



# Phénomènes de Transfert

Phénomènes de transfert de chaleur et de masse

[Prof. H.Hofmann](#) LTP, IMX, EPFL

[Matériaux](#) 4<sup>ième</sup> semestre

**Prof. H. HOFMANN**

**Laboratoire de Technologie des Poudres  
EPFL / IMX**

## **PHENOMENES DE TRANSFERT**

### **I. TRANSFERT DE CHALEUR**

#### **1. INTRODUCTION**

##### **1.1. Généralités**

Les multiples procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur, soit parce que c'est le but recherché (fours, coulée, échangeurs, thermoformage, induction, lits fluidisés, trempe, refroidissement), soit parce que ceux-ci interviennent d'une manière inévitable (chocs thermiques, pertes de chaleurs, rayonnement). Des connaissances de base en ce domaine sont donc nécessaires à l'ingénieur de production ou de développement pour

- comprendre les phénomènes physiques qu'il observe;
- maîtriser les procédés et donc la qualité des produits.

Le deuxième principe de la thermodynamique admet que la chaleur (ou énergie thermique) ne peut passer que d'un corps chaud vers un corps froid, c'est-à-dire d'un corps à température donnée vers un autre à température plus basse. Le cours "Phénomènes de Transfert I" a pour objet d'étudier la manière dont s'effectue cet échange. Le transfert de chaleur se produit suivant deux modes semblables:

- soit par contact: c'est la conduction thermique;
- soit à distance: c'est le rayonnement thermique.

On considère un troisième mode de transfert d'énergie calorifique qui est la convection. (échange de chaleur entre un fluide et un solide). Dans ce cas le phénomène thermique est compliqué par des déplacements de matière et au transfert de chaleur se superpose le transfert de masse.

La thermodynamique établit les conditions de cette transmission de chaleur et détermine les conséquences qui en résultent, mais elle ne se préoccupe pas de la vitesse de cette transmission. En thermodynamique classique, les transformations réversibles supposent essentiellement le voisinage de l'équilibre et par conséquent, les échanges ne peuvent s'effectuer qu'entre corps à températures très voisines. Dans la pratique, ces

transferts de chaleur s'effectuent entre corps dont les différences de températures sont finies et la vitesse avec laquelle ils s'effectuent, jouent un rôle important.

## 1.2. Définitions

### La chaleur:

Pour le cours "Phénomènes de transfert" nous disons simplement que c'est une forme de l'énergie. Disons aussi que, lorsqu'on introduit une quantité de chaleur dans un corps, la température de ce dernier augmente. Dans le cas d'un changement de phase, une partie de cette chaleur est utilisée pour satisfaire les besoins thermiques liés à ce phénomène (fusion, évaporation, etc...).

### La température:

C'est la manifestation mesurable de la chaleur stockée. On dit aussi que la température est liée à la moyenne d'énergie cinétique due au mouvement des atomes et molécules du corps par la relation:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T \quad (1.1)$$

### La conservation de la chaleur:

Une fois que l'énergie a été transformée en chaleur, cette dernière se "conserve" lors des différents transferts qu'elle subit.

$$Q + \Delta Q = Q' \quad (1.1b)$$

### La chaleur spécifique:

La relation fondamentale

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1.2)$$

exprime que, si un corps de masse  $m$  stocke  $\Delta Q$  joules, sa température s'élèvera de  $\Delta T$ .  $C_p$ , la chaleur spécifique (en  $J/(kg \cdot K)$ ) est une propriété physique des matériaux et elle dépend généralement de la température. Elle caractérise sa capacité à emmagasiner de la chaleur. La chaleur spécifique d'une substance est fonction de sa structure moléculaire et de sa phase.

### L'enthalpie:

On appelle "enthalpie" la quantité d'énergie contenue dans l'unité de masse d'un corps porté d'une température de référence  $T_0$  à la température  $T$ . Elle contient d'éventuelles chaleurs de transformation survenues dans l'intervalle  $T_0 - T$ . [ $H(T_0) = 0$  ;  $T_0 = 0^\circ C$  ou  $20^\circ C$  selon les tables]:

$$\Delta H = \Delta Q/m [J/kg] \quad (1.3)$$

La chaleur latente de changement d'état:

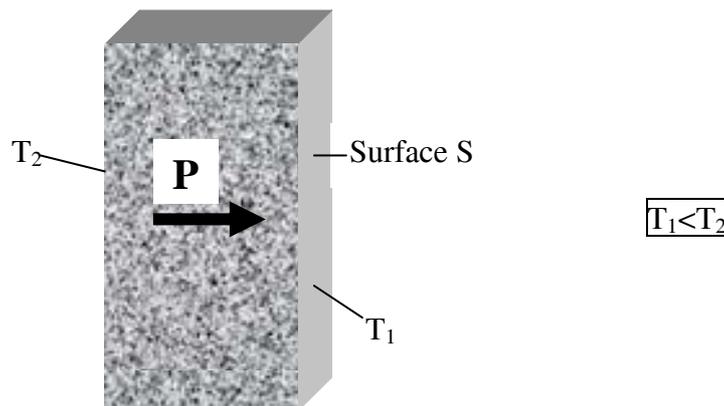
La chaleur latente spécifique d'une substance est la quantité de chaleur nécessaire pour entraîner le changement de phase d'une unité de masse de la substance. L'unité SI de la chaleur latente spécifique est le J/kg. La chaleur latente de fusion est la quantité d'énergie thermique dégagée par 1 kg de substance solide (p. ex. quand elle fond) sans qu'il y ait de changement de température. La chaleur latente de vaporisation est la quantité d'énergie thermique nécessaire pour transformer à l'état de vapeur 1 kg d'une substance sans qu'il y ait changement de température.

Flux de chaleur:

Le flux est un débit de chaleur:

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [\text{J/s ; W}] \quad (1.4)$$

Les transferts de chaleur sont mesurés par des flux.

Les transferts de chaleur:

**Figure 1.1:** Les transferts de chaleur

Lorsque deux points dans l'espace sont à des températures différentes ( $T_2 > T_1$ ), il y a systématiquement transfert de chaleur de  $T_2$  vers  $T_1$  (c'est le deuxième principe de la thermodynamique).

$$dS = dS_1 + dS_2$$

$$dS = \frac{dQ}{T_1} + \frac{-dQ}{T_2} = dQ \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

$$dS = dQ \left( \frac{T_2}{T_1 T_2} - \frac{T_1}{T_1 T_2} \right) = dQ \frac{(T_2 - T_1)}{T_1 T_2}$$

$$dS \geq 0 \Rightarrow T_2 > T_1$$

$T_1$	$T_2$
$P$	
←	

Le flux est proportionnel à  $\Delta T$  et à la section de passage.

$$\boxed{P = h S (T_1 - T_2) \text{ [W]}} \quad (1.5)$$

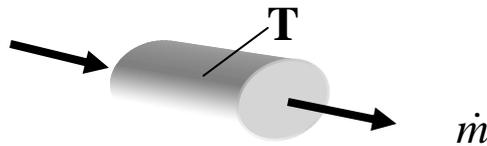
$h$  s'interprète comme un coefficient d'échange de chaleur. On doit souligner ici que la relation dans le chapitre intitulé "Définitions et unités" n'est valable qu'au premier ordre, car  $h$  est, le plus souvent, une fonction de la température et du matériau. D'une manière conventionnelle, on donnera une valeur positive au sens du flux qui va de  $T_1$  vers  $T_2$  lorsque  $T_1 > T_2$ .

Pour le transfert de chaleur, on utilise très souvent la densité de flux, définie par

$$\boxed{q = \frac{P}{S}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1.6)$$

On peut aussi parler de transport de chaleur lors du déplacement d'un fluide chaud. Un débit massique  $\dot{m}$  (kg / s) d'un fluide à la température  $T$  correspond à un débit de chaleur, et donc à un flux:

$$P = \dot{m} C_p T \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \text{K} \right] = \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = [\text{W}] \quad (1.7)$$



**Figure 1.2: Transfert de chaleur par un fluide**

Les modes de transfert de chaleur:

Il s'agit d'étudier  $h$  dans les cas distincts suivants:

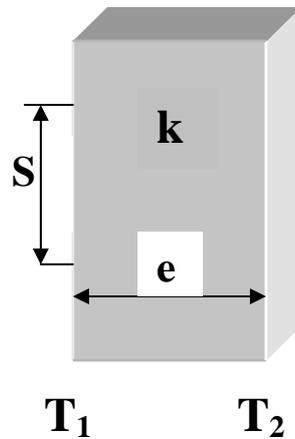
**La conduction:**

Echange de chaleur entre deux points d'un solide, ou encore d'un liquide (ou d'un gaz) immobile et opaque. En régime stationnaire:

$$\boxed{P = \frac{k}{e} S \Delta T} \quad \boxed{h \cong k / e} \quad (1.8)$$

$k$  est la conductivité du matériau: c'est une fonction de  $T$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , de la direction etc..., mais souvent on admettra que  $k$  est une constante.  $k$  en  $\left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$

$e$  est la distance (en mètre) entre les points considérés.



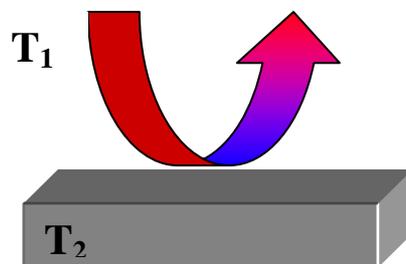
*Figure 1.3 Conduction*

**La convection:**

Echange de chaleur entre une paroi et un fluide avec transport de la chaleur par le fluide en mouvement.

$$P = h \cdot S (T_1 - T_2) \quad (1.9)$$

$h = f(\text{nature du fluide}, T_1, T_2) = \text{coefficient d'échange par convection}$



*Figure 1.4: Convection*

**Le rayonnement:**

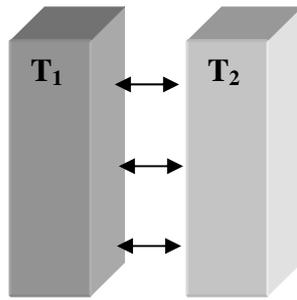
Echange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent.

$$P = \varepsilon_{12} k_B S (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.10)$$

$\varepsilon_{12} =$  facteur d'émission équivalente de l'ensemble paroi 1 - paroi 2

$k_B =$  constante de Boltzmann

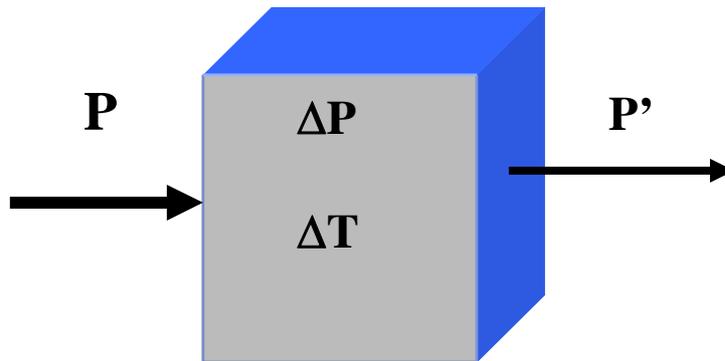
**Pour les équations du rayonnement, T s'exprime en Kelvin !!!**



*Figure 1.5: Rayonnement*

Evolution thermique liée à un flux de chaleur:

Une quantité de chaleur  $\Delta Q$  stockée dans un corps entraîne une variation  $\Delta T$  de la température. Une autre situation se présente lorsqu'un débit de chaleur (flux) s'accumule dans un système (S). On distingue le cas où S contient une masse et celui où S est traversé par un fluide.

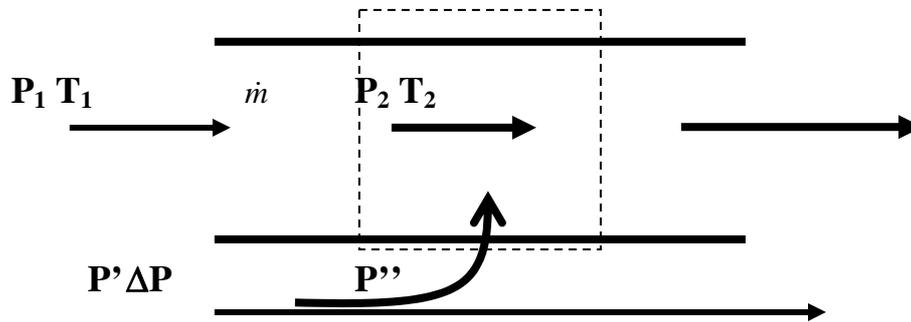


*Figure 1.6: Flux accumulé dans une masse*

$$\Delta P = \frac{dQ}{dt} = m C_p \frac{dT}{dt} \quad (1.11)$$

La relation (1.11) décrit un **régime transitoire**: élévation, au fil du temps, de la température d'une masse  $m$  accumulant un flux de chaleur  $\Delta P$ .

**Problème du tuyau parcouru par un débit  $\dot{m}$  et qui échange de la chaleur avec le milieu environnant**



**Figure 1.7: Flux accumulé dans un débit massique  $\dot{m}$ .**

En **régime permanent** (c'est-à-dire températures invariantes dans le temps), le bilan énergétique s'écrit:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad \text{avec } P_i = \dot{m} C_p T_i$$

si  $T_2 > T_1$ ,  $\Delta P$  est responsable de l'évéléation de température de la masse de  $T_1$  à  $T_2$ :

$$\Delta P = \dot{m} C_p (T_2 - T_1) \quad [\text{W}] \quad (1.12)$$

Notez que  $\Delta P$  est apporté par un autre fluide. D'autre part,  $\Delta P$  peut contenir des termes "source" internes à un système:

- Une chaleur latente de changement de phase
- Un effet Joule
- Une chaleur de réaction chimique, etc....