Leçon n°18 : Phénomènes de transport

Niveau	**Licence**
Prérequis	1er et 2e principe de la thermodynamique Conduction électrique Mécanique des fluides
Biblio	
Plan	I. Transfert thermiques 1. Les modes de transfert thermique 2. Diffusion thermique a) Flux thermique b) Bilan énergétique c) Loi de Fourier d) Equation de diffusion thermique e) Résistance thermique 3. Application : onde de chaleur II. Comparaison des différents modes de transport 1. Conduction électrique 2. Diffusion de particules 3. Diffusion de quantité de mouvement 4. Convection thermique et rayonnement thermique

Intro ;
Sy à l'équilibre jusque là
Sy avec homogénéité d'une grandeur intensive: transport d'une grandeur physique extensive pour tendre à un nouvel équilibre.et donc génère un flux
Inhomogénéité d'une grandeur intensive qui engendre le transport d'une grandeur extensive et donc un flux.
Grandeur conservée au cours du transport
Phénomène irréversible.

II-

1)

Diapo recap sur tout.

On va pouvoir comparer la conductivité thermique et la conductivité electrique.
Diapo : valeur

Conductivité thermique : peu étendue entre le plus fort et le plus faible plusieurs centaines
Conductivité électrique 10^7 pour le cuivre
L'eau 10^-6

Les deux phénomènes sont dues aux mêmes phéno microscopiques (cuivre électron libre)

De la même manière on va avoir une équation des conservation de la charge pour l'électrique
.
Equation de d'Alembert sy de propagation (derivée partielle du second ordre)
Diffusion de particule similaire au phénomène de transfert thermique

Irréversible (impossible de revenir dans l'état initial)
On peut décrire ce phéno avec le vecteur densité de courant ; flux de particule par unité de surface

Loi de fick relation entre vecteur densité de particule et le gradient de densité moléculaire. On va tendre à aller vers des zones où la densité moléculaire est plus faible.

Phénomène lent Manip : goutte dans de l'eau.

Matériau peut avoir une résistance à la diffusion de particule

Valeur du coefficient D qui dépend du type de particule et dans quel milieu.

Molécule dans un gaz, …
De même ordre de grandeur que coefficient de diffusion thermique
Bcp plus lent que transfert thermique.

Transfert quantité de mouvement : transport tangentiel
Avec des couches mésoscopiques qui glissent les unes par rapport aux autres.

A partir d'un phénomène on peut en décrire plusieurs
Diffusion :
Dû à l'inhomogénéité d'une grandeur au sein d'un système.

Remarques :

Trop de diapo
Prendre le temps de commenter tous les diapos !!

Jury :
Leçon transverse, ne pas présenter qu'un seul type de transport.
On en détail 1 et on suppose que les autres ont déjà été vu.
Et les comparer.
Par contre partie II trop longue.

Dans cette leçon on détaille la diffusion thermique, les autres déjà introduits et on verra dans une autre leçon la convection radiation.
43 minutes.

Le jury attend la partie deux alors ne pas la bacler.

Tableau :
Pour aller à l'essentiel :
Diffusion thermique et diffusion de particule :
Loi de Fourier et la loi de fick et la loi de la conservation
La différence on a Ro C pour la diffusion thermique. Donc on a lamda et C alors que diffusion de particule on a que le coeff D.

Diffusion quantité de mouvement.
Diffusion d'un vecteur au lieu d'un scalaire sinon tout est semblable.

Pas besoin de refaire les équations de la viscosité. On revoit ce que l'on a déjà vu.

Deuxième colonne conduction électrique : plus interessant et plus dur

On retrouve une équation de diffusion dans un conducteur (à écrire plutôt que l'équation de d'Alembert)
Analogie électrique des ondes de chaleur : l'effet de peau.
Dans le cas des conducteurs à basse fréquence —> On peut retrouver équation de diffusion pour le champs électrique (ce n'est pas dans le cas général du coup)

Sur un conducteur les charges se repoussent pour aller vers l'exterieur alors que la T cherche à s'homogèneiser

Analogie avec elect marche que avec les conducteurs lorsque la densité de charge (ro)= 0.

Div E = Ro/ epsilon O . Donc ça on ne le retrouve pas entre les deux.

DONC : bien montrer que 3 identiques et que l'on peut faire l'analogue avec l'électricité que dans une certaine mesure.

On retrouve la notion de résistance un peu partout en physique : cas stationnaire et qu'une relation de proportionnalité.
En stationnaire on retombe sur une équation de type resistive.
Valeur numérique pour les sigmas. Pas la peine; On ne peut pas les comparer entre elles.

Bien parler de lamda et a car c'est le coeur de la leçon en ce qui concerne les ordres de grandeur
Par contre les ordres de grandeur pour la deuxième partie de la leçon on laisse tomber.

Pourquoi on utilise la fonte pour mijoter
Mais quand on fait cuir la viande une poêle en cuivre ?
On utilise pas le cuivre pur car oxyde de cuivre nocif.
On peut utiliser le cuivre avec les confitures car le sucre de confiture est réducteur.

Poele en alu : pb oxyde d'alu.
On met un revêtement dessus.

Deta

Questions :

- Grandeur forcément conservée lors d'un transport ?
Non. Si on enlève le terme source comme ce qu'on a fait ce n'est pas conservé.

- Que peut on dire de ces grandeurs d'un point de vue thermodynamique ?
Inhomeneité d'une grandeur et conservation d'une grandeur

Conservation d'une grandeur : c'est l'energie. Grandeur extensive.
Inhomogénéité : grandeur intensive (température)
Pas de transfert de température

Inhomogénéité d'une grandeur intensive qui engendre le transport d'une grandeur extensive et donc un flux.

- Que dit le premier principe ?
Si on a inhomogénéité d'une grandeur intensive on aura une grandeur extensive (premier principe)

- Quel type de conduction : naturelle car un gradient de T.

Conduction forcée : quand il y a une turbine.

- Application d'une thermosource?? Effet joule
Effet joule pour chauffer un radiateur electrique.

Comment fonctionne une centrale ?
Thermosource qui crée de la chaleur ensuite on transfert la chaleur vers un circuit d'eau.
Nucleaire : thermosource constant reculé par carbone .
Flux qui s'échappe vers l'extérieur
Le therme source compense le terme flux
Autre application :
Sonde qui fonctionne sur une Pile atomique :
Pile qui chauffait avec un matériau electrique;
Pile qui convertissait la chaleur en electricité.
Voyager 1.
Normalement devait durer 4 ans depuis 1977 et il a duré bcp plus. (toujours en activité)

Pourquoi les cristaux liquides changent de couleur en fonction de la température ?
Verre puis rouge.
Orientation différente des cristaux liquides dû aux changements de phase.

Densité qui décroit en fonction de la distance?
Solution d'un Dirac ; gaussienne qui s'étale.

- Quel est la largeur de la gaussienne (pour la diffusion)?

On a vu pour les transferts thermiques : L= Racine (D *t) Donc elle croit comme la racine du temps.

- Trasnfert thermique ? réponse à un échelon température. Primitive de la gaussienne erf.

- Exemple de lamda. Modèle microscopique. Déterminer le coefficient de diffusion thermique à partir des propriétés microscopiques?

U la vitesse quadratique moyenne
Particule qui font udt
N particules =1/6 nUdtdS

Quelle energie ? 3/2 kBT

On est obligé de considérer le point où il y a eu le dernier choc donc le libre parcours moyen.

Elles emportent une énergie proportionnelle à x-l/2.

- Différence entre coeff diffusion thermique a et conductivité lamda?
- En stationnaire on s'en fiche de sa capacité à chauffer—> lamda

A :Capa matériau transmettre la chaleur et de sa facilité à chauffer
En régime stationnaire on sait que T varie linéairement, relation entre T et le flux.
(aller a l'essentiel pour pas passer trop de temps sur les diapos)
Exemple du double vitrage. Schéma avec les différentes resistances.
On voit bien que la résistance totale c'est quasi que la résistance de l'air car bcp plus forte que la résistance du verre.

Pourquoi y'a pas le rayonnement thermique et la convection dans les modes de transport ?
Très différent et plus compliqué . (on reverra ça dans la leçon + tard)

CP 18 : Phénomènes de transport

①

Niveau : Licence   **P.R.** : 1er et 2nd principe de la thermodynamique
Conduction électronique
Mécanique des fluides

Intro : → Dû à l'inhomogénéité d'une grandeur intensive, transport d'une grandeur extensive, ~~elle se conserve au cours du transport~~, irréversible

I. Transferts thermiques

Corps chaud vers un corps froid. Maintenant on va s'intéresser au transfert temporel des transferts thermiques.

1) Les modes de transfert thermique

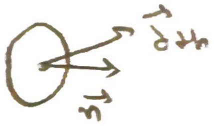
→ La conduction : transport d'NRJ sans dpmt de matière (diffusion thermique)
→ La convection : transport d'NRJ avec dpmt de matière
→ Le rayonnement OEM

On néglige la convection et le rayonnement dans ce problème.

2) Diffusion thermique

a) flux thermique

$$\Phi = \frac{\delta Q}{\delta t} \text{ (en Watt)} = \oiint \varphi_{ext \to S}\, dS$$
$$= \oiint \underbrace{\vec{j}_{th}}_{\text{vecteur densité de courant thermique}} \cdot \vec{dS}$$

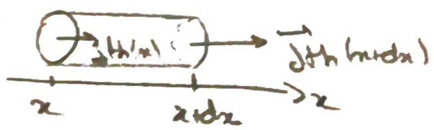


$\vec{j}_{th}$ est orienté suivant la direction du transfert thermique
$\Phi > 0$ lorsque le S reçoit

Le flux est par convention positif lorsque le système reçoit de l'énergie.

b) Bilan énergétique

1D



Bilan thermique entre t et $t+dt$:
1er principe : $dU = \delta Q + P_{produit}$ → effet Joule, chgmt de phase
hyp → S ne reçoit pas de travail

Energie produite par le sy : effet joule, changement de phase. Tout ce qui génère de l'énergie et qui n'est pas dû au transfert thermique.

• $dU = U(t+dt) - U(t) = \delta m\, c\,(T(x+dx) - T(x))$
or $\delta m = \rho S dx$ $\quad = \rho S c \dfrac{\partial T}{\partial t} dx dt$

• $\delta Q_{ext \to S} = \delta Q_x + \delta Q_{x+dx} = -\Phi(x+dx)dt + \Phi(x,t)dt$
$= -\dfrac{\partial \Phi}{\partial x} dt dx = -\dfrac{\partial j_{th}(x,t)}{\partial x} S dt dx$

Energie thermique reçu par le sy.
Signe moins car énergie thermique sors du syst!me (jth en x + dx) donc on met un moins pour qu'elle rentre dans le système
Bilan thermique local du sy
S n'intervient pas dans l'eq donc valable qq soit le sy choisi
Defini la conservation du flux thermique au sein du cylindre

→ $\rho c \dfrac{\partial T}{\partial t} + \dfrac{\partial j_{th}(x,t)_x}{\partial x} = 0$ (1D) } on rajoute $\dfrac{\partial j_y}{\partial y} + \dfrac{\partial j_z}{\partial z}$

$$\boxed{\rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} + \mathrm{div}(\vec{j}_{th}(x,t)) = 0 \quad 3D}$$

Loi de fourrier issue de l'experience.

c) Loi de Fourier (expérimentale)

$$\boxed{\vec{j}_{th} = -\lambda \, \vec{\text{grad}}\, T}$$

λ : conductivité th.

BT °C $\xleftarrow{\vec{j}_{th}}$ HT °C

BT °C $\xrightarrow{\vec{\text{grad}}\, T}$ HT °C

En accord avec le principe de la thermo le signe - pour que ça aille de la HT à la BT.

Cristaux liquides
Cuivre transfert mieux la chaleur
On essaye de comprendre pourquoi avec la conductivité thermique.

Conductivité thermique : Cuivre >> Alu >> Laiton > Fer
~390 ~220 120 50 (W.m⁻¹.K⁻¹)

elle caractérise chaque matériau, c'est leur aptitude à transférer de la chaleur

béton ~ 1
eau ~ 0,6
Air ~ 0,026

Matériau
Fer 50
Laiton 120
Aluminium 220
Cuivre 390
Béton 1
Eau 0,6
Air 0,026

Micro : agitation $_{th}$ des particules → chocs
→ vibration
→ e⁻ libres.

Lamda est caractéristique à chaque matériau, c'est leur aptitude à transférer la chaleur.

Métaux : électrons libres en plus pour transmettre agitation thermique.
Aptitude d'un matériau à conduire la chaleur

d) Equation de diffusion thermique

on combine Loi de Fourier c) et le bilan énergétique du b)

Si on met - dT on ne retrouve pas la même équation donc bien un pheno irréversible
Pour comparer à un Phéno de propagation : dérivée partielle seconde par rapport au temps

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \Delta T}$$

a coefficient de diffusion (m².s⁻¹)

dépend : facilité à chauffer, λ = conduit

Capacité à accumuler la chaleur ρc

Diapo ordre de grandeur coeff diffusion thermique :

a (10^-6) m^2/s
Cuivre 117
Béton 0,54
Glace 1,203
Air 20

Cuivre ~ 117.10^{-6}
béton ~ $0{,}54.10^{-6}$
glace ~ $1{,}203.10^{-6}$
air ~ 20.10^{-6}

Capacité à accumuler la chaleur dans le matériau (différence avec la conductivité thermique)

ODG :

$$L \simeq \sqrt{a\tau}$$

$$\tau \simeq \frac{L^2}{a}.$$

Avec ce coeff a on peut avoir des ordres de grandeurs du phénomène :

e) Résistance thermique

Capacité du matériau à résister au transfert thermique

Analogie : $R = \frac{U}{I} = \frac{V_1 - V_2}{I}$

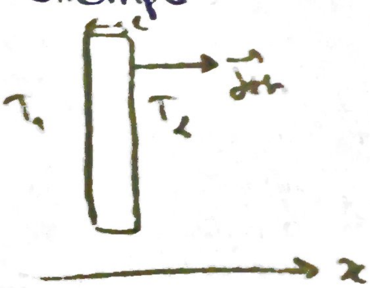
Intensité dû aux déplacements des porteurs de charge.

$$\rightarrow \boxed{R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi_{th\, 1\to 2}}}$$

Regime stationnaire.
linéarité de T.

Comme la résistance électrique, la résistance thermique s'additionne lorsque l'on se met en série;

Exemple :



$T_1 > T_2$

$$\Phi_{th\, 1\to 2} = \iint \vec{j}_{th}\, \vec{dS}$$

$$\vec{j}_{th} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{e} \vec{u_x} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{e} \vec{u_x}$$

$$\Phi_{th\, 1\to 2} = \frac{S\lambda}{e}(T_1 - T_2)$$

$$R_{th} = \frac{e}{S\lambda}.$$

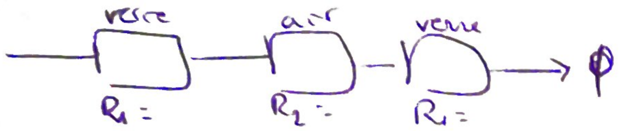
Si paroi adiabatique $R_{th} \to \infty$ (2)

Pour une vitre d'épaisseur $e = 5$ mm, $\lambda_{verre} = 7{,}8\ 10^{-1}\ W\,m^{-1}$ et $S = 1\ m^2$

$R_{th} = 6{,}4\ 10^{-3}\ K.W^{-1} \to$ bq de pertes

Pour une ~~double~~ vitre ~~vitrage~~ épaisseur $2e$, $R_{th} = 1{,}28.10^{-2}\ K.W^{-1} \to$ Encore bq de pertes

Pour double vitrage $R_{th} = 0{,}26\ K.W^{-1} \to$ équivalent à 20,5 cm de verre.



Interet double vitrage ; air conductivité thermique très faible .

II. Comparaison des différents modes de transport

1) Conduction électrique

Transport de charges dû a l'action d'une force électromagnétique

voir tableau.

Loi d'Ohm : $\vec{J} = -\sigma \vec{E} = -\sigma\, \overrightarrow{grad}\, V$

Conductivité électrique est bq + étendue.

cuivre : 10^7 et eau : 10^6

2) Diffusion de particules

Transport de particules

voir tableau

n : densité moléculaire.

$D\,(m^2/s)$	
10^{-5}	mol ds gaz
10^{-10}	—— liq
$10^{-30} - 10^{-16}$	—— sol.

3) Diffusion de quantité de mouvement

Transport de quantité de mouvement dû à une force tangentielle.

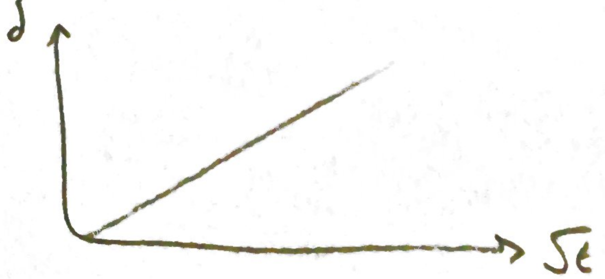
$\vec{v} = v_x(y)\,\vec{u}_x$

$d\vec{F}_t = \eta \dfrac{\partial v_x}{\partial y}\, dS\, \vec{u}_x$

$\vec{J}_p = -\nu\, \overrightarrow{grad}(p)$ → quantité de mouv en unité de vol.

↳ viscosité cinématique (m^2/s).

$\delta \propto \sqrt{t}$



(4) Convection thermique et rayonnement thermique

I. 3) Application : onde de chaleur

Comment se propage la température dans le sol.
Comme équation de diffusion est linéaire on peut passer en complexe.
Equation différentielle du second ordre.
Longueur d'atténuation de l'onde de chaleur dans le sol
OPP à atténuer .

On voit que le phénomène est lent car temps caract de la propag : onde va être très rapidement atténué

→ régime sinusoïdale

$x = 0$

$T(0,t) = T_0 + T_1 \cos(\omega t)$

$T(x,t) = T_0 + T_1(x) \cos(\omega t)$

$\theta(x,t) = T(x,t) - T_0 = Re(\underline{T_1}(x) e^{i\omega t})$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Rightarrow \underline{T_1}''(x) = \frac{i\omega}{a} \underline{T_1}(x)$$

$$\Rightarrow \underline{T_1}(x) = \underline{A} \exp\left(-(1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\, x\right) + \underline{B} \exp\left((1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\, x\right)$$

Qd $x \to \infty$ $\underline{B} = 0$

$x \to 0$ $\underline{A} = T_1$

$$T(x,t) = T_0 + T_1 \exp\left(\frac{x}{\delta}\right) \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right) \quad \text{avec } \delta = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \simeq \sqrt{a\tau}$$

$v = \sqrt{2a\omega}$

En moy. $a = 6{,}5 \cdot 10^{-7}\ m^2/s$

On modélise les variat° annuelles par une sin car 1er janv $-10°C$
1er juillet →

Pour une cave, on souhaite que variat° an. de T avant une amplitude $< 2°C$

Pour $\tau = 1$ an → $\delta = 2{,}5\,m$.

On veut que $\left|T_1 \exp\left(\frac{-x}{\delta}\right)\right| < 2$, il faut $x > 5{,}75\,m$

→ ds l'idéal, une cave doit être creusée à ~ 6m de profondeur

Question : Persistance souvent en statio

Diff th, part et $\vec{q}$ → semblable th le tps m eq

≠ entre a et λ

Centrale et p[i]le atomique

Changement de phase : orienté-désorienté

réponse à 1 échelon fct erf

Microscopique

GP.

analogie électrique que si $\rho = 0$ pr conduct

pression cinétique

u vitesse moyenne quadratique

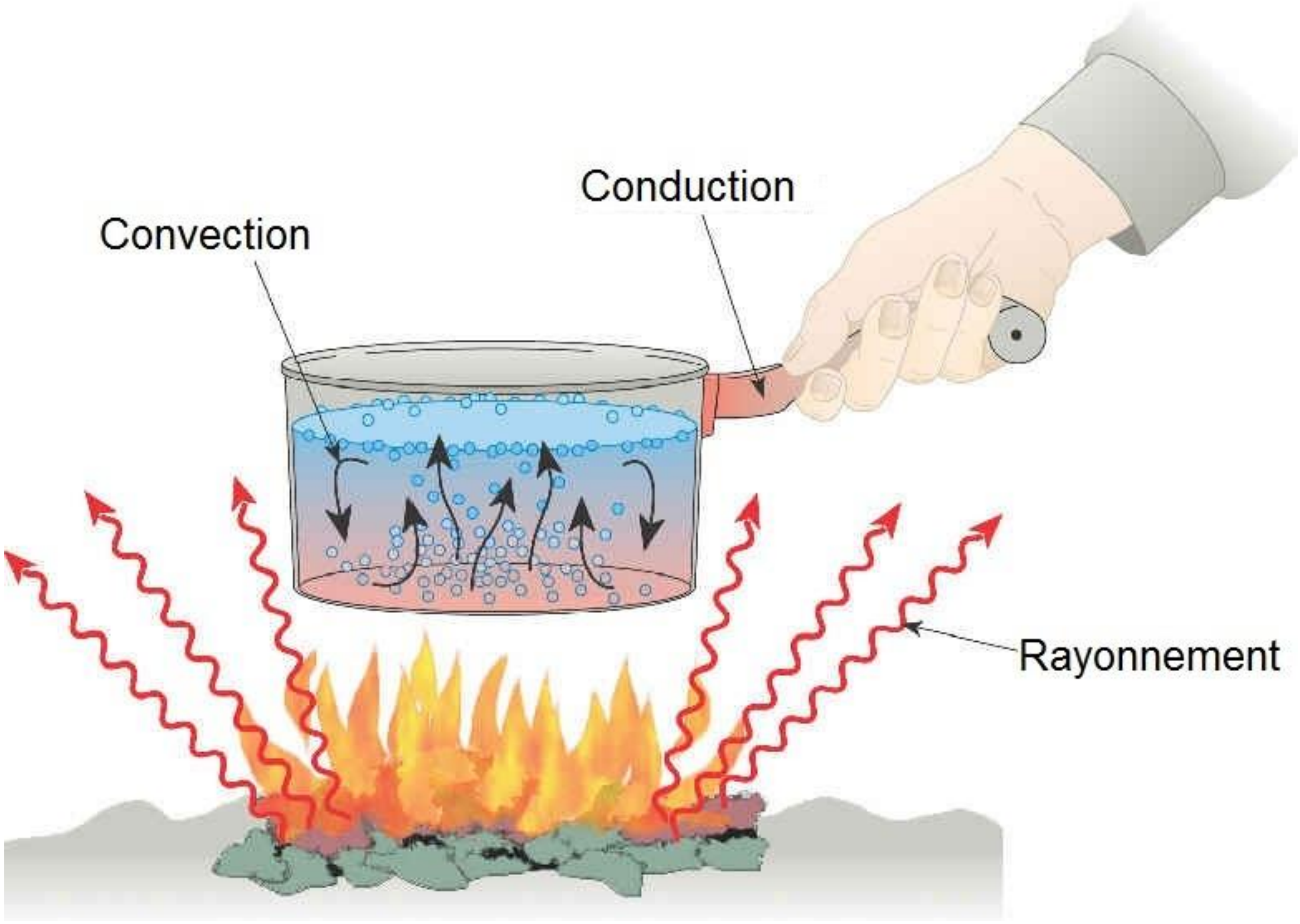
$N_{\text{mur}} = \frac{1}{6} n u\, dS\, dt$

NRJS $\frac{3}{2} k_B T (x - \frac{\ell}{2})$

ℓ libre parcours moy

LP 18 : Phénomènes de transport

Les modes de transfert thermique



La conductivité thermique λ

Retour sur l'expérience :

Matériau	**λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) à 300K**
Fer	50
Laiton	120
Aluminium	0.6
Cuivre	390

Conducteurs thermiques:
Cuivre>>Aluminium>Laiton>Fer

La conductivité thermique λ

Matériau	**λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) à 300K**
Cuivre	390
Béton	1
Eau	220
Air	0.026

λ est caractéristique de chaque matériau , c'est leur aptitude à transférer de la chaleur.

Le coefficient de diffusion thermique a

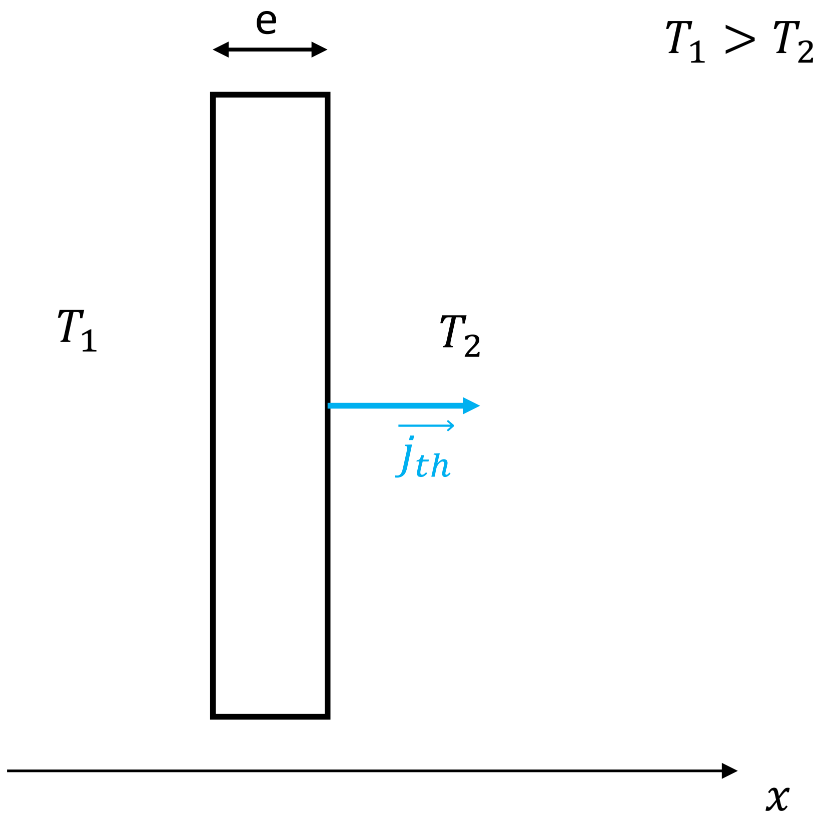
Matériau	**$a.10^{-6}$ (m²/s)**
Cuivre	117
Béton	0,54
Glace (0°C)	1,203
Air	20

Résistance thermique

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\phi_{th1\to2}}$$

$$\phi_{th1\to2} = \iint \overrightarrow{j_{th}}.\overrightarrow{dS}$$

$T_1 > T_2$



$$\overrightarrow{j_{th}} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{e} \overrightarrow{u_x} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{e} \overrightarrow{u_x}$$

$$\phi_{th1\to2} = \frac{S\lambda}{e}(T_1 - T_2)$$

$$R_{th} = \frac{e}{s\lambda}$$

Si paroi adiabatique $R_{th} \rightarrow \infty$

Pour une vitre d'épaisseur $e = 5\ mm$ avec $\lambda_{vitre} = 7{,}8.10^{-1}\ W.m^{-1}.K^{-1}$ et $S = 1\ m^2$

$R_{th} = 6{,}4.10^{-3} K.W^{-1}$ → Beaucoup de pertes

Si on double l'épaisseur : $2e = 10\ mm$, alors $R_{th} = 1{,}28.10^{-2} K.W^{-1}$ → Encore beaucoup de pertes

Double vitrage : entre les 2 plaques de verre d'épaisseur e, on ajoute une épaisseur d'air d'épaisseur e.

On a $\lambda_{air} = 0{,}02\ W.m^{-1}.K^{-1}$. On trouve alors : $R_{th} = 0{,}2628\ K.W^{-1}$ → équivalent à $20{,}5\ cm$ d'épaisseur de verre.

Application numérique : onde de chaleur

En moyenne, $a = 6{,}5.\,10^{-7}\ m^2.\,s^{-1}$ (variable avec la nature du sol et l'humidité)

On modélise les variations annuelles par une sinusoïde car

- le 1er janvier (le plus froid) → -10°C

- le 1er juillet (le plus chaud) → 30°C

Conditions initiales : Soit $T(0{,}0) = T_0 + T_1 = -10°C$ et $T\left(0, \frac{\tau}{2}\right) = T_0 - T_1 = 30°C$

On a donc $T_0 = 20°C$ et $T_1 = -20°C$

Pour une cave, on souhaite que les variations annuelles de température aient une amplitude inférieure à 2°C.

Pour $\tau = 1\ an \quad \rightarrow \quad \delta = 2{,}5\ m$

On veut que $\left|T_1 \exp(\frac{-x}{\delta})\right| < 2$, il faut que $x > 5{,}75\ m$

→ Dans l'idéal, une cave doit être creusée à environ 6m de profondeur pour que la température reste constante tout au long de l'année.

Diffusion thermique	**Conduction électrique**	**Diffusion de particules**	**Diffusion quantité de mouvement**
Transport d’énergie	Transport de charges dû à l’action d’une force électromagnétique	Transport de particules	Transport de quantité de mouvement dû à une force tangentielle
$j_{th} = \frac{dQ}{dS}$	$j = \frac{di}{dS}$	$j_N = \frac{dQ}{dS}$	
<u>Loi de Fourier</u> : $\vec{j}_{th} = -\lambda \overrightarrow{grad} T$	<u>Loi d’Ohm :</u> $\vec{j} = -\sigma \vec{E} = -\sigma \overrightarrow{grad} V$	<u>Loi de Fick :</u> $\vec{j}_n = -D \overrightarrow{grad}(n)$	<u>La loi de Newton:</u> $\vec{j}_p = -\nu \overrightarrow{grad}(p)$
$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \mathrm{div}(\vec{j}_{th}) = 0$	$\frac{\partial p}{\partial t} + div(\overrightarrow{j}) = 0$ p : densité de charges	$\frac{\partial n}{\partial t} + div(\vec{j}_n) = 0$	$\frac{\overrightarrow{\partial p}}{\partial t} + div(\vec{j}_p) = 0$
$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\phi_{th1\rightarrow 2}}$	$R = \frac{U}{I} = \frac{V_1 - V_2}{I}$	$R_{th} = \frac{n_1 - n_2}{\phi_{n1\rightarrow 2}}$	
$\frac{\partial T}{\partial t} - a\, \Delta T = 0$	Equation de d’Alembert $\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - c^2 \Delta \vec{E} = 0$	$\frac{\partial n}{\partial t} - D\, \Delta n = 0$	$\frac{\overrightarrow{\partial p}}{\partial t} - \nu \Delta \vec{p} = 0$ $\vec{p}$: quantité de movement par unite de volume

Autres transferts thermiques

Convection thermique	**Rayonnement thermique**
<u>Loi de Newton :</u> Au voisinage d'un solide (température Ts), le fluide (température Tf) reçoit : $$\vec{J}_{th} = \mathrm{h}(T_s - T_f)\vec{n}$$ Avec h : coefficient de transfert thermique	Tout corps porté à une température T émet un rayonnement EM où l'intensité augmente avec T. Loi de Stefan-Boltzmann : $$P_{rayonnée} = \sigma T^4$$ σ : constante de Stefan-Bolztmann