre}\rangle = 0,31 \longrightarrow T_0 = 255\ K = -18°C$ ∴ faut tenir compte de l'atmosphère

Duvod
Rayonne-T
3

3] T éq. Terre en présence atm

- épaisseur atm $e \simeq 30\,km \ll R_T$ ⇒ on prendra m surf pour la Terre et pour atm

- par Wien, λ_m (soleil) $\simeq 500\,nm$ (pour 5800 K)
  λ_m (Terre) $\simeq 10\,\mu m$ (pour 300 K)

- Atm. laisse passer grande partie rayon. sol. (supposons 100%) et absorbe 100% celui de Terre (eau absorbe cette gamme de λ)

- On suppose T_0 (Terre) & T_1 (atm), sont uniformes et albedo de l'ensemble (T + atm) $= 0{,}31$

Bilans énergétiques:

- pour (T + atm) : $(1-A)P = \sigma T_1^4 \, 4\pi R_T^2$
- pour Terre : $(1-A)P + \sigma T_1^4 \, 4\pi R_T^2 = \sigma T_0^4 \, 4\pi R_T^2$

$T_1 = 255\,K$
$T_0 = 303\,K = 30°C$ très élevée

4] Amélioration du modèle

Atm. pas 100% transparent au rayon. solaire (absorbe partie de UV par l'ozone stratosphérique et partie de IR par eau)

⇒ atm. absorbe α et ⇒ $1-\alpha$ arrive à la Terre.
$\alpha \simeq 0{,}33$

Bilan énergétique:

- T + atm : le m
- Terre : $(1-A)(1-\alpha)P + \sigma T_1^4 \, 4\pi R_T^2 = \sigma T_0^4 \, 4\pi R_T^2$

$T_0 = 290\,K = 17°C$

On peut améliorer + en prenant en compte:

- atm pas 100% opaque au rayonne. Terrestre, en particulier ds [8 µm, 16 µm]
- Terre n'émet pas tout, une partie de l'E reçue sert à évaporer océan

⚹ donc atm ↗ T éq. de la Terre