

chapitre 4: Transfert de chaleur par rayonnement

1) introduction: Le transfert de chaleur par rayonnement ne nécessite aucun support matériel solide ou fluide.

Tous les corps, solides, liquides ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Les différents types d'ondes électromagnétiques et leurs longueurs d'ondes correspondantes sont représentés par la figure 1

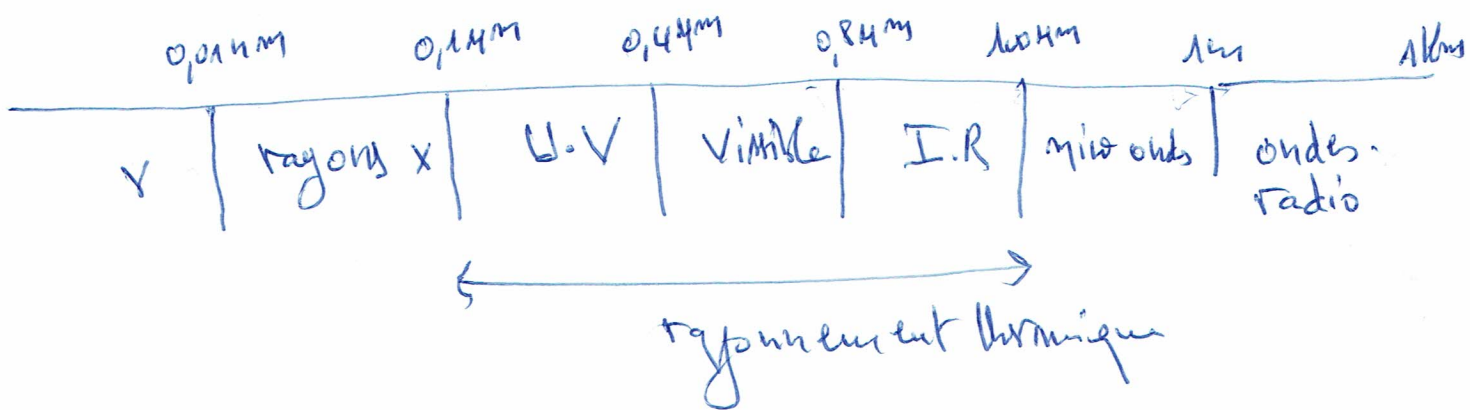


Figure 1: spectre des ondes électromagnétiques.

2) classifications

2-1 selon la composition spectrale du rayonnement

les grandeurs relatives à l'ensemble du spectre du rayonnement

thermique sont appelées totales.

si elles concernent un intervalle spectral étroit $\Delta\lambda$ autour d'une longueur d'onde λ , elles sont dites monochromatiques: G_{λ}

et selon la distribution spatiale du rayonnement:

• Les grandeurs sont dites hémisphériques lorsqu'elles concernent l'ensemble des directions de l'espace.

• Elles sont appelées directionnelles lorsqu'elles caractérisent une direction donnée de propagation du rayonnement

thermique G_{θ}

3) Définitions:

3.1 Grandeurs relatives aux sources.

3.1.1) Flux d'une source thermique: c'est la puissance thermique

émise par une source dans tout l'espace où elle rayonne: Φ (W)

si une source est de dimensions faibles par rapport à r_0 , distance la séparant du point d'observation, elle est

considérée ponctuelle. Elle peut donc rayonner dans toutes les directions de l'espace sphérique qui l'entoure: elle rayonne

dans un angle solide de 4π

Dans le cas où la source est de grandes dimensions, un élément de surface ds peut rayonner sous un angle solide $d\Omega$ (figure 2).

$$d\Omega = \frac{ds \cos \alpha}{r^2} \quad \rightarrow \textcircled{1}$$

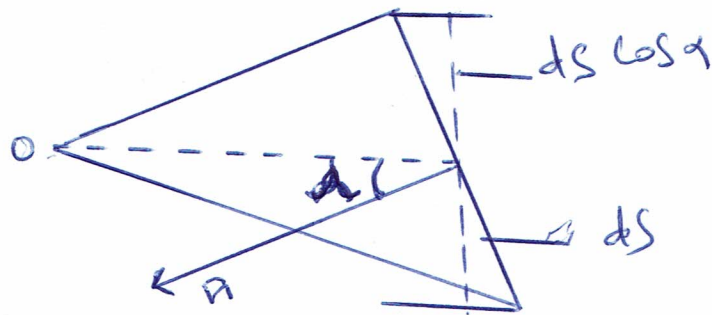


Fig 2: Angle solide.

3.1.2) Émittance d'une source thermique: c'est le flux thermique émis par unité de surface:

$$M = \frac{d\Phi}{ds} \quad (\text{W/m}^2) \quad \rightarrow \textcircled{2}$$

3.1.3 intensité d'une source dans une direction

on appelle intensité énergétique unidirectionnelle I_x , le flux thermique par unité d'angle solide émis par une surface ds dans un angle solide $d\Omega$ qui entoure la direction x .

$$I_{or} = \frac{d\phi_{or}}{d\omega} \quad (\text{W/sterad}) \quad (3)$$

3.14) Luminance d'une source dans une direction.

La luminance L_{or} d'une source de surface élémentaire dans une direction ox est définie comme étant le rapport de l'intensité I_{or} dans cette direction par la surface apparente $ds \cdot \cos \beta$ (fig. 3)

$$L_{or} = \frac{I_{or}}{ds \cdot \cos \beta} = \frac{d^2\phi_{or}}{d\omega \cdot ds \cdot \cos \beta} \quad \rightarrow (4)$$

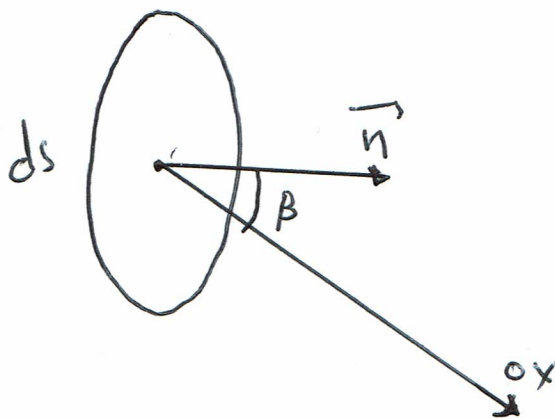


Fig 3: surface apparente

4) Grandeurs relatives aux récepteurs:

4.1) Eclaircement: L'éclaircement est le flux total par l'unité d'une surface réceptrice, en provenance de toutes les directions:

$$E = \frac{dQ}{ds} \quad (\text{W/m}^2) \quad 5$$

4.2) Reception d'un rayonnement thermique par un solide
 Lorsque un rayon incident φ_i frappe un corps porté à la température T , une partie φ_r de l'énergie incidente est réfléchi par la surface S , une autre partie φ_a est absorbée et une troisième partie φ_t est transmise (fig 4)

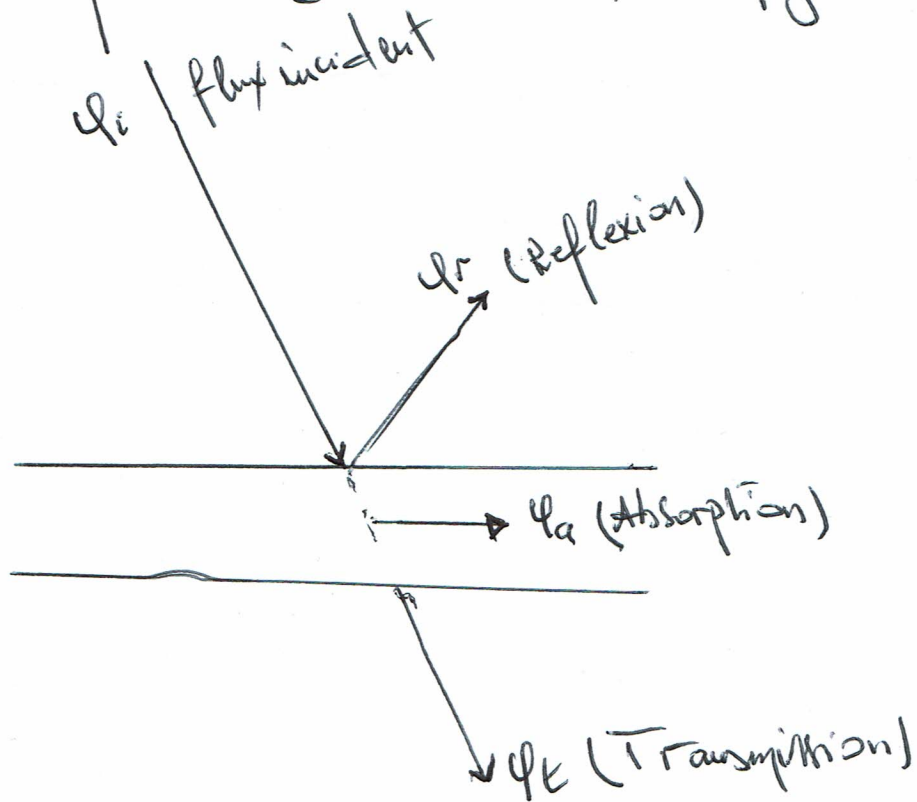


Figure 4: interaction rayonnement thermique - solide.

Le comportement thermique d'un corps solide vis-à-vis du rayonnement est caractérisé par les coefficients totaux de réflexion (reflectivité ρ), d'absorption (absorptivité α) et de transmission (transmissivité τ):

$$\begin{cases} \rho = \frac{\varphi_r}{\varphi_i} \\ \alpha = \frac{\varphi_r}{\varphi_i} \\ \tau = \frac{\varphi_t}{\varphi_i} \end{cases} \quad \text{--- (5)}$$

La conservation de l'énergie s'exprime par la relation suivante :

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad \text{--- (6)}$$

Dans le cas où les propriétés radiatives des corps varient avec la longueur d'onde et la direction, la relation (6) reste valable avec les coefficients directionnels.

$$\rho_{\theta, \lambda} + \alpha_{\theta, \lambda} + \tau_{\theta, \lambda} = 1 \quad \text{--- (7)}$$

4.3) Corps transparent

La propagation du rayonnement thermique s'effectue dans le vide en ligne droite et la vitesse de la lumière, avec la conservation de l'énergie transportée (pas de perte). Le vide est un milieu parfaitement transparent.

Remarque certains milieux sont dits partiellement transparents car la propagation de rayonnement thermique s'accompagne d'une diminution de l'énergie.

4.4) corps opaques

La majorité des milieux liquides et solides sont dits opaques, car ils arrêtent la propagation du rayonnement thermique à leurs surfaces.

4.5) corps noirs

C'est un corps qui absorbe la totalité de rayonnement thermique incident indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident, il est caractérisé par $\alpha = 1$

4.6) corps gris

un corps gris est un corps dont le pouvoir absorbant $\alpha_{\lambda T}$ est indépendant de la longueur d'onde λ du rayonnement qu'il reçoit. $\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$

5°) Lois du rayonnement thermique

5-1) Loi de Lambert

Les surfaces dont la luminance est indépendante de la direction de propagation sont dites diffuses: $L_{\theta} = L$.

elles sont régies par la loi de Lambert (surface Lambertienne)

$$M = \pi \cdot L \quad \text{--- (8)}$$

avec M représente l'émission du corps.

5° 2) Loi de Kirchhoff

A une température T et pour une longueur d'onde λ donnée,

le rapport $\frac{M_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}$ est le même pour tous les corps.

dans le cas des corps noirs, $\alpha_{\lambda T} = 1$ donc $\frac{M_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} = M_{0\lambda T}$

avec $M_{0\lambda T}$ est l'émission monochromatique du corps noir

l'émission monochromatique de tout corps est égale au produit de son pouvoir absorbant (absorptivité) monochromatique par l'émission monochromatique des corps noirs à la

même température (loi de Kirchhoff).

$$M_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} M_{0\lambda T} \quad \text{--- (9)}$$

Dans le cas du corps gris ($\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$), la loi de Kirchhoff est généralisée :

$$M_T = \alpha_T M_{0T} \quad \text{--- (10)}$$

$$\eta = \pi \cdot L \quad \text{--- (8)}$$

avec η représente l'émission du corps.

5-2) Loi de Kirchhoff

A une température T et pour une longueur d'onde λ donnée,

le rapport $\frac{M_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}$ est le même pour tous les corps.

dans le cas des corps noirs, $\alpha_{\lambda T} = 1$ donc $\frac{M_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} = M_{0\lambda T}$

avec $M_{0\lambda T}$ est l'émission monochromatique du corps noir

l'émission monochromatique de tout corps est égale au produit de son pouvoir absorbant (absorptivité) monochromatique par l'émission monochromatique des corps noirs à la

même température (loi de Kirchhoff).

$$M_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} M_{0\lambda T} \quad \text{--- (9)}$$

Dans le cas du corps gris ($\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$), la loi de Kirchhoff est généralisée :

$$\eta_T = \alpha_T M_{0T} \quad \text{--- (10)}$$

5-3 / Loi de Planck

La loi de Planck relie l'émission monochromatique du corps noir à la longueur d'onde et à sa température.

$$M_{\lambda, T} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad \text{--- (1)}$$

avec c_1 et c_2 sont deux constantes $c_1 = 3,7417 \cdot 10^{-16}$ et $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$

Cette loi permet de tracer les courbes isothermes de la variation de $M_{\lambda, T}$ en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures.

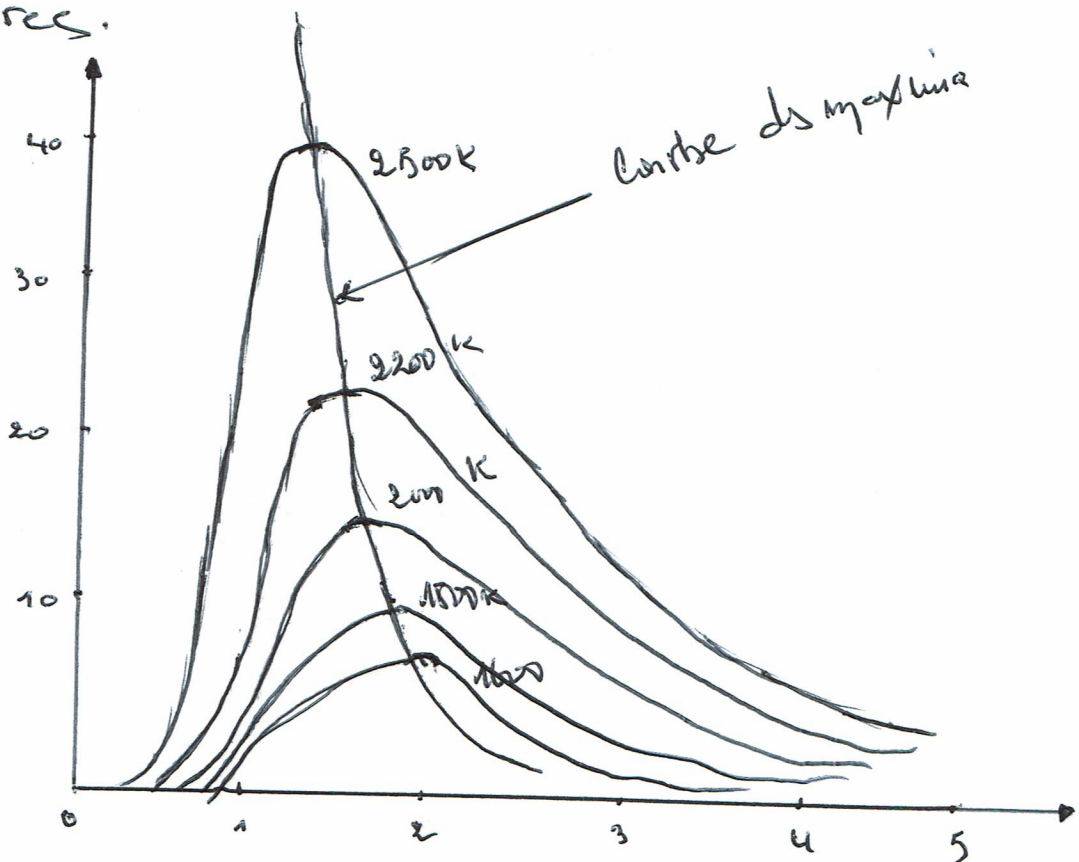


Fig 4: Emission monochromatique du corps noir.

5-4) Lois de Wien

1^{ère} loi: La longueur d'onde λ_m pour laquelle l'émission est maximale varie avec la température de la source elle s'exprime par la 1^{ère} loi de Wien (Loi de déplacement)

$$\lambda_m = \frac{2898 \cdot 10^{-6}}{T} \quad \text{--- (12)}$$

La deuxième loi: la 2^{ème} loi de Wien exprime la valeur maximale de l'émission du corps noir en fonction de sa température

$$M_{0, \lambda_{TF}} = 1287 \cdot 10^{-8} T^5 \quad \text{--- (13)}$$

5.5) Loi de Stefan-Boltzmann:

L'intégration de la relation de Planck pour toutes les longueurs d'onde donne l'émission totale M_{0T} du corps noir qui est fonction que de la température T . cette loi est appelé la loi de Stefan Boltzmann:

$$M_{0T} = \sigma T^4 \quad \text{--- (14)}$$

avec σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,675 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

5.6) Rayonnement des corps réels

Les propriétés émissives des corps réels sont liées aux propriétés du corps noir dans les mêmes conditions (de température et de longueur d'onde). On les caractérise à l'aide de coefficients appelés facteurs d'émission ou émissivités.

Ces coefficients sont définis par

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{\lambda T} = \frac{M_{\lambda T}}{M_{\lambda 0 T}} \\ \varepsilon_T = \frac{M_T}{M_{0 T}} \end{array} \right. \longrightarrow (15)$$

D'autre part et selon la loi de Kirchhoff, on montre que

$$a_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T} \longrightarrow (16)$$

5.7 Rayonnement des corps gris

Les corps gris sont caractérisés par $a_{\lambda T} = a_T$ donc $\varepsilon_{\lambda T} = \varepsilon_T$ d'où $M_T = \varepsilon_T \cdot M_{0 T}$. On peut déduire l'émission du corps gris en fonction de la température.

$$M_T = \varepsilon_T \cdot E \cdot T^4 \longrightarrow (17)$$