



Transferts thermiques par conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

Transferts thermiques par conduction



Transferts thermiques par conduction

Différents modes de transferts thermiques

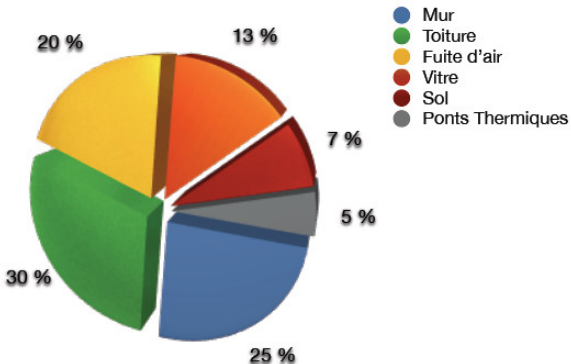
Loi de Fourier

Équation de la chaleur

Régime stationnaire

Transferts conducto-convectifs

Les causes de pertes thermiques au sein d'une maison sont nombreuses :



– Les causes des pertes thermiques dans une maison type



Transferts thermiques par conduction

Différents modes de transferts thermiques

Loi de Fourier

Équation de la chaleur

Régime stationnaire

Transferts conducto-convectifs

Application	Description	Performances en m ² Kelvin/Watt minimales à respecter
Planchers	Planchers bas sur sous-sol (caves, garages, buanderies), sur vide sanitaire (c'est-à-dire le volume inutilisé séparant le sol naturel du premier plancher) ou sur passage ouvert dans les immeubles (pour piétons, voitures, etc...)	$R \geq 3.0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
Murs	<u>Murs</u> en façade ou en pignon. Seule l'isolation des murs existants ouvre droit au crédit d'impôt. La construction d'une seconde paroi, avec aménagement d'un vide d'air entre les deux parois n'est pas éligible à l'avantage fiscal	$R \geq 3.7 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
Toitures	Toitures terrasses (impérativement isolées par l'extérieur)	$R \geq 4.5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
	Rampants et plafonds de <u>combles aménagés</u>	$R \geq 6.0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
	Planchers de <u>combles perdus</u>	$R \geq 7.0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$

– Travaux d'isolation thermique éligibles au crédit d'impôt



Transferts
thermiques
par
conduction

De nombreux matériaux peuvent être envisagés pour réaliser les murs d'une habitation ainsi que son isolation thermique.

Matériau	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$)
Cuivre	4×10^2
Béton ordinaire	2,1
Brique	0,8
Laine de verre	0,04
Mousse polyuréthane	0,02
air	0,02
eau	0,6
acier	25 - 45
verre	1,2



Transferts thermiques par conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

Comment choisir le bon matériau ? la bonne épaisseur ? ...

Comme dans une maison, dans toutes les études thermodynamiques intervient la notion de transfert thermique (Q) entre le système et l'extérieur. Comment se font ces transferts thermiques ? Sont-ils tous du même type ?



Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Conduction
thermique
Rayonnement
thermique

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

1

Différents modes de transferts thermiques



Convection thermique

La convection est un transport d'énergie thermique propre aux fluides associé à un mouvement macroscopique de matière dans le fluide. Chaque portion de fluide transporte son énergie interne en se déplaçant.

Exemples :

.....

.....

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Conduction
thermique
Rayonnement
thermique

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs



Conduction (ou diffusion) thermique.

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Conduction
thermique
Rayonnement
thermique

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

La diffusion thermique (ou conduction thermique) est un transfert d'énergie thermique dans un milieu matériel sans transport (= mouvement macroscopique) de matière. Ce transport d'énergie met en jeu les chocs entre les particules (pour un fluide) ou les vibrations du réseau cristallin (solides)

La diffusion thermique a pour origine l'inhomogénéité du champ de température dans le milieu. Le transport d'énergie se fait des régions les plus chaudes vers les régions les plus froides. La diffusion thermique est un phénomène irréversible.

Exemple :

.....
.....



Rayonnement thermique

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Conduction
thermique
**Rayonnement
thermique**

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

La surface de la Terre chauffe grâce à la chaleur provenant du Soleil. Celle-ci ne peut être acheminée ni par convection, ni par conduction, qui toutes deux nécessitent un milieu matériel pour se propager. Ce transfert thermique se fait par rayonnement, c'est-à-dire qu'il est transporté par l'énergie de l'onde électromagnétique.

De façon générale, tout corps émet un rayonnement électromagnétique, qui dépend de sa température. Plus la température est faible, plus les photons émis ont une grande longueur d'onde (dans l'infrarouge). Pour émettre dans le visible, on chauffe à une grande température, c'est le principe des ampoules à filament !

Exemples :



Bilan

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Conduction
thermique

**Rayonnement
thermique**

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

	Milieu	Transport de matière
Convection		
Conduction		
Rayonnement		



Transferts thermiques par conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

2

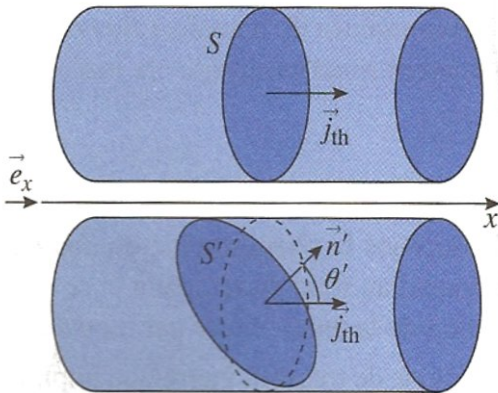
Loi de Fourier



Densité de flux thermique

Transferts
thermiques
par
conduction

On étudie donc la conduction entre deux systèmes **sans mouvement macroscopique**, à travers une paroi (S)





La puissance thermique qui traverse la section (S) (ou flux thermique) est définie par :

.....

Le vecteur « densité de flux thermique » est alors défini par :

.....

Le vecteur densité de flux thermique a les propriétés suivantes :

- ▶ Dimension :
- ▶ Direction :
- ▶ Sens :
- ▶ Si le flux est uniforme sur la section (S) :



Conductivité thermique et loi de Fourier

Transferts
thermiques
par
conduction

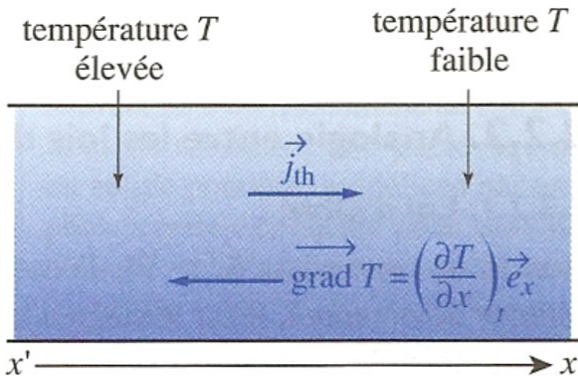
Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conductive-
convectifs





Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

Dans un milieu sans mouvement macroscopique, dont la température n'est pas uniforme, $T(x, t)$ par exemple, il se crée une densité de flux thermique $\vec{j}_{th}(x, t)$, allant du chaud vers le froid et tendant à homogénéiser la température.

Cette densité de flux est, en norme, d'autant plus grande que la variation de température est grande (soit $\left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|$ grand).

Ces propriétés sont traduites par la loi de Fourier :

Généralisation en 3D :



Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

3

Équation de la chaleur



Situation étudiée :

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

Matériau homogène : masse volumique ρ , capacité thermique massique c , indépendantes du point considéré.

Aucun mouvement macroscopique n'a lieu dans ce matériau (pas de possibilité de convection thermique).

La température n'est pas homogène. Elle ne dépend que d'une variable d'espace et du temps $T(x, t)$.

On étudie la diffusion thermique sur au niveau de surfaces d'échanges en x et $x + dx$ telles que $S_x = S_{x+dx} = S$.



Bilan d'énergie interne sur un système fermé mésoscopique

Transferts thermiques par conduction

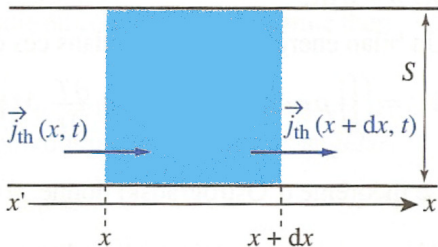
Différents modes de transferts thermiques

Loi de Fourier

Équation de la chaleur

Régime stationnaire

Transferts conducto-convectifs



Effectuer un bilan d'énergie interne sur le système.

.....

.....

.....

.....



**Transferts
thermiques
par
conduction**

.....

.....

.....

Différents
modes de
transferts
thermiques

.....

Loi de
Fourier

.....

**Équation de
la chaleur**

.....

Régime
stationnaire

.....

Transferts
conducto-
convectifs

.....

.....



Application du Premier Principe

Transferts
thermiques
par
conduction

.....

.....

Différents
modes de
transferts
thermiques

.....

.....

Loi de
Fourier

.....

Équation de
la chaleur

.....

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

.....

.....

.....



Transferts
thermiques
par
conduction

.....

.....

.....

Différents
modes de
transferts
thermiques

.....

.....

Loi de
Fourier

.....

Équation de
la chaleur

.....

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

.....

.....

.....



Loi de Fourier, Équation de la chaleur

Transferts
thermiques
par
conduction

.....
.....

Différents
modes de
transferts
thermiques

.....
.....

Loi de
Fourier

.....

Équation de
la chaleur

.....

Régime
stationnaire

.....

Transferts
conducto-
convectifs

.....

.....



**Transferts
thermiques
par
conduction**

.....

.....

.....

Différents
modes de
transferts
thermiques

.....

Loi de
Fourier

.....

**Équation de
la chaleur**

.....

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

.....

.....

.....



Échelles caractéristiques

Transferts
thermiques
par
conduction

À partir de l'équation de la chaleur, faire émerger une relation entre des grandeurs caractéristiques.

.....
.....

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

AN : Pour $D_{th} = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ Combien de temps le phénomène de diffusion met-il pour se propager sur 1 cm ? sur 1 m ?

.....

Que peut on en conclure concernant les phénomènes diffusifs ?

.....

.....



Application 1 : Temps de cuisson

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

Pour Noël, vous souhaitez faire cuire une dinde pesant 3.5 kg. L'an passé, la dinde pesait 2.5 kg et était « bien cuite » au bout d'une heure et demi.

1. Rappeler l'équation de la chaleur.
2. Quelle est la relation liant les ordres de grandeur du temps et de la longueur caractéristiques d'un phénomène de diffusion ?
3. Proposer des hypothèses raisonnables et en déduire la loi de variation liant le temps de cuisson avec la masse de la dinde à cuire.
4. Déterminer le temps de cuisson de la dinde de 3.5 kg.
5. Que penser d'une indication du type « tant de minutes de cuisson par kilo » ? En suivant une telle loi, les grosses dindes seront-elles trop cuites ou pas assez cuites ? et les petites dindes ?



Équation de conservation

Montrer que l'on peut mettre en évidence une équation de conservation de l'énergie.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs



**Transferts
thermiques
par
conduction**

.....

.....

.....

Différents
modes de
transferts
thermiques

.....

.....

Loi de
Fourier

.....

**Équation de
la chaleur**

.....

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

.....

.....

.....



Transferts thermiques par conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

**Régime
stationnaire**

Transferts
conducto-
convectifs

4

Régime stationnaire



Régime stationnaire

Transferts
thermiques
par
conduction

Un régime permanent correspond à une température ne dépendant pas du temps.

Différents
modes de
transferts
thermiques

Or les transferts thermiques ont tendance à homogénéiser celle-ci, pour tendre vers un état d'équilibre, où la température dépend donc du temps !

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Comment est-il possible d'être en régime permanent, avec une température non homogène (et donc existence de transferts thermiques) ?

Transferts
conducto-
convectifs

Cela est possible si chaque extrémité, par exemple une tige métallique, est maintenue à une température constante (différente de chaque côté). Alors le système transfère de l'énergie thermique pour réchauffer le côté froid, en vain à cause des thermostats.



Application 2 : Profil de température

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

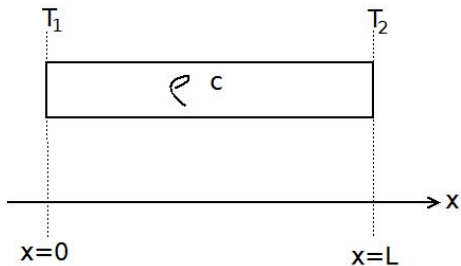
Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

Exprimer la température $T(x)$ le long d'une barre métallique de longueur L , en régime permanent. On considère les conditions aux limites suivantes : $T(x = 0) = T_1$ et $T(x = L) = T_2$.





Analogies

Transferts
thermiques
par
conduction

La diffusion (ou conduction) thermique possède de nombreuses analogies avec les phénomènes de : diffusion de particules, conduction électrique en régime permanent...

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

	Conduction thermique	Conduction électrique
Grandeur transportée		
Cause du transport		
loi de transport		



Résistance électrique et résistance thermique

Un conducteur ohmique est caractérisé par sa résistance électrique. Il vérifie la loi d'Ohm :

.....

En régime permanent, un milieu matériel peut être caractérisé par sa résistance thermique :

.....

Si considère conducteur ohmique d'épaisseur e , de section S et de conductivité électrique γ , sa résistance électrique R_{elec} s'exprime :

.....

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs



Transferts
thermiques
par
conduction

Dans le cas d'un phénomène de diffusion thermique unidirectionnel, et stationnaire, au sein d'un matériau d'épaisseur e , de section S et de conductivité thermique λ , la résistance thermique d'un objet s'écrit de même :

.....

Différents
modes de
transferts
thermiques

.....

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Si on accole deux matériaux l'un contre l'autre, leurs résistances thermiques s'ajoutent.

Régime
stationnaire

.....

Transferts
conducto-
convectifs

.....

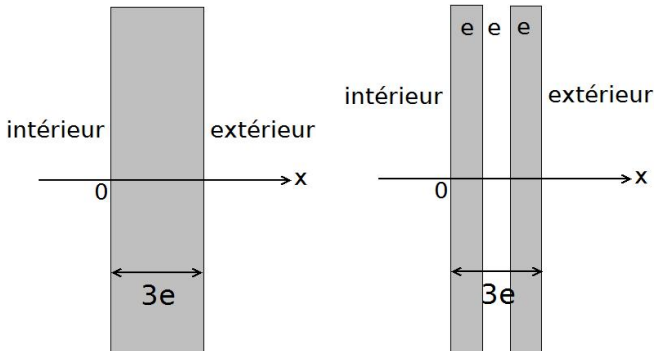
.....



Application 3 : Double vitrage

Objectif : Évaluer l'efficacité thermique du double vitrage par rapport au simple vitrage.

On note $\lambda_v = 1.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ la conductivité thermique du verre et $\lambda_a = 0.024 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ celle de l'air. L'air extérieur est à la température $T_{ext} = 0^\circ\text{C}$ et à l'intérieur il fait $T_m = 25^\circ\text{C}$.





1. On considère dans un premier temps une vitre d'épaisseur $3e$ et de surface S .
 - 1.1 La longueur caractéristique de la surface de la fenêtre est supposée grande par rapport à son épaisseur. Que peut-on en déduire ?
 - 1.2 Exprimer la résistance thermique en régime permanent, en faisant l'analogie entre le flux thermique et l'intensité électrique.
 - 1.3 Déterminer l'expression du flux Φ traversant la vitre en régime permanent en fonction des caractéristiques géométriques de la fenêtre.
2. On considère maintenant un double vitrage. Le dispositif est formé par deux vitres d'épaisseur e séparées par une lame d'air de même épaisseur.
 - 2.1 Déterminer le flux Φ' à travers ce dispositif.
 - 2.2 Calculer $\frac{\Phi'}{\Phi}$ et conclure.



Transferts thermiques par conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

5

Transferts conducto-convectifs



Loi de Newton

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

Lorsqu'un matériau solide est en contact avec un fluide de température T_f , il existe un transfert thermique au niveau de la surface de contact S résultant de la différence de température entre la surface S à la température T_S du solide et la température T_f du fluide.

Ce transfert, dit "conducto-convectif", est modélisé par la loi de Newton :

Loi de Newton

$$d\phi_{\text{solide} \rightarrow \text{fluide}} = h(T_S - T_f)dS$$

h = coefficient de transfert conducto-convectif (en $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$)

Dépend de la nature du fluide et du solide (conductivité, état de surface, mouvements de convection...)



Application 4 : Ailette de refroidissement

Transferts
thermiques
par
conduction

Différents
modes de
transferts
thermiques

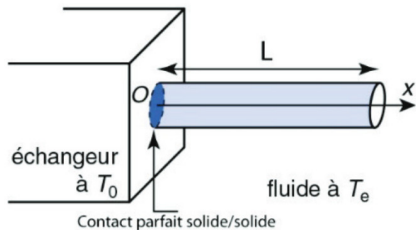
Loi de
Fourier

Équation de
la chaleur

Régime
stationnaire

Transferts
conducto-
convectifs

On considère une barre de cuivre cylindrique de rayon $a = 5 \text{ cm}$ et de longueur L . En $x = 0$, la barre de cuivre est en contact avec un milieu à la température $T_0 = 330 \text{ K}$. Tout le reste de la tige est en contact avec l'air ambiant de température uniforme $T_e = 300 \text{ K}$.



Données :

- ▶ Conductivité thermique du cuivre : $\lambda = 400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- ▶ Coefficient de transfert conducto-convectif :
 $h = 12 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$



1. La tige est supposée infiniment longue et le régime stationnaire. Montrer que l'équation de diffusion s'écrit :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{T}{\delta^2} = -\frac{T_e}{\delta^2}$$

Préciser l'expression de δ .

2. En déduire l'expression de $T(x)$ en tout point de la barre.