

## Chapitre 3. Notions sur les modes de transferts thermiques

### 3.1 Introduction

Plus de 85 % de l'énergie consommée dans le monde passe par la combustion de réserves fossiles ou de ressources renouvelables. D'autre part, quelles que soient les technologies utilisées, la maîtrise de l'énergie nucléaire, de l'énergie solaire thermique, de la géothermie profonde ou des pompes à chaleur reposent en partie sur les transferts thermiques. De plus, les efficacités des systèmes de propulsion, de production d'énergie et, plus généralement encore, de la plupart des systèmes industriels ou d'usage courant, électroniques par exemple, dépendent aussi de la maîtrise du conditionnement thermique de ces systèmes. Les transferts thermiques constituent donc une science clé de l'énergie.

La thermique ou la thermocinétique se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final. Donc, le transfert de chaleur étudie la propagation de l'énergie thermique d'un milieu à un autre, sous influence d'une différence spatiale et/ou temporelle de température.

Dans ce chapitre, en s'intéressant plus particulièrement à l'énergie thermique des actions exercées sur cette énergie :

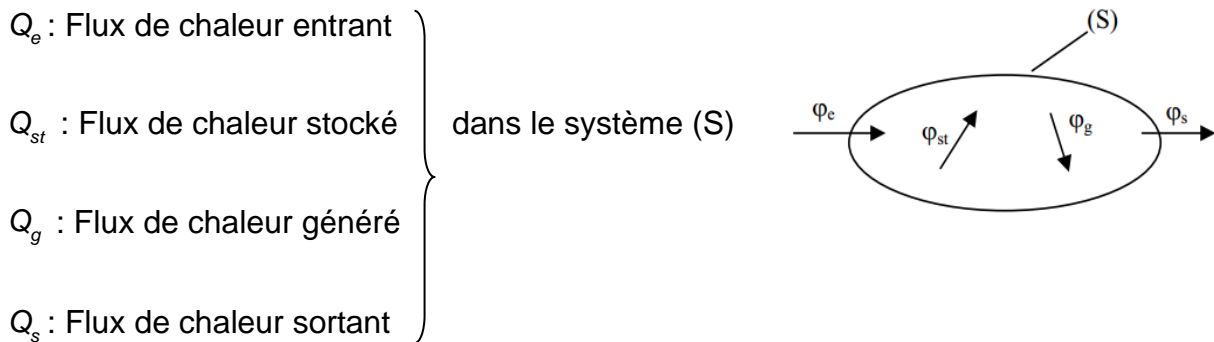
- Transport : c'est le déplacement dans l'espace d'une quantité d'énergie. Par exemple, on dispose d'une quantité d'eau chaude en un lieu que l'on déplace à travers un réseau de conduites pour l'amener dans un autre lieu afin d'assurer un moyen de chauffe.
- Stockage : c'est le déplacement dans le temps d'une quantité d'énergie. Par exemple, la quantité de l'eau chauffée par un chauffe-eau solaire peut être stockée durant le temps d'ensoleillement (au cours de la journée) pour l'utiliser pendant la nuit.
- Transfert : c'est le passage d'une quantité d'énergie d'un milieu matériel (solide, liquide ou gazeux) à un autre milieu matériel. Notre eau chaude, par

l'intermédiaire du radiateur (échangeur de chaleur), transfère son énergie à l'air environnant.

- Conversion : c'est le passage d'une forme d'énergie à une autre. Par exemple la transformation de l'énergie électrique en énergie thermique par l'intermédiaire de l'effet Joule dans la résistance du thermoplongeur.

### 3.2 Conservation d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (volume de control) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être :



On applique le 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$Q_e + Q_g = Q_{st} + Q_s \quad (\text{en } W) \quad (3.1)$$

- L'énergie stockée : augmentation de l'énergie interne de système considérée au cours de temps à pression constante.

$$Q_{st} = \rho VC \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.2)$$

$Q_{st}$  : Flux de chaleur stocké [W]

$\rho$  : Masse volumique [Kg/m<sup>3</sup>]

$C$  : Chaleur spécifique [J.Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$T$  : Température [K]

$t$  : Temps [s]

- L'énergie générée : Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique...) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme :

$$Q_g = \dot{q} \cdot V \quad (3.3)$$

$Q_g$  : Flux de chaleur générée [W]

$\dot{q}$  : Densité volumique d'énergie générée [ $W \cdot m^{-3}$ ]

$V$  : Volume [ $m^3$ ]

- Flux de chaleur entré : lorsqu'un débit massique  $\dot{m}$  de matière entre dans le système à la température  $T_1$  et en ressort à la température  $T_2$  on doit considérer dans le bilan (3.1) un flux de chaleur entrant correspondant :

$$Q_e = \dot{m} C_p (T_1 - T_2) \quad (3.4)$$

$Q_e$  : Flux de chaleur entrant dans le système [W]

$\dot{m}$  : Débit massique [ $Kg \cdot s^{-1}$ ]

$C_p$  : Chaleur spécifique [ $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$T_1$  et  $T_2$  : Température d'entrée et de sortie du fluide [K]

Le potentiel qui provoque le transport et le transfert de l'énergie thermique est la température. Si deux points matériels placés dans un milieu thermiquement isolé sont à la même température, on peut affirmer qu'il n'existe aucun échange thermique global entre ces deux points. Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons : conduction, convection et rayonnement (voir la figure ci-dessous).

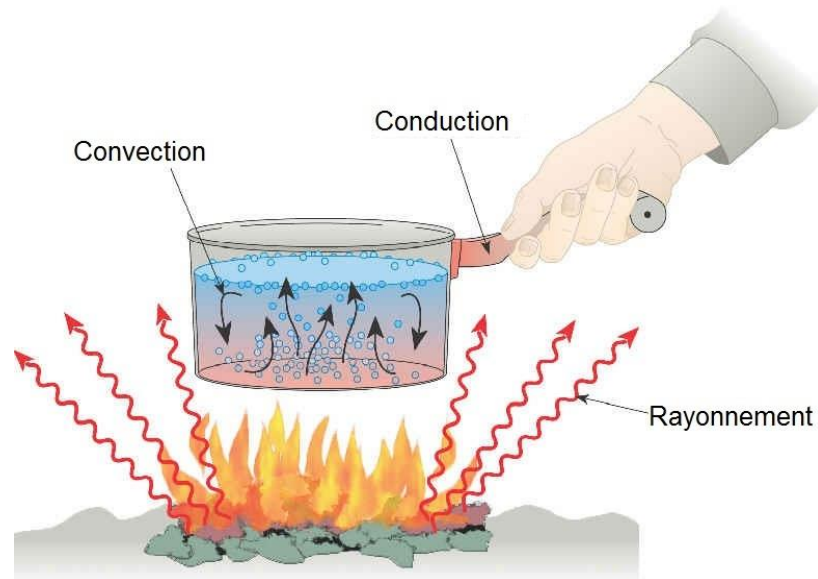


Figure 3.1 Schéma de trois modes de transfert thermique.

### 3.2.1 Transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction est un transport de chaleur dans un milieu immobile ou mobile sans remous turbulent. Ce mode de transport de la chaleur est le seul intervenant au sein des milieux solides opaques, aussi la conduction concerne essentiellement les solides. Dans les liquides et les gaz le transport de la chaleur par conduction est très souvent négligeable devant les deux autres types de transport de la chaleur.

La conduction est un phénomène très analogue à la conduction de l'électricité. Il s'agit d'un transfert d'énergie à petite échelle, dans un corps localement au repos. On parlera de conducteur ou d'isolant de la chaleur. Elle est décrite par la loi de Fourier (1807).

La loi correspondant à ce processus particulier de diffusion de la chaleur est telle que la densité  $\vec{Q}$  ( $W / m^2$ ) du courant de chaleur en un point, appelée encore densité du flux, est une fonction linéaire du gradient de température en ce point :

$$\vec{Q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (3.5)$$

L'opérateur  $\vec{\lambda}$ , qui définit la conductivité thermique du milieu au point considéré, est un tenseur symétrique. Pour un milieu isotrope, la conductivité thermique se caractérise simplement par un scalaire unique  $\lambda$ .

La relation ci-dessus, dite loi de FOURIER, se démontre à partir des lois de la mécanique statistique appliquées aux atomes, molécules ou électrons libres du milieu considéré.

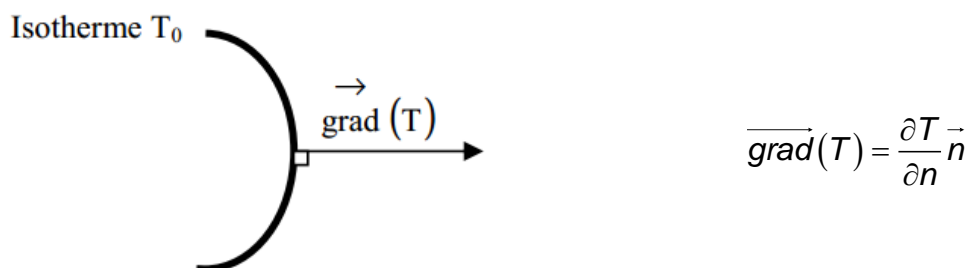
### 3.2.1.1 Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température :  $T = f(x, y, z, t)$ . La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

### 3.2.1.2 Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite *surface isotherme*. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :



**Figure 3.2** Isotherme et gradient thermique.

Avec :  $\vec{n}$  vecteur unitaire de la normale

$\frac{\partial T}{\partial n}$  dérivée de la température le long de la normale.

### 3.2.1.3 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\vec{Q} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (3.6)$$

Ou sous forme algébrique :

$$Q = -\lambda S \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.7)$$

Avec : Q Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\lambda$  Conductivité thermique du milieu ( $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

x Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $\text{m}^2$ )

Le signe (-) signifie que la chaleur est transmise toujours dans la direction de température décroissante.

La loi de FOURIER ou la loi de la conduction thermique est phénoménologique dans le sens où elle est le résultat d'observations de phénomènes. C'est une généralisation de phénomènes de nature. Comme exemple on peut observer le phénomène de la conduction thermique dans une barre cylindrique, de matériau donné, dont la surface latérale est isolée thermiquement mais les deux faces transversales sont maintenues à deux températures différentes, avec  $T_1 > T_2$ .

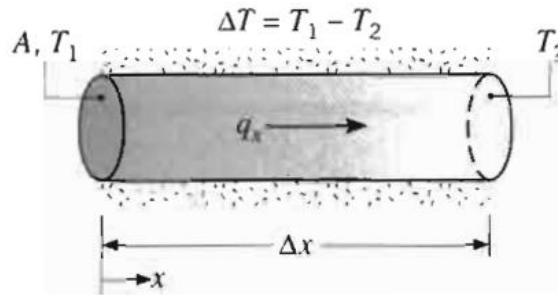


Figure 3.3 Conduction stationnaire.

### Exemple

Les dimensions d'un toit d'une maison est de 6 m de longueur, de 8 m de largeur et de 0,25 m de profondeur, est construit d'une couche plate de béton dont la conductivité thermique est 0,8 W/m.K. La température des deux faces, intérieure et extérieure, du toit sont respectivement 15 et 4 °C, pour une période de 10 heures.

Déterminer :

- Le flux de chaleur perdu par le toit pendant cette période;
- Le coût de cette perte de chaleur au propriétaire de la maison si le coût de l'électricité est 0,08 DA/kWh.

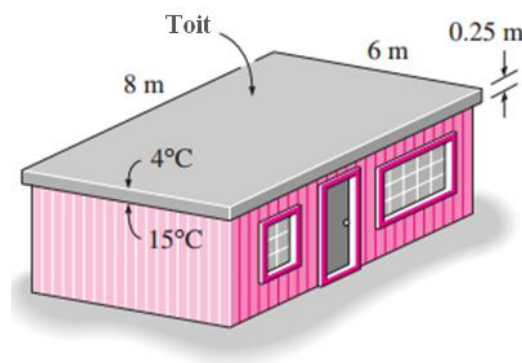


Figure 3.4 Schéma représentatif du problème.

### Solution

Notant que le transfert de chaleur par le toit est fait par conduction et la surface du toit est  $A = 6m \times 8m = 48m^2$ . L'application de la loi de Fourier permet d'écrire :

$$Q = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda A \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{E} = (0,8 \text{ W / m.K}) (48 \text{ m}^2) \frac{(15 - 4) \text{ K}}{0,25 \text{ m}} = 1690 \text{ W} = 1,69 \text{ kW}$$

La quantité et le coût de la chaleur perdue, à travers le toit, durant la période de 10h est déterminé par :

$$q = Q \times \Delta t = (1,69 \text{ kW})(10 \text{ h}) = 16,9 \text{ kWh}$$

$$\text{coût} = (\text{Quantité d'énergie})(\text{coût d'unité d'énergie}) = (16,9 \text{ kWh})(0,08 \text{ DA / kWh}) = 1,35 \text{ DA}$$

Il faut ajouter quelques grandeurs qui apparaîtront au fur et à mesure de l'analyse et de la mise en place des phénomènes de la conduction thermique :

- La conductivité thermique, qui indique l'aptitude du matériau à conduire la chaleur (à rapprocher de la conductivité électrique) :

$$\lambda \propto \frac{dQ}{dt \cdot dA} \frac{L}{\Delta T} \quad (3.8)$$

Dans cette relation  $L$  est la dimension caractéristique de l'échange par conduction pour laquelle l'écart de température est  $\Delta T$ . L'unité de la conductivité thermique est alors  $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

- La diffusivité thermique caractérise l'aptitude au déplacement dans l'espace mais surtout dans le temps de la chaleur. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique). Cette grandeur est à rapprocher des deux autres diffusivités que l'on rencontre lorsque sur un problème de thermique vient se greffer un problème massique, diffusivité matérielle, ou un problème d'écoulement, diffusivité mécanique ou viscosité dynamique. La diffusivité thermique est définie par :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (3.9)$$

$\rho$  est la masse volumique du matériau. L'unité des diffusivités est  $(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ .

- Effusivité thermique : pour caractériser les échanges thermiques à des temps courts il est fait usage de l'effusivité thermique :



$$E = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (3.10)$$

Par conséquent, elle s'exprime par (J.K<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1/2</sup>).

**Remarque:** Ne pas confondre l'effusivité thermique avec la diffusivité thermique. Toutes deux sont les grandeurs principales pour quantifier l'inertie thermique. À la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité d'un déplacement des calories à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe les calories. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. Au contraire, plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe.

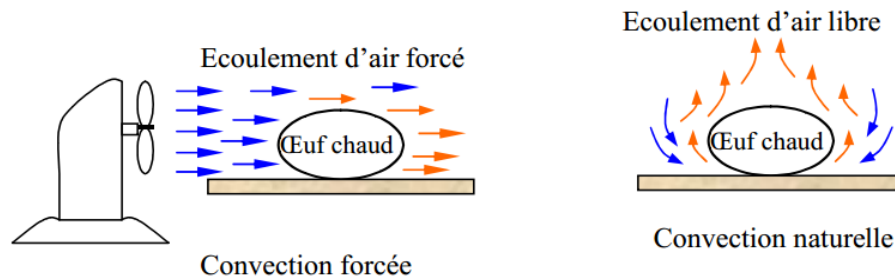
- Inertie thermique : Quand un matériau se trouve à l'équilibre thermique, sa température est fixe et les échanges de chaleur (échange par conduction, convection, rayonnement) qu'il a avec son environnement sont équilibrés. L'**inertie thermique** est la propension de ce matériau à garder longtemps sa température d'origine quand intervient une perturbation de cet équilibre thermique.
  - Si le matériau est très inerte, il atteindra cet équilibre au bout d'un temps long.
  - Si le matériau est peu inerte, il attendra cet équilibre au bout d'un temps bref.

### 3.2.2 Transfert de chaleur par convection

La convection est le mode transfert de chaleur lié au mécanisme de propagation de la chaleur entre une surface solide et un fluide (gaz ou liquide) en mouvement en contact de cette surface. Dans le processus de convection, la chaleur se déplace des zones chaudes vers les zones froides. La convection caractérise très souvent l'échange à la frontière entre un solide et un fluide, donc il est très lié à l'écoulement du fluide mais aussi aux géométries de la surface d'échange.

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Dans le cas où le mouvement du fluide est provoqué par une force extérieure : pompes pour les liquides ; ventilateurs et compresseurs pour les gaz, on est en présence de la convection forcée. Dans le cas contraire, quand le mouvement du fluide se fait

naturellement sous l'effet de la différence de masse volumique des particules du fluide, on l'appelle naturelle. Dans ce cas les particules qui ont reçu une énergie thermique de la part de la paroi leur masse volumique diminue, et sous l'effet de la poussé d'Archimède un écoulement ascendant est crée au sein du fluide.



**Figure 3.5** Convection forcée et naturelle.

Le transfert de chaleur par convection est proportionnel à l'écart de température existant entre la paroi et le fluide. Mathématiquement ceci peut être exprimé par la relation suivante :

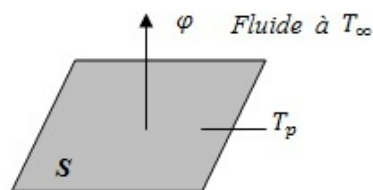
$$Q \propto S(T_p - T_\infty) \quad (3.11)$$

Avec  $S$  : surface de contact du fluide

En introduisant une constante de proportionnalité  $h$ , on obtient :

$$Q = hS(T_p - T_\infty) \quad (3.12)$$

L'équation (3.12) est connue sous le nom de loi de Newton. La constante de proportionnalité " $h$ " s'appelle coefficient de transfert de chaleur par convection.



**Figure 3.6** Schéma du transfert de chaleur convectif

Avec :  $Q$  : Flux de chaleur convectif [W]

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

$T_p$  : Température de surface du solide [K]

$T_\infty$  : Température du fluide loin de la surface du solide [K]

$S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide [ $\text{m}^2$ ]

La valeur de  $h$  est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide-fluides.

### **Exemple**

Considérons une personne dans une salle fraîche à 20°C. Déterminer le flux de chaleur transféré par convection de la surface de cette personne si la surface externe moyenne et la température de la personne sont de 1,6 m<sup>2</sup> et 29°C, respectivement et le coefficient de transmission de chaleur de convection est 6 W/m<sup>2</sup>.K.

### **Solution**

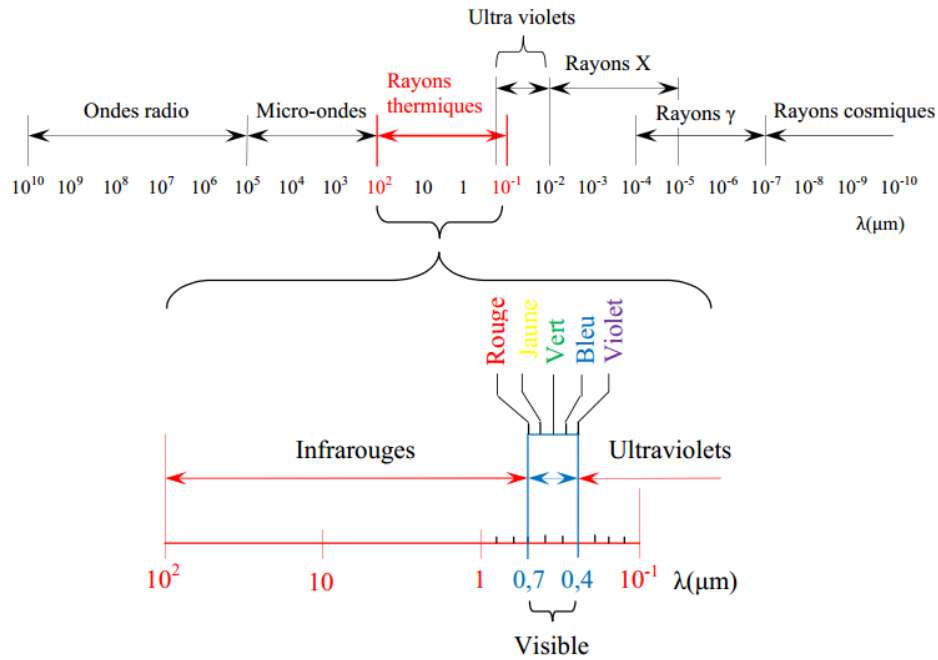
Le transfert de chaleur entre la personne et l'air dans la chambre par convection est calculé comme suite :

$$Q_{conv} = hS(T_s - T_\infty) = (6W / m^2.K)(1,6m^2)(29 - 20)K = 86,4W$$

### **3.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement**

La conduction et la convection sont des mécanismes de transfert de chaleur qui nécessitent des milieux matériels pour la propagation de la chaleur. Alors que la chaleur peut aussi bien être transmise sans la présence de ce milieu matériel. L'exemple le plus connu de tous est celui de l'échauffement de la terre par le soleil.

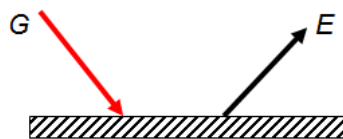
Effectivement c'est grâce aux ondes électromagnétiques, qu'on appelle rayonnement, que la chaleur est transmise entre les corps. D'après la théorie des ondes électromagnétiques, on sait que leur vitesse de propagation dans le vide est de  $3.10^8$  m/s (vitesse de la lumière dans le vide). Pour faire la part des choses, il faut dire que ce n'est pas toutes les ondes électromagnétiques les plus connues telles que : rayon de transmission de radio et télévision, téléphonie, micro-ondes, infrarouge, lumière visible, ultraviolet, rayon X, seules les rayons infrarouge, lumière visible et l'ultraviolet transportent la chaleur.



**Figure 3.7** Spectre des ondes électromagnétiques.

D'après la théorie du rayonnement, tous les corps, quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur.

Considérons une paroi plane telle que représentée sur la figure ci-dessous. Etant à une température différente de celle des corps avoisinant, elle reçoit et émet du rayonnement thermique.



**Figure 3.8** Emittance et Eclaircissement

Corps noir : c'est un corps qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident, il est défini par :  $\varepsilon = 1$ . Une surface enduite de noir de fumée est approximativement un corps noir.

Le rayonnement émit par une paroi est appelé Emittance noté par la lettre "E". D'après la loi de Stéfán-Boltzman, on peut calculer l'Emittance d'un corps noir :

$$E_n = \sigma T^4 \quad [W / m^2] \quad (3.13)$$

Avec  $\sigma$  : constante de Stéfán-Boltzman,  $\sigma = 5,67.10^{-8} [W / m^2.K^4]$

T : Température de la paroi en Kelvin ;

L'indice "n" indique que le corps est noir ;

Connaissant l'Emittance d'un corps noir, on peut calculer le flux de chaleur émit par ce corps.

$$Q = E_n \cdot S = S \cdot \sigma \cdot T^4 [W] \quad (3.14)$$

Avec S : Surface émettant le rayonnement.

Emittance d'un corps réel :

$$E = \varepsilon \sigma T^4 [W / m^2] \text{ et } Q = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 [W] \quad (3.15)$$

Avec  $\varepsilon$  : coefficient d'émissivité thermique, caractérisant l'état de surface ;  $\varepsilon \leq 1$ , pour les corps noir  $\varepsilon = 1$ .

D'après cette loi, on en déduit qu'un corps noir émet plus que tous les corps réels.

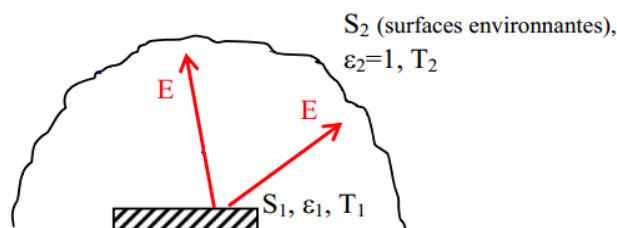
Le rayonnement reçu par la paroi, appelé aussi rayonnement incident ou éclaircissement est défini comme étant le rayonnement parvenant de l'extérieur à la surface de la paroi. Selon les caractéristiques radiatives de cette surface, une partie ou la totalité de ce rayonnement incident peut être absorbée. L'énergie thermique du rayonnement absorbée par la paroi peut être calculée d'après la relation suivante :

$$G_{abs} = a \cdot G \quad (3.16)$$

Avec a : coefficient d'absorption de la paroi.

Le phénomène de rayonnement implique toujours l'échange de chaleur entre deux ou plusieurs surfaces. Considérons le cas simple d'un corps de surface  $S_1$  et un coefficient d'émissivité  $\varepsilon_1$ , à la température absolue  $T_1$  qui se trouve complètement entouré par un autre corps noir ( $\varepsilon_2 = 1$ ) de surface plus grande  $S_2$  à la température  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) (figure 3.9). Le flux thermique échangé, par rayonnement, entre ces deux corps est donné par la loi de Stéphan-Boltzmann suivante :

$$Q = \varepsilon_1 S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.17)$$



**Figure 3.9** Flux échangé entre deux surfaces

### **Exemple**

Calculer le flux de chaleur, par unité de surface, émis par le soleil si sa température est égale à  $5700^{\circ}\text{C}$  et les conditions de rayonnement sont proches de celles d'un corps noir.

**Solution** : En considérant le soleil comme étant un corps noir ( $\varepsilon = 1$ ), appliquons l'équation (3.15). Le flux par unité de surface correspond à la densité de flux ( $\dot{Q}$ ) est :

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma T^4 = 1(5,67 \cdot 10^{-8})(5700 + 273)^4 = 72,2 \cdot 10^6 \text{ [W / m}^2 \text{]}$$