

Introduction

L'expérience montre que tout corps porté à une température T émet un rayonnement électromagnétique qui se propage à la vitesse de la lumière dans le milieu considéré. Cette constatation est de nos jours connue de chacun : on pensera, par exemple, à l'observation nocturne grâce aux jumelles et aux caméras capables d'observer le rayonnement infrarouge émis par tout corps de température T . Le but de ce chapitre est d'étudier qualitativement ce rayonnement en lien avec le modèle du *corps noir* à l'équilibre thermique, que l'on définira dans un premier temps, et dont on donnera les caractéristiques ; dans une deuxième partie, nous présenterons une application à l'effet de serre.

Table des matières

I - Rayonnement du corps noir	1
1) Rayonnement thermique, modèle du corps noir	1
2) Équilibre radiatif	2
3) Loi de Stefan et de Wien	3
II - Application : effet de serre	4
1) Flux surfacique solaire reçu par la Terre	4
2) Température de surface de la Terre sans atmosphère	4
3) Température de surface de la Terre avec atmosphère monocouche : effet de serre	5

I - Rayonnement du corps noir

1) Rayonnement thermique, modèle du corps noir

a) Qu'est ce que le rayonnement thermique

Le rayonnement d'un matériau chaud dépend du matériau. Les lampes à incandescence, qui sont de plus en plus remplacées par des lampes à LED dans les maisons, sont composées d'un filament de tungstène chauffé par effet Joule à une température d'environ 3600 K. Il émet alors un rayonnement dont la partie du spectre située dans le domaine visible, est utilisée pour l'éclairage domestique (il y a également un rayonnement dans l'IR...).

A RETENIR

Tout corps chauffé à une température T émet un rayonnement électromagnétique. On parle de **rayonnement thermique** à la température T .

Exemple :

- Soleil de température de surface $T_S = 5750$ K
- Corps humain à température ambiante $T_h = 300$ K
- Rayonnement fossile de l'Univers $T_f = 2,7$ K

L'étude du spectre d'émission des corps chauffés montre un spectre continu qui ne dépend que de la température de surface T du corps indépendamment du matériau qui les compose. Ce phénomène est décrit en modélisant le corps chauffé comme un corps noir.

b) Qu'est ce que le modèle du corps noir ?

On étudie dans ce chapitre le corps noir, qui est un modèle universel, dont le rayonnement est très bien compris et qui s'applique à de nombreuses situations d'intérêt.

C'est également un modèle d'une grande importance historique, puisque c'est en étudiant ce modèle que Planck a introduit la constante h dont on connaît la postérité, ainsi que la notion de "quantum de rayonnement" (on rappellera que c'est l'impossibilité de décrire correctement le rayonnement du corps noir qui a conduit Planck, puis Einstein à introduire la notion de photon et la théorie de quanta, ancêtre de la mécanique quantique).

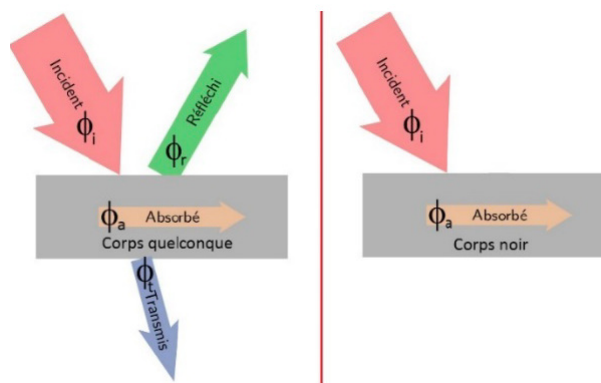
En général, un corps qui reçoit une onde électromagnétique peut faire trois choses : la réfléchir, la transmettre ou l'absorber.

Définition : Corps noir.

On appelle corps noir un corps de température T qui **absorbe intégralement** le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit, quelle que soit la longueur d'onde de celui-ci. En conséquence, il ne la réfléchit pas et ne la transmet pas.

Remarque :

- En tant que modèle, le corps noir n'existe pas, mais sur certaines gammes de longueur d'onde on peut considérer que certains corps approchent ce modèle en très bonne approximation, notamment :
 - une plaque recouverte de noir de fumée dans le visible ;
 - des briques dans l'infrarouge.
 puisque ces matériaux sont de très bons absorbeurs opaques.
- Un corps noir n'est pas noir ! Sa couleur dépend de sa température. À température ambiante il émet effectivement trop peu dans le visible et apparaît noir à l'œil.
- En pratique, l'universalité et la généralité des lois qui découlent du modèle du corps noir permettent de les appliquer à des systèmes qui s'éloignent du modèle strict. On extrapolera ainsi souvent les résultats du corps noir à d'autres systèmes : Soleil, qui n'est pas à l'équilibre thermique (sa surface est plus froide que son cœur), ciel qui est transparent,...
- En théorie, un corps noir idéal est composé d'une boîte dont les parois sont parfaitement absorbantes et maintenues à la température T . Il s'établit un équilibre thermodynamique entre la boîte et le champ électromagnétique intérieur au travers de l'absorption et de l'émission d'ondes électromagnétiques par les parois. L'observation du champ électromagnétique interne se fait au travers d'une ouverture de faible diamètre percée dans la boîte. Le rayonnement sortant est appelé *rayonnement du corps noir* ou *rayonnement thermique*.

**2) Équilibre radiatif****Définition : Flux surfacique.**

Le flux surfacique φ d'énergie électromagnétique est donné par

$$d\mathcal{P} = \varphi dS$$

où $d\mathcal{P}$ est la puissance électromagnétique traversant la surface élémentaire dS (où l'énergie EM qui traverse dS par unité de temps) exprimée en W. φ s'exprime en W.m^{-2}

Définition : densité spectrale de flux surfacique.

un flux surfacique φ peut être décomposé selon les longueurs d'ondes. Le flux surfacique élémentaire entre λ et $\lambda+d\lambda$ s'écrit

$$d\varphi = F(\lambda)d\lambda$$

et le flux surfacique total est donc

$$\varphi = \int_0^\infty F(\lambda)d\lambda$$

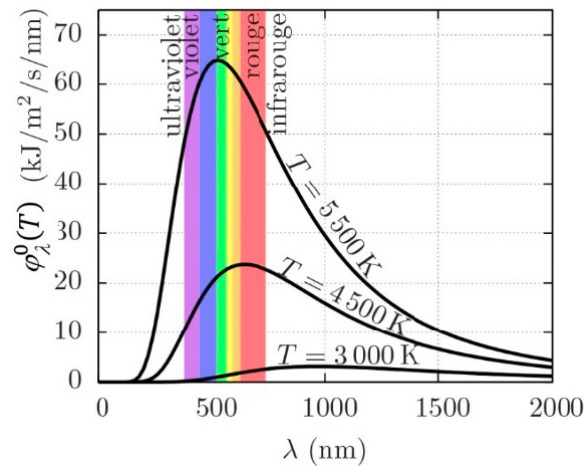
F est en W.m^{-3}

L'équilibre radiatif d'un corps quelconque indique que celui-ci doit évacuer l'énergie qu'il reçoit du rayonnement électromagnétique, pour pouvoir être à l'équilibre thermodynamique.
 Dans le cas d'un corps noir, la puissance absorbée et la puissance émise doivent donc être égales, c'est l'équilibre radiatif du corps noir.

En 1900, Planck, en raisonnant sur des "paquets" d'énergie, émis par la boîte décrite dans la remarque au-dessus, propose une relation pour la densité spectrale de flux surfacique émis par le corps noir à la température T :

$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T \lambda}\right) - 1}$$

qui est la **loi de Planck** (formule hors programme!!).



Historiquement, cette loi est précédée des lois de Wien (1893) et de Stefan(-Boltzmann) (1879), mais nous allons étudier celles-ci comme des cas particuliers de la loi de Planck

3) Loi de Stefan et de Wien

— A RETENIR —

Loi de déplacement de Wien.

Pour un corps de température de surface T , la densité spectrale de flux surfacique émis est maximale pour une longueur d'onde λ_{\max} donnée par :

$$\lambda_{\max} T \approx 2900 \mu\text{m.K}$$

Exemple :

un être humain de température $T \approx 300 \text{ K}$ rayonne principalement à $\lambda_{\max} \approx 9 \mu\text{m}$ (dans l'IR donc). Le Soleil de température de surface $T = 5900 \text{ K}$ rayonne principalement autour de $\lambda_{\max} \approx 500 \text{ nm}$ (visible). Le fond diffus cosmologique (ou rayonnement fossile) à $T = 3 \text{ K}$, rayonne dans les ondes radio ($\lambda_{\max} \approx 900 \mu\text{m}$).

— A RETENIR —

Loi de Stefan.

Le flux surfacique total émis par un corps dont la surface est portée à la température T est donné par

$$\varphi = \sigma T^4$$

où $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan

ATTENTION!! Le rayonnement thermique d'un corps noir est une propriété de surface : c'est la température de surface qui intervient dans la loi de Stefan et de Wien.

Remarque :

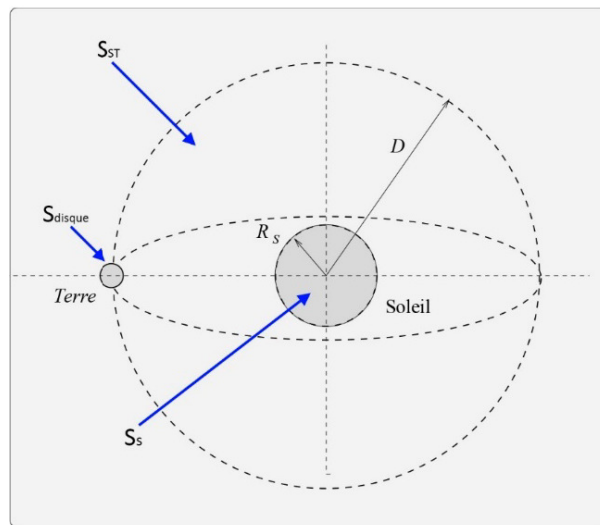
- En pratique, comme je l'ai déjà dit, on utilisera ces lois même pour des système hors-équilibre (le Soleil par exemple), et même pour des corps qui ne sont pas très absorbant (le ciel par exemple).
- Le loi de Planck donne un rayonnement très dissymétrique.

II - Application : effet de serre**1) Flux surfacique solaire reçu par la Terre**

Le Soleil de rayon $R_S = 7,0 \cdot 10^5$ km présente une température de surface de $T_S = 5,75 \cdot 10^3$ K, la loi de Stefan permet de calculer la puissance totale émise par le Soleil :

$$\mathcal{P}_{S,tot} = 4\pi R_S^2 \cdot \sigma T_S^4 (= 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W})$$

Ce rayonnement est émis par le Soleil de manière isotrope. La Terre de rayon $R_T = 6,4 \cdot 10^3$ km, située à une distance $d_{T-S} = 1,5 \cdot 10^8$ km du Soleil en récupère une fraction :



$$\frac{\mathcal{P}_S}{\mathcal{P}_{S,tot}} = \frac{\pi R_T^2}{4\pi d_{T-S}^2}$$

où \mathcal{P}_S est la puissance solaire reçue par l'atmosphère terrestre. On en déduit le flux surfacique solaire moyen en haut de l'atmosphère :

$$\varphi_S = \frac{\mathcal{P}_S}{\pi R_T^2} = \frac{R_S^2}{d_{T-S}^2} \sigma T_S^4$$

L'AN donne $\varphi_S 1,3 \cdot 10^3 \text{ W.m}^{-2}$. Cette quantité est parfois appelée *constante solaire*.

2) Température de surface de la Terre sans atmosphère

En supposant que la Terre est isotherme de température de surface T_T et se comporte comme un corps noir, la puissance moyenne rayonnée sur l'ensemble de sa surface est donnée par la loi de Stefan à nouveau :

$$\mathcal{P}_T = 4\pi R_T^2 \sigma T_T^4$$

À l'équilibre thermodynamique, le bilan radiatif de la Terre impose $\mathcal{P}_S = \mathcal{P}_T$ (puissance reçue par le Soleil = puissance rayonnée par la Terre), soit :

$$\varphi_S \pi R_T^2 = 4\pi R_T^2 \sigma T_T^4$$

On peut alors en déduire la température de surface de la Terre à l'équilibre thermodynamique :

$$T_T = \left(\frac{\varphi_S}{4\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = 2,8 \cdot 10^2 \text{ K}$$

Ce modèle sans atmosphère conduit à une température moyenne de surface de la Terre de quelques degrés. On trouve donc un ordre de grandeur cohérent, mais la valeur numérique est un peu faible...

Notons qu'à la température de surface de la Terre calculée précédemment correspond un rayonnement dont le spectre est maximum à $\lambda_{\max} \approx 10 \mu\text{m}$ selon la loi de Wien. Le rayonnement tellurique est donc infra-rouge.

3) Température de surface de la Terre avec atmosphère monocouche : effet de serre

Le modèle précédent peut être raffiné en prenant en compte l'effet de l'atmosphère. celle-ci est composée de gaz qui la rendent transparente dans le visible et quasiment opaque dans le domaine infrarouge, à cause de l'absorption des molécules du gaz. L'atmosphère est donc modélisée comme :

- transparente dans le domaine visible et réfléchissant une proportion A , appelé **albédo**, du flux surfacique solaire incident. Ainsi seule une proportion $(1 - A)$ du flux surfacique solaire incident parvient effectivement à la surface de la Terre. Les mesures montrent que $A \approx 0,3$;
- parfaitement absorbante dans le domaine infrarouge, c'est-à-dire complètement opaque au flux surfacique tellurique émis par la Terre.

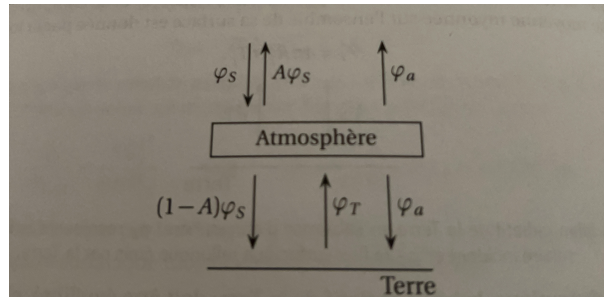
En conséquence, l'atmosphère se comporte comme un corps noir de température T_a dans le domaine infrarouge. L'atmosphère émet donc un rayonnement de flux surfacique φ_a en direction de la Terre et de l'atmosphère. Le flux surfacique tellurique infrarouge apparaît alors comme confiné car une partie est réémise par l'atmosphère en direction de la Terre, c'est l'**effet de serre**.

A RETENIR

Effet de serre :

l'atmosphère est transparente dans le domaine visible et complètement opaque dans le domaine infrarouge. Une proportion A appelée *albédo* du flux surfacique solaire est réfléchi par l'atmosphère vers l'espace et l'atmosphère absorbe l'ensemble du flux surfacique tellurique émis par la Terre. L'atmosphère se comporte comme un corps noir et émet un rayonnement infrarouge qui est en partie absorbé par la Terre. Le flux surfacique tellurique est donc confiné au voisinage de la Terre par l'atmosphère, on parle d'*effet de serre*.

Bilan radiatif en présence d'atmosphère :



Afin de calculer la température de surface de la Terre dans ce modèle, explicitons le bilan radiatif précédent sur la Terre, puis sur l'atmosphère :

— sur la Terre :

$$4\pi R_T^2 \varphi_T = (1 - A)\pi R_T^2 \varphi_S + 4\pi R_T^2 \varphi_a$$

$$\text{soit } \varphi_T = \frac{1-A}{4} \varphi_S + \varphi_a$$

— sur l'atmosphère :

$$2.4\pi R_T^2 \varphi_a + \pi R_T^2 (1 - A) \varphi_S + \pi R_T^2 A \varphi_S = \pi R_T^2 \varphi_S + 4\pi R_T^2 \varphi_T$$

$$\text{soit } 2\varphi_a = \varphi_T$$

De ces relations, on en déduit l'expression du flux surfacique tellurique φ_T ainsi que la température de surface de la Terre :

$$\varphi_T = \frac{1 - A}{2} \varphi_S$$

et donc

$$T_T = \left(\frac{1 - A}{2\sigma} \varphi_S \right)^{\frac{1}{4}}$$

On trouve alors $T_T \approx 3,0.10^2$ K, soit une température moyenne de surface de la Terre de quelques dizaines de degrés. Ce modèle donne donc une meilleure description de la température de surface de la Terre qu'en l'absence d'atmosphère. Le modèle peut encore être amélioré par exemple en prenant en compte l'effet des nuages dans le bilan radiatif, ou encore le transport d'énergie par convection dans l'atmosphère dû aux mouvements des masses d'air.