

Bilans radiatifs

Chapitre 14,3

1 Rayonnement électromagnétique et transfert thermique

1.1 Émission, absorption, réflexion, diffusion

Dans ce document, la grandeur φ 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 φ_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 φ_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 φ_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 φ_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 φ_p cumule le flux φ_r , mais aussi le flux émis φ_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'ondes¹, d'autant plus grand que sa température est élevée.

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

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

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

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

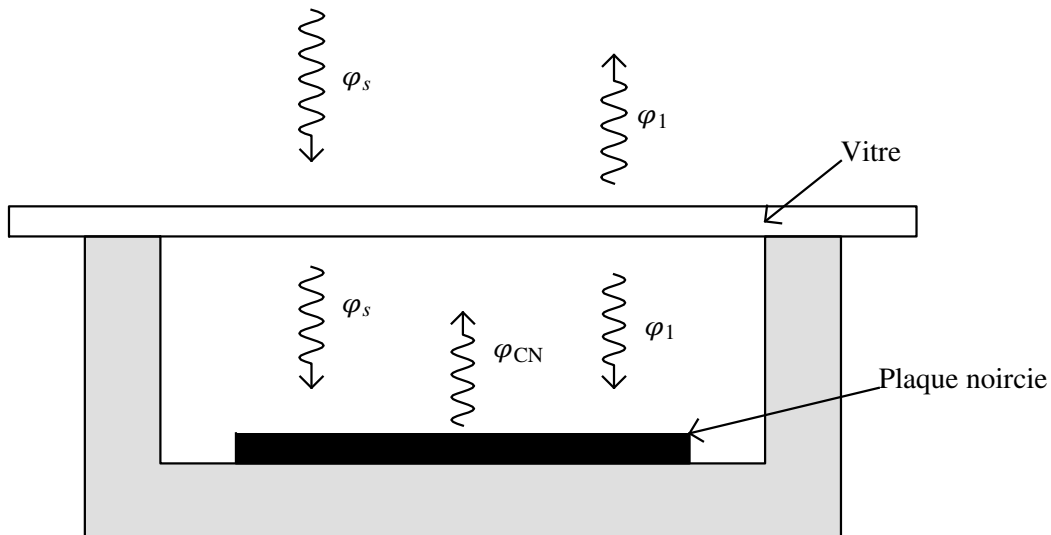
Remarque. On attribue souvent les propriétés des corps noirs en *équilibre radiatif et thermodynamique* aux corps noirs en *équilibre radiatif à température localement constante (mais pas uniforme)*.

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 φ_s le flux solaire surfacique supposé arriver normalement à la vitre et à la plaque, par φ_{CN} le rayonnement émis par la plaque et par φ_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 vitres².

3 Bilan radiatif de la Terre

Activité du Livre scolaire.

4 Bilan thermique de la Terre dans la troposphère

Note. Ne tentez cet exercice que si vous n'êtes pas facilement effrayés par l'écriture littérale. En aucun cas, un exercice de ce niveau ne sera demandé en contrôle. Par contre le raisonnement utilisé est identique à celui des exercices précédents.

Données. Le rayon du Soleil vaut $R_S = 7,0 \cdot 10^8$ m ; le rayon de la Terre vaut $R_T = 6,4 \cdot 10^6$ m ; la distance moyenne de la Terre au Soleil vaut $d = 1,5 \cdot 10^{11}$ m.

On admet que le Soleil se comporte sensiblement comme un corps noir de température T_S .

- 7) Rappeler la loi de Stephan et donner l'unité de la constante σ .
A.N. $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ S.I.
- 8) Exprimer $P_{e,S}$, la puissance totale rayonnée par le Soleil, en fonction de σ , T_S et R_S .
On supposera que le flux surfacique émis $\varphi_{e,S}$ est uniforme sur toute la surface du Soleil.

On peut montrer que la puissance $P_{i,T}$ reçue du Soleil par la Terre a pour expression

$$P_{i,T} = \frac{\pi R_T^2}{4\pi d^2} P_{e,S} = \frac{R_T^2}{4d^2} P_{e,S}$$

où πR_T^2 est la surface que présente la terre au rayonnement et d la distance Soleil-Terre. La Terre reçoit donc la puissance

$$P_{i,T} = \frac{\pi R_T^2}{d^2} R_S^2 \sigma T_S^4$$

La Terre réfléchit une partie de l'énergie reçue par le Soleil (la fraction réfléchie s'appelle l'**albedo** A de la planète) et absorbe le reste. L'albedo A a donc pour expression

$$A = \frac{P_{r,T}}{P_{i,T}}$$

où $P_{r,T}$ est la puissance réfléchie par la Terre et $P_{i,T}$ la puissance incidente reçue par la Terre.

2. 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.

- 9) Donner l'expression de $P_{a,T}$ la puissance absorbée par la Terre.
- 10) On suppose que la Terre se comporte comme un corps noir de température T_T (température de la planète) en équilibre radiatif et thermodynamique. Donner l'expression du flux surfacique $\varphi_{e,T}$ émis par la Terre puis celle de $P_{e,T}$ la puissance rayonnée par la Terre.
- 11) Écrire l'équation qui traduit l'équilibre radiatif de la Terre et en déduire l'expression de sa température T_T .
- 12) Calculer la valeur de T_T .
L'albedo de la Terre vaut $A=0,34$ et la température du Soleil $T_S=5785$ K.
- 13) La valeur de la température obtenue à partir du modèle précédent vous paraît-elle réaliste?
Comment pourrait-on améliorer le modèle ?

On modélise maintenant la Terre en faisant les hypothèses suivantes :

- Le sol et l'atmosphère de températures (T_0, T_1) rayonnent approximativement comme des corps noirs de températures (T_0, T_1) ;
- L'atmosphère absorbe la fraction α du rayonnement solaire et absorbe complètement le rayonnement de la Terre. La Terre absorbe la fraction $(1-\alpha)$ du rayonnement solaire et absorbe le rayonnement de l'atmosphère ;
- On néglige l'épaisseur de l'atmosphère. La surface de l'atmosphère est donc égale à la surface du sol, c'est à dire $4\pi R_T^2$;
- La puissance incidente considérée dans ce modèle est la puissance absorbée dans le modèle précédent (de façon à prendre en compte l'albedo :

$$P_{iT} = (1 - A) \frac{\pi R_T^2}{d^2} R_S^2 \sigma T_S^4$$

- 14) Écrire l'équation qui traduit l'équilibre radiatif au niveau du sol.
- 15) Écrire l'équation qui traduit l'équilibre radiatif de l'atmosphère.
- 16) En déduire les expressions des températures T_0 et T_1 en fonction de la température T_T et du coefficient α .
- 17) Calculer la nouvelle température du sol. Ce modèle est-il plus réaliste ?