Chap 4: TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT

Année universitaire 2024-2025

Principe de transfert de chaleur par rayonnement

C'est un mode d'échange de chaleur (d'énergie) sous forme d'ondes électromagnétiques selon la loi de Planck ($E=h.\upsilon$, tels que: υ est la fréquence d'onde associée et $h=6,62.10^{-34}$ J.s est la constante de Planck). Donc, il ne nécessite aucun support matériel, il est analogue à la propagation de la lumière. Il se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière ($C=3.10^{8}$ m/s). Le rayonnement thermique émis par les corps, se situé entre des longueurs d'ondes de 0,1 μm à 100 μm. Pratiquement, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront. Mais, ce mode de transfert devient prépondérant à des températures supérieurs aux températures ordinaires. Généralement, tous les corps (solides, liquides et gazeux) émettent un rayonnement de nature électromagnétique. On peut citer que, le vide et les gaz simples comme (O_2, H_2 et N_2) représentent des milieux parfaitement transparents mais, les gaz composés comme (CO_2, H_2O, CO et CH_4) et certaines liquides et solides comme (les verres et les polymères) sont partiellement transparents. La majorité des solides et des liquides sont des corps opaques puisque ils stoppent la propagation du rayonnement juste au niveau de leur surfaces.

Définitions préliminaires

Les grandeurs physiques seront désignées selon la composition spectrale ou la distribution spatiale du rayonnement:

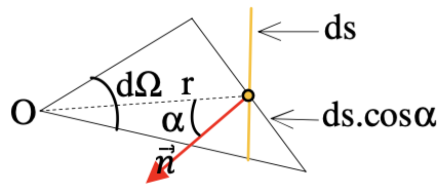
- **Grandeur totale:** elle est relative à l'ensemble du spectre;
- **Grandeur monochromatique:** elle concerne seulement un intervalle spectral étroit ($d\lambda$), autour d'une longueur d'onde (λ);
- **Grandeur hémisphérique:** elle est relative à l'ensemble des directions de l'espace;
- **Grandeur directionnelle:** elle caractérise une direction donnée de la propagation.

Pendant l'étude de l'équilibre thermique d'un système , tout corps doit être considéré comme:

- **Emetteur**: s'il envoi un rayonnement lié à sa température (sauf s'il est parfaitement transparent);
- **Récepteur**: s'il reçoit des rayonnements émis ou réfléchis et diffusés par les corps qui l'entourent.
- **Corps opaque**: c'est un corps qui ne transmet aucun rayonnement à travers lui-même, il stoppe la propagation de tout rayonnement dès sa surface, il se réchauffe par l'absorption du rayonnement;
- **Corps transparent**: c'est un corps qui transmet tout le rayonnement incident;
- **Corps noir**: est celui qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit , il est caractérisé par un pouvoir absorbant ($\alpha_{\lambda T}$=1). Tous les corps noirs rayonnent de la même manière à la même température, le corps noir rayonne plus qu'un corps non noir.

- **Corps gris**: est celui dont le pouvoir absorbant ($\alpha_{\lambda T}$) est indépendant de la longueur d'onde (λ), il est caractérisé par ($\alpha_{\lambda T}=\alpha_T$). Un corps gris à haute température pour ($\lambda<3\mu m$, soleil), un corps gris à basse température pour ($\lambda>3\mu m$, atmosphère).
- **Angle solide**: l'angle solide élémentaire ($d\Omega$) sous lequel est vu, d'un point (O), le contour d'une petite surface (ds, assimilé à une surface plane) est donné par:

$$d\Omega = dscos\alpha/r^2$$



Représentation schématique d'un angle solide

- Le flux envoyé par une surface (s) sous un angle solide élémentaire (dΩ), entourant la direction (Ox) est désigné par ($d\varphi_x$).
- Le flux d'une source (φ), c'est la puissance rayonnée par une surface (s) dans tout l'espace qui l'entoure sur toutes les longueurs d'ondes et est donné par:

$$\varphi = \int_s \ d\varphi = \int_\Omega \ d\varphi_x, \text{[W]}$$

- Le flux envoyé par un élément de surface (ds) sous un angle solide élémentaire (dΩ) est désigné par ($d^2\varphi$);
- Le flux envoyé dans tout l'espace par une surface élémentaire (ds) est désigné par (dφ) et il est donné par:

$$d\varphi = \int_\Omega \ d^2\varphi$$

- **Emittance énergétique monochromatique:** l'émittance monochromatique d'une source à la température (T) est donnée par:

$$M_{\lambda T} = d\varphi_\lambda^{\lambda+d\lambda}/dsd\lambda; \text{[W/m}^3\text{]}$$

Tels que; $d\varphi_\lambda^{\lambda+d\lambda}$: est le flux d'énergie émis entre les deux longueurs d'ondes (λ) et (λ+dλ)

- **Emittance énergétique totale:** c'est la densité de flux émise par la surface élémentaire (ds) sur tout le spectre des longueurs d'ondes, elle est donnée par:

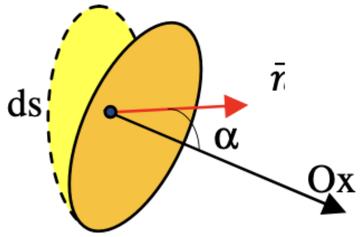
$$M_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} M_{\lambda T} d\lambda = d\varphi/ds; \text{ [W/m}^2\text{]}$$

- **Intensité énergétique dans une direction:** c'est le flux par unité d'angle solide émis par une surface (ds) sous un angle solide (dΩ) entourant la direction (Ox), elle est donnée par:

$$I_x = d^2\varphi_x/d\Omega$$

– **Luminance énergétique dans une direction:** c'est l'intensité énergétique dans la direction (Ox) par unité de surface émittrice apparente (la projection de la surface (s) sur le plan (⊥) à Ox), elle est donnée par:

$$L_x = I_x/ds_x = I_x/dscos\alpha = d^2\varphi_x/d\Omega dscos\alpha$$



. Schéma montrant la luminance d'un élément de surface ds.

– **Eclairement (**relatif à un récepteur**):**

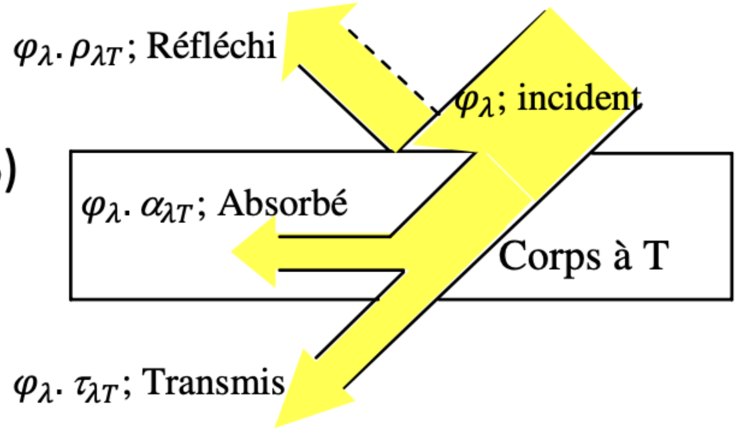
C'est le flux reçu par unité de surface réceptrice, en provenance de l'ensemble des directions (≅ emittance).

Processus de réception d'un rayonnement par un corps

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie de cette énergie peut être réfléchie, une autre transmise à travers le corps, et le reste est quantitativement absorbée sous forme de chaleur. (à mettre dans le chapitre correspondant).

Lorsque un rayonnement incident d'énergie (φ_λ) frappe un corps (C) à la température (T) (voir figure ci-contre), on remarque que:

- Une partie de l'énergie ($\varphi_\lambda.\rho_{\lambda T}$) est réfléchie par la surface (S) du corps;
- Une partie de l'énergie ($\varphi_\lambda.\alpha_{\lambda T}$) est absorbée par le corps en lui échauffant;



Processus de réception d'un rayonnement par un corps

- Le reste de l'énergie ($\varphi_\lambda.\tau_{\lambda T}$) est transmise en continuant le chemin.

Tel que;

$$\varphi_\lambda = \varphi_\lambda.\rho_{\lambda T} + \varphi_\lambda.\alpha_{\lambda T} + \varphi_\lambda.\tau_{\lambda T}$$

d'où

$$\rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} + \tau_{\lambda T} = 1$$

qui représentent respectivement; le pouvoir monochromatique réfléchissant ($\rho_{\lambda T}$), le pouvoir monochromatique absorbant ($\alpha_{\lambda T}$) et le pouvoir monochromatique de transmittance ($\tau_{\lambda T}$). Ces pouvoirs sont fonctions de la nature du corps, son épaisseur, sa température (T), de la longueur d'onde (λ), du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

Lois du rayonnement

Loi de Lambert

L'intensité énergétique dans une direction (δ), est donnée par:

$$I_\delta = I_n . cos\delta$$

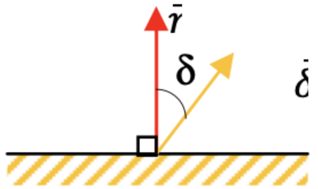


Schéma montrant l'intensité énergétique dans une direction donnée

Lorsque un corps suit la loi de Lambert, l'emittance est proportionnelle à la luminance:

$$M = \pi . L; \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Loi Kirchoff

– L'emittance monochromatique de tout corps est égale au produit de son pouvoir absorbant monochromatique ($\alpha_{\lambda T}$) par l'emittance monochromatique du corps noir à la même température:

$$M_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} . M_{O\lambda T}; \text{ [W/m}^3\text{]}$$

Tel que; $M_{O\lambda T}$: est l'emittance monochromatique du corps noir.

– L'emittance totale (M_T) d'un corps gris à la température (T) est égale au produit de son pouvoir absorbant (α_T) par l'emittance totale (M_{OT}) du corps noir à la même température.

Loi de Planck

L'emittance monochromatique du corps noir dépend seulement de la longueur d'onde (λ) et de la température (T):

$$E_\lambda = \frac{d\varphi_\lambda}{ds} = \frac{C_1}{\lambda^5\left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}}-1\right)}; \text{ [W/m}^2\text{.µm}^{-1}\text{]}$$

Tels que;

$$\begin{cases} T: température\ en\ Kelvin; \\ \lambda: longueur\ d'onde\ en\ \mu m \\ C_1 = 2\pi hc^2 = 3{,}74.10^8 W.\mu^4.m^{-2}, c'estla\ constante\ de\ Planck \\ C_2 = hc/k = 14400\ \mu.K, \quad k: constante\ de\ stefan - Boltzmann \\ c: vitesse\ de\ la\ lumière\ (c = 3.10^8 m/s) \end{cases}$$

Remarques

1. Dans le domaine visible (petites longueurs d'ondes)

   $e^{\frac{C_2}{\lambda T}} >> 1$, d'où $E_\lambda = M^0_{\lambda,T} = C_1\lambda^{-5}e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$

2. Dans le lointain domaine infrarouge (grandes longueurs d'ondes), le développement de ($e^{\frac{C_2}{\lambda T}}$), permet d'exprimer ($M^0_{\lambda,T}$) par:

   $E_\lambda = M^0_{\lambda,T} = C_1 T / C_2\, \lambda^4$

Lois de Wien

-1) Première loi de Wien

La première loi de Wien permet d'exprimer ou d'évaluer les longueurs d'ondes correspondantes à l'émittance monochromatique maximale (pour laquelle le rayonnement est maximal) en fonction de la température. Pour sa dérivation, il suffit d'annuler la dérivée de l'émittance:

$$\frac{dM^0_{\lambda T}}{d\lambda} = 0 \Leftrightarrow \lambda_m = \frac{2898}{T}\text{; [μm]}$$

Remarque

- A la température ambiante (T=300K, λ_m=9,6μm), un corps émet le rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'ondes qui nous entoure mais non visible à notre œil [(0,36÷0,75) μm];
- A la température du soleil (T=5790K, λ_m=0,5μm, rayonnement maximal), c'est le jaune visible pour laquelle notre œil a une efficacité lumineuse maximale

-2) Deuxième loi de Wien

Cette loi exprime la valeur de l'émittance monochromatique maximale, il suffit qu'on remplace (λ_m) par sa valeur dans la loi de Planck pour obtenir:

$$M^0_{\lambda m,T} = B.T^5$$

Avec, $B=1,287.10^{-5} W.m^{-3}.K^{-5}$ et T en Kelvin

Loi de Stefan-Boltzmann

Elle donne l'emittance totale du corps noir, avec la sommation de toutes les émittances monochromatiques pour toutes les longueurs d'ondes ou l'intégration de:

$$E = \frac{d\varphi}{ds} = \int_0^{\infty} E_\lambda \, d\lambda = M^0 = \int_0^{\infty} M^0_{\lambda,T} \, d\lambda = \sigma.T^4; \text{[W/m}^2\text{]} \qquad (6\text{-}15)$$

Tel que : $\sigma=5,67.10^{-8}$ [$W/m^2.K^4$], la constante de Stefan-Boltzmann