

I - Lois du rayonnement thermique4. Exemples

* $T = T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$

loi de Wien : $\lambda_{\text{max}} \approx 10 \mu\text{m} \Rightarrow \text{IR}$

cela permet le fonctionnement de caméra ou thermomètre IR et des caméras thermiques.

* Soleil

cf. Figure 2 : le Soleil se comporte comme un corps noir de température $T = 5777 \text{ K}$ (surface)

$\lambda_{\text{max}} \approx 0,5 \mu\text{m} \Rightarrow \text{visible}$

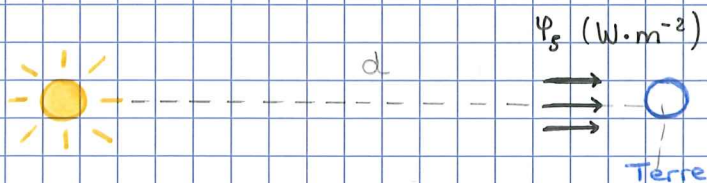
Puissance émise : $\Phi = \sigma T^4 \times S$ avec $S = 4\pi R_s^2$

$R_s = 696 \times 10^6 \text{ m}$

on en déduit :

$\Phi = 3,8 \times 10^{26} \text{ W}$

→ question : Que reçoit la Terre ?



le Soleil est supposé assez loin et ses rayons quasi-parallèles

Ψ_s : puissance par unité de surface du flux solaire qui arrive sur Terre.

$\Phi = 4\pi d^2 \Psi_s$

$\Psi_s = \frac{\Phi}{4\pi d^2} = \frac{\sigma T^4 \times 4\pi R_s^2}{4\pi d^2} = \sigma T^4 \frac{R_s^2}{d^2} = 1378 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

$\Psi_{s, \text{mesurée}} = 1368 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

↳ corps noir = bon modèle.

- * Tout l'univers baigne dans un rayonnement thermique de température : $T = 2,7 \text{ K}$
C'est un rayonnement fossile émis lors du big-bang (création de l'univers)

- * Corps humain

$$T = 310 \text{ K}$$

$$\lambda_{\text{max}} \approx 10 \mu\text{m} \Rightarrow \text{IR}$$

$$S = 2 \text{ m}^2 \quad (\text{surface de peau})$$

$$\Phi_e = \sigma T^4 S \approx 1 \text{ kW} \quad \text{énorme !} \rightarrow \text{comme un petit radiateur}$$

$\hookrightarrow$ le sujet devrait mourir

En pratique, ce rayonnement émis est compensé par un rayonnement thermique ambiant incident $T_0 = 300 \text{ K}$

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{net}} &= \sigma T^4 - \sigma T_0^4 \\ &= \sigma (T^4 - T_0^4) \\ &= 105 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

$$\Phi_{\text{net}} S = 210 \text{ W}$$

UTILE

IP est souvent commode de linéariser l'expression

$$\begin{aligned} T^4 - T_0^4 &\approx 4 T^3 (T - T_0) \\ &\approx 4 T_0^3 (T - T_0) \end{aligned}$$

valable qd T et T_0
sont proches

$$\Phi_{\text{net}} = 4 \sigma T_0^3 (T - T_0)$$

preuve 1:

$$\begin{aligned} T &= T_0 + \Delta T \quad \text{avec } \Delta T \ll T_0 \\ &= T_0 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T^4 &= T_0^4 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right)^4 \\ &\approx T_0^4 \left(1 + 4 \frac{\Delta T}{T_0} \right) \end{aligned}$$

$$T^4 \approx T_0^4 + 4T_0^3 \Delta T$$

$$T^4 - T_0^4 \approx 4T_0^3 \Delta T$$

$$\approx 4T_0^3 (T - T_0)$$

preuve 2:

$$T^4 - T_0^4 = (T - T_0) \underbrace{(T^3 + T^2 T_0 + T T_0^2 + T_0^3)}_{\approx 4T_0^3}$$

Avec cette approximation, on trouve $\varphi_{\text{net}} = 115 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Après linéarisation, φ_{net} rappelle la loi de Newton.

II - Effet de serre

1. Principe : serre d'horticulture

Modèle très simple : on considère seulement le rayonnement et on occulte tous les effets géométriques

cf. Figure 3

a) on cherche T à l'équilibre.

" à l'équilibre (régime stationnaire)

$$\varphi_s = \varphi_e$$

$$\text{or } \varphi_e = \sigma T^4$$

$$\text{donc } \sigma T^4 = \varphi_s \quad \text{donc } T = \left(\frac{\varphi_s}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\varphi_s = 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{on trouve } T = 320 \text{ K} = 47^\circ \text{C}$$

b) avec vitre

Le rayonnement solaire est concentré dans le visible, domaine dans lequel la vitre est transparente. Le rayonnement de la plaque est concentré dans l'IR domaine dans lequel la vitre est opaque.

La vitre s'échauffe car elle capte le rayonnement IR, elle émet aussi du rayonnement vers le haut et vers le bas.

La plaque reçoit maintenant 2 flux.

→ équilibre de la plaque : $\varphi_s + \varphi_v = \varphi_p$ (1)

→ équilibre de la vitre : $\varphi_p = 2\varphi_v$ (2)

⇒ équilibre global : $\varphi_s = \varphi_v$ (1) + (2)

et $\varphi_p = 2\varphi_s$

or $\varphi_p = \sigma T^4$

donc $\sigma T^4 = 2\varphi_s$ donc $T = \left(\frac{2\varphi_s}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} = 381 \text{ K} = 108^\circ\text{C}$

loi de Wien : $\lambda_{\text{max}} = 8 \mu\text{m} \Rightarrow \text{IR}$

c) 2 vitres

→ équilibre de la plaque : $\varphi_s + \varphi_{v_1} = \varphi_p$

→ équilibre vitre 1 : $\varphi_p + \varphi_{v_2} = 2\varphi_{v_1}$

→ équilibre vitre 2 : $\varphi_{v_1} = 2\varphi_{v_2}$

⇒ équilibre global : $\varphi_s = \varphi_{v_2}$

donc $\varphi_{v_1} = 2\varphi_s$

et $\varphi_p = \varphi_s + 2\varphi_s = 3\varphi_s$

Stefan : $T = \left(\frac{3\varphi_s}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}}$

2. Température du globe terrestre sans atmosphère

albédo : fraction de rayonnement solaire réfléchi vers l'espace

$A \approx 0,3$

On suppose la température de la Terre uniforme (*-moyenne)

puissance reçue :

$P_x = \varphi_s \pi R^2 (1-A)$ Δ inclinaison des rayons

on seube avec un disque

En moyenne, par unité de surface :

$$\frac{P_x}{4\pi R^2} = \frac{\varphi_s}{4} (1-A)$$

tient compte jour/nuit, pôles / équateur

on pose $\varphi_s' = \frac{\varphi_s}{4} = 342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

flux solaire moyen à la surface de la Terre.

puissance émise

$$P_e = \varphi_e \times 4\pi R^2$$
$$= \sigma T^4 \times 4\pi R^2$$

à l'équilibre : $P_e = P_x$

$$\sigma T^4 \times 4\pi R^2 = \varphi_s \pi R^2 (1-A) \quad [\text{W}]$$

$$\sigma T^4 = \frac{\varphi_s}{4} (1-A) = \varphi_s' (1-A) \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$$

$$T = \left(\frac{\varphi_s' (1-A)}{\sigma} \right)^{1/4} = 255 \text{ K} = -18^\circ\text{C} \Rightarrow \text{sous-estimation}$$

Souvent, on écrit directement le bilan en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ en utilisant $\frac{\varphi_s}{4} = \varphi_s'$

3. Température du globe terrestre avec atmosphère

cf. Figure 5

L'atmosphère est transparente au visible et absorbe une fraction β des IR. $\beta = 0,89$

À l'équilibre,

Terre :

$$(1-A)\varphi_s' + \varphi_{eA} = \varphi_{eT}$$

Atmosphère :

$$\beta \varphi_{eT} = 2\varphi_{eA}$$

donc $\Phi_a = \frac{\beta \Phi_{eT}}{2}$

puis $(1-A)\Phi_s' + \frac{\beta \Phi_{eT}}{2} = \Phi_{eT}$

$(1-A)\Phi_s' = \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \Phi_{eT}$

$\Phi_{eT} = \frac{(1-A)\Phi_s'}{1 - \frac{\beta}{2}}$

or $\Phi_{eT} = \sigma T^4$

pour les IR la Terre se comporte comme un corps noir.

$T = \left(\frac{(1-A)\Phi_s'}{\sigma(1 - \frac{\beta}{2})} \right)^{1/4}$

$= 295 \text{ K}$

$= 22^\circ \text{C}$

sur-estimée

On peut raffiner le modèle mais il ne tient pas compte des transferts par convection associé au cycle de l'eau.

4. Bilan thermique terrestre détaillé

cf Figure 6, Table 1

On peut retrouver l'albédo :

$\beta = \frac{\Phi_{sa}}{\Phi_1} = \frac{350}{390} = 0,89$

$A = \frac{\Phi_{ra} + \Phi_{rs}}{\Phi_s'} = \frac{30 + 77}{342} = \frac{107}{342} \approx 0,3$

Vérifions qu'il y a équilibre :

Terre (sol) :

ce qui arrive : $\Phi_{as} + \Phi_3 = 168 + 324 = 492 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

ce qui repart : $\Phi_s + \Phi_{at} = 380 + 102 = 482 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Atmosphère :

ce qui arrive : $\Phi_{aa} + \Phi_{sa} + \Phi_{ar} = 67 + 350 + 102 = 519 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

ce qui repart : $\Phi_2 + \Phi_3 = 195 + 324 = 519 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Le changement climatique consiste en une modification des termes de ce bilan.

T du sol : $\sigma T^4 = \Phi_3 \Rightarrow T = \left(\frac{\Phi_3}{\sigma} \right)^{1/4} = 287 \text{ K} = 15^\circ \text{C}$