

Bilans Radiatifs

Doc. 13,4

§1 Objectif

Ce document a pour but de montrer comment effectuer des bilans énergétiques radiatifs afin de comprendre le mécanisme de l'*effet de serre* et d'évaluer la température moyenne sur Terre, tout en examinant l'impact de l'*albédo*.

§2 Rayonnement électromagnétique et transfert thermique

§2.1 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

Le *rayonnement électromagnétique émis par un corps à une température donnée* est généré par les mouvements des porteurs de charge (électrons, ions, etc.) à cause de l'excitation thermique. Cette émission, *spontanée*, permet la conversion de l'énergie interne en énergie radiative.

Le flux surfacique correspondant à cette émission est noté φ_e .

Absorption

L'*absorption* du rayonnement par la matière est le phénomène opposé à l'émission. Dans ce cas, *le rayonnement absorbé est transformé en énergie interne*.

Le flux surfacique absorbé est désigné par φ_a .

Réflexion et diffusion

Lorsqu'un rayonnement arrive sur une paroi, il peut être renvoyé dans une autre direction dans le milieu d'incidence, sans absorption. Ce phénomène inclut la *réflexion*, qui obéit aux lois de Descartes, ou la *diffusion*, pour laquelle le rayonnement est renvoyé dans toutes les directions, même à partir d'une direction incidente unique. Des substances comme le verre dépoli, le papier ou les tissus sont des exemples de milieux diffusants. *Ces phénomènes se produisent sans changement de fréquence des ondes*.

Le flux surfacique de retour dans le milieu d'incidence est noté φ_r .

§2.2 Milieux transparents. Milieux opaques

Milieu transparent

Un milieu est dit totalement **transparent** s'il transmet complètement le rayonnement qu'il reçoit, sans 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 alors soit absorbé, soit réfléchi/diffusé, ou encore 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 $4\ \mu\text{m} < \lambda < 30\ \mu\text{m}$.

§2.3 Équilibre radiatif d'un corps opaque

⚠ Pour des raisons de simplification, *tous les flux thermiques surfaciques sont considérés positifs* dans la suite du document. 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, ce 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.

Pour un **corps opaque en équilibre radiatif** avec le champ de rayonnement qui l'entoure,

$$\varphi_e = \varphi_a$$

Un **corps opaque en équilibre radiatif** reçoit et émet, sous forme de rayonnement, une même quantité d'énergie par unité de temps et de surface : *l'émission compense exactement l'absorption*.

§2.4 Rayonnement d'équilibre

Lorsque le système, composé de corps opaques plongés dans un milieu transparent, est à l'**équilibre thermodynamique** à la température T , le rayonnement qui s'établit dans le milieu transparent est appelé **rayonnement d'équilibre**.

Remarque. L'équilibre thermodynamique implique notamment que les corps opaques soient *en équilibre radiatif avec le rayonnement qui les entoure*, c'est-à-dire qu'ils absorbent et émettent la même quantité d'énergie radiative.

§2.5 Loi de Stefan pour le rayonnement d'équilibre d'un corps noir

Corps noir

Un **corps noir** est 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 spectrales ».

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.

Loi de Stefan

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, d'autant plus grand que sa température est élevée.

§2.5.1 Bilan radiatif pour un corps noir

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 $1 \cdot 10^7 \text{ K}$) ils sont totalement absorbés par la photosphère.

§3 Application : 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 au sol 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 infrarouge 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. $\varphi_s = 0,600 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

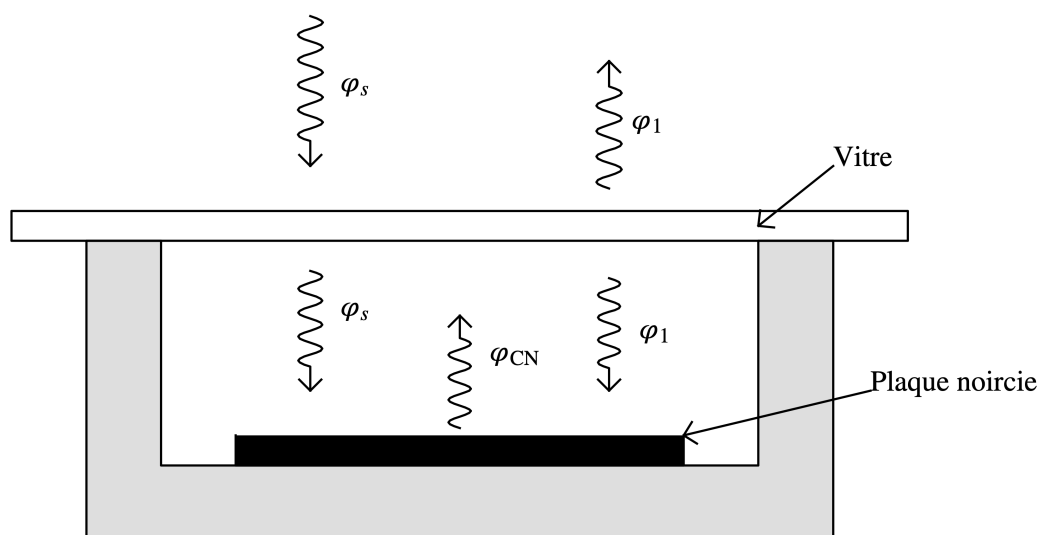


FIGURE 1 : Serre

Q1. On suppose l'équilibre radiatif de la plaque. Écrire l'équation qui traduit cet équilibre.

Puisque la plaque peut être considérée comme un corps noir,

- le flux surfacique incident sur la plaque est $\varphi_i = \varphi_s + \varphi_1$;
- le flux surfacique partant sur la plaque est $\varphi_p = \varphi_{CN}$

L'équilibre radiatif de la plaque impose donc

$$\varphi_s + \varphi_1 = \varphi_{CN}$$

Q2. On suppose l'équilibre radiatif de la vitre. Écrire l'équation qui traduit cet équilibre.

Puisque la vitre peut être considérée comme un corps noir pour le rayonnement IR,

- le flux surfacique incident est $\varphi'_i = \varphi_{CN}$;
- le flux surfacique partant est $\varphi'_p = 2\varphi_1$. Le flux φ_1 intervient deux fois car la vitre présente deux surfaces au niveau desquelles elle peut rayonner.

L'équilibre radiatif de la vitre impose donc

$$2\varphi_1 = \varphi_{CN}$$

Q3. Calculer la température T de la plaque noircie.

Si on considère φ_s comme une donnée du problème, les équations précédentes constituent un système de deux équations à deux inconnues : φ_1 et φ_{CN} . Par substitution, on détermine que :

$$\varphi_{CN} = 2\varphi_s$$

Si on applique la loi de Stefan à la plaque, corps noir en équilibre radiatif et thermique local, on peut écrire

$$\varphi_{CN} = \sigma T^4$$

donc

$$T = \left(\frac{2\varphi_s}{\sigma} \right)^{1/4}$$

$$\text{A.N. } T = \left(\frac{2 \times 0,600 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} \right)^{1/4} = 380 \text{ K.}$$

Q4. En déduire la température T_1 de la vitre.

À la question 2, on a montré :

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_{CN}}{2}$$

Si on applique la loi de Stefan à la vitre, corps noir en équilibre thermodynamique et local pour le rayonnement IR, on peut écrire :

$$\varphi_1 = \sigma T_1^4$$

donc

$$T_1 = \left(\frac{\varphi_1}{\sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{\varphi_{CN}}{2\sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{T}{2} \right)^{1/4}$$

A.N. $T_1 = \left(\frac{380 \text{ K}}{2} \right)^{1/4} = 320 \text{ K}.$

Q5. 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.

Les bilans radiatifs sont les suivants :

— Pour la vitre extérieure :

$$2\varphi_2 = \varphi_1$$

— Pour la vitre intérieure :

$$2\varphi_1 = \varphi_2 + \varphi_{CN}$$

— Pour la plaque :

$$\varphi_{CN} = \varphi_s + \varphi_1$$

On en déduit :

$$\varphi_2 = \varphi_s$$

$$\varphi_1 = 2\varphi_s$$

$$\varphi_{CN} = 3\varphi_s$$

Si on applique la loi de Stefan à la plaque, corps noir en équilibre radiatif et thermique local, on peut écrire :

$$\varphi_{CN} = \sigma T^4$$

donc :

$$T = \left(\frac{3\varphi_s}{\sigma} \right)^{1/4}$$

L'application numérique donne $T = 422 \text{ K}.$

Q6. Généraliser le cas précédent à la situation où on utiliserait n vitres.

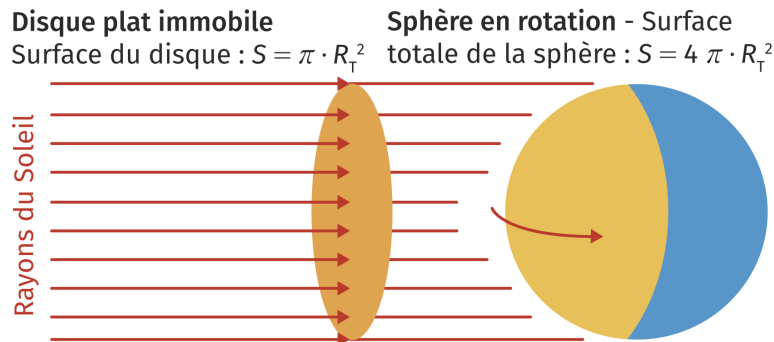
Si on utilise n vitres, $\varphi_{CN} = (n+1)\varphi_s$ et $T = \left(\frac{(n+1)\varphi_s}{\sigma} \right)^{1/4}.$

Remarque. 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.

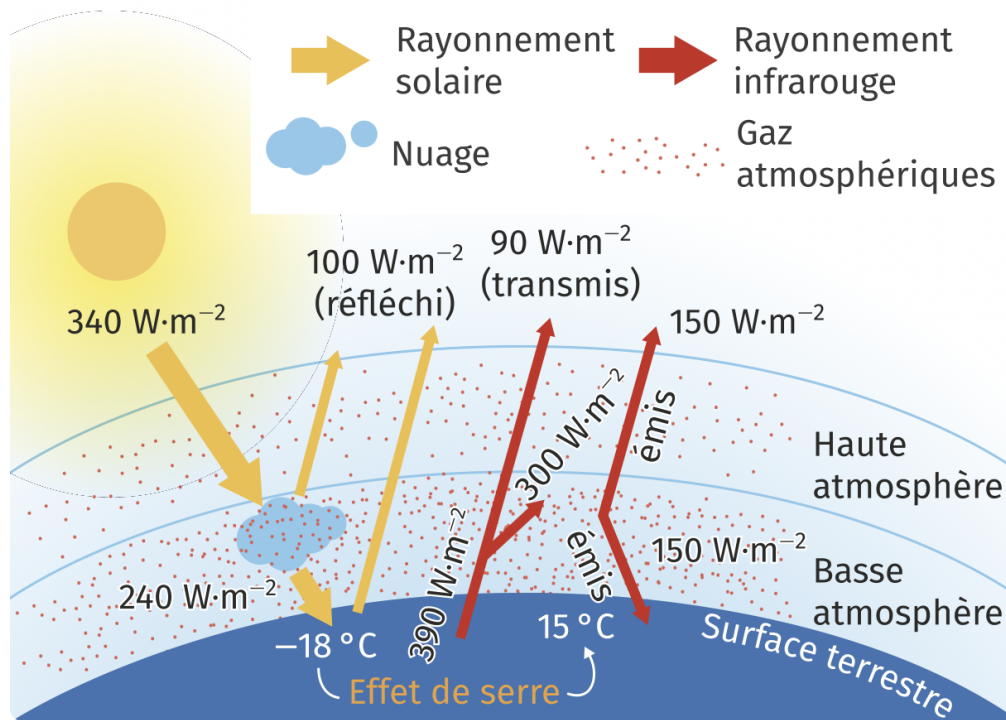
§4 Application : Bilan radiatif de la Terre

§4.1 Documents

Document 1 : Flux solaire La surface éclairée de la Terre reçoit un rayonnement solaire de flux thermique surfacique $\varphi = 1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Cette grandeur correspond au flux thermique reçu par unité de surface éclairée. La face non éclairée ne reçoit aucun flux thermique provenant du Soleil.



Document 2 : Schématisation des flux



Document 3 : Albédo et effet de serre Tout le rayonnement solaire n'est pas absorbé par la surface de la Terre. En effet, une partie est directement réfléchi par les nuages ou la glace. L'albédo α est défini comme le rapport entre la puissance surfacique réfléchi et la puissance surfacique reçue par la Terre. Aussi, l'atmosphère n'est pas transparente aux infrarouges. Elle en absorbe une partie et se réchauffe, réémettant des infrarouges.

§4.2 Exploitation

Q1. Calculer le flux thermique solaire total ϕ reçu par la Terre de rayon $R_T = 6370 \text{ km}$.

φ est la puissance thermique surfacique reçue par la Terre, la puissance thermique ϕ est donc égale à : $\phi = \varphi S_N$ où S_N est la surface que présente la Terre au rayonnement (projection de la Terre sur un plan). Comme cette surface est un disque, $S_N = \pi R_T^2$ et $\phi = \varphi \pi R_T^2$.

A.N. $\phi = 1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times \pi \times (6,370 \cdot 10^6 \text{ m})^2 = 1,70 \cdot 10^{17} \text{ W}.$

Q2. Retrouver le flux thermique surfacique moyen $\varphi_m = 340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ en considérant l'alternance jour-nuit et la surface totale de la Terre.

Comme la situation n'est pas statique (la Terre tourne sur elle-même), le flux ϕ n'est pas reçu par la surface S_N mais réparti sur la totalité de la surface de la Terre.

Le flux surfacique moyen est donc $\varphi_m = \frac{\phi}{S}$ où S est la surface réelle de la Terre :

$$\varphi_m = \frac{\varphi \pi R_T^2}{4\pi R_T^2} = \frac{\varphi}{4}$$

A.N. $\varphi_m = \frac{1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{4} = 340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$

Q3. Pour respecter son équilibre thermique, préciser la condition sur l'énergie émise par la Terre vers l'espace.

La Terre est en équilibre thermique, son énergie interne, et donc sa température, restent constantes. L'équilibre thermique impose l'équilibre radiatif, on a donc :

$$\varphi_a = \varphi_e$$

Q4. Vérifier la température moyenne T , en kelvin (K), de la surface de la Terre si l'atmosphère n'absorbait pas de rayonnement infrarouge.

En théorie, la loi de Stefan ne s'applique qu'à un corps noir et ne peut donc pas être utilisée si on considère l'existence de l'albédo. En première approximation, on peut tout de même faire abstraction de ceci et examiner ce que donne l'application de cette loi.

Si on note $\varphi_1 = 240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ le flux surfacique incident, l'équilibre radiatif donne :

$$\varphi_1 = \varphi_{e1} = \sigma T_1^4 \iff T_1 = \left(\frac{\varphi_1}{\sigma} \right)^{1/4}$$

A.N. $T_1 = \left(\frac{240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} \right)^{1/4} = 255 \text{ K} = -18,2^\circ \text{C}.$

Remarque. $\varphi_1 \neq \varphi_m$ à cause de l'albédo.

Q5. Calculer l'albédo α et préciser son influence sur la température T .

L'albédo α est défini comme le rapport entre la puissance surfacique réfléchie et la puissance surfacique reçue par la Terre,

$$\alpha = \frac{\varphi_r}{\varphi_i}$$

avec $\varphi_r = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et $\varphi_i = 340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

A.N. $\alpha = \frac{100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} = 0,294$, soit 29,4 %.

Si la valeur de l'albédo diminue, le flux surfacique réfléchi diminue. Le flux surfacique absorbé augmente alors, entraînant une augmentation du flux surfacique émis, afin d'atteindre un nouvel état d'équilibre radiatif, et une augmentation de la température.

Q6. Vérifier que la température moyenne à la surface de la Terre correspond à un rayonnement émis de flux thermique surfacique égal à $390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Lorsqu'on prend en compte l'absorption du rayonnement IR par l'atmosphère, le flux surfacique absorbé total vaut : $\varphi_2 = 240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} + 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. La formule pour le calcul de la température T_2 reste valable, donc $T_2 = \left(\frac{\varphi_2}{\sigma} \right)^{1/4}$.

$$\text{A.N. } T_2 = \left(\frac{390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}} \right)^{1/4} = 288 \text{ K} = 14,9^\circ \text{C}.$$