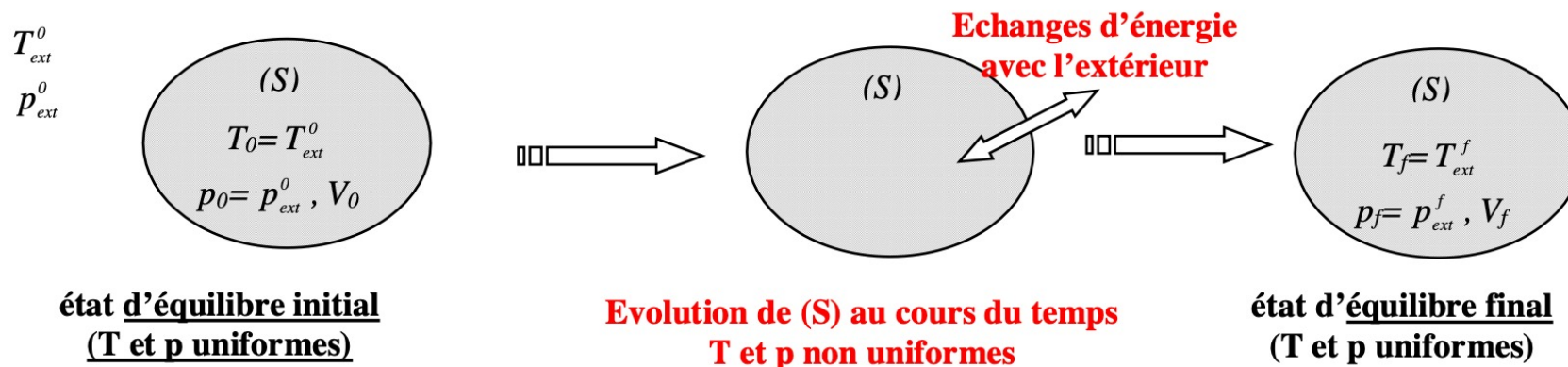


# Déperdition



# Chap. 1 : GENERALITES SUR LES TRANSFERTS DE CHALEUR

La thermodynamique nous apprend que l'énergie peut être transférée à partir d'interactions entre le système et son environnement, sous forme de chaleur et de travail. Cependant, la thermodynamique ne se préoccupe que de l'état initial et de l'état final du système à l'équilibre, et ne fournit aucune information sur la nature des interactions mises en jeu et sur l'évolution temporelle du système entre les deux états d'équilibre.



Un transfert de chaleur au sein d'un système ne se produit que s'il existe des gradients de température entre les différentes parties du système, ce qui implique que celui-ci n'est alors pas à l'équilibre thermodynamique (la température n'est pas uniforme dans tout le système). Au cours de la transformation du système vers un état d'équilibre final, la température va évoluer à la fois en temps et en espace. Le but de l'analyse des transferts de chaleur est d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation et de déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps.

# I. Les trois modes de transfert de chaleur :

## 1. Transfert de chaleur par conduction dans les solides (ou les fluides au repos).

Le processus de transfert de chaleur par conduction s'appuie sur un milieu matériel sans mouvement de matière et est dû à des phénomènes physiques microscopiques (agitation des atomes ou des molécules, flux d'électrons libres...). Il peut être vu comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques (les particules chaudes qui ont une énergie de vibration élevée) vers les particules les moins énergétiques (les particules froides d'énergie de vibration moins élevée), dû aux collisions entre particules. Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres dans le réseau cristallin (par exemple pour les métaux). Ainsi les bons conducteurs d'électricité sont en général également de bons conducteurs de la chaleur.

## 2. Transfert de chaleur par convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement. On distingue deux types de convection:

- *Convection naturelle:* les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) et/ou par des gradients de composition.

- *Convection forcée*: le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).

On parlera de *convection mixte* lorsque les deux types de convection coexistent dans un système.

### **3. Transfert de chaleur par rayonnement**

Tout corps matériel émet et absorbe de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Le phénomène d'émission d'un corps correspond à la conversion d'énergie matérielle (agitation des électrons constituant la matière dont l'intensité dépend de la température) en énergie radiative. Le phénomène d'absorption est la conversion inverse.

## II. Définitions

Les transferts de chaleur sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température,  $T(x,y,z,t)$

- La variation dans le temps en un point  $M(x,y,z)$  du système est donnée par la dérivée partielle de  $T(x,y,z,t)$  par rapport au temps :  $\frac{\partial T}{\partial t}$

Pendant un intervalle de temps  $dt$ , la variation de température en un point  $M$  sera :

$$dT = \frac{\partial T}{\partial t} dt$$

- La variation dans l'espace à un instant  $t$  est donnée par de **gradient de température** :

$$\vec{\nabla}T = \overrightarrow{grad} T = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix}$$

• **Flux de chaleur**

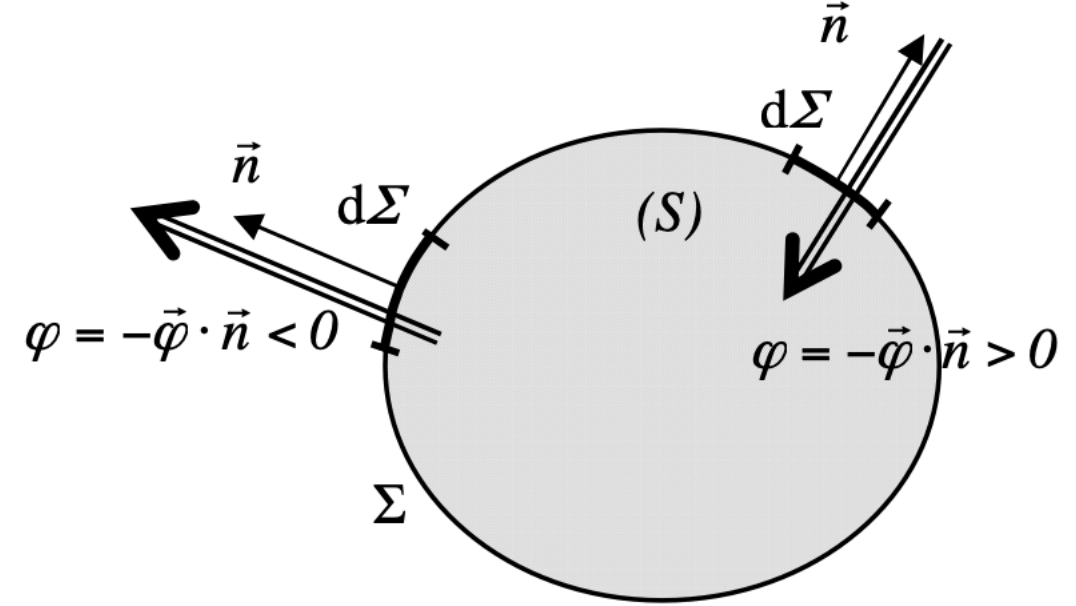
Un flux de chaleur est une quantité d'énergie transférée sous forme de chaleur par unité de temps. C'est donc une puissance, qui s'exprime en Watt ( $J/s$ ) :

$$\phi = \frac{Q}{t} = \dot{Q} \quad (W)$$

• **Densité de flux de chaleur**

En général, le flux échangé à travers une surface n'est pas uniforme sur toute la surface. On définit alors une densité de flux de chaleur,  $\varphi$ , qui correspond à un flux de chaleur par unité de surface (en  $W/m^2$ ).

**Exemple** : flux de chaleur échangé par un système avec l'extérieur à travers une surface  $\Sigma$  :



$$\phi = \iint_{\Sigma} \varphi d\Sigma = \iint_{\Sigma} -\vec{\varphi} \cdot \vec{n} d\Sigma$$

$\vec{n}$  est la normale extérieure à l'élément de surface  $d\Sigma$ .

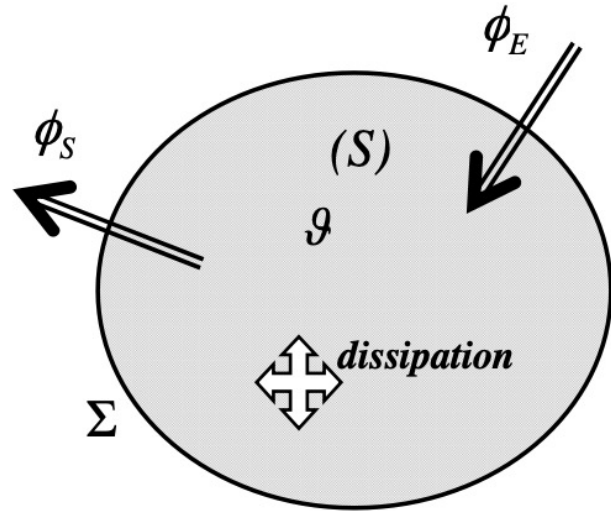
Le signe '-' est introduit pour respecter la convention suivante : on compte positivement le flux qui entre dans le système.

### III/ Formulation d'un problème de transfert de chaleur

But : déterminer quantitativement l'évolution de la température à l'intérieur du système dans l'espace et dans le temps. L'équation qui permet d'obtenir cette information s'appelle l'équation de l'énergie ou équation de la chaleur. Comment établir cette équation ?

On réalise un bilan d'énergie sur le système c'est-à-dire que l'on applique le premier principe de la thermodynamique.

- **Etape 1** : on définit un volume de contrôle ( $\mathcal{V}$ ) limité par une surface de contrôle  $\Sigma$  à travers laquelle de l'énergie et de la matière peuvent circuler.
- **Etape 2** : on fait l'inventaire des différents flux d'énergie mis en jeu qui influent sur l'état du système. Par exemple, si on s'intéresse aux flux de chaleur :



- **flux de chaleur entrant :**  $\phi_E$
- **flux de chaleur sortant :**  $\phi_S$
- **flux de chaleur dissipé (produit) dans le volume :**  $\phi_{PR}$

$\phi_{PR}$  a pour origine une autre forme d'énergie (chimique, électrique (effet Joule), nucléaire) qui est convertie en énergie thermique à l'intérieur du volume.

A l'issue de l'échange, le **flux de chaleur accumulé (stocké)** dans le volume va contribuer à la variation de l'énergie interne, qui se traduit par la variation de la température du volume.

**Etape 3 :** On fait le bilan d'énergie en appliquant le premier principe de la thermodynamique:

$$\text{Accumulation} = \text{Entrée} - \text{Sortie} + \text{Production}$$

- **Etape 3 :** on fait le bilan d'énergie en appliquant le premier principe de la thermodynamique :

$$\text{Accumulation} = \text{Entrée} - \text{Sortie} + \text{Production}$$

Si on suppose que le volume est incompressible (le travail des forces de pression est nul) et au repos, ce qui sera le cas dans toute la suite du cours, le premier principe s'écrit, pour une évolution entre les instants  $t$  et  $t + dt$  :  $dU = \delta Q = \delta Q_{ext} + \delta Q_{int}$ . Le terme  $\delta Q$  tient compte à la fois des échanges de chaleur avec l'extérieur,  $\delta Q_{ext}$  (lié à  $\phi_E - \phi_S$ ), et du dégagement de chaleur interne,  $\delta Q_{int}$ , issu de la conversion d'une autre forme d'énergie en chaleur (lié à  $\phi_{PR}$ ).

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\delta Q_{ext}}{dt} + \frac{\delta Q_{int}}{dt} = \phi_E - \phi_S + \phi_{PR}$$

- **Etape 4 :** on établit les expressions des différents flux

### a. Flux de chaleur échangé par conduction – loi de Fourier

Ce mécanisme de transfert est régi par une loi phénoménologique établie par Joseph Fourier en 1822, stipulant que la densité de flux échangée par conduction est proportionnelle au gradient de température (proportionnalité entre la cause (le gradient) et l'effet (le flux)). Cette loi, appelée **loi de Fourier**, s'écrit :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \vec{\nabla} T \text{ en } W/m^2$$

Le signe ‘-‘ intervenant dans cette loi traduit le fait que le flux de chaleur circule des zones chaudes vers les zones froides (dans le sens opposé au gradient de température).

Le coefficient de proportionnalité,  $\lambda$ , est la **conductivité thermique**, en  $W/m/K$ .

La conductivité thermique dépend de la nature du corps considéré et dépend généralement de la température. Elle traduit la capacité d'un matériau à transporter la chaleur par conduction.

Ainsi, pour un gradient de température donné, le flux de chaleur sera d'autant plus important que la conductivité sera grande. Pour les matériaux conducteurs de la chaleur,  $\lambda$  sera élevée et inversement sera faible pour les isolants. Exemples à la température ambiante :

$$\lambda_{\text{laine de verre}} = 0.04 \text{ W/m/K}$$

$$\lambda_{\text{air}} = 0.026 \text{ W/m/K (l'air immobile est un très bon isolant)}$$

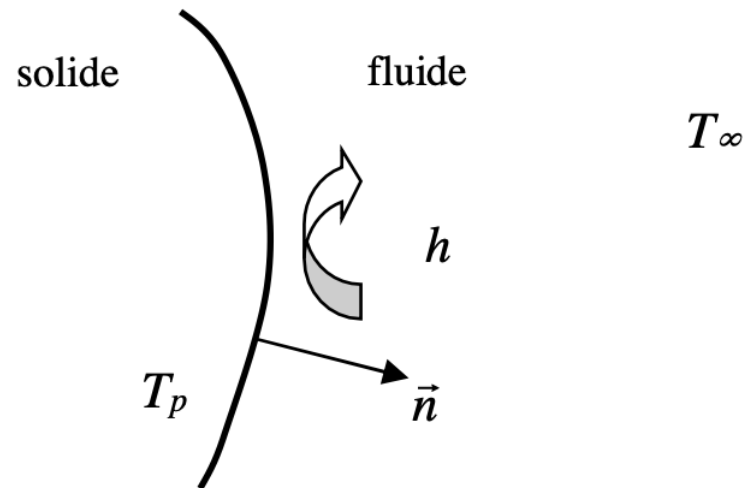
$$\lambda_{\text{verre}} = 1.2 \text{ W/m/K}$$

$$\lambda_{\text{cuivre}} = 390 \text{ W/m/K}$$

Par ailleurs, pour un flux de chaleur donné, le gradient de température sera d'autant plus faible que  $\lambda$  est grand. Pour des flux modérés, on pourra ainsi dans certains cas considérer que la distribution de température à l'intérieur d'un corps de grande conductivité thermique est quasi-uniforme.

## b. Flux de chaleur échangé par convection – loi de Newton

Ce mécanisme de transfert est régi par la **loi de Newton** qui stipule que la densité de flux de chaleur échangé entre une paroi solide et un fluide en écoulement est proportionnelle à l'écart de température qui lui a donné naissance.



- du point de vue du solide (flux entrant dans le fluide ou sortant du solide si  $T_p > T_\infty$ ):

$$\vec{\varphi} = h(T_p - T_\infty) \vec{n}$$

$h$  est une grandeur positive appelée **coefficient d'échange convectif**, en  $(W.m^{-2}.K^{-1})$ . Ce coefficient dépend de nombreux paramètres (fluide, type d'écoulement, état de surface...) et est donc extrêmement difficile à quantifier précisément.

### c. Flux de chaleur échangé par rayonnement – loi de Stefan

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps à des températures différentes séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Ce mécanisme de transfert est régi par la **loi de Stefan**.

Ex : corps de petite dimension placé dans une enceinte fermée

$T_p$

●

$T_C$

$$\varphi = \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_C^4)$$

$\varepsilon$  : émissivité du corps ( $0 < \varepsilon \leq 1$ )

$\sigma$  : constante de Stefan =  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ .