

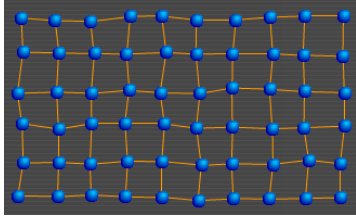
# P9 – Transferts thermiques

## Problèmes stationnaires de conduction

### I. L'énergie thermique (la chaleur)

#### 1. Origine microscopique de l'énergie thermique

Le monde microscopique est en agitation perpétuelle.



Même les atomes et molécules des solides sont en mouvement.

Que représente la température? C'est l'énergie moyenne du milieu que les particules microscopiques peuvent « utiliser » :

$$\bar{E} \sim kT$$

#### Température

- Température absolue en Kelvin,  $T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$ .
- Il n'y a pas de températures négatives (pas d'énergie négative), le zéro ne peut être atteint.
- La température la plus basse atteinte :  $T_{min} \sim 10^{-9} K$
- On peut mesurer la température à travers de nombreuses grandeurs : dilatation, tension électrique, résistance électrique, lumière...

Ex. 5 p. 374 : ordre de grandeur du nombre de particules

#### 2. Énergie interne

L'énergie interne  $U$  est l'énergie « totale » des particules microscopiques : leur énergie cinétique  $E_c$  due à leur mouvement, et leurs énergie potentielles  $E_{p_j,i}$  due aux interactions entre particules, avec un champ extérieur...

$$U = \sum_{j,part.i} E_{c_i} + E_{p_{j,i}}$$

On ne peut mesurer l'énergie de chaque particule et donc  $U$ , mais on peut mesurer l'énergie échangée par un système de particules.

La conservation de l'énergie impose :

$$\Delta U = W + Q \quad \left| \begin{array}{l} W : \text{travail échangé avec l'extérieur en J} \\ Q : \text{chaleur échangée avec l'extérieur en J} \end{array} \right.$$

Si le système échange uniquement de la chaleur (cf. Transferts thermiques, 1S) :

$$\Delta U = Q = m c \Delta T \quad \left| \begin{array}{l} m : \text{masse en kg} \\ c : \text{capacité thermique massique en } J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1} \\ \Delta T : \text{variation de température en K (ou } ^{\circ}C) \end{array} \right.$$

### 3. Rappel : puissance et énergie

L'énergie est liée à la puissance par la relation :

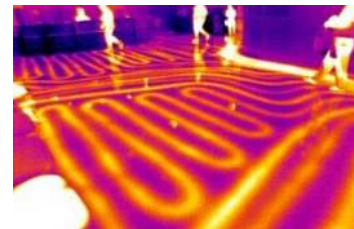
$$E = P \Delta t \quad \left| \begin{array}{l} E : \text{énergie en J} \\ P : \text{puissance en W} \\ \Delta t : \text{durée en s} \end{array} \right.$$

## II. Types de transfert

### 1. Rayonnement

Tout corps rayonne (cf. le rayonnement du corps noir, Lumière et matière, 1S)

L'intensité et la fréquence du maximum d'émission augmente avec la température (cf. loi de Wien, Lumière et matière, 1S)

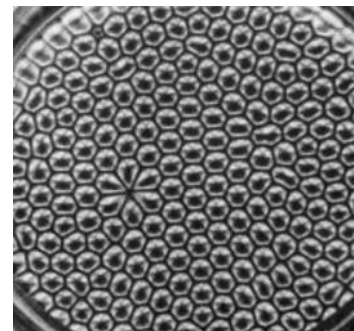


Imagerie IR de la circulation d'eau dans un sol chauffant.

#### Remarques

- L'efficacité du transfert par rayonnement dépend de la température ( $\phi \propto T^4$ ).
- Le rayonnement optique et IR peut être réfléchi par une couche métallique (couverture de survie...).

### 2. Convection



Cellules de Rayleigh-Bénard dans un liquide chauffé par en dessous

La convection est le transport de chaleur associé au transport de matière.

#### Remarques

- Possible uniquement dans les fluides (gaz, liquides).
- Très efficace.
- La convection peut être forcée : vent sur le corps humain, ventilation d'un radiateur de processeur, circulation d'eau dans le moteur d'une voiture...

### 3. Conduction



Transport de la chaleur par conduction/diffusion dans une règle métallique

► Simulation refroidissement plan    ► Conduction thermique des métaux

Ex. 7 p. 375 : échanges dans un morceau de cuivre

La conduction est la propagation de la chaleur dans le matériau, par diffusion de l'agitation thermique.

#### Remarques

- Peu efficace, évolution lente de  $T$ .
- Seul moyen de transport dans les solides.
- Plus efficace dans les solides, en particulier dans les métaux.

## III. Transfert par conduction

### 1. Flux et résistance thermique

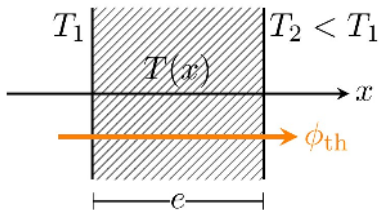
#### Principe

Quelque soit le type de transfert, le flux de chaleur va toujours spontanément du corps chaud vers le corps froid. C'est un processus irréversible.

Le flux thermique est la puissance échangée par un corps sous forme de chaleur :

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad \left| \begin{array}{l} \phi : \text{flux thermique en W} \\ Q : \text{énergie thermique en J} \\ \Delta t : \text{durée en s} \end{array} \right.$$

Dans certaines configurations simples (mur, cylindre, sphère...) et stationnaires on peut donner l'expression du flux thermique.



Flux thermique à travers un mur

Dans le cas d'un mur (ou d'une surface plane) le flux thermique est proportionnel à l'écart de température :

$$\phi = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} \quad \left| \begin{array}{l} \Delta T : \text{écart de température en K (ou } ^\circ\text{C)} \\ R_{th} : \text{résistance thermique en K} \cdot \text{W}^{-1} \end{array} \right.$$

La résistance thermique s'oppose au transport de chaleur.

#### Association de plusieurs conducteurs thermiques

- Surface conductrice composée de plusieurs matériaux de résistances thermiques  $R_1, R_2, \dots, R_n$  superposés les uns par dessus les autres.
- La résistance thermique totale  $R_T$  de l'ensemble des couches est la somme des résistances thermiques :

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

#### Remarque

On peut faire un parallèle avec des conducteurs ohmiques associés en série dans un circuit électrique.

### 2. Conductivité thermique

La résistance thermique dépend des caractéristiques du matériau traversé, en particulier de sa conductivité thermique.

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} \quad \left| \begin{array}{l} R_{th} : \text{résistance thermique en K} \cdot \text{W}^{-1} \\ e : \text{épaisseur du mur en m} \\ \lambda : \text{conductivité thermique en W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \\ S : \text{surface du mur en m}^2 \end{array} \right.$$

En tenant compte de l'expression précédente :

$$\phi = \frac{\lambda S}{e} \Delta T$$

Contrairement à la résistance thermique qui s'oppose au transport de chaleur, la conductivité thermique d'un matériaux représente sa propension à transporter la chaleur.

Ex. 8 p. 375 : flux à travers un vitrage et un mur en béton

Quelques conductivités thermiques caractéristiques :

Matériau	Argon	Air	Laine	Bois	Eau	Verre	Fer	Cuivre
Conductivité ( $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) à 20 °C	0,018	0,026	0,04	0,15	0,6	1,2	80	390

#### Remarques

- Les métaux sont de bons conducteurs électriques et thermiques.
- Les gaz sont de bons isolants thermiques tant qu'il n'y a pas de convection.
- Le vide est le meilleur isolant pour la conduction et la convection qui nécessitent un milieu matériel, mais pas pour le rayonnement.