

## **Chapitre 2. Transfert de chaleur par rayonnement.**

### **1. Introduction**

Il pourrait être intéressant de ranger les processus de transfert de chaleur en deux catégories. La première serait définie par le fait que le milieu structural à travers lequel la chaleur est transmise participe au processus de transfert : c'est le cas de la conduction et de la convection étudiée aux chapitres précédents. La deuxième catégorie est celle où le milieu ne participe pas au transfert de chaleur c'est le cas du rayonnement qui fait l'objet du présent chapitre.

Quand un corps est placé dans une enceinte dont les murs sont à une température inférieure à celle du corps, la température de celui-ci diminue même si l'enceinte a été vidée. Le processus par lequel la chaleur est transmise, sans l'aide d'aucun moyen matériel est appelé **rayonnement thermique**.

### **2. Définitions et lois énergétiques**

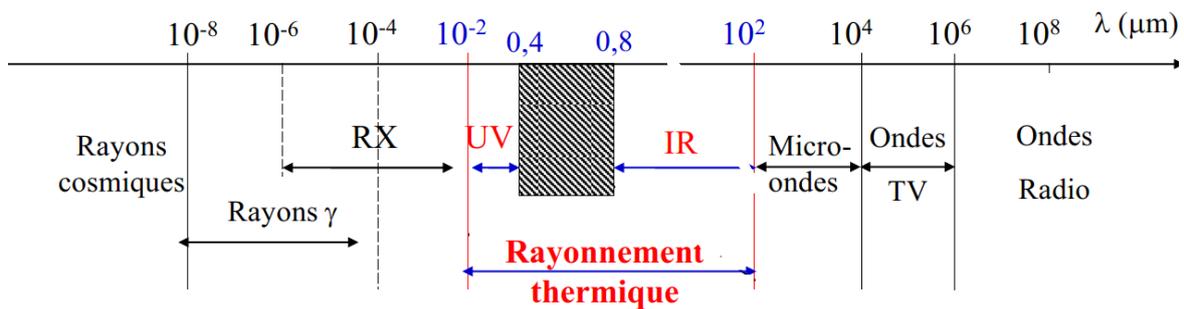
#### **2. 1. Définitions**

Le terme rayonnement est appliqué à l'ensemble des échanges d'énergie à distance entre les corps par ondes électromagnétiques. 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.

Sous le nom de rayonnement, on réunit l'ensemble des échanges d'énergie à distance entre corps par ondes électromagnétiques, qui se distingue des autres formes de rayonnement uniquement par leur longueur d'onde.

## 2.1.2. Spectre des ondes électromagnétiques

L'action d'un rayonnement sur un milieu dépend de sa longueur d'onde. Les limites des propriétés du rayonnement suivant sa longueur d'onde  $\lambda$  pour divers formes peuvent être résumées par le spectre suivant.



## 2.1.3. Classification de grandeurs physiques utilisées

### 2.1.3.1. Classifications suivant la composition spectrale du rayonnement

Les grandeurs physiques relatives à l'ensemble du spectre du rayonnement thermique sont appelées **totales**. Celles relatives à un intervalle spectral étroit  $d\lambda$  centré autour d'une longueur d'onde  $\lambda$  sont appelées **monochromatiques** et sont affectées d'un indice  $\lambda$ .

### 2. 1.3.2. Classifications suivant la distribution spatiale du rayonnement

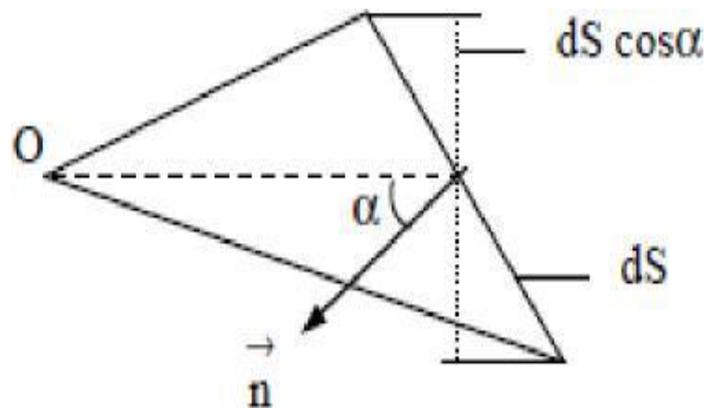
Lorsqu'elles concernent l'ensemble des directions de l'espace, les grandeurs sont appelées **hémisphériques**, lorsqu'elles ne caractérisent qu'une direction donnée de propagation, elles sont appelées **directionnelles**.

## 2.1.4. Grandeurs énergétiques

### 2.1.4.1. Grandeurs relatives à une surface émettant un rayonnement

**2.1.4.1.1. Flux énergétique :** abréviation  $\Phi$  unité [W]. C'est la puissance émise par une source dans tout l'espace où elle peut rayonner.

**2.1.4.1.2. Angle solide :** abréviation  $d\Omega$  unité [strad] stéradian. L'angle solide est une généralisation dans l'espace à trois dimensions de la notion de l'angle plan, il est défini comme :



$$d\Omega = \frac{\text{Aire de surface interceptée}}{R^2} = \frac{ds \cos \alpha}{R^2}$$

**2.1.4.1.3. Emitance :** abréviation  $M$  unité [W/m<sup>2</sup>]. Définie comme le flux totale émis par uunité de surface de la source elle s'exprime :

$$M = \frac{d\Phi}{dS}$$

**2.1.4.1.4. Intensité** : abréviation **I**, unités [W/ Sr]. On appelle intensité énergétique  $I_{OX}$ , le flux par unité d'angle solide émis par une surface  $dS$  dans un angle solide  $d\Omega$  entourant la direction  $OX$ .

$$I_{OX} = \frac{d\Phi_{OX}}{d\Omega}$$

**2.1.4.1. 5. Luminance** : abréviation **L<sub>OX</sub>** unité [W/m<sup>2</sup>.Sr]. la luminance  $L_{OX}$  d'une source de surface  $dS$ , dans une direction  $OX$ , est définie comme le rapport de l'intensité  $I_{OX}$  de la surface dans cette direction par la surface apparente  $dS \cos \alpha$ .

$$L_{OX} = \frac{dI_{OX}}{dS \cos \alpha} = \frac{d^2\Phi_{OX}}{d\Omega dS \cos \alpha}$$

### **2.1.4.2. Grandeurs relatives à une surface recevant un rayonnement**

**2.1.4.2.1.Éclairement** : abréviation **E** unité [W/m<sup>2</sup>]. C'est l'homologue de l'émittance pour une source. L'éclairement est le flux total reçu par unité de surface réceptrice, en provenance de l'ensemble des directions.

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

### **2.1.4.2.2. Réception du rayonnement par solide**

Quand un rayon incident d'énergie  $\Phi_{\lambda i}$  frappe un corps à une température  $T$ , une partie  $\Phi_{\lambda r}$  est réfléchiée par sa surface  $S$ , une partie  $\Phi_{\lambda a}$  est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste  $\Phi_{\lambda t}$  est transmis est continue son chemin

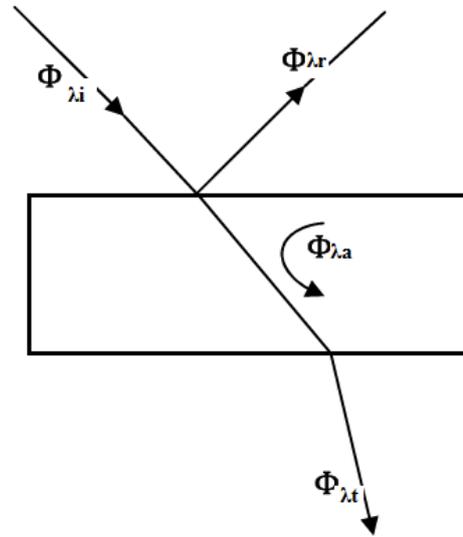
$$\Phi_{\lambda i} = \Phi_{\lambda r} + \Phi_{\lambda a} + \Phi_{\lambda t}$$

En divisant l'équation précédente par  $\Phi_{\lambda i}$  :

$$1 = \frac{\Phi_{\lambda r}}{\Phi_{\lambda i}} + \frac{\Phi_{\lambda a}}{\Phi_{\lambda i}} + \frac{\Phi_{\lambda t}}{\Phi_{\lambda i}}$$

On pose :

$$\varphi_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda r}}{\Phi_{\lambda i}} \quad \alpha_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda a}}{\Phi_{\lambda i}} \quad \tau_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda t}}{\Phi_{\lambda i}} \quad , \quad \varphi_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$$



On définit ainsi les pouvoirs monochromatiques réfléchissant  $\varphi_{\lambda}$ , absorbant  $\alpha_{\lambda}$  et filtrant  $\tau_{\lambda}$ , qui sont fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température  $T$  de la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

Si l'on considère l'énergie incidente sur tout le spectre des longueurs d'onde, on obtient les pouvoirs réfléchissant  $\varphi$  absorbant  $\alpha$  et filtrant  $\tau$ .

Les valeurs  $\varphi$ ,  $\alpha$  et  $\tau$  de certains corps sont données dans des tableaux dans la littérature.

**1<sup>er</sup> cas :** Corps opaque  $\tau=0 \Rightarrow \varphi+\alpha=1$  la majorité des liquides et des solides sont des corps opaques

- Si  $\varphi=0 \Rightarrow \alpha=1 \Rightarrow$  le corps opaque s'appelle un corps noir.
- Si  $\varphi=1 \Rightarrow \alpha=0 \Rightarrow$  le corps c'est le cas d'un corps blanc.

**2<sup>ème</sup> cas** : Corps totalement transparent :  $\varphi=\alpha=0 \Rightarrow \tau=1$ . Ce corps n'émet pas et n'absorbe pas aussi. Exemple : les gaz simples (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, etc.), le vide, l'air, etc.

**3<sup>ème</sup> cas** : Corps partiellement transparent : il y a diminution de l'énergie transportée pendant la traversée du corps. C'est le cas de certains gaz (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO...) et de certains solides (plastiques, verres).

## 2.2. Lois du rayonnement thermique d'un corps noir

### 2.2.1. Le corps noir

Le corps noir ou émetteur idéal est un corps qui peut émettre et absorber le maximum d'énergie possible à chaque température et longueur d'onde. Il sert d'étalon au rayonnement. Les grandeurs physiques caractérisant sont munis d'une puissance "0".

### 2.2.2. Loi de Planck

La loi de Planck lie l'émittance monochromatique du corps noir à sa longueur d'onde et à sa température. Elle s'exprime :

$$M^0_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\left(\frac{hc}{K\lambda T}\right)} - 1}$$

Avec :

h : Constante de Plank ,  $h=6,625510^{-34}$  [J/s]

c : Célérité des ondes électromagnétiques dans le milieu où se propage le rayonnement [m/s]

$c = \frac{c_0}{n}$  où  $c_0 = 3.10^8$  [m/s] et n est l'indice de réfraction.

$\lambda$  : longueur d'onde [m]

K : Constante de Boltzmann.  $K=1.385 \cdot 10^{-23}$  [J/K]

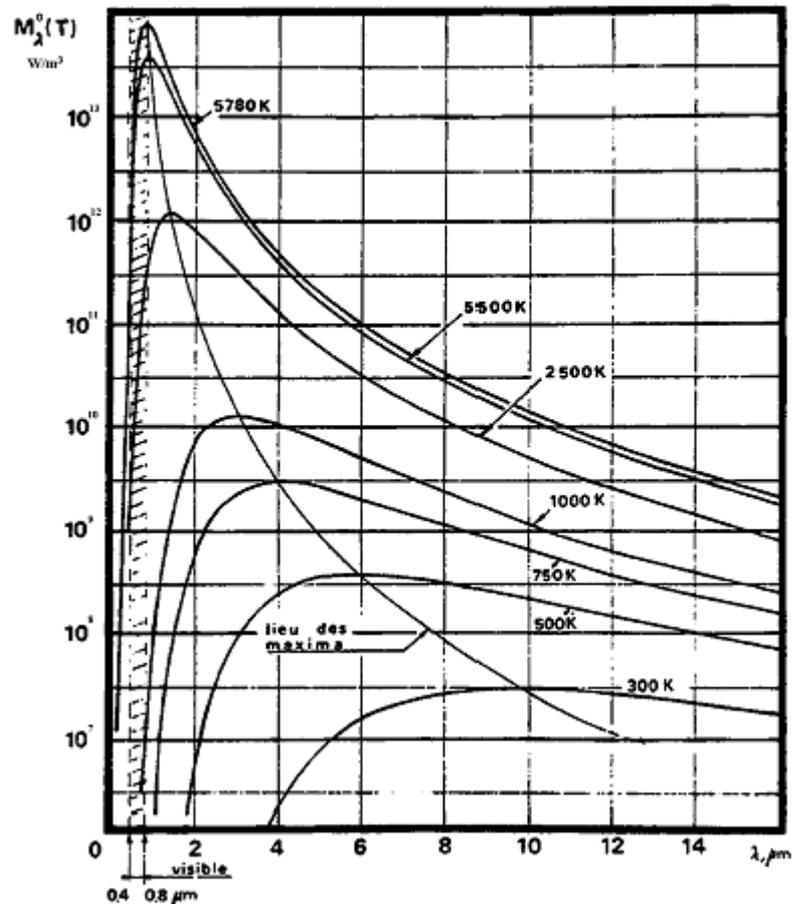
T : Température du corps noir [K].

Lorsque le rayonnement se propage dans le vide (indice de réfraction égale à l'unité) la loi de Planck prend la forme suivante :

$$M_{\lambda}^0 = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1 \right]}$$

$c_1$  et  $c_2$  des constantes  $c_1 = 374,15 \cdot 10^{-18}$  [W/m<sup>2</sup>] et  $c_2 = 14.388 \cdot 10^{-3}$  [mK]

La loi de Planck permet de tracer les courbes isothermes représentant les variations de l'émittance monochromatique en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures.



Remarque :

On remarque qu'à chaque température, la courbe possède une longueur d'onde pour laquelle l'émittance est maximale. En reliant ces maximums, on aura la courbe représentée sur la figure appelée : **lieu des maxima**.

### 2.2.3. Loi de Wien

Les lois de Wien au nombre de deux fournissent l'abscisse et l'ordonnée de la longueur d'onde pour laquelle l'émittance monochromatique du corps noir est maximale.

#### 2.2.3.1. Première loi de WIEN

La première loi de Wien nous permet de déterminer la longueur d'onde pour laquelle le rayonnement est maximal. Cette longueur d'onde en fonction de la température s'exprime :

$$\lambda_m T = 2898 \text{ [}\mu\text{m K]}$$

#### 2.2.3.2. Deuxième loi de WIEN

L'émittance est aussi fonction de température. La seconde loi de Wien permet d'exprimer cette dépendance :

$$M_{\lambda_{\max}}^0 = BT^5 \quad B = 1,287 \cdot 10^{-5} \text{ [W/m}^3\text{K}^5\text{]}$$

La constante B a pour valeur numérique selon les unités :

$$B = 1,287 \cdot 10^{-5} \text{ [W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-5}\text{]} \text{ si } [\lambda_{\max}] \text{ en m et } B = 1,287 \cdot 10^{-11} \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-5}\text{]} \\ \text{si } [\lambda_{\max}] \text{ en } \mu\text{m}.$$

#### **2.2.2.4. Loi de STEFAN BOLTZMANN**

Cette loi fournit l'expression de l'émittance totale par unité de surface de rayonnement du corps noir dans le vide en fonction de sa température absolue, On peut l'établir en intégrant sur l'ensemble du spectre, la relation exprimant la loi de PLANCK elle s'exprime :

$$M^0 = \sigma T^4 \quad \sigma : \text{constante de Stefan Boltzmann, } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$