

LP 21 : Transfert thermique

Élément imposé : Refroidissement d'un ordinateur (leçon Joachim + Olivier PC/PC*), profil thermique de l'atmosphère (leçon Fenril), résistance thermique, loi de Newton, rayonnement du Soleil à la Terre (exemple Sanz PC/PC*), rouleau de Rayleigh Bénard

Niveau : L2

Prérequis :

- Thermodynamique : 1^e et 2nd principes (L1)
- Diffusion des particules (L2) ??
- Électrocinétique – circuit linéaire ? (L1)
- Régimes transitoires (L1)
- Loi de Wien
- Description des modes de transferts thermiques (TS)
- Loi d'Ohm, résistance électrique (secondaire)

Biblio :

- Perez, Thermodynamique
- Fruchart Physique expérimentale,

<https://www.youtube.com/watch?v=CkRbEC4-zgg> (convection)

<https://www.youtube.com/watch?v=0BdRaWFR2IM> (à 1 min20) (convection)

<https://www.youtube.com/watch?v=9joLYfayee8> (conduction)

<https://www.youtube.com/watch?v=vq5k6t6uZwE> (conduction casserole sans convection)

http://scphysiques.free.fr/animations/anim/meca/flux_thermique.swf (flux et résistance thq)

Introduction pédagogique :

Leçon niveau L2 car fait appel à plusieurs notions de physique que les élèves doivent maîtriser.

On va réutiliser les connaissances sur les corps noirs pour parler du rayonnement

Il faudra aussi que l'élève soit familier avec le premier principe de la thermodynamique

Dans le secondaire les élèves parlent déjà des différents transferts thermiques, ils connaissent déjà les modes de transfert mais que de façon descriptive.

On utilisera tout au long de la leçon une expérience avec une barre de cuivre qu'on chauffe à une extrémité

On fera également le choix de se limiter à la considération de problème unidimensionnelle en repère cartésien pour décrire les transferts thermiques, d'autres situations avec un repère cylindrique par exemple pour être envisagé dans le cadre de TD

Difficultés : bilan : on va le faire pas à pas avec schéma

TD : 3D, bilan sur une maison, ailette de refroidissement, approche doc : modèle thermodynamique de la Terre

TP : barre calorifugée (présentée ici), convection.

Introduction

Transfert thermique : Échange d'énergie thermique sous forme de chaleur.

Notion que vous avez déjà abordé au lycée, aujourd'hui on va voir ces phénomènes plus en détails.

Rappel Slide des 3 modes :

- rayonnement, les rayons du soleil nous chauffent
- convection
- diffusion :

Objectif : Comprendre et savoir modéliser les différents modes de transfert thermique.

I. Conduction

Transfert thermique au sein d'un support matériel sans mouvement macroscopique de matière.

A. Le flux thermique

Rappel : la température modélise au niveau microscopique l'agitation des molécules

La diffusion c'est un transfert de proche en proche sans mouvement macroscopique de matière (slide) . Elle met en jeu des chocs ou vibrations des particules du support qui transmettent ainsi leur énergie cinétique. Ce phénomène a lieu lorsque le support présente une inhomogénéité de température, et se fait des zones de température élevée vers les zones de températures faibles.

Pour caractériser ce transfert d'énergie, on utilise le vecteur densité de courant j .

La quantité d'énergie qui traverse une surface dS entre t et $t+dt$ vaut : schéma

$$\delta Q = \vec{j}(M, t) \cdot \vec{n} dS_M dt \rightarrow j \text{ en } \text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1} = \text{Wm}^{-2}, j \text{ est donc une puissance par m}^2$$

On peut définir le flux thermique Φ : la puissance du transfert thermiques $d\Phi = \vec{j} \cdot \vec{n} dS_M$

$$\rightarrow \Phi = \iint \vec{j} \cdot \vec{n} dS_M \text{ en W}$$

Transition : Comment déterminer j ?

B. Loi de Fourier

Fourier en 1822 démontre expérimentalement un loi pour la densité de courant thermique

Loi de Fourier : $\vec{j} = -\lambda \text{grad } T$ avec λ la conductivité thermique en $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Comment interpréter cette loi ? Soit une barre de taille l alignée selon un axe x . En entrée une température $T_1 > T_2$ qui est la température en sortie. On a donc $\text{grad}(T)$ qui est la variation de la température selon l'axe, on remarque qu'elle diminue donc $\text{grad}(T) < 0$, le vecteur densité de flux thermique est dirigée selon des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides

Limites : si le gradient est trop fort, on ne peut pas l'approcher par une loi linéaire ou encore si la température varie trop rapidement, l'établissement du flux thermique n'est plus instantané et il y a un retard dans l'établissement du flux thermique. Mise en défaut également si le milieu est non isotrope.

λ dépend du matériau (slide) elle renvoie à l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. (ex : cueillièrre en bois et pas en métal)

Remarque : analogue a la loi d'Ohm : $\vec{j} = -\sigma \text{grad } V$

En poussant l'analogie plus loin on peut aussi définir une résistance thermiques

$$R_{elec} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} = \frac{\Delta V}{I} \leftrightarrow R_{th} = \frac{1}{\lambda} \frac{L}{S} = \frac{\Delta T}{\Phi}$$

On aimerait bien avoir une équation pour trouver l'évolution de T dans la barre, a 1D

Bilan local d'énergie

On utilise le 1er principe sur une tranche d'épaisseur dx , hypoyhèses : unidimensionnel, pas de mouvement macro, système fermé et indéformable, calorifugé. On a un flux entrant et un flux sortant.

Faire schéma

$$dU = \delta W + \delta Q = \delta Q = dm c (T(x, t+dt) - T(x, t)) = \rho c S \frac{\delta T}{\delta t} dx dt$$

$$dU = j(x, t) S dt - j(x+dx, t) S dt$$

$$dU = \frac{-\delta j}{\delta x} S dx dt$$

$$\text{Or } j = -\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \rightarrow \lambda \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \rho c \frac{\delta T}{\delta t} \text{ Equation de diffusion}$$

Remarque : Ce phénomène est irréversible : si on fait la transformation $t \rightarrow -t$, on obtient l'opposé de cette équation.

$$D_{th} = \frac{\lambda}{\rho c} \quad D_{th} \text{ diffusivité thermique, slide ODG}$$

Transition : Etude en régime permanent

C. Etude en régime permanent

exp : Fruchart p 384, barre de cuivre avec condition aux limites, schéma slide

Données : <https://physique-pt-cluny.monsite-orange.fr/file/a016cc98ec2bb13e2494ea50256faf64.pdf>

Soit une barre calorifugée de section S et de longueur L , avec une résistance chauffante à un bout émettant un flux thermique permanent et une dissipation de chaleur à l'autre bout. Les conditions aux limites sont ainsi fixées : $T(x=0) = T_0$ et $T(x=L) = T_e$

Si on regarde uniquement au temps long : la température ne change plus avec le temps \rightarrow régime permanent $dT/dt = 0 \rightarrow T = ax + b$ on obtient une relation affine

Avec les conditions aux limites $T(x=0) = T_0 = b$; $T(x=L) = T_e = aL + T_0$

$$T(x) = \frac{T_e - T_0}{L} x + T_0$$

exp : Avec ODG on peut faire mesure de λ : $D_{th} = \frac{\lambda}{\rho c} = \frac{L^2}{\tau}$, si D diminue, τ augmente

On obtient un profil de température cohérent avec l'expérience.

Problème : dans un cas parfait la température augmenterait jusqu'à être uniforme partout, il y a des pertes.

Transition : d'où viennent ces pertes ?

II. Rayonnement

Rayonnement : transfert d'énergie thermique par des ondes électromagnétiques. Donc même en l'absence de milieu matériel.

Un corps chauffé rayonne et nous avons vu des modèles de types corps noir reliant la puissance de ce rayonnement à la température du corps en question.

Les ondes électromagnétiques chauffent l'objet qui les reçoit par absorption.

Corps noir : Corps idéal qui absorbe toutes les radiations électromagnétiques et dont l'émission ne dépend que de sa température. Gustave Kirchhoff, 1862. Il est à l'équilibre radiatif.

Modèle : Loi de Wien $\lambda_{\max} = 2,89 \cdot 10^{-3} / T$ (slide)

Ce qui va nous intéresser ici c'est plus la puissance qui est rayonnée par un corps noir

Loi de Stefan : $P_s = \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

On peut mesurer la puissance rayonné par la barre.

III. Convection

<https://svt.ac-versailles.fr/spip.php?article519>

Comme on a vu un objet peut rayonner mais quand vous soufflez sur la barre de fer qui est chaude, ce n'est pas le rayonnement qui fait que vous la refroidissez.

C'est la convection

Convection : transport d'énergie propre aux fluides, associé à un mouvement macroscopique du fluide. Les particules de fluides transportent de l'énergie en se déplaçant.

On peut modéliser ce phénomène par le modèle conducto-convectif :

Pour cela, on considère un solide à température T_c en contact avec un fluide à température $T_0 < T_c$.

Il s'établit alors une couche limite entre le fluide et le solide au sein de laquelle la température passe progressivement de T_c à T_0 . Le flux thermique du solide vers le fluide suit la loi phénoménologique de Newton : $j_{th} = -h(T_c - T_0)$ avec h coeff conducto convectif en $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Le flux dans ce modèle vaut : $d\Phi = h(T(x) - T_e) dS$

Il caractérise la facilité d'avoir un transfert à l'interface solide-fluide, il dépend de la nature du fluide, pour l'air $h=10\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Pour comprendre pourquoi on a des pertes : il faut comprendre qu'au bord de la barre l'air se réchauffe puis comme il est plus chaud il devient moins dense et est remplacé par de l'air frais (slide)

Ici on a des pertes par convection : A calculer pour la barre

On a bien majoritairement des pertes par convection ici, ça explique pourquoi on a pas une barre à la même température partout.

Conclusion

En conclusion, nous avons étudié ici les 3 modes de transferts thermique, à savoir le rayonnement, la conduction et la convection. Nous avons vu les différentes lois qui leur sont associées.