République Algérienne Démocratique et Populaire

Université de Jijel Mohamed Seddik Benyahya

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Module : Transfert de chaleur 2

Niveau : Licence Energétique

Année universitaire : 2019-2020

Chapitre II : Rayonnement thermique

Chapitre II: Rayonnement thermique

II.1. Introduction :

Le transfert thermique par rayonnement repose sur le transfert de chaleur à l'aide des ondes électromagnétiques. Il suppose l'existence d'un émetteur de rayonnement, d'un espace dans lequel le rayonnement se propage et d'un récepteur. Il est lié fortement au niveau de la température des corps en présence. Il est très intense quand les températures dépassent la centaine des degrés Celsius.

II.2. Rayonnement électromagnétique :

La matière émis des ondes électromagnétiques sous l'effet des diverses excitations. Ces échanges peuvent avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La figure suivante représente le spectre des ondes électromagnétiques :

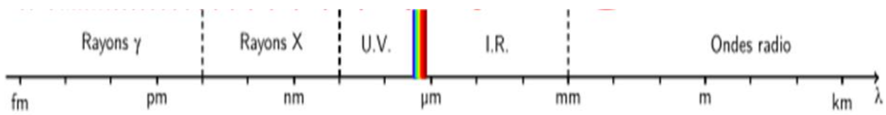


Fig.1. Domaines du spectre électromagnétique

Nom	**Longueur d'onde**
Rayon gamma γ	< 10 pm
Rayon X	10 pm – 10 nm
Ultraviolet	10 nm – 390 nm
Visible	390 nm – 750 nm
Infrarouge	750 nm – 0,1 mm
Micro-ondes	1 mm - 1 m
Ondes radio	1 m – 100 000 km

II.3. Rayonnement thermique :

On s'intéresse uniquement au rayonnement thermique. Ce dernier occupe une très faible portion du spectre des ondes électromagnétiques située dans un intervalle de longueur d'onde allant de 0.01 à 100 µm à l'intérieur d'une bande comprise entre 0.4 et 0.8 µm.

II.4. Les notions géométriques essentielles :

Un élément de la surface d'un corps radiant peut être considérer comme un plan si ses dimensions sont petites. Dans ces conditions, le flux rayonné par cet élément est hémisphérique c-à-d il couvre l'ensemble des directions de l'espace hémisphérique qui entourent cet élément de surface.

II.4.1. Notion d'angle solide :

L'étude du rayonnement thermique nécessite l'utilisation d'outils géométriques spécifiques. En particulier, la quantité de chaleur sera transportée par les photons dans un cône entourant une direction d'émission. Nous appelons ce cône l'angle solide. Considérons un élément de surface dΣ qui émet un rayonnement thermique dans tout l'espace qui l'englobe. Nous appelons (x) la direction d'émission. Nous construisons l'angle solide dΩ qui entoure la direction d'émission et qui coupe l'hémisphère de rayon *r* en formant la surface d*S*.

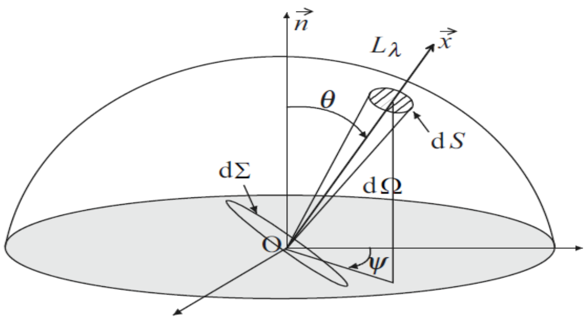


Fig.2.Rayonnement hémisphérique

Nous savons alors que dans le système de coordonnées sphériques (r, θ, ψ) :

$$dS = r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\psi$$

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2}$$

$$d\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\psi$$

Avec:

dΩ: angle solide en stéradian ; dS : surface ; r : rayon de l'hémisphère.

II.5. Grandeurs physiques :

On définit les différentes grandeurs physiques selon que l'on considère le matériau en tant qu'émetteur ou récepteur.

II.5.1. Grandeurs liées à l'émission

- **Luminance :**

La luminance est le flux de chaleur émis par un corps par unité de surface de ce corps perpendiculaire à la direction d'émission et par unité d'angle solide :

$$L(\lambda, \theta, \psi) = \frac{d^2\phi}{d\Sigma \cos\theta \, d\Omega}$$

La luminance est définie à la longueur d'onde λ.

La quantité $d\Sigma.\cos\theta$ représente la projection de la surface émettrice dans la direction perpendiculaire à la direction d'émission.

$$L(\lambda, \theta, \psi) = \frac{d^2\phi}{d\Sigma \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\psi}$$

- **L'émittance :**

L'émittance est le flux émit par unité de surface émettrice.

$$M(\lambda, \theta, \psi) = \frac{d\phi}{d\Sigma}$$

La relation entre la luminance et l'émittance est :

$$M(\lambda, \theta, \psi) = L(\lambda, \theta, \psi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\psi$$

- **L'émittance hémisphérique totale :**

$$M = \pi L$$

II.5.2. Grandeurs liées au récepteur :

- **Eclairement :**

Il désigne le flux incident reçu par unité de surface de récepteur perpendiculairement à la direction d'incidence :

$$E(\lambda, \theta, \psi) = \frac{d\phi}{d\Sigma \cos\theta}$$

$$E(\lambda, \theta, \psi) = L(\lambda, \theta, \psi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\psi$$

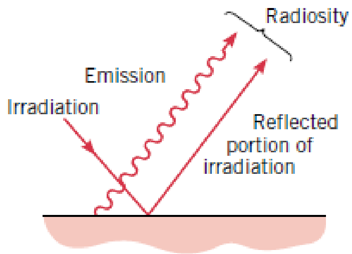
L : luminance ; ϕ : flux.

- **Eclairement hémisphérique totale :**

$$E = \pi L$$

- **Radiosité :**

La radiosité est la somme de l'émittance et de la fraction d'éclairement réfléchit :



$$J(\lambda,\theta,\psi) = M(\lambda,\theta,\psi) + \rho\, E(\lambda,\theta,\psi)$$

- **Radiosité hémisphérique totale :**

$$J = M + \rho\, E$$

II.6.Principe de chauffage par rayonnement :

Lorsqu'un rayonnement atteint la surface d'un corps, une fraction de la puissance totale incidente est réfléchie, une autre fraction est absorbée et une troisième fraction peut être transmise.

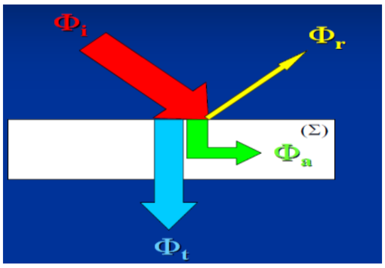


Fig.3. Réception du rayonnement par un corps

On désigne par :

Φ_i : flux incident sur une surface Σ ; Φ_r : flux réfléchi ; Φ_a : flux absorbé ; Φ_t : flux transmis.

On a : Absorptivité : $\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i}$; Réflectivité : $\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i}$; Transmitivité : $\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i}$;

Avec : $\alpha + \rho + \tau = 1$.

II.7. Corps noir :

II.7.1. Définition :

Le rayonnement émet par un corps dépend de sa nature. L'émetteur idéal est le corps qui pour une température donnée émet le maximum d'énergie. Ce corps s'appelle corps noir. Il est défini également comme celui dont son pouvoir d'absorption est maximal. Il absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit, c'est le corps de référence.

II.7.2. Loi de Planck :

Planck a établi une relation liant l'émittance monochromatique M^o du corps noir à la longueur d'onde λ, et à sa température absolue T.

$$M^o_\lambda = \frac{C_1\, \lambda^{-5}}{\mathrm{Exp}\left(\frac{C_2}{\lambda\, T}\right) - 1}$$

M^{o}_{λ} : émittance du corps noir pour une longueur d'onde donnée, C_1 et C_2 des constantes physiques.

T	λ	$C_1 = 2\pi h C_0^2$	$C_2 = hC_0/k$	M^{o}_{λ}
K	m	$3{,}741.10^{-16}$ W.m^2	0,014388 m.K	W/m^3

h : constante de Planck : $6{,}6255.10^{-34}$ J.s

k : constante de Boltzmann : $1{,}3805.10^{-23}$ J/k

C_0 : $2{,}9979.10^8$ m/s

II.7.3. Lois de Wien :

Deux lois fournissent respectivement λ_{max} et le maximum d'émittance monochromatique du corps noir pour chaque température.

- 1ère loi : exprime la valeur de λ_{max} en fonction de la température : $\lambda_{max}.T = 2898\ \mu m.k$
- 2ème loi : exprime l'émittance maximale en fonction de la température : $M^0_{\lambda max} = \beta T^5$

T	λ	β	$M^0_{\lambda max}$
K	m	$1{,}287.10^{-5}$ W/m3.k^5	W/m^3
K	µm	$1{,}287.10^{-11}$ W/m^2 .µm. k^5	W/m^2 .µm

II.7.4. Loi de Stefan Boltzmann :

Celle loi fourni l'émittance totale du rayonnement du corps noir en fonction de sa température absolue. Elle est exprimé par :

$$M^0 = \sigma_s.T^4$$

σ_s : Constante de Steffan-Boltzmann

$\sigma_s = \frac{2.\pi^5}{15}.\frac{k^4}{C_0^2.h^3} = 5{,}67.10^{-8}\mathrm{W/m^2.k^4}$

II.8. Rayonnement des corps réels :

II.8.1. Emissivité des corps réels :

L'émissivité des corps réels est plus faible que celle des corps noirs qui est maximum pour la même température de surface. Pour caractériser cette émissivité, on définit le coefficient d'émission :

$$\varepsilon = \frac{L(T)}{L^{\circ}(T)}$$

L : luminance du corps réels.

L^0 : luminance du corps noir à la même température.

Quand l'émissivité monochromatique d'un corps est la même quel que soit la longueur d'onde considérée, on dit que ce corps est gris : $\varepsilon_\lambda = \varepsilon\ \forall\lambda$

λ : Longueur d'onde.

II.8.2.Absorption, réflexion et transmission des corps réels

- **Absorptivité**

L'absorptivité est le rapport entre le flux absorbé et l'éclairement :

$$\alpha(\lambda,\theta,\psi) = \frac{E_a(\lambda,\theta,\psi)}{E(\lambda,\theta,\psi)}$$

L'absorptivité totale hémisphérique est :

$$\alpha = \frac{E_a}{E}$$

- **Réflectivité**

La réflectivité est le rapport entre le flux réfléchit et l'éclairement :

$$\rho(\lambda,\theta,\psi) = \frac{E_r(\lambda,\theta,\psi)}{E(\lambda,\theta,\psi)}$$

La réflectivité totale hémisphérique est:

$$\rho = \frac{E_r}{E}$$

- **Transmissivité**

La transmissivité est le rapport entre le flux transmis et l'éclairement :

$$\tau(\lambda,\theta,\psi) = \frac{E_t(\lambda,\theta,\psi)}{E(\lambda,\theta,\psi)}$$

La transmissivité totale hémisphérique est :

$$\tau = \frac{E_t}{E}$$

II.8.3.La loi de Kirchhoff

Pour tout corps, l'émissivité est égale à l'absorptivité: $\alpha = \varepsilon$

Si on considère l'aspect spectral, la relation précédente reste valable et il suffit pour cela que le rayonnement du corps soit isotrope. On a : $\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$

Si on considère en plus l'aspect directionnel, l'égalité est toujours valable : $\alpha(\lambda,\theta,\psi) = \varepsilon(\lambda,\theta,\psi)$

II.8.4. Caractérisation de l'interaction du rayonnement avec les milieux matériels :

a. Milieu semi transparent ou semi absorbant :

Un milieu qui ne transmit pas de puissance sur la longueur d'onde (λ) est un milieu opaque à cette longueur d'onde. Sa transmitivité est nulle sur tout le spectre : $\forall\lambda, \tau_\lambda = 0, \alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$.

Un milieu dans lequel le flux électromagnétique n'est pas absorbé ni réfléchi $\forall\lambda$ est un milieu transparent. $\forall\lambda, \tau_\lambda = 1$

Les milieux semi transparent ne laisse passer qu'une partie du rayonnement incident. Lorsqu'un milieu absorbe tout le flux radiatif $\forall\lambda$ de celui-ci, c'est un corps noir : $\forall\lambda, \alpha_\lambda = 1$

Le tableau suivant regroupe les définitions des différents milieux ou corps :

Corps noir	$\forall\lambda, \alpha_\lambda = 1$
Corps opaque	$\forall\lambda, \tau_\lambda = 0$
Corps transparent	$\forall\lambda, \tau_\lambda = 1$
Corps brillant	$\forall\lambda, \rho_\lambda \rightarrow 1$
Réflecteur parfait	$\forall\lambda, \rho_\lambda = 1$
Corps gris	$\forall\lambda, \varepsilon_\lambda = \varepsilon$

II.8.5. Rayonnement entre surface :

a) Facteur de forme :

Considérons deux surfaces grises possédants des températures différentes et positionnées dans l'espace. Le facteur de forme ***F*12** est la part de flux rayonné par (1) qui va être intercepté par (2). De la même façon, le facteur de forme ***F*21** est la part de flux rayonné par (2) qui va être intercepté par (1).

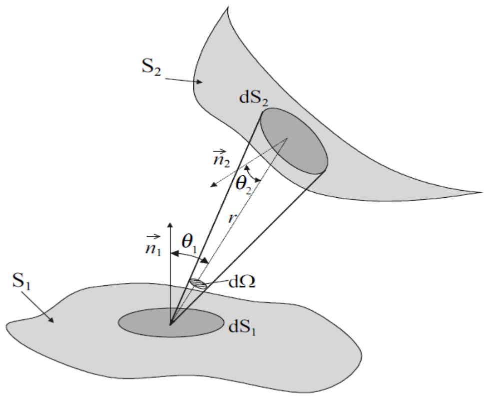


Fig.4.Transfert de chaleur par rayonnement entre deux surfaces

On cherche une expression de $F12$ en partant de la relation liant le flux émis à la luminance :

$$\mathrm{d}\phi_{1\to 2} = L_1\,\mathrm{d}S_1\,\cos\theta_1\,\mathrm{d}\Omega_{21}$$

$$\mathrm{d}\Omega_{21} = \frac{\mathrm{d}S_2\,\cos\theta_2}{r^2}$$

$$\mathrm{d}\phi_{1\to 2} = L_1\,\frac{\mathrm{d}S_1\,\cos\theta_1\,\mathrm{d}S_2\,\cos\theta_2}{r^2}$$

$$\phi_{1\to 2} = L_1\int_{S_1}\int_{S_2}\frac{\cos\theta_1\,\cos\theta_2}{r^2}\,\mathrm{d}S_1\,\mathrm{d}S_2$$

$$J_1 = M_1 + \rho\,E_1$$

La loi de Lambert lie la radiosité avec la luminance :

$$J_1 = \pi L_1$$

Après le remplacement de la luminance par son expression en fonction de la radiosité, on trouve l'expression suivante du flux thermique émis par 1 et reçu par 2 :

$$\phi_{1\to 2} = J_1 S_1 F_{12}$$

Le facteur de forme $F12$ est :

$$F_{12} = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} \mathrm{d}S_1 \mathrm{d}S_2$$

b) Relation de réciprocité

Le flux émis par 2 et reçu par 1 est défini par:

$$\mathrm{d}\phi_{2\to 1} = L_2 \mathrm{d}S_2 \cos\theta_2 \mathrm{d}\Omega_{21}$$

$$\phi_{2\to 1} = J_2 S_2 F_{21}$$

On trouve alors que le facteur de forme $F21$ est :

$$F_{21} = \frac{1}{S_2} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} \mathrm{d}S_1 \mathrm{d}S_2$$

La comparaison des deux relations du facteur de forme donne la relation de réciprocité suivante:

$$F_{12} S_1 = F_{21} S_2$$

c) Exemples d'évaluations de facteur de forme

- **Courbure de surface**

Considérons l'exemple de la figure suivante où un cylindre 1 (ou une sphère) est placé à l'intérieur d'un autre cylindre 2 (ou d'une autre sphère). La surface 2 étant concave, une partie du flux émis par 2 est aussi incident à 2 et donc $F22 \neq 0$. Par contre la convexité de 1 fait que le flux émit par 1 n'est jamais intercepté par 1 ($F11 = 0$) mais que tout le flux est intercepté par 2 ($F12 = 1$). En utilisant finalement la relation de réciprocité, on trouve le facteur de forme : $\boldsymbol{F21 = S1/S2}$.

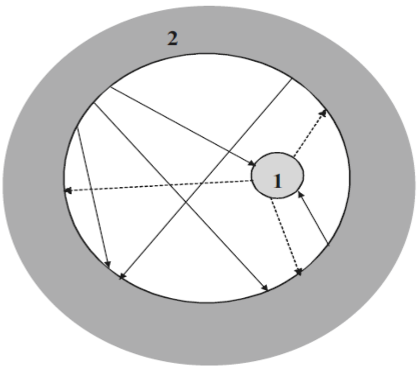


Fig.5.Flux rayonnés entre deux cylindres ou deux sphères, l'un est placé à l'intérieur de l'autre.

- **Cas particulier de la cavité**

Imaginons que N surfaces grises forment une cavité telle que celle représentée sur la figure suivante. Les surfaces sont toutes à des températures différentes et on suppose que la cavité est isolée de l'extérieur.

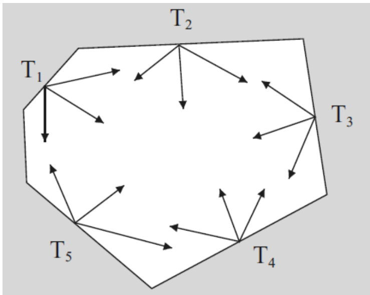


Fig.6.Flux rayonnés par différentes surfaces formant une cavité

Le flux émis par la surface j est vu en totalité par l'ensemble de toutes les autres surfaces. Dans une cavité, on obtient :

$$\sum_{i=1}^{N} F_{ji} = 1, \qquad \forall\, j \in (1, \cdots, N)$$

II.9. Échanges radiatifs entre deux corps noirs:

Les deux surfaces se comportent comme des corps noirs. Dans ce cas l'absorptivité égale à 1. Le flux réfléchi est nul. On obtient : $J = M^0$

M^0 : émittance du corps noir.

Le flux total hémisphérique partant de 1 et arrivant sur 2 est :

$$\phi_{1\to 2} = M_1^0\, S_1\, F_{12}$$

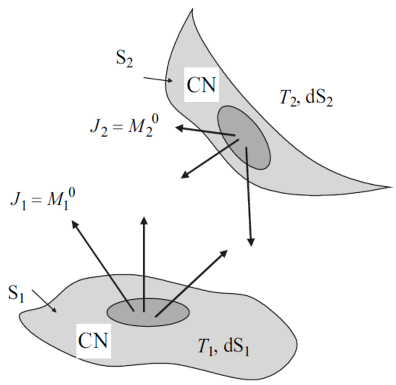


Fig.7.Échange de chaleur par rayonnement entre 2 corps noirs

De même, le flux total hémisphérique partant de 2 et arrivant sur 1 est :

$$\phi_{2\to 1} = M_2^0\, S_2\, F_{21}$$

Le flux net échangé entre les deux corps est donc :

$$\phi_{12} = \phi_{1\to 2} - \phi_{2\to 1}$$

$$\phi_{12} = M_1^0\, S_1\, F_{12} - M_2^0\, S_2\, F_{21}$$

$$\phi_{12} = S_1\, F_{12}\, \left(M_1^0 - M_2^0\right)$$

Nous avons montré que l'émittance totale hémisphérique d'un corps noir est liée à sa température à partir de la relation de Stefan - Boltzmann :

$$M^0 = \sigma_s\, T^4$$

Le flux net échangé entre deux corps noirs 1 et 2 de surface respective $S1$ et $S2$ et de température respective $T1$ et $T2$ est :

$$\phi_{12} = S_1\, F_{12}\, \sigma_s\, \left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

II.10. Émission spectrale du corps noir

On recherche souvent à calculer le flux émis dans une bande spectrale bien définie et non sur la totalité du spectre. Nous cherchons donc à calculer :

$$\int_0^{\lambda} M_\lambda^0\, \mathrm{d}\lambda$$

Nous définissons pour cela la fonction :

$$F_{0\to\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} M_\lambda^0\, \mathrm{d}\lambda}{\sigma_s\, T^4} = \int_0^{\lambda T} \frac{M_\lambda^0}{\sigma_s\, T^5}\, \mathrm{d}\,(\lambda T)$$

Cette quantité représente la fraction de flux émis dans la bande spectrale ($0 \to \lambda$) par rapport à l'émittance totale. Malheureusement, ce calcul ne conduit pas à une expression analytique, on doit recourir à des outils numériques d'intégration. La fonction $F_{0\to\lambda}$ est présentée par un tableau ou bien graphiquement.

Si on cherche à calculer le flux émis dans une bande ($\lambda_1 \to \lambda_2$), on utilise la relation:

$$F_{\lambda_1\to\lambda_2} = F_{0\to\lambda_2} - F_{0\to\lambda_1}$$

II.11. Utilisation de l'analogie électrique

L'analogie électrique a été utilisée pour la résolution du problème de conduction. Dans ce cas, la résistance lie le flux avec la différence de température. Nous allons définir dans le cas de rayonnement une résistance liant le flux net échangés entre deux surfaces noires 1 et 2 avec la différence entre l'émittance des deux surfaces. La valeur de la résistance est donc donnée par la relation : $\phi_{12} = \frac{M_1^\circ - M_2^\circ}{\frac{1}{F_{12} S_1}}$

On obtient ainsi un schéma électrique équivalent tel que celui représenté sur la figure suivante :

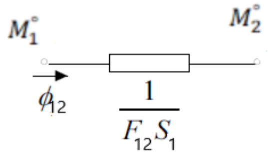


Fig.8. Analogie électrique entre deux surfaces noires

II.12.Expression du flux net échangé entre corps gris dans une cavité:

Considérons une cavité formée de *N* surfaces diffuses, opaques et grises comme est représenté sur la figure suivante :

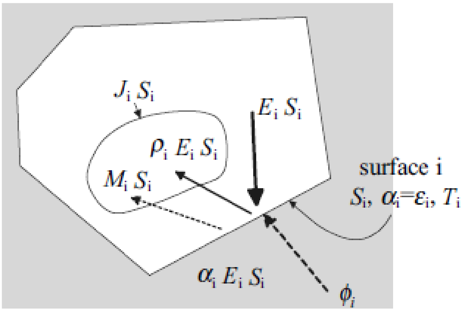


Fig.9. Bilan des flux à la surface grise d'une cavité

Le flux net à la surface *i* dans ce cas est :

$$\phi_i = \frac{M_i^0 - J_i}{(1-\alpha_i)/\alpha_i\ S_i} = \sum_{j=1}^{N} \frac{J_i - J_j}{(F_{ij}\ S_i)^{-1}}$$