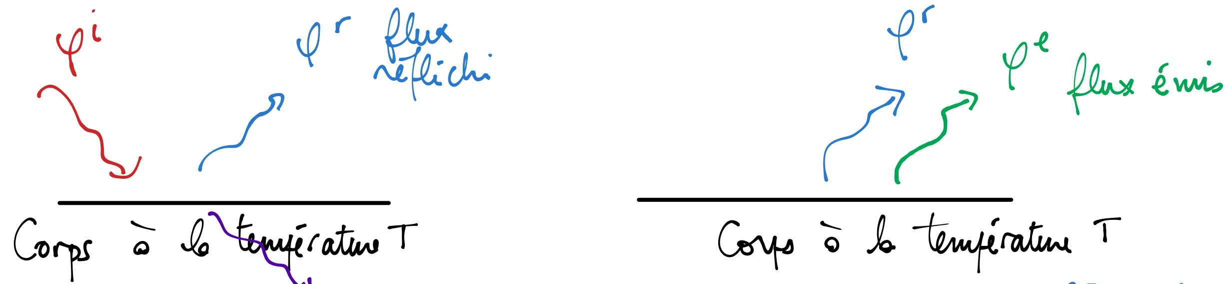
Thermodynamique
Chapitre 2 - Rayonnement thermique

Idées :
- Agitation thermique : atomes dans un état excité, désexcitation sous forme radiative (plus λ diminue plus l'énergie correspondante est forte).
- Matière soumise à un rayonnement électromagnétique : absorption / diffusion.
- Étude thermodynamique : équilibre d'un gaz de photons à la température T (ils sont absorbés, émis ...) : idée d'échanges quantifiés entre le rayonnement et la matière ($E = h\nu$, hypothèse formulée par Planck en 1900, premier pas vers la mécanique quantique).

I. Rayonnement du corps noir



Flux incident : $\varphi^i = \varphi^r + \varphi^a$ flux absorbé

Flux partant : $\varphi^P = \varphi^r + \varphi^e$

On parle d'**équilibre radiatif** lorsque $\varphi^R = 0$. L'équilibre thermique implique l'équilibre radiatif.

flux radiatif : $\varphi^R = \varphi^P - \varphi^i$

1. Corps noir

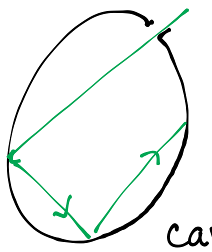
Un corps noir est un système idéal qui absorbe tout le rayonnement incident quel que soit sa longueur d'onde. On a alors :

$$\varphi^i = \varphi^a \Rightarrow \varphi^r = 0$$

Le flux partant est alors égal au flux émis :

$$\varphi^p = \varphi^e$$

En pratique, un système se comporte comme un corps noir sur une fenêtre de longueur d'onde. Le rayonnement du corps noir étant bien connu, ils permettent de réaliser des calibrations de sources lumineuses.



la lumière incidente est piégée

cavité avec petite ouverture

Matériau :
- verre + noir de fumée → domaine visible
- plâtre → IR (5 µm . 8 µm)

On parle parfois de corps gris lorsqu'une proportion constante (quelle que soit la longueur d'onde) du rayonnement incident est absorbée.

2. Flux surfacique émis par un corps noir isotherme

La loi de Planck (1900) exprime la densité spectrale de flux émise par un corps noir isotherme à la température T :

$$\varphi_\lambda^e = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_BT\lambda}\right)-1}$$

$\varphi_\lambda^e d\lambda$ correspond à la puissance surfacique émise par le corps dans la fenêtre spectrale comprise entre λ et $\lambda + d\lambda$

— La constante $h = 6,63.10^{-34}$J.s est appelée **constante de Planck**. $h\nu = hc/\lambda$ est l'énergie d'un photon de longueur d'onde λ.

— La constante $k_B = 1,38.10^{-23}$J.K^{-1} est la **constante de Boltzmann** (également introduite par Planck dans son étude du corps noir). k_BT correspond à l'ordre de grandeur de l'énergie d'agitation thermique à la température T. *On rappelle :* $k_B\mathcal{N}_A = R$ constante des gaz parfaits.

On vérifie ainsi que l'intérieur de l'exponentiel est sans dimension. On peut également vérifier que :

$$\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \rightarrow \underbrace{\underbrace{\left[\frac{hc}{\lambda}\right]}_{J\,.\,m\,.\,s^{-1}}\underbrace{\left[\frac{c}{\lambda^4}\right]}_{.\,m^{-4}}}_{W\,.\,m^{-3}}$$

est bien une densité spectrale de flux.

$$[\varphi_\lambda] = \frac{W\,.\,m^{-2}}{m}$$

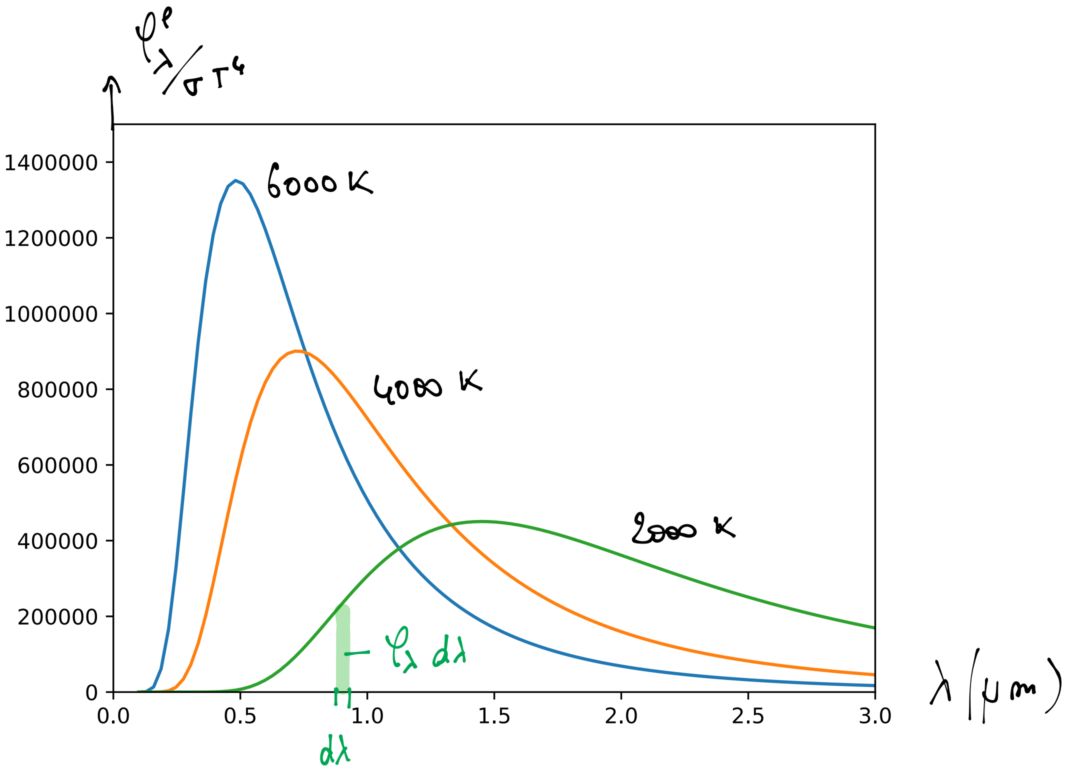


FIGURE 1 – φ_λ^e en fonction de la longueur d'onde (en μm) pour $T = 6.10^3$K ; 4.10^3 K et 2.10^3 K (on a divisé par σT^4 pour que la figure soit plus lisible).

Deux conséquences :

— Loi de Wien :

$$\lambda_{max} T = 2,9.10^3 \mu\text{m.K}$$

λ_{max} correspond au maximum d'émission, on peut retenir que 98% de l'émission se fait dans la fenêtre $[0.5\lambda_{max}, 8\lambda_{max}]$.

— Loi de Stefan : lorsqu'on somme $\varphi^e_\lambda d\lambda$ sur l'ensemble du spectre, on obtient le flux surfacique émis total :

$$\varphi^e_{tot} = \int_0^\infty \varphi^e_\lambda d\lambda$$

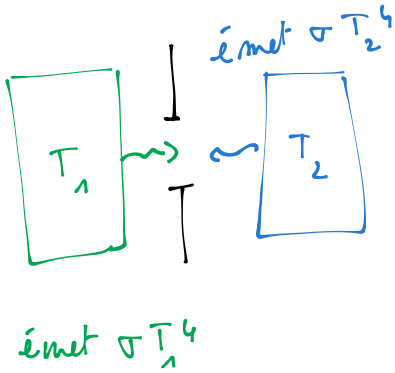
$$\varphi^e_{tot} = \sigma T^4$$ (aire sous la courbe)

avec $\sigma = 5,670.10^{-8}\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ constante de Stefan.

Dans le cas d'un corps noir en équilibre thermique (et donc en équilibre radiatif), le flux absorbé est égal au flux émis et les résultats précédents s'appliquent aussi bien au flux émis qu'au flux absorbé. Dans le cas d'un corps non noir à l'équilibre thermique ce sont les flux partant et incident qui suivent ces lois.

3. Application

On considère deux corps noirs de températures T_1 et T_2 proches, séparés par une ouverture de section S. Établir l'expression de la résistance thermique associée au rayonnement lorsque le système est à l'équilibre thermique.

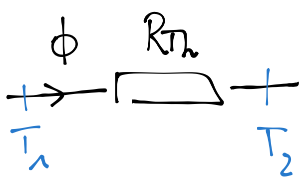


$$\phi_{\text{gauche vers droite}} = S\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

Si $\Delta T = T_1 - T_2 \ll T_1$ alors

$$T_2^4 = (T_1 - \Delta T)^4 = T_1^4\left(1 - \frac{\Delta T}{T_1}\right)^4 \simeq T_1^4\left(1 - 4\frac{\Delta T}{T_1}\right)$$

$$\rightarrow \phi = S\sigma 4 T_1^3 (T_1 - T_2)$$



On peut introduire une résistance thermique liée au rayonnement.

$$R_{Th} = \frac{1}{S\sigma 4 T_1^3}$$

II. Application à l'étude de l'effet de serre

Document : Reflets de la Physique (numéro 33) *Composition atmosphérique et bilan radiatif* Jean Poitou **2013**

1. Caractéristiques du système

— Le rayonnement émis par le Soleil est celui d'un corps noir à la température :

$$T_S = 5780 \text{ K}$$

Le rayon du Soleil étant :

$$R_S = 6,96.10^5 \text{ km}$$

On a ainsi :

$$\lambda_{max,S} = 0,50\mu\text{m}$$

$$\Phi_{tot,S} = 4\pi R_S^2\ \sigma T_S^4 \Rightarrow \Phi_{tot,S} = 3,85.10^{26} \text{ W}$$

Lien avec réaction nucléaire dans le Soleil à faire Le flux surfacique émis par le Soleil au niveau de la Terre :

$$\varphi_{S,Terre} = \Phi_{tot,S}.\frac{1}{4\pi(d_{TS})^2}$$

L'application numérique donne :

$$\varphi_{S,Terre} = 1,36\text{kW.m}^{-2}$$

Pour obtenir le flux surfacique moyen (en tenant compte de l'alternance jour-nuit), il suffit de considérer que le flux solaire se répartit sur la surface totale de la Terre :

$$< \varphi_{S,Terre} >= \Phi_{tot,S}.\frac{\pi R_T^2}{4\pi(d_{TS})^2}.\frac{1}{4\pi R_T^2}$$

On obtient 340W.m^{-2} comme indiqué dans le texte.

— Le rayonnement émis par la Terre est celui d'un corps noir à la température $T_T = 288\text{K}$ ce qui correspond à un maximum d'émission autour de 10μm.

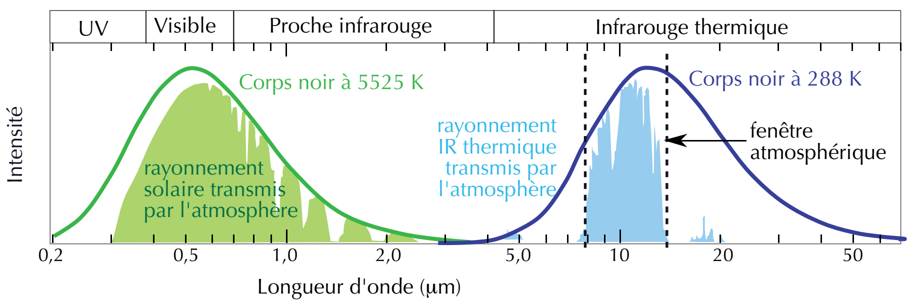


FIGURE 2 – Extrait de l'article - Reflets de la physique - Spectres d'émission et d'absorption par l'atmosphère du rayonnement solaire et du rayonnement émis par la Terre, en l'absence de nuages et d'aérosols.

2. Système Terre-Soleil

On considère dans un premier temps le système Terre-Soleil seul sans tenir compte de l'atmosphère. On va estimer la température à la surface de la Terre.

— On écrit l'équilibre radiatif en supposant que la Terre absorbe la totalité du rayonnement solaire :

$$<\varphi_{S,Terre}>=\varphi_{e,T} \Rightarrow \sigma T_T^4 =<\varphi_{S,Terre}>$$

ce qui donne une température à la surface de la Terre de 278 K.

— En tenant compte de l'albedo (fraction du rayonnement qui est réfléchi) qui est évalué à 30% dans le texte :

$$0,7<\varphi_{S,Terre}>=\varphi_{e,T}$$

on trouve $T_T = 255$K comme indiqué dans le texte.

La température à la surface de la Terre est plus élevée à cause de l'effet de serre.

3. Effet de serre

On modélise l'atmosphère comme un corps noir à la température T_a proche de T_T : elle est transparente dans le visible (c'est-à-dire pour le rayonnement solaire), absorbe et émet dans l'IR suivant la loi de Stefan :

$$\varphi = \sigma T_a^4$$

— Équilibre radiatif de l'atmosphère :

$$\varphi_T = 2\varphi_a$$

— Équilibre radiatif de la Terre (en tenant compte de l'albedo) :

$$\varphi_T = 0,7.\varphi_S + \varphi_a$$

On a ainsi :

$$\varphi_T = 2 * 0.7 * \varphi_S$$

ce qui conduit à une température $T_T = 302$K. Un modèle plus complet sera vu en TD.