

LP 21 - Transferts Thermiques

Niveau L2

Prerequis

- * Conduction, convection, rayonnement
- * Loi de Wien
- * Loi d'Ohm
- * Résistance électrique
- * Description microscopique de la température
- * Premier principe thermodynamique



Bibliographie

- * 1001 QP - Girard
- * Physique tout-en-un PC - NP
- * Frochart.

Expérience: Barre de cuivre: - Détermination λ .

Introduction pédagogique

- * C'est une leçon qui se place au niveau licence 2 car elle fait appel à plusieurs notions de physique que les élèves doivent maîtriser
- * On va réutiliser des connaissances sur les corps noirs par parler du rayonnement
- * Il faudra aussi que l'élève soit familiarisé avec le premier principe de la thermodynamique
- * Dans le secondaire les élèves parlent déjà de transferts thermiques, ils connaissent déjà les modes de transfert (conduction, convection, rayonnement), mais en fait de façon descriptive.
- * Dans ce cours on va essayer de modéliser les notions qu'ils connaissent déjà, avec des outils de la physique
- * On va aussi essayer d'avoir une démarche expérimentale où on va essayer de trouver des modèles qui correspondent à ce que l'on obtient expérimentalement
- * On utilisera tout au long de la leçon une expérience avec une barre de cuivre que l'on chauffe à une extrémité
- * On se placera dans un problème à une seule dimension pour faciliter la compréhension des élèves
- * On pourra bien sûr lors d'une séance de TD refaire les démonstrations et des applications à 3 dimensions
- * Les difficultés pour l'élève pourraient être calculatoire, on fera donc les démonstrations pas à pas
- * Nous utiliserons les nouvelles notions comme par exemple les flux ou les vecteurs densité de courant, on essaiera de mettre en place des analogies, des schémas et des expériences pour faciliter la compréhension
- * Dans ce cours on abordera les 3 modes de transfert, on en fera l'étude en parcourant le même système, par montrer à l'élève qu'une méthode systématique de résolution permet de s'en sortir, même avec des systèmes complexes
- * TD : bilan sur une maison, ailettes de refroidissement, modèle thermique de la terre, cas avec production interne, intérêt du double vitrage
- * TP : introduit sur la diffusion de particule
- * Etude Doc sur l'effusivité

Introduction

Bonjour à tous, aujourd'hui nous allons parler de transferts thermiques. C'est une notion que vous avez déjà abordé au lycée, mais aujourd'hui on va essayer de modéliser physiquement les phénomènes que l'on observe.

* Pour ça on va étudier cette barre de cuivre. que l'on va chauffer à une extrémité, on va regarder ce qui se produit, et essayer de comprendre avec des modèles physiques.



* Vous l'avez déjà vu, mais on peut toujours faire en rappel, il existe 3 modes de transfert:

- La conduction ou diffusion
 - Le rayonnement,
 - La convection.
- } projection

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

Transition : Si je regarde la température dans ma barre de fer, je vois qu'on a un échauffement même là où on ne chauffe pas.

↳ Quel phénomène ? C'est de la diffusion

I - Le phénomène de diffusion

A - Le flux thermique.

* Par rappel la température modélise au niveau macroscopique l'agitation microscopique des molécules

* La diffusion c'est un transfert d'énergie de proche en proche sans mouvement macroscopique de matière. (projection)

↳ il est donc logique de voir une augmentation de la température dans la barre.

* Pour caractériser ce transfert d'énergie, on utilise le vecteur densité de courant $\vec{j}$

* La quantité d'énergie qui traverse une surface d^2S entre t et $t+dt$ vaut (schéma)

$$\delta^3 Q = \underbrace{\vec{j}(n, t) \cdot \vec{n}}_{\text{m}^2} \cdot \underbrace{d^2 S_n}_{\text{S}} dt \Rightarrow \|\vec{j}\| \text{ en } \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

* j est donc une puissance par m^2 (Bien expliquer)

* On peut définir le flux thermique ϕ qui est la puissance de transfert thermique

$$\hookrightarrow \boxed{\frac{d^2 \phi}{dt} = \frac{\delta^3 Q}{dt} = \vec{j} \cdot \vec{n} \cdot d^2 S_n} \Rightarrow \phi = \iint_S \vec{j} \cdot \vec{n} \cdot d^2 S_n \text{ en W.}$$

Transition : On a une expression pour la puissance dans notre barre de fer, mais pour l'instant on ne connaît pas $\vec{j}$.

B. Loi de Fourier.

* Fourier, en 1822 démontre expérimentalement une loi pour la densité de courant thermique:

$$\vec{j} = -\lambda \text{grad } T$$

avec λ la conductivité thermique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 λ dépend du matériau (propr.)

* On pourra noter que cette loi est analogue à la loi d'Ohm: $\vec{j} = -\sigma \text{grad } V$

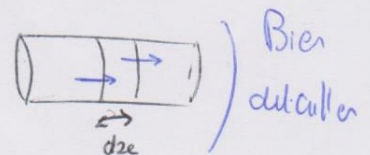
* En poussant l'analogie plus loin on peut aussi définir une résistance thermique.

$$R_{\text{elec}} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{S} = \frac{\Delta V}{I} \iff R_{\text{th}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{L}{S} = \frac{\Delta T}{\phi}$$

* La résistance thermique c'est une grandeur très importante quand on fait des bilans pour les pertes d'un maison, on fera des applications en TD, mais ici ce n'est pas ce qui nous intéresse.

* On aimerait bien avoir une équation pour tracer l'évolution de T dans la barre, à une dimension

* On utilise le premier principe. Soit une tranche d'épaisseur dx



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

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

$$= -\frac{\partial j}{\partial x} \cdot S dx dt = \rho c S \frac{\partial T}{\partial t} dx dt$$

$$\text{Or } j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Rightarrow +\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = 0} \quad \text{Equation de diffusion}$$

Transition: Est-ce que cette équation peut nous expliquer le profil des températures dans la barre?

c. Profil des températures

* Si je regarde en Q^z au temps longs, on voit que la température ne change plus avec le temps

↳ Régime permanent: $\partial T / \partial t = 0$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad \Rightarrow T = ax + b \quad \text{on obtient une droite}$$

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

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

Avec ordre de grandeurs on peut faire
une mesure de λ : $D_{th} = \frac{\lambda}{\rho c} = \frac{L^2}{t}$
comparaison R_{th} ? avec D_{th} avec ΔT



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

* Mais on va faire une petite expérience de pensée:

- Je chauffe ma barre à l'origine
- Il y a de la diffusion, la température augmente progressivement
- Si il n'y avait pas de pertes la température augmenterait jusqu'à être uniforme partout

$\Rightarrow$ Quand on s'approche on peut sentir le transfert thermique

$\Rightarrow$ il y a des pertes (il faudrait les calculer!)

Transitions: D'où proviennent les pertes?

II - Le rayonnement

* Le - Module du corps noir

- * Ce module, proposé par Wien en 1896 modélise un corps qui rayonne
- * Un corps noir est un corps qui absorbe toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, cela a pour effet d'augmenter sa température. Mais surtout il émet un rayonnement électromagnétique en fonction de sa température.

Loi de Wien : $\lambda_{\max} = \frac{2,89 \cdot 10^{-3}}{T}$

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

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

$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ K

- * Si on mesure la puissance rayonnée par notre barre on trouve :

$P_s = \text{ } \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

$\Rightarrow P_{\text{ray}} = \text{ } \text{W}$

- * Mais il faut faire attention car l'air aussi rayonne vers la barre

$P_{\text{air}} = \text{ } \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ $P_{\text{ray air}} = \text{ } \text{W}$

$\Rightarrow P_{\text{ray}}' = \text{ } \text{W}$

Transition : Le rayonnement ne nous permet pas de comprendre toutes les pertes, ce n'est pas suffisant

B. Application: Le profil thermique de l'atmosphère

$$6.96 \cdot 10^8 \text{ m}$$



* Le Soleil a une température $T_s = 5600 \text{ K}$

↳ La puissance émise est donc: $P_s = \sigma T_s^4 S = \sigma T_s^4 \cdot \pi R_s^2 = 3.4 \cdot 10^{26} \text{ W}$

* La Terre reçoit une partie de ce rayonnement:

↳ à la distance d , la puissance surfacique vaut: $P_{\text{surf}} = \frac{P_s}{4\pi d^2} = 1.3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$

↳ la Terre a une surface apparente $\pi R_T^2 = S_T$

↳ $P_{\text{reçue}} = P_{\text{surf}} \times S_T = P_s \cdot \frac{R_T^2}{4d^2} = 1.6 \cdot 10^{17} \text{ W}$

* A l'équilibre, la Terre doit réémettre tout ce qu'elle reçoit

$$\hookrightarrow 0 = \sigma T_T^4 \cdot 4\pi R_T^2 - P_s \frac{R_T^2}{4d^2} \Rightarrow T_T =$$

$$= \sigma T_T^4 \cdot 4\pi R_T^2 - \sigma T_s^4 \cdot 4\pi R_s^2 \cdot \frac{R_T^2}{4d^2} \Rightarrow T_T = T_s \left(\frac{R_s}{2d} \right)^{1/2} = 2^\circ \text{C}$$

* Cette valeur a le bon ordre de grandeur, mais est plus faible que la valeur théorique ($\approx 15^\circ \text{C}$) $\Rightarrow$ cela est dû à l'atmosphère.

* Ce qui serait intéressant, ce serait de regarder la température en fonction de l'altitude.

• Statique fluide: $\frac{\partial p}{\partial z} = -\mu g$ ~~$\alpha pV = nRT \Leftrightarrow p = \frac{nRT}{V} = \frac{m}{V} \cdot \frac{RT}{n} = \mu \frac{RT}{n}$~~

~~$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{p\mu}{RT} g \Leftrightarrow \frac{\partial p}{p} = -\frac{\mu g}{RT} dz$$~~
~~$$\Leftrightarrow \ln(p/p_0) = -\frac{\mu g z}{RT}$$~~

$$\Rightarrow dp = -\mu g dz \quad \text{si } \mu = \text{cte} \quad \text{on a } p = p_0 - \mu g z$$

$$\alpha pV = nRT \Leftrightarrow T = \frac{pV}{\mu R} \Rightarrow \frac{\mu RT}{n} = \frac{\mu RT_0}{n} = \mu g z$$

$$T = T_0 - \frac{\mu g z}{R}$$

on a fait beaucoup d'approximations.



III - La convection

- * Comme on a vu un objet peut rayonner, mais quand vous soufflez sur une barre de fer qui est chaude ce n'est pas le rayonnement qui fait que vous la refroidissez
- * C'est la convection qui est responsable ici
- * On peut modéliser ce phénomène par le modèle conducto convectif de Nernst

* Le flux dans ce modèle vaut:

$$\underbrace{d\dot{Q}}_{\text{W}} = h \cdot \underbrace{(T(x) - T_e)}_K \underbrace{d^2S}_{\text{m}^2}$$

h : coeff conducto convectif en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

- * il caractérise la facilité d'avoir un transfert à l'interface solide - fluide
 - ↳ il dépend de la nature du fluide, par l'air $h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- * Pour comprendre pourquoi on a des pertes: il faut comprendre qu'à 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 (projo)
- * Ici on a des pertes par convection:

$$P_{\text{conv}} = h (T - T_0) S \simeq \quad \text{W}$$

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

Conclusion: On a vu les trois modes de transferts thermiques ici, comment les modéliser et faire un bilan sur le système.

- * On fera des TD sur chaque mode séparément par la suite se familiariser avec chaque modélisation