

Le rayonnement thermique et la loi du Corps Noir

Le rayonnement :

Un corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Une des particularités de ce rayonnement dit "thermique" est qu'il peut se propager dans le vide.

Au niveau microscopique, ce phénomène ne peut s'expliquer en physique classique. Cependant, on retiendra comme image que plus la température du corps est élevée, plus l'agitation thermique responsable de l'émission est élevée.

Comme tout rayonnement électromagnétique, le rayonnement dit thermique est caractérisé par une densité d'énergie et un spectre (répartition de l'énergie suivant la longueur d'onde).

Le rayonnement thermique se déplace vers les courtes longueurs d'ondes quand la température du corps augmente. Ainsi le filament de tungstène utilisé dans les lampes à incandescence a une couleur caractéristique de sa température. A faible température, il est rouge-orangé, puis jaune puis blanc. Le pic du spectre d'émission se déplace de la limite entre l'infra-rouge et le visible (rouge) vers le milieu du visible (blanc).

Il faut finalement distinguer la nature des récepteurs de ce rayonnement thermique : certains le réfléchissent d'autres l'absorbent et la transforment en énergie interne pour rayonner à leur tour.

Caractéristiques du rayonnement thermique

Cette section se focalise sur le rayonnement thermique. On présente tout d'abord le comportement des surfaces par rapport au rayonnement.

On définit ensuite le rayonnement d'équilibre, puis on énonce la loi du corps noir.

Enfin on s'intéresse au comportement des surfaces réelles.

Émission, absorption, réflexion-diffusion, transparence et opacité.

Nous allons étudier les différents comportements de la matière vis à vis du rayonnement thermique. Nous rappelons que le rayonnement thermique est un rayonnement électromagnétique; on retrouve donc le vocabulaire des ondes.

Émission

Un corps porté à une certaine température convertit son énergie interne (énergie microscopique) en rayonnement thermique.

Une unité de surface d'un corps émet durant une unité de temps une quantité d'énergie appelée flux d'émission.

On le note F_{em} .

Absorption

Il s'agit de l'opération inverse. Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé (noté F_{abs})

Réflexion et diffusion

Au lieu d'être absorbé, le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi.

Dans ces conditions on distingue 2 cas :

- Le renvoi obéit aux lois de l'optique géométrique (un angle d'incidence, un angle de réflexion). Il s'agit alors de réflexion.

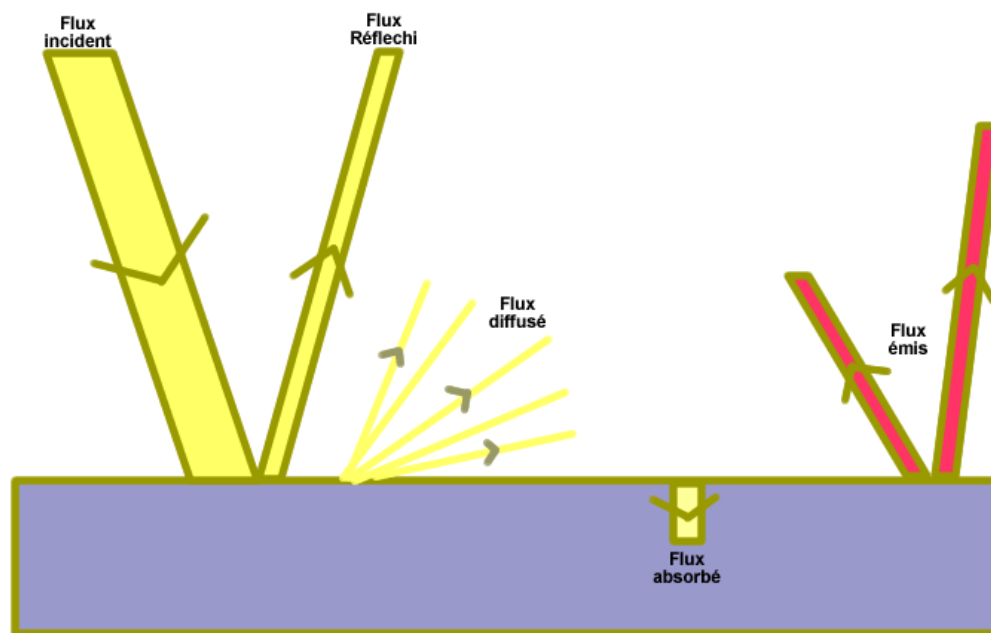
- Le renvoi se fait dans toutes les directions (même si l'on a une seule direction incidente). On parle alors de diffusion.

On note que l'onde diffusée ou émise a la même fréquence que l'onde incidente.
La somme de ces deux flux est notée F_{ref} .

Transparence et opacité

Un milieu peut transmettre intégralement l'onde incidente, il est alors appelé milieu transparent. Le vide est un exemple de milieu transparent. En première approximation, le verre est aussi un milieu transparent pour des longueurs d'ondes dans le domaine du visible.

Inversement, un corps ne transmettant aucune partie du rayonnement incident est dit corps opaque.



Un petit résumé avec un schéma représentant les différents flux au niveau de la surface d'un corps opaque.

On remarque que le flux émis n'est pas forcément à la même longueur d'onde que le flux incident.

Rappel des notations du cours pour les flux :

F_{ref} = Flux réfléchi + Flux diffusé

F_{abs} = Flux absorbé

$F_{émi}$ = Flux émis

F_i = Flux réfléchi + Flux absorbé

F_p = Flux réfléchi + Flux émis

Par la suite, nous nous intéresserons à des corps opaques placés dans le vide (milieu transparent). Cela modélise bien les corps célestes.

Relations entre les flux lumineux, notion de rayonnement d'équilibre.

Flux incident.

Le flux incident F_i est défini comme la puissance surfacique du rayonnement incident en un point considéré de la surface du corps étudié (cf figure précédente).

Le flux incident est soit réfléchi-diffusé, soit absorbé.

On a donc la relation suivante. :

$$F_i = F_{ref} + F_{abs}$$

Flux partant.

Le flux surfacique partant du corps est lui la somme du flux émis et du flux réfléchi

On a donc la relation suivante. :

$$F_p = F_{ref} + F_{emi}$$

Équilibre radiatif.

On dit qu'un corps opaque est en équilibre radiatif avec le rayonnement qui l'entoure, s'il n'emmagasine pas d'énergie ou n'en perd pas.

Dans ces conditions, le flux incident doit être égal au flux partant.

On a donc :

$$F_p = F_i \quad \text{et} \quad F_{emi} = F_{abs}$$

Définition du Corps Noir. Lois de Planck, de Wien et de Stephan.

Le corps noir.

Le corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit.

Dans ces conditions, le flux réfléchi est nul et le flux partant est seulement constitué du flux émis.

On a donc

$$F_{ref} = 0 \quad \text{et} \quad F_p = F_{emi}$$

Loi de Planck

La loi de Planck donne la répartition suivant la longueur d'onde du flux émis F_{emi} d'un corps noir à la température T .

Notre but n'est pas de démontrer la loi de Planck, mais elle s'obtient en établissant une relation entre la densité

volumique d'énergie électromagnétique du champ rayonné et le flux partant ou incident.
 Dans un petit intervalle de longueur d'onde, le flux émis Femi a l'expression suivante :

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} : \text{ constante de Planck}$$

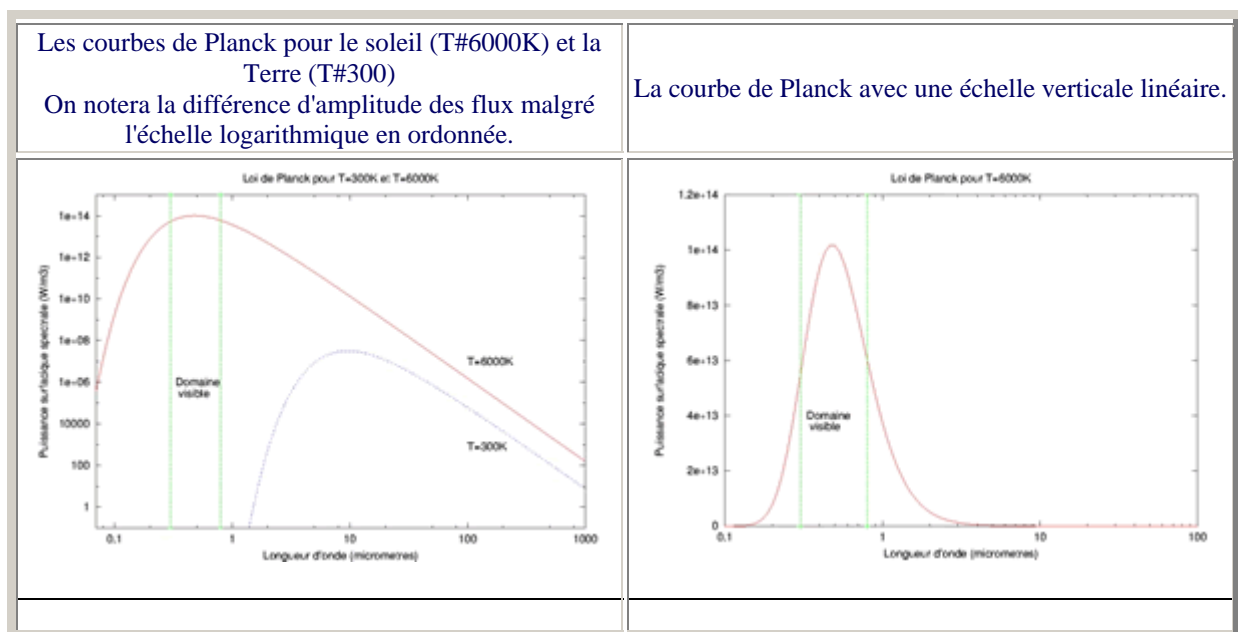
$$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/s} \text{ constante de Boltzmann}$$

$$dF_{emi}^{CN} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{k_B \lambda T} - 1} d\lambda$$

$c = 3.00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ vitesse de la lumière

λ : longueur d'onde.

T : Température du corps opaque.



Loi de Wien.

Cette loi dite du "**déplacement de Wien**" découle directement de la formule de Planck.

Pour une température donnée, elle donne la valeur de la longueur d'onde λ_m où le flux est maximal :

$$\lambda_m T = C = 3000 \mu m . K$$

A l'aide de la figure précédente montrant les courbes de Planck pour les 2 températures, on peut trouver graphiquement que :

- Pour T=6000K, $\lambda_m = 0.6$ micromètre, soit le milieu du spectre visible.
- Pour T=300K, $\lambda_m = 10$ micromètres, situé dans infra-Rouge.

On vérifiera ces valeurs en faisant une simple division !!!!

Loi de Stéfán.

La *loi de Stéfán* est la simple intégration de la loi de Planck sur l'ensemble des longueurs d'onde. Ce peut être un petit exercice de mathématiques qui donne :

$$F_{emi}^{CN} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{k_B \lambda T} - 1} d\lambda = \sigma T^4$$

avec $\sigma = 5.67.10^{-8} W.m^{-2}.K^4$: constante de Stefan

Vite, des valeurs numériques :

- Pour T=6000K, on a $F_p=F_i=73.000.000 W/m^2/K-4$
- Pour T=300K, on a $F_p=F_i=459 W/m^2/K-4$

La formule de Stefan est d'une importance capitale et rappelle que les flux incidents et partants ne sont fonction que de la température. On note la forte dépendance en T puisqu'il s'agit d'une puissance quatrième.

Alors que la Température du Soleil n'est que 20 fois plus élevée que celle de la Terre, son flux partant est 160000 fois plus élevé.

Rayonnement à partir de surfaces réelles.

Une surface réelle diffère du Corps Noir pour :

- **l'absorption** : Une surface réelle est caractérisée par son pouvoir absorbant. On note **a le coefficient d'absorption**.

Il s'agit du rapport entre le flux absorbé et le flux incident.

$$a = \frac{F_{abs}}{F_i}$$

Ce rapport dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Pour le Corps Noir, il est égal à 1.

- **l'émission** : Une surface réelle est caractérisée par son pouvoir d'émission. On note **e le coefficient d'émission**.

Il s'agit du rapport entre le flux émis réel et le flux émis du corps noir de même température.

$$e = \frac{F_{emi}^{reel}}{F_{emi}^{CN}} = \frac{F_{emi}^{reel}}{\sigma T^4}$$

Ce rapport dépend de la longueur d'onde du rayonnement émis.

Pour le Corps Noir, il est égal à 1.

Pour une même longueur d'onde, le coefficient d'absorption et le coefficient d'émission sont égaux. Cependant, rayonnement incident et rayonnement émis étant souvent dans des domaines de longueur d'ondes très différents, il faudra prendre 2 valeurs différentes.

Des exemples de coefficients d'absorption en fonction de la longueur d'onde.

Surface	0.6micron-solaire	1.8micron-1650K	3.6microns-800K	5.4microns-430K	9.3microns-310K
Fer galvanisé	0.89	0.90			0.28
Marbres blancs	0.47				0.97
Verre	0.1				0.90
Papier blanc	0.28	0.25	0.82		0.95
Océan	0.9				
Sol enneigé	0.3				
Végétation	0.8				0.85

Application à une surface réelle éclairée par le soleil. Notion d'albédo.

On considère une surface terrestre boisée éclairée par un flux solaire F_0 . Cette surface est à une température T proche de 300K. Son spectre d'émission se situe donc dans l'IR.

Écrivons l'égalité des flux absorbés et émis pour cette surface.

$$a(\lambda = 0.6\mu m).F_0 = a(\lambda = 9.3\mu m).\sigma T^4$$

On peut trouver T en connaissant les valeurs numériques de F_0 et de a aux 2 longueurs d'ondes.

Enfin, on appelle **albédo (A)** le rapport entre le flux réfléchi et le flux solaire incident.

$$A = \frac{F_{ref}}{F_i}$$

On note que :

$$A = 1 - a(\lambda = 0.6\mu m)$$