

CHAP V : TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT

5.1 Généralités. Définitions

Tous les corps, quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux dont la température est supérieure au 0° K ($-273.15 \text{ C}^{\circ}$), émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au perte de l'énergie interne du corps émetteur.



Objet chaud rayonnant

Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes **longueurs d'onde** comme l'a démontré l'expérience de William Herschel :

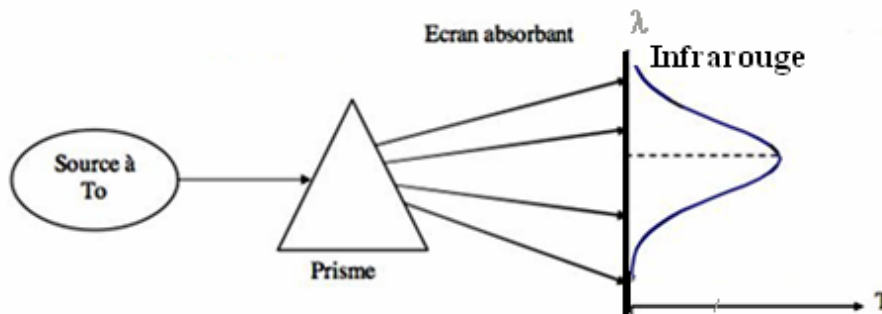


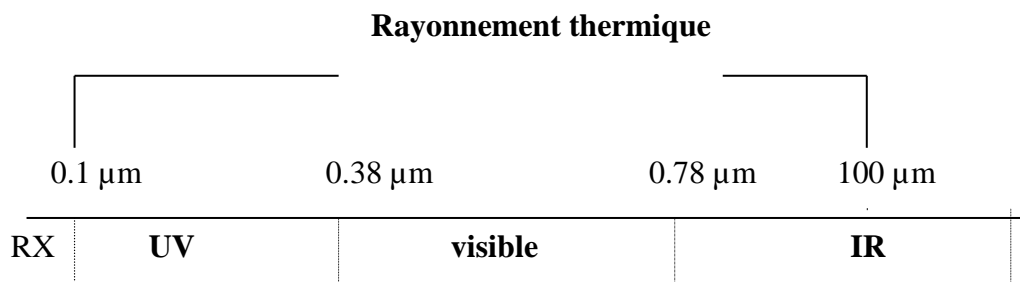
Figure 4.1 : Principe de l'expérience de William Herschel

Le **rayonnement thermique** émis par les corps se situe entre **0,1 et 100 μm** .

Rayonnement **IR.** : $0,78 \mu\text{m} < \lambda < 314 \mu\text{m}$

Rayonnement **visible.** : $0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$

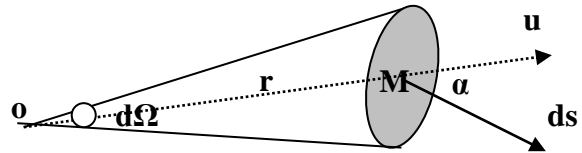
Rayonnement **UV.** : $0,1 \mu\text{m} < \lambda < 0,39 \mu\text{m}$



5.1.1 L'angle solide

L'angle solide sous lequel depuis un point O on voit une surface S est par définition l'aire de la surface intersection de la sphère de rayon unité et du cône de sommet O s'appuyant sur le contour de la surface S. L'angle solide élémentaire $d\Omega$ sous lequel est vu d'un point O le contour d'une petite surface dS . L'unité est **Stéradian** (Sr)

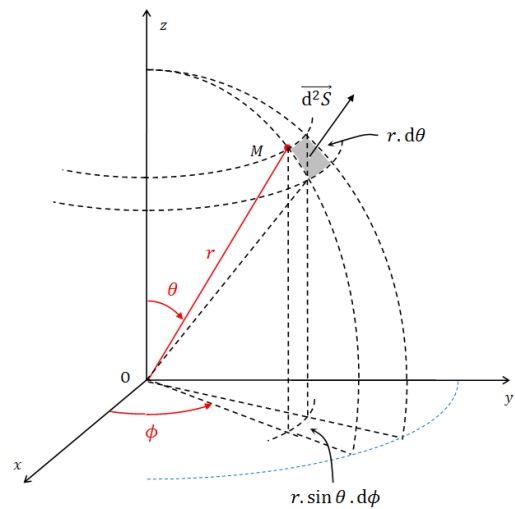
$$d\Omega = \frac{d\vec{s} \cdot \vec{u}}{r^2} = \frac{ds \cdot \cos(\alpha)}{r^2} \quad (V.1)$$



Pour une sphère de rayon r , l'angle solide élémentaire $d\Omega$ est défini pour un élément de surface élémentaire ds ($ds=r^2 \cdot d\theta \cdot \sin(\theta) \cdot d\phi$) par:

$$d\Omega = d\theta \cdot \sin(\theta) \cdot d\phi \cdot \cos(\alpha) \quad ; \quad \alpha=0$$

l'angle solide pour laquelle on voit toute la sphère au centre O est:
 $\Omega = \int d\phi \int \sin(\theta) \cdot d\theta = 4\pi \text{ Sr}$



5.2 Définitions relatives aux SOURCES

5.2.1 Flux thermique

Le flux énergétique de rayonnement c'est la puissance émise par une source ou reçue par une surface sous forme de rayonnement :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (W)$$

5.2.2 Emittance énergétique totale (M_T):

C'est la **densité de flux de chaleur émise** par rayonnement par dS sur **tout le spectre des longueurs d'ondes**. Elle n'est plus fonction que de la température T et de la nature de la **source** :

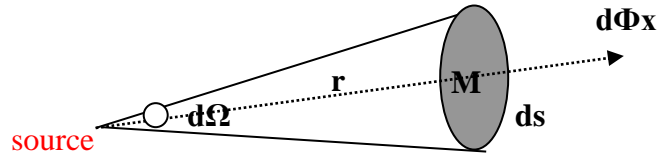
$$M_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} M_{\lambda T} d\lambda = \frac{d\Phi_{(émis)}}{dS} \quad (W/m^2) \quad (V.2)$$

ou $M_{\lambda T}$ est l'emittance monochromatique à la température T

5.2.2 Intensité énergétique dans une direction (I_x)

On appelle intensité énergétique I_x le **flux** par unité **d'angle solide émis** par une surface dS dans un angle solide $d\Omega$ entourant la direction Ox :

$$I_x = \frac{d\Phi_x}{d\Omega} \quad (\text{W /Sr}) \quad (\text{V.3})$$



5.3 Définitions relatives à un récepteur

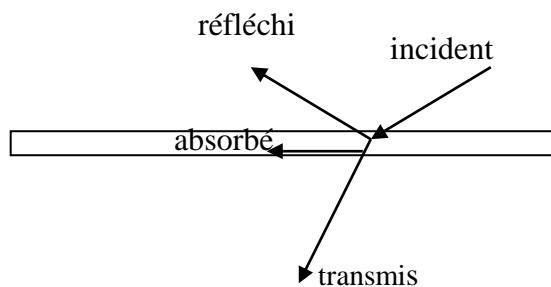
5.3.1 Eclairement (Irradiance)

L'éclairement est le **flux reçu** par unité de surface réceptrice, en provenance de l'ensemble des directions.

$$E_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_{\lambda T} d\lambda = \frac{d\Phi_{reçu}}{dS} \quad (\text{W /m}^2) \quad (\text{V.4})$$

5.3.2 Réception du rayonnement par un solide

Quand un rayon **incident** d'énergie Φ_i frappe un corps 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 par le corps qui s'échauffe et le reste Φ_t est transmis et continue son chemin :



Posons :

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} : \text{ est le coefficient de réflexion thermique}$$

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} \text{ est le coefficient d'absorption thermique}$$

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} \text{ est le coefficient de transmission thermique}$$

Les coefficients précédents sont en fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T, de la longueur d'onde λ du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

$$\text{On a évidemment : } \Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad \text{d'où : } \rho + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{V.6})$$

5.4 Corps noir, corps gris

5.4.1 Corps noir

C'est un corps qui absorbe tout le **rayonnement incident** quelque soient les longueurs d'onde et les directions de propagation

$$\text{Donc : } \alpha_\lambda = 1$$

Sans en réfléchir ni transmettre aucune fraction :

$$\rho_\lambda = 0, \quad \tau_\lambda = 0$$

A une température donnée, un corps noir rayonne le maximum d'énergie pour chaque longueur d'onde. Une surface enduite de noir de fumée est approximativement un corps noir.

5.4.2 Corps gris

C'est objet idéal qui absorberait l'énergie électromagnétique qu'il recevrait comme le corps noir mais avec un taux de réflexion constant plus de zéro, dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température.

5.5 Lois du rayonnement

4.5.1 Rayonnement du corps noir

Emittance monochromatique (M_λ)

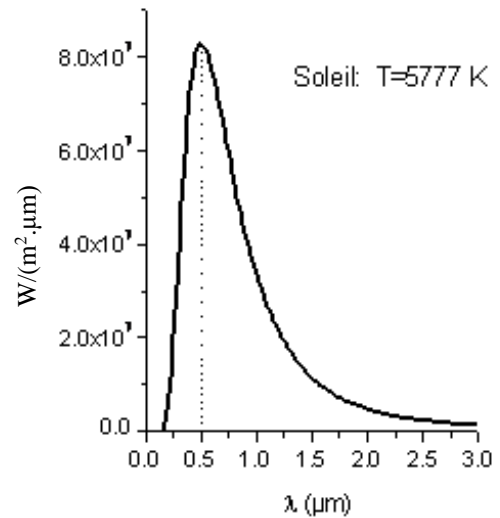
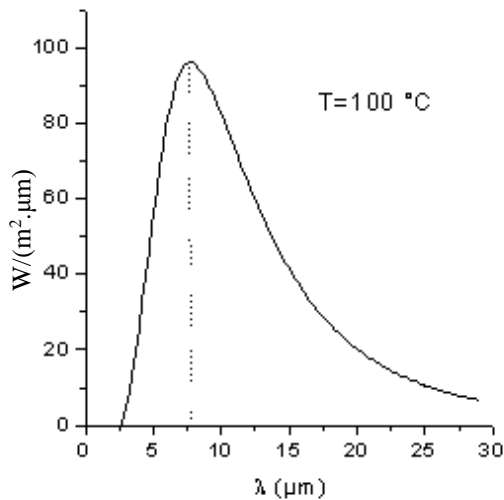
Elle est donnée par la **loi de Planck** :

$$M_\lambda^o = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (\text{W.m}^{-3}) \quad (\text{V.7})$$

Avec :

$$C_1 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^2$$

$$C_2 = 1,4385 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$$



REMARQUE :

D'après les deux courbes précédentes , on remarque qu'à chaque température T correspond une courbe ayant un **maximum** pour une valeur λ_{\max} de la longueur d'onde.

$$\lambda_{\max} = 2,897 \cdot 10^{-3} / T \quad \text{et} \quad M_{\lambda_{\max}}^o = 0.410 \left(\frac{T}{10} \right)^5 \quad (\text{V.8})$$

Pour le Soleil ($T \approx 5777 \text{ K}$), 90% de l'énergie est émise entre 0,31 et 2,5 μm, le maximum étant situé dans le spectre visible. Par contre, un corps noir à 373 K (100°C) a son émission maximale vers $\lambda = 8 \text{ μm}$ dans l'IR.

Emittance totale M_{oT}

L'intégration de la formule de Planck (4.5) pour toutes les longueurs d'onde donne l'émittance totale M_{oT} du corps noir qui n'est plus fonction que de la température T , on obtient la loi de Stefan-Boltzmann :

$$M_T^O = \sigma T^4 \quad (\text{V.9})$$

avec . $\sigma = 5,675 \cdot 10^{-8} \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-4})$ (constantes de Boltzmann)

5.5.2 Rayonnement des corps non noirs (gris)

Facteur d'émission ou émissivité

C'est le rapport entre l'énergie rayonnée par un matériau et l'énergie rayonnée par un corps noir à la même température. Ainsi un corps noir idéal a une émissivité de 1 ($\epsilon = 1$) alors que n'importe quel matériau réel à une émissivité inférieure à 1 ($\epsilon < 1$).

$$\epsilon = \frac{M_T}{M_T^O} \quad (\text{V.10})$$

Or : $M_T = \epsilon M_{T^O}$, nous en déduisons l'émittance du corps gris à la température T :

$$M_T = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{V.11})$$

Exemple : Emittance du soleil

température de la surface du soleil est: $T_s = 5800 \text{ k}$

$$M_o = \sigma T^4 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W.m}^{-2} = 64 \text{ MW.m}^{-2}$$

Flux Φ rayonné par le soleil

$$\Phi = M_o \cdot S_{\text{soleil}}$$

Rayon du soleil : $R_s = 696\,000 \text{ km} = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$

$$\Phi = M_o \cdot S_{\text{soleil}}$$

Surface du soleil : $S = 4 \pi R_s^2 = 4 \pi (6,96 \cdot 10^8)^2 = 6,08 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$

$$\Phi = 3,9 \cdot 10^{20} \text{ MW}$$

5.6 FACTEUR DE FORME (ou facteur d'angle)

5.6.1 Facteur de forme entre deux surfaces élémentaires:

Le facteur de forme est utilisé dans les échanges radiatifs.

Le facteur d'angle ou **facteur de forme** entre deux surfaces élémentaire dS_1 , dS_2 est défini par :

$$dF_{1-2} = \frac{\cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) \cdot dS_2}{\pi d^2} \quad \text{(a)} \quad \text{(échange entre } dS_1 \text{ et } dS_2)$$

et

$$dF_{2-1} = \frac{\cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) \cdot dS_1}{\pi d^2} \quad \text{(b)} \quad \text{(échange entre } dS_2 \text{ et } dS_1)$$

Si on divise (a) sur (b), on obtient:

$$dS_1 \cdot dF_{1-2} = dS_2 \cdot dF_{2-1}$$

Soit:

$$F_{1-2} = \frac{1}{S_1} \iint_{S_1 S_2} \frac{\cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2)}{\pi d^2} dS_1 \cdot dS_2$$

$$F_{2-1} = \frac{1}{S_2} \iint_{S_1 S_2} \frac{\cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2)}{\pi d^2} dS_1 \cdot dS_2$$

Pour des surfaces finies, le facteur de forme entre les deux surfaces S_1 , S_2 est :

$$S_1 \cdot F_{1-2} = S_2 \cdot F_{2-1}$$

Le facteur de forme est toujours compris entre 0 et 1

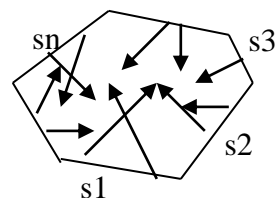
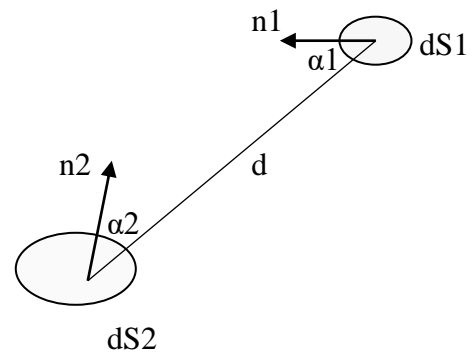
5.6.2 PROPRIETES DES FACTEURS DE FORMES

Relation des réciprociétés entre des surfaces S_i et S_j

$$S_i \cdot F_{i-j} = S_j \cdot F_{j-i}$$

Pour une enceinte fermée:

Pour une surface fermée pour laquelle n surfaces (en regardante) toute l'énergie émise par une surface i va tomber sur les autres surfaces de l'enceinte.



$$\sum_{k=1}^N F_{i-k} = 1$$

5.6.3 FACTEUR DE FORME POUR QUELQUES GEOMETRIES

