

# Bilans radiatifs

## Chapitre 14,3

### 1 Rayonnement électromagnétique et transfert thermique

#### 1.1 Émission, absorption, réflexion, diffusion

Dans ce document, la grandeur  $\varphi$  n'est pas le **flux thermique** pour une surface donnée  $S$  quelconque mais le **flux thermique surfacique**. Son unité n'est donc pas le watt (W) mais le watt par mètre-carré ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

**Émission.** Il s'agit du *rayonnement électromagnétique émis par un corps porté à une certaine température*. Cette émission est *spontanée* et a pour cause les mouvements des porteurs de charge de la matière (électrons, etc.) dus à l'excitation thermique. *L'énergie interne est ainsi convertie en énergie radiative*. Nous notons  $\varphi_e$  le flux surfacique correspondant à cette émission.

**Absorption.** Il s'agit de la conversion inverse. *Le rayonnement absorbé par la matière est converti en énergie interne*. Nous noterons  $\varphi_a$  le flux surfacique absorbé.

**Réflexion et diffusion.** *Le rayonnement incident sur une paroi peut être renvoyé par la paroi dans une autre direction dans le milieu d'incidence par interaction avec la paroi mais sans absorption*. Les phénomènes concernés peuvent être la simple *réflexion* (obéissant aux lois de Descartes) ou la *diffusion* qui consiste à un renvoi étalé dans toutes les directions même pour une direction incidente unique. Le verre dépoli, le papier, les tissus, etc. sont des substances diffusantes. *Réflexion et diffusion s'effectuent sans changement de fréquence des ondes*. Notons  $\varphi_r$ , le flux surfacique de retour dans le milieu d'incidence.

#### 1.2 Milieux transparents. Milieux opaques

**Milieu transparent.** Un milieu est dit totalement **transparent** s'il *transmet intégralement le rayonnement qu'il reçoit*. il n'y a donc *ni absorption, ni réflexion/diffusion*.

**Milieu opaque.** À l'inverse un milieu est dit totalement **opaque** s'il *ne transmet aucune fraction de rayonnement qu'il reçoit*. Le rayonnement incident est donc *soit absorbé, soit réfléchi/diffusé, soit les deux*.

**Remarque.** En fait, on n'observe jamais une transparence ou une opacité totale sur l'ensemble des fréquences du spectre. Pour un milieu donné, il convient de définir les intervalles de fréquences (ou de longueur d'onde), pour lesquelles on pourra considérer le milieu comme à peu près transparent ou opaque.

Ainsi le verre, par exemple, pourra être considéré comme transparent dans l'intervalle  $0,3\mu\text{m} < \lambda < 3\mu\text{m}$  et opaque au contraire dans l'intervalle  $4\mu\text{m} < \lambda < 30\mu\text{m}$ .

#### 1.3 Équilibre radiatif

Pour des raisons pratiques, *tous les flux thermiques sont considérés positifs*. De plus, on considère les échanges d'énergie rayonnante entre corps opaques placés dans un milieu transparent, en un point de la surface d'un de ces corps opaques.

**Flux surfacique incident.** Le flux surfacique incident  $\varphi_i$  est la puissance surfacique du rayonnement incident au point considéré.

Le corps étant opaque au rayonnement, le rayonnement incident est soit absorbé, soit réfléchi/diffusé, ces processus pouvant avoir lieu simultanément.

La conservation de l'énergie exige dans ces conditions que :

$$\varphi_i = \varphi_a + \varphi_r$$

**Flux surfacique partant.** Le flux surfacique partant  $\varphi_p$  cumule le flux  $\varphi_r$ , mais aussi le flux émis  $\varphi_e$  par le corps au voisinage de la frontière.

La conservation de l'énergie implique que :

$$\varphi_p = \varphi_e + \varphi_r$$

On dit qu'un corps opaque est en **équilibre radiatif** avec le champ de rayonnement qui l'entoure si la condition :

$$\varphi_i = \varphi_p$$

est satisfaite.

**Remarque.** L'équilibre radiatif ne suppose pas l'**équilibre thermodynamique** pour les corps opaques, *leurs températures peuvent être différentes.*

L'équilibre radiatif implique aussi l'égalité entre les flux émis et absorbés :

$$\varphi_e = \varphi_a$$

## 1.4 Rayonnement d'équilibre

Lorsque le système, constitué des corps opaques placés dans un milieu transparent, est à l'*équilibre thermodynamique* à la température  $T$ , le rayonnement qui règne dans le milieu transparent est dit **rayonnement d'équilibre**.

**Remarque.** L'équilibre thermodynamique nécessite l'équilibre radiatif des corps opaques avec le rayonnement dans lequel ils baignent.

## 1.5 Loi de Stefan pour le rayonnement d'équilibre d'un corps noir

**Corps noir.** Le corps noir est défini comme un **absorbeur intégral sur la totalité du spectre** : *tout rayonnement thermique incident est absorbé quel que soit sa longueur d'onde et quelle que soit sa direction incidente.*

Le concept d'absorbeur intégral est un concept idéal. L'absorption totale ou quasi totale pour une substance donnée n'est observée, dans la pratique, que dans certains domaines spectraux ou « fenêtres spectrale ».

*Le flux partant d'un corps noir est totalement d'origine émissive* : il n'y a pas de contribution due au rayonnement réfléchi ou diffusé.

La loi de Joseph Stefan fut découverte expérimentalement en 1879 lors de son étude du rayonnement d'équilibre du corps noir. Elle stipule que *le flux émis par un corps noir est proportionnel à sa température élevée à la puissance 4.*

$$\varphi_e = \sigma T^4$$

avec  $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

**Un corps noir émet un flux surfacique, à toutes les longueurs d'ondes<sup>1</sup>, d'autant plus grand que sa température est élevée.**

Le bilan radiatif d'un corps noir en équilibre radiatif et thermodynamique est :

$$\varphi_e = \varphi_a = \sigma T^4$$

avec  $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

<sup>1</sup>. Ce qui ne signifie pas qu'il est égal à toutes les longueurs d'ondes !

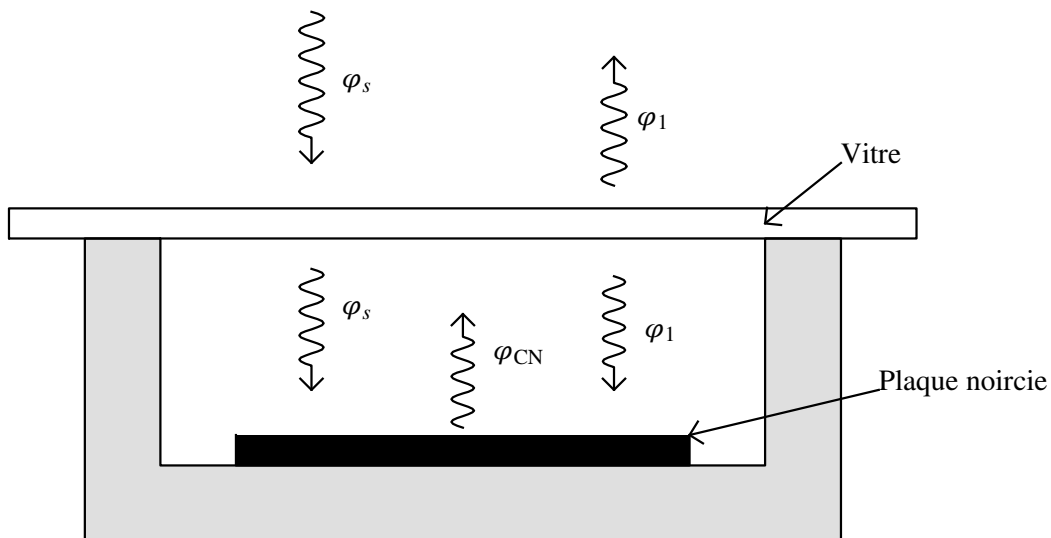
**Remarque.** On attribue souvent les propriétés des corps noirs en *équilibre radiatif et thermodynamique* aux corps noirs en *équilibre radiatif à température localement constante (mais pas uniforme)*.

Si on considère, par exemple, le soleil, l'étude du rayonnement qu'il émet montre qu'il est voisin de celui d'un corps noir de température de l'ordre de 6000 °C. La couche superficielle responsable de l'émission est appelée photosphère. Sa température d'équilibre local est voisine de cette valeur. Quant aux rayonnements émis par les couches profondes du soleil (dont la température est beaucoup plus élevée, de l'ordre de  $10^7$  K) ils sont totalement absorbés par la photosphère.

## 2 Effet de serre

On étudie l'effet de serre produit par l'interposition d'une vitre au-dessus d'une plaque qui reçoit le rayonnement solaire. La plaque est noircie et assimilée à un corps noir. Le verre est supposé totalement transparent au rayonnement solaire. La vitre est en revanche totalement absorbante pour le rayonnement infra-rouge émis par la plaque (et l'atmosphère) qui absorbe le rayonnement solaire. On désigne par  $\varphi_s$  le flux solaire surfacique supposé arriver normalement à la vitre et à la plaque, par  $\varphi_{CN}$  le rayonnement émis par la plaque et par  $\varphi_1$  le rayonnement émis par la vitre.

**Donnée.**  $\varphi_s = 0,600 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ .



- 1) On suppose l'équilibre radiatif de la plaque. Écrire l'équation qui traduit cet équilibre.
- 2) On suppose l'équilibre radiatif de la vitre. Écrire l'équation qui traduit cet équilibre.
- 3) Calculer la température  $T$  de la plaque noircie.
- 4) En déduire la température  $T_1$  de la vitre.
- 5) On superpose maintenant deux vitres (avec une couche d'air entre ces vitres). Reprendre les questions précédentes et déterminer la nouvelle température de la plaque.
- 6) Généraliser le cas précédent à la situation où on utiliserait  $n$  vitres<sup>2</sup>.

## 3 Bilan radiatif de la Terre

Activité du Livre scolaire.

<sup>2</sup>. Dans la réalité, chaque vitre réfléchit et absorbe une partie du rayonnement solaire. On peut montrer qu'il faut 4 à 5 vitres pour que la température  $T$  soit maximale.