

Introduction aux transferts thermiques

Les différents mécanismes de transfert thermique. Combinaison des trois modes de transfert. Conservation de l'énergie.

Objectifs

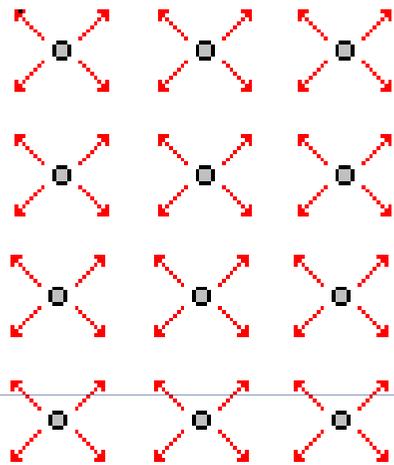
➤ Identifier les modes de transfert thermique

- **Conduction thermique** : l'énergie se propage au sein d'un même corps ou passe d'un corps à un autre sous l'influence d'un gradient de température. Bien qu'il n'y ait pas de transfert de matière, il s'agit d'un phénomène de **diffusion**.
- **Convection** : les différences de températures au sein d'un fluide engendrent des différences de masse volumique. Ainsi les particules se mettent naturellement en mouvement, les particules plus légères remontant etc. Ce déplacement de matière induit un déplacement de la chaleur.
- **Rayonnement** : tous les corps émettent un rayonnement électromagnétique, on parle de rayonnement thermique.

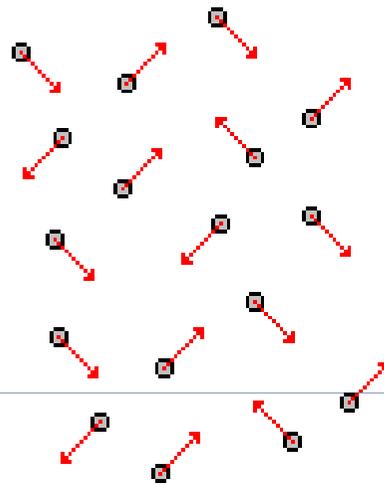
➤ Connaître les mécanismes de transfert

➤ Savoir faire un bilan énergétique

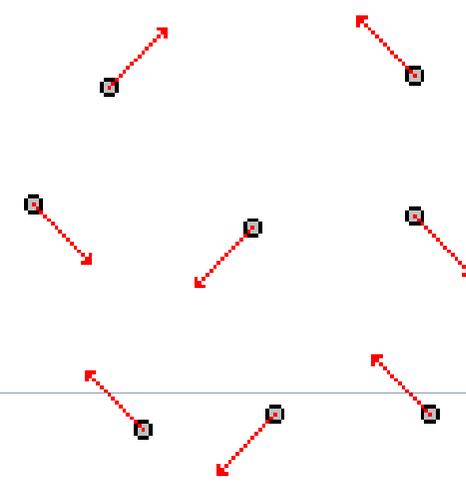
Objectifs



Solide cristallin



Liquide



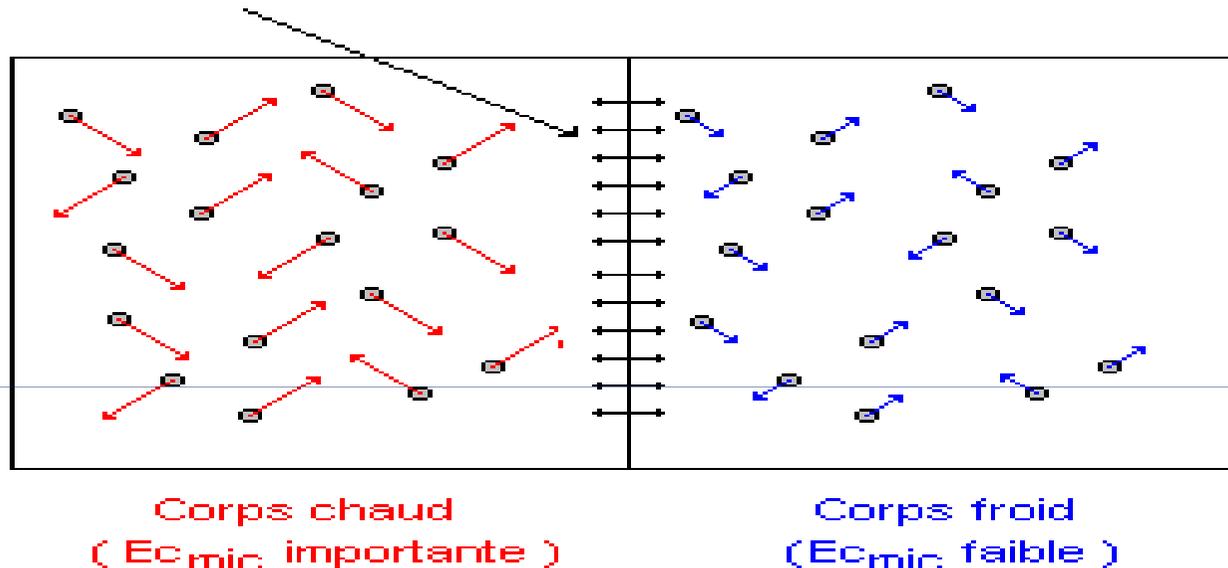
Gaz

La température est due à l'agitation thermique, c'est à dire à l'énergie cinétique microscopique des particules qui constituent le système.

- Remarque: Si la température T augmente, alors $E_{c_{mic}}$ augmente et l'énergie interne U augmente.

Objectifs

Propagation de l'énergie du corps chaud vers le corps froid



- La propagation de l'énergie au niveau de la zone de contact provoque l'augmentation de l'énergie cinétique microscopique des particules du corps froid. On dit qu'il y a transfert d'énergie par "chaleur". La température du corps chaud diminue et la température du corps froid augmente. Lorsque $T_{\text{corps chaud}} = T_{\text{corps froid}}$, les deux objets sont à l'équilibre thermique.
- Remarque: Le transfert d'énergie par chaleur s'effectue toujours du corps chaud vers le corps froid.

L'énergie

- L'énergie est la capacité d'un système à produire un **travail**, entraînant un mouvement ou produisant par exemple de la **lumière**, de la **chaleur** ou de l'**électricité**.
- C'est une grandeur physique qui caractérise l'état d'un système et qui est d'une manière globale conservée au cours des transformations.
- L'énergie s'exprime en **joules** (dans le **système international d'unités**) ou souvent en (**kW-h** ou **kWh**).
- Les principales ressources énergétiques sont les **énergies fossiles** (le **gaz naturel**, le **charbon**, le **pétrole**), l'**énergie hydroélectrique**, l'**énergie éolienne**, l'**énergie nucléaire**, l'**énergie solaire**, l'**énergie géothermique**.

L'énergie

- La **foudre** illustre généralement l'énergie à l'état naturel. Paradoxalement elle en contient assez peu. Sa violence vient surtout de la rapidité et de l'extrême localisation du phénomène.
- Les activités économiques telles que les productions industrielles, le transport, le chauffage des bâtiments, l'utilisation d'appareils électriques divers, sont consommatrices de beaucoup d'énergie; **l'efficacité énergétique**, la dépendance énergétique, la sécurité énergétique et le prix de l'énergie y sont des préoccupations majeures.
- Une sensibilisation accrue aux effets du réchauffement climatique a conduit ces dernières années à un débat mondial sur la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre et à des actions pour leur réduction. Cela conduit à envisager des transformations des modes de consommation énergétique (transition énergétique), pas seulement en raison des contraintes liées à l'épuisement de l'offre, mais aussi à cause des problèmes posés par les déchets, l'extraction des énergies fossiles.

La chaleur

- La chaleur peut désigner : un **transfert thermique** en **thermodynamique**. Cette dernière notion est également reliée à :
 - L'**énergie interne** dont la chaleur est une des formes d'échange : (peut être décomposée en deux parties:
 - ❖ Une **énergie cinétique** correspondant au mouvement du système dans son ensemble ainsi qu'aux mouvements des particules qui le constituent.
 - ❖ Une **énergie potentielle** due aux interactions du système avec le milieu extérieur par l'intermédiaire de champs, gravitationnel, électriques ou magnétiques mais aussi due aux interactions entre les molécules, ions, atomes, électrons, noyaux

La chaleur

- la **chaleur latente**, mise en jeu dans les changements d'état,
- la **capacité thermique**, ou capacité calorifique (la possibilité qu'a un corps d'absorber ou restituer de l'énergie par **échange thermique** au cours d'une transformation pendant laquelle sa **température** varie).
- L'**équation de la chaleur** (est une **équation aux dérivées partielles** parabolique, introduite initialement en 1811 par **Fourier** pour décrire le phénomène physique de **conduction thermique**).
- D'une manière générale par rapport à la notion de chaleur telle qu'elle est définie en physique : **une température élevée**.

Introduction

- La **thermodynamique** permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.
- La **thermique** (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.
- **Définition du Transfert thermique**
- Un transfert thermique, est un transfert d'**énergie microscopique désordonnée**. Cela correspond en réalité à un transfert d'**énergie thermique** entre particules; est un *mouvement* (déplacement) de l'énergie thermique d'un *système* à un autre à cause d'une *différence de température*.

Le transfert de chaleur

- Le transfert de chaleur est un *mouvement* (déplacement) de l'énergie thermique d'un *système* à un autre à cause d'une *différence de température*.

Flux de chaleur

- La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface est appelée densité de flux de chaleur :

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt}$$

- Où S est l'aire de la surface (m²).
- On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps.

Bilan d'énergie

- Définir un système (S) par ses limites dans l'espace;
- Etablir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être :

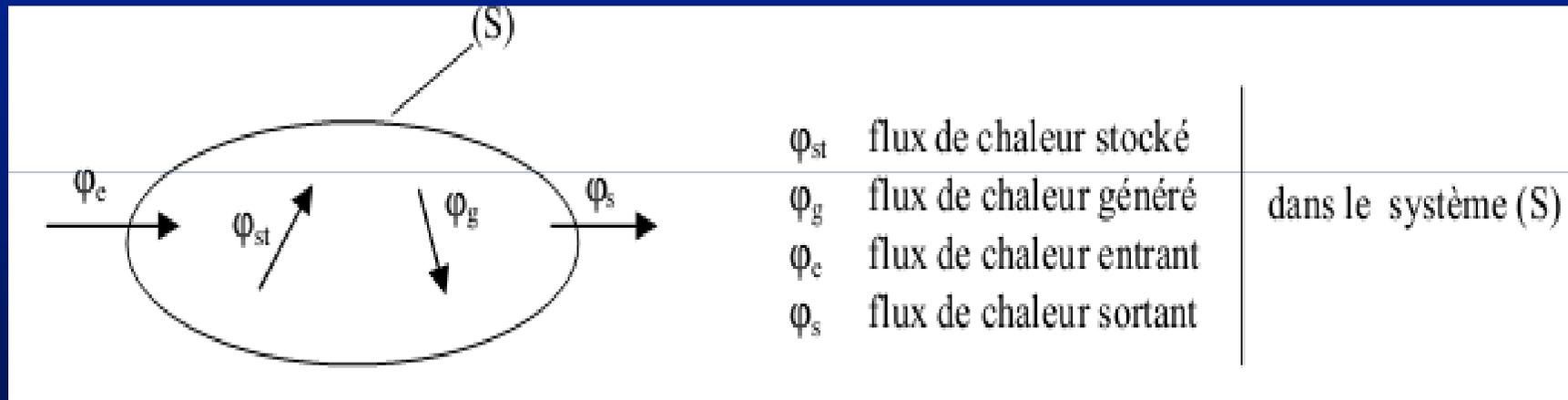
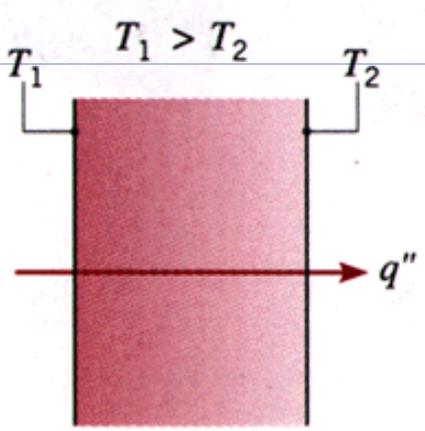
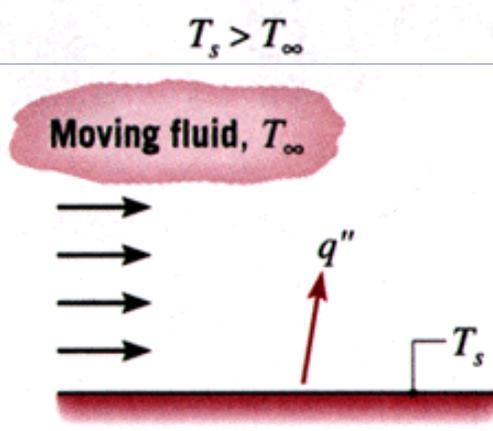
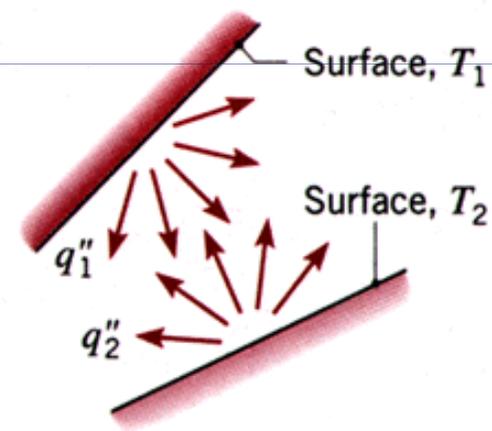


Figure 1.2 : Système et bilan énergétique

- On applique alors le 1^{er} principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st}$$

Modes de transfert thermique

Conduction through a solid or a stationary fluid	Convection from a surface to a moving fluid	Net radiation heat exchange between two surfaces
 <p>T_1 $T_1 > T_2$ T_2</p> <p>q''</p>	 <p>$T_s > T_\infty$</p> <p>Moving fluid, T_∞</p> <p>q''</p> <p>T_s</p>	 <p>Surface, T_1</p> <p>Surface, T_2</p> <p>q_1''</p> <p>q_2''</p>

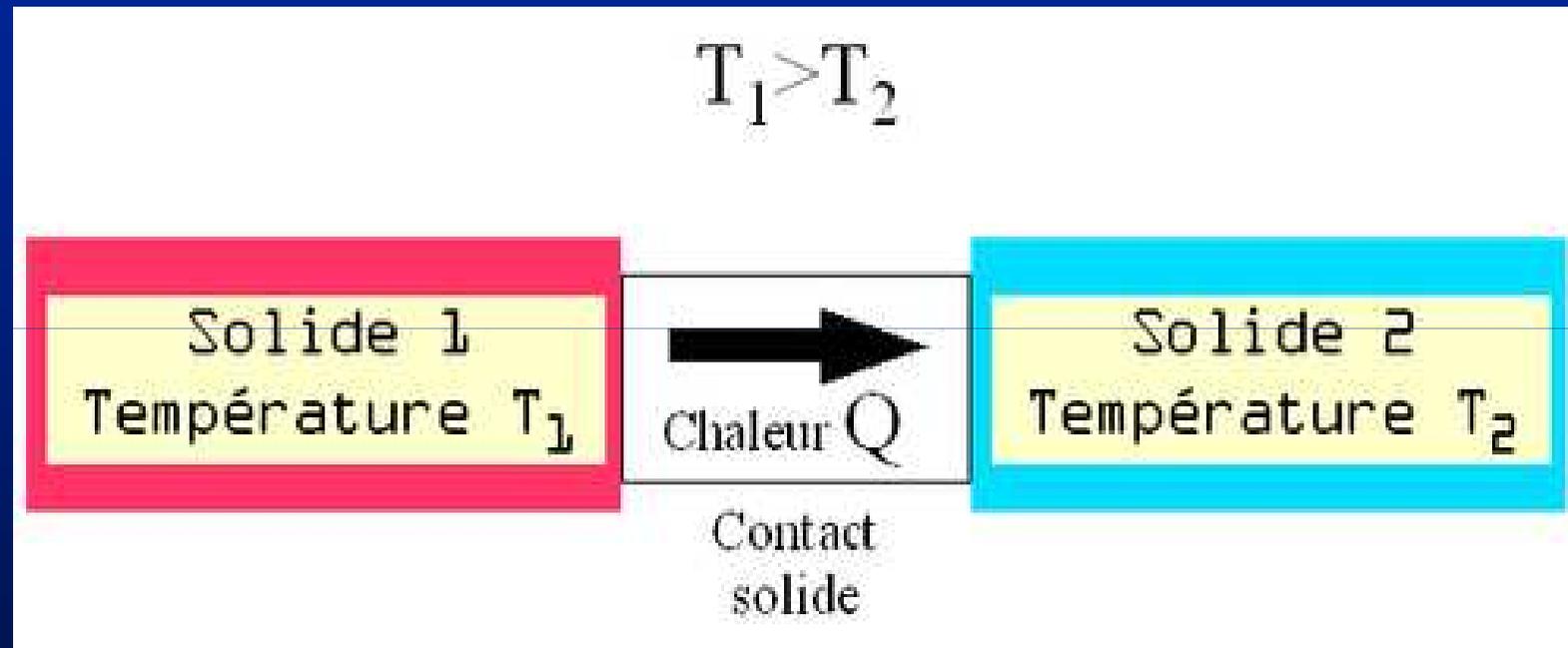
Modes de transfert thermique

- Il existe trois modes de transfert thermique:
- **Conduction thermique** : l'énergie se propage au sein d'un même corps ou passe d'un corps à un autre sous l'influence d'un gradient de température. Bien qu'il n'y ait pas de transfert de matière, il s'agit d'un phénomène de **diffusion**.
- **Convection** : les différences de températures au sein d'un fluide engendrent des différences de masse volumique. Ainsi les particules se mettent naturellement en mouvement, les particules plus légères remontant etc. Ce déplacement de matière induit un déplacement de la chaleur.
- **Rayonnement** : tous les corps émettent un rayonnement électromagnétique, on parle de rayonnement thermique.

Conduction

- **Connaissez-vous des applications industrielles ou des phénomènes faisant intervenir le transfert de chaleur par conduction?**
- **Où, quand et comment la chaleur se propage-t-elle par conduction?**
 - la chaleur se propage dans les matériaux opaques et *solides ou fluides*, jamais dans le vide
 - la chaleur se propage *continuellement*, sans interruption sauf lorsque toutes les parties d'un corps se trouvent à la même température
 - le transfert de chaleur naturel s'effectue de T_{chaud} vers T_{froid}

Conduction



Représentation schématique du transfert thermique par conduction

Conduction

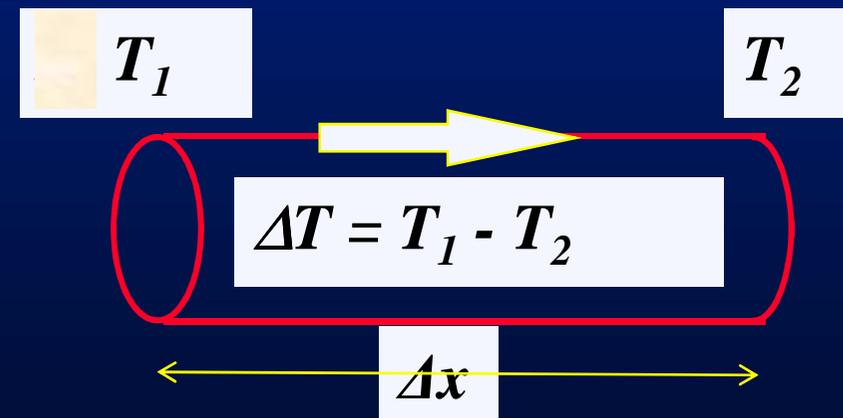
- **Comment qualifier et quantifier le transfert thermique?**
 - le taux de transfert de chaleur par *conduction* dans les solides (fluides au repos) est proportionnel au *gradient* de T multiplié par la *surface* à travers laquelle se produit le transfert
 - le taux de transfert dépend de la conductivité thermique, k , une propriété physique du matériau considéré.
 - k ($\text{J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}$), soit des ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). La densité de flux de chaleur s'exprime en (W.m^{-2}). La température T , en K.
 - loi de Fourier

$$q_d'' = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

Loi de Fourier

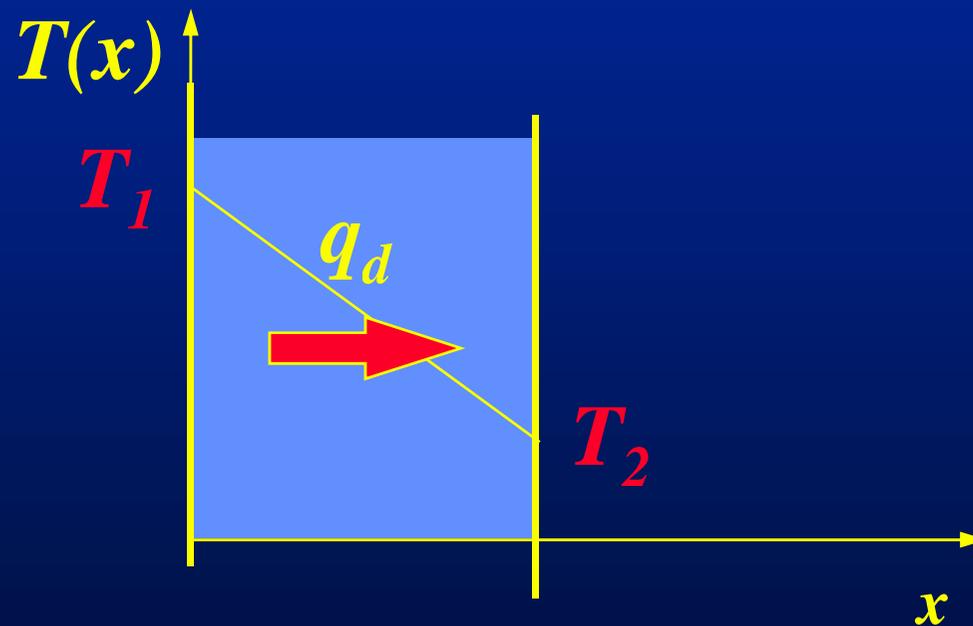
- **La relation permettant de décrire le transfert par conduction est :**
 - la loi de Fourier pour la diffusion de l'énergie thermique
 - Il s'agit d'un loi basée sur une expérience évidente simple et non sur une dérivation à partir de principes de conservation de l'énergie:

$$q_d = kS \frac{\Delta T}{\Delta x}$$



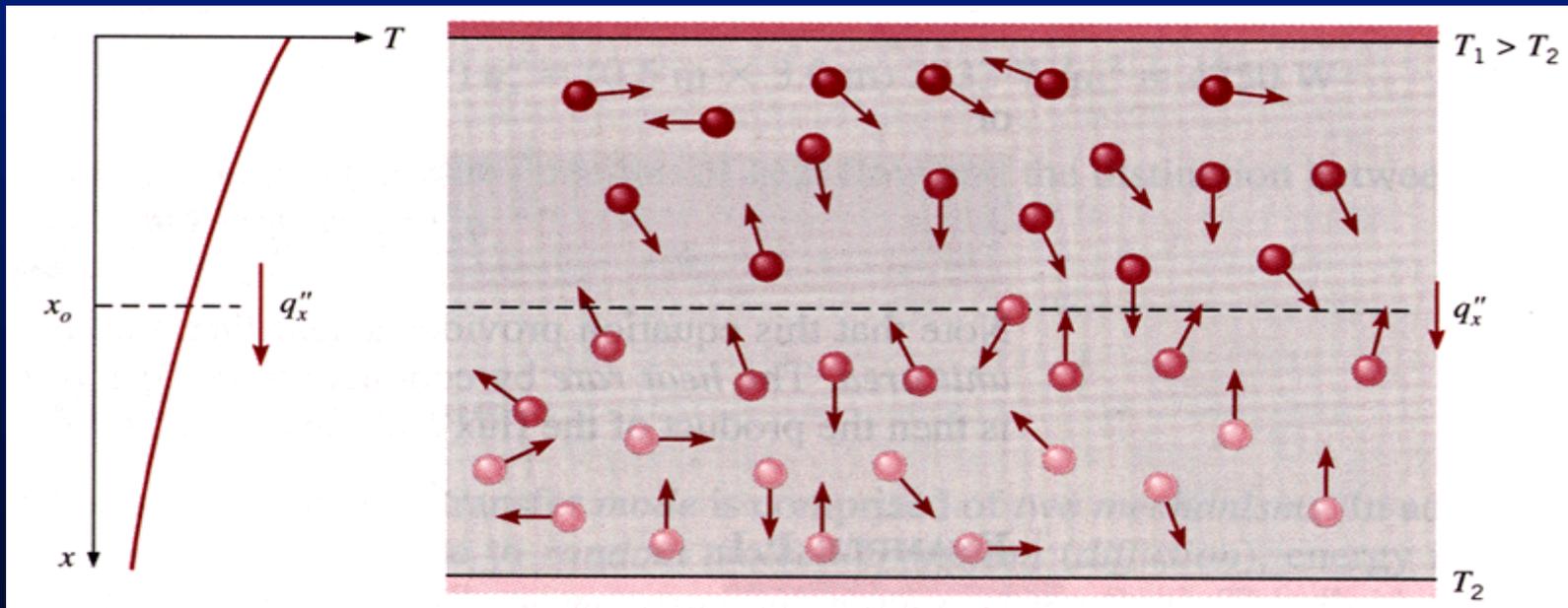
Loi de Fourier

- Le signe négatif provient de la pente du gradient



Conduction

- activité moléculaire quel que soit le milieu
- solides: **vibration** des structures inter-atomiques et **transfert d'électrons** libres dans les conducteurs. Vibrations seules dans les isolants.
- fluides: échanges de quantité de mouvement par **collisions** entre molécules



Schématisation de la conduction dans un fluide au repos

Loi de Fourier

- **La conductivité thermique est définie par la loi de Fourier:**
 - Flux de chaleur qui traverse une surface unitaire en présence d'un gradient unitaire.
 - Différent pour chaque matériau.
 - Dépend de la pression pour les fluides.
 - Constante de proportionnalité qui permet d'écrire une expression du taux de transfert en fonction de la surface d'échange et du gradient thermique.

La résistance thermique:

$$R_{\text{Thermique}} = \frac{T_1 - T_2}{q}, \quad R_{\text{Thermique}} = \frac{e}{k \cdot S}$$

Propriétés thermiques

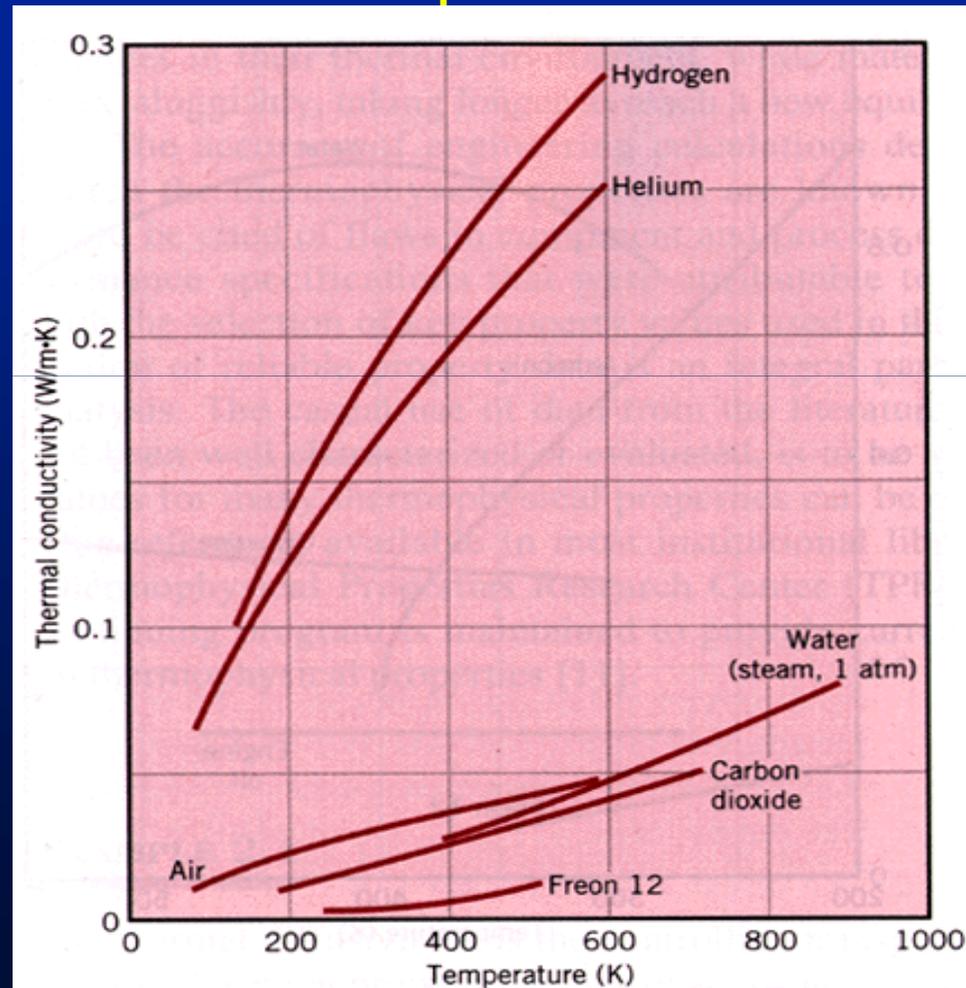
- **Conductivité thermique ou conductibilité**
 - propriété dite *thermophysique*
 - indication de l'habilité d'un matériau à transporter (transférer) de la chaleur par un processus de diffusion appelé conduction thermique.
 - dépend de la structure atomique, de la composition et de l'état d'un matériau
 - métaux et solides meilleurs que les liquides qui sont eux mêmes meilleurs que les gaz.

Bilan d'énergie

- Un bilan d'énergie, et l'expression de la loi de Fourier conduit à l'équation générale de conduction de la chaleur dans un corps homogène : $k\Delta T + P = \rho c dT/dt$
- où :
- k est la conductivité thermique du matériau en $W.m^{-1}.K^{-1}$.
- T désigne la température,
- P est l'énergie produite au sein même du matériau en $W.m^{-3}$. Elle est souvent nulle (cas des dépôts de chaleur en surface de murs, par exemple), mais l'on peut citer de nombreux cas où elle ne l'est pas; citons parmi d'autres l'étude du transfert thermique par conduction au sein du combustible nucléaire, ou l'absorption de la lumière ou des micro-ondes au sein des matériaux semi-transparents....,
- ρ est la **masse volumique** du matériau en $kg.m^{-3}$,
- et c est la **chaleur spécifique** massique du matériau en $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

Propriétés thermiques

- Conduction thermique



Conductivité thermique en fonction de T

Exemple d'application:

Calculer le flux traversant une vitre de 1 m^2 de surface et de $3,5 \text{ mm}$ d'épaisseur. La température de la face interne de la vitre est égale à 10°C , celle de la face externe est égale à 5°C .

- 1- en déduire la résistance thermique de la vitre, sachant que, la conductivité thermique du verre est: $k_v = 0,7 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$
- 2- Pour les mêmes températures de paroi, calculer le flux traversant un m^2 de mur de briques de 26 cm d'épaisseur.
- 3- En déduire la résistance thermique, sachant que, la conductivité thermique des briques est: $k_b = 0,52 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$

Solution:

- Flux traversant 1m² de vitre :

$$\phi_{\text{verre}} = \frac{\lambda \cdot S \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{e} = \frac{0,7 \cdot 1 \cdot (5 - 0)}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 1000 \text{ W}$$

$$R_v = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,7} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

- Résistance thermique d'1m² de vitre :

$$R_{\text{verre}} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\phi} = \frac{10 - 5}{1000} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C.W}^{-1} \quad \text{ou} \quad R = \frac{e}{\lambda \cdot S} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 1} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C.W}^{-1}$$

- Flux traversant 1m² de mur de briques :

$$\phi_{\text{briques}} = \frac{\lambda \cdot S \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{e} = \frac{0,52 \cdot 1 \cdot (10 - 5)}{0,26} = 10 \text{ W}$$

- Résistance thermique d'1m² de mur de briques :

$$R_{\text{briques}} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\phi} = \frac{10 - 5}{10} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C.W}^{-1} \quad \text{ou} \quad R = \frac{e}{\lambda \cdot S} = \frac{0,26}{0,52 \cdot 1} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C.W}^{-1}$$

Analyse des résultats : Pour une même surface et un même écart de température, le flux perdu par la vitre est 100 fois plus élevé que celui perdu par le mur de briques dont la conductivité est plus faible et dont l'épaisseur est beaucoup plus élevée que celle de la vitre.

Exemple d'application 2 :

Calculer le flux traversant la façade de 50 m² d'une maison. Le mur est constitué de briques de 26 cm d'épaisseur. La façade est percée de 4 vitres de 2 m² de surface et 3,5 mm d'épaisseur et d'une porte en bois de 2m² et de 42 mm d'épaisseur.

On suppose que la température de paroi interne est égale à 10°C pour tous les matériaux constituant la façade, de même, la température de paroi externe est de 5°C.

Conductivité thermique du verre : $k_v = 0,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Conductivité thermique des briques : $k_b = 0,52 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Conductivité thermique du bois : $k_{\text{bois}} = 0,21 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Réponse :

La façade peut être assimilée à 3 résistances en parallèle, celle des vitres, celle de la porte et celle du mur de briques. On calcule donc chacune de ces résistances pour en déduire la résistance équivalente et pour calculer finalement le flux traversant la façade.

- Résistance thermique des vitres :

$$R_{\text{vitres}} = \frac{e_{\text{vitre}}}{\lambda_v \cdot S_{\text{vitres}}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 4,2} = 0,625 \cdot 10^{-3} \text{ °C.W}^{-1}$$

- Résistance thermique de la porte :

$$R_{\text{porte}} = \frac{e_{\text{porte}}}{\lambda_{\text{bois}} \cdot S_{\text{porte}}} = \frac{0,042}{0,21 \cdot 2} = 0,1 \text{ °C.W}^{-1}$$

- Résistance thermique du mur :

$$R_{\text{mur}} = \frac{e_{\text{mur}}}{\lambda_{\text{p}} \cdot S_{\text{mur}}} = \frac{0,26}{0,52 \cdot (50 - 4,2 - 2)} = \mathbf{0,0125 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}}$$

- Résistance équivalente de la façade :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{\text{vitres}}} + \frac{1}{R_{\text{porte}}} + \frac{1}{R_{\text{mur}}} = \frac{1}{0,625 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,0125} = 1600 + 10 + 80 = 1690 \text{ } \text{W} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$R = \frac{1}{1690} = \mathbf{0,592 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}}$$

- Donc le flux traversant la façade est :

$$\phi_{\text{façade}} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{R} = 5 \cdot 1690$$

$\Phi_{\text{façade}} = \mathbf{8450 \text{ W}}$

- *On peut aussi calculer le flux traversant les vitres, la porte et le mur et additionner ces flux soit :* Flux traversant les vitres

$$\phi_{\text{vitres}} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{\text{vitres}}} = \frac{10 - 5}{0,625 \cdot 10^{-3}} = \mathbf{8000 \text{ W}}$$

- Flux traversant la porte

$$\phi_{\text{porte}} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{\text{porte}}} = \frac{10 - 5}{0,1} = \mathbf{50 \text{ W}}$$

- Flux traversant le mur

$$\phi_{\text{mur}} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{\text{mur}}} = \frac{10 - 5}{0,0125} = \mathbf{400 \text{ W}}$$

- Donc le flux total traversant la façade est :

$$\phi_{\text{façade}} = \phi_{\text{vitres}} + \phi_{\text{porte}} + \phi_{\text{mur}} = 8000 + 50 + 400 \quad \mathbf{\Phi_{\text{façade}} = 8450 \text{ W}}$$

Analyse des résultats : Bien que la surface totale des vitres (8m²) soit seulement de 1/5 de la surface de mur (40m²), le flux perdu par conduction par les vitres (fermées) est 400 fois plus important que celui perdu par le mur. Il est donc particulièrement important de réduire le flux perdu par les vitres grâce à un double vitrage (*voir exercice chapitre suivant*).