

LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

✦ *Le nom du livre, l'auteur*¹

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

- Equilibre thermodynamique local
- Rayonnement du corps noir : loi de Planck, stefan, loi de Wien.

Expériences

- ✦ Biréfringence du quartz

Table des matières

1 Rayonnement thermique	2
1.1 Loi de Stefan et flux radiatif	2
1.2 Effet de serre	3
2 Diffusion thermique	3
2.1 Equation de la chaleur	4
2.2 Propriétés de la conduction	4
2.3 Régime stationnaire et analogie électrique	4
3 Convection thermique	5
3.1 Convection naturelle et convection forcée	5
3.2 Loi de Newton	6
4 Application au chauffe-eau solaire	6

Préparation

Biblio : Annexe de la LP 18, Sanz, livres de prépa, Effet serre (bup) http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=21046

Préparation : Finir le calcul. Faire l'AN sur diapo (écrit).

Plan : il faut disséminer le modèle du chauffe eau un peu dans les premières parties. Le modèle prend du temps à bien expliquer (au moins 15 min) et il faut le préparer sur transparent.

Introduction

Les échanges thermiques sont présents dans notre quotidien, nous nous habillons chaudement en hiver pour éviter les pertes par conduction et convection. Les transferts radiatifs sont directement responsables du climat terrestre.

Chauffe eau solaire Un exemple qui montre les différents modes de transfert thermique est le chauffe-eau solaire. On montre un schéma comme <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/chauffe-eau-solaire/fonctionnement-chauffe-eau-solaire/>. Le Soleil chauffe le métal par rayonnement. Le métal se réchauffe de proche en proche par conduction. Le circuit primaire transporte l'eau chaude par convection forcée. L'échangeur thermique en serpentin permet un transfert par conduction. Le liquide refroidi, repart vers le capteur ou il est à nouveau chauffé tant que l'ensoleillement reste efficace. *En hiver ou lors de longue période de mauvais temps, la totalité de la production d'eau chaude ne peut être assurée par cette énergie solaire, un dispositif d'appoint (résistance ou serpentin raccordé à une chaudière d'appoint prend donc le relais et reconstitue un stock d'eau chaude.* L'objectif de cette leçon est de comprendre le fonctionnement de ce dispositif, comment le modéliser simplement et d'estimer son efficacité.

Objectif Cette leçon se situe directement dans le prolongement de la leçon sur le corps noir, c'est pourquoi nous allons étudier tout d'abord le cas du transfert radiatif. Ensuite, nous éclairerons la notion de conduction thermique que nous n'avions pas discuté lors de notre étude sur la thermodynamique. Nous finirons par étudier quelques éléments de convection thermique où nous réinvestirons des notions de mécanique des fluides.

1 Rayonnement thermique

Le but de cette partie est d'estimer le flux de chaleur reçu par la plaque du chauffe-eau ainsi que la température de la Terre, en connaissant celle du Soleil.

1.1 Loi de Stefan et flux radiatif

Corps noir - rappel Pour rappel, le corps noir est un corps qui absorbe l'ensemble du rayonnement qu'il reçoit. A l'équilibre thermodynamique, ce corps va émettre un rayonnement électromagnétique dont la forme du spectre dépend uniquement de sa température et est donnée par la loi de Planck. C'est un modèle idéal, en réalité ma plupart des corps ne sont pas rigoureusement des corps noir, ils sont partiellement réfléchissants. Ils vont donc toujours émettre moins que le corps noir.

Le Soleil en tant que corps noir ? Le Soleil n'est pas à l'équilibre thermodynamique. Cependant, la couche externe est à l'équilibre thermodynamique local : sa température est bien définie mais est différente des couches internes. En le modélisant par un corps noir, il émet alors un rayonnement d'équilibre thermique.

Loi de Stefan On pourrait passer en prérequis De la loi d'émission du corps noir, on peut en déduire la loi de Stefan qui donne le flux surfacique ϕ d'énergie thermique émis par un corps noir à une température T . Elle s'obtient en intégrant la loi de Planck sur le spectre. [calcul]. Pour l'expression de ϕ , on admet le facteur $1/4$, d'origine géométrique, qui peut s'obtenir en utilisant que le rayonnement émis est égal au rayonnement reçu, supposé isotrope (cf. fiche). **ODG:** pour le Soleil, $T = 6 \cdot 10^3 \text{K}$, $R = 7 \cdot 10^8 \text{km}$, $P = \phi 4\pi R^2 = \sigma T^4 4\pi R^2 \sim 4 \cdot 10^{26} \text{W}$.

Flux reçu sur Terre Le transfert thermique se fait à la vitesse de la lumière et ne nécessite pas de milieu matériel : il peut se propager dans l'espace, du soleil à la Terre. Le rayonnement thermique étant isotrope, par conservation de l'énergie, on déduit le flux surfacique à une distance au niveau de la Terre. [dessin]. Par dilution sphérique, $\phi = P/(4\pi d_{TS}^2) = 1 \text{kW/m}^2 = 1 \text{mW/mm}^2$. On a résolu une partie du problème : estimer le flux de chaleur reçu par la

plaque du chauffe-eau.

Discussion Cependant, dans cette estimation, on a ignoré certains effets, comme l'absorption d'une partie du spectre par l'atmosphère. Mais l'ordre de grandeur reste valide.

Température de la Terre ↯ ma fiche ou Sanz p177. On veut désormais estimer la température de la Terre [schema+calcul]. Les hypothèses sont : pas d'atmosphère, la Terre est un corps gris (absorbe une fraction $(1-A)$ du rayonnement incident, avec A l'albedo), d'émittance 1 (émet intégralement le rayonnement absorbé) et à l'équilibre radiatif. [calcul] On trouve une température trop faible.

↓ *Il faut prendre en compte l'atmosphère de la Terre et en particulier l'effet de serre.*

1.2 Effet de serre

↯ ma fiche, Sanz. On va aller plus loin et voir l'effet de l'atmosphère sur la Terre [Montrer le vrai spectre reçu](#). Certaines longueurs d'ondes sont absorbées par les molécules de l'atmosphère (notamment l'UV par la couche d'ozone).

λ_{max} **du Soleil et de la Terre** En connaissant la température du Soleil et de la Terre et en appliquant la loi de Wien (à rappeler), on obtient les longueurs d'ondes caractéristiques des spectres émis par les deux astres : 500 nm pour le Soleil, 10 μm pour la Terre.

Hypothèses sur l'atmosphère En s'appuyant sur la forme du graphe du spectre reçu, on formule l'hypothèse que l'atmosphère absorbe vers 10 μm et est transparente à 500 nm.

Effet de serre [schémas] On voit avec les flèches que qualitativement, le flux par reçu la Terre augmente en présence d'une atmosphère. On montre [calcul] que la température augmente d'un facteur 1.2.

Résultat On trouve une température de 30 degrés, ce qui est beaucoup mieux mais toujours un peu chaud.

Discussion On pourrait améliorer le modèle en prenant en compte [fiche/Sanz]. Mais ce sont plutôt des modèles numériques qu'il faut mettre en jeu.

↓ *On revient sur le fil rouge qu'est le chauffe-eau solaire. On veut maintenant s'intéresser aux échanges thermiques dans le métal.*

2 Diffusion thermique

Pour un plan en 30 min, on peut supposer l'équation de la chaleur en prérequis et juste 1) résoudre le profil stationnaire 2) introduire la notion de résistance thermique et calculer celle du bloc de cuivre du chauffe eau 3) faire un odg de temps de diffusion dans le liquide.

Un autre type de transport est la conduction thermique. Ce mode de transport nécessite un milieu matériel pour se déplacer. Par ailleurs, c'est le moyen de transport dominant dans les solides. Mais il est aussi présent dans les fluides.

Conductiscope

Plonger le conductiscope dans l'eau bouillante : les cristaux liquides indiquent par leur sublimation l'évolution de la température le long de la tige ; on voit que celle-ci évolue plus ou moins vite selon les matériaux. On constate que plus le front avance, moins il avance vite. En effet, on verra que le front avance de manière sous-linéaire ($L \propto \sqrt{Dt}$). *Pourquoi les cristaux changent-ils de couleur ? La phase nématique hélicoïdale (ou phase cholestérique) où la direction d'orientation des batonnets tourne de plan en plan est caractérisée par le pas "cholestérique", c'est-à-dire la distance entre deux couches parallèles, une fois que les molécules ont fait un tour complet sur elles-mêmes, de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde du domaine visible. Elle a pour propriété de réfléchir de façon sélective la lumière selon les conditions de Bragg de la diffraction.*

Microscopiquement, la conduction correspond au phénomène de transport de l'énergie interne par agitation thermique, et se fait sans déplacement macroscopique de matière.

2.1 Equation de la chaleur

Hypothèses Equilibre thermodynamique local, milieu isotrope, on identifie $c_p = c_v = c$ pour un métal (voir annexe LP 18 pour les détails). Le terme source peut correspondre à de l'énergie dégagée par des réactions chimiques, nucléaire, absorption de radiation.

Equation de conservation voir sans ? H (meilleur) ou U (il faut supposer le milieu indéformable, sinon travail de pression) ? STOCKAGE = TRANSFERT + PRODUCTION

Loi de Fourier cf. LP 18 (idem Loi de Fick) Relation constitutive pour fermer les équations. Réponse linéaire. Conforme au second principe. Validité pour de faibles écarts à l'homogénéité (non linéarités), faibles variations temporelles (retard), un milieu isotrope (tenseur).

Densité de flux thermique $\delta Q = \vec{j}_Q d\vec{S} dt$. Loi phénoménologique de Fourier. Le signe est conforme au 2e principe de la thermodynamique : le transfert se fait des zones chaudes aux zones froides. Valable au voisinage de l'équilibre, dans le cadre de faibles écarts à l'homogénéité. Le coefficient est un scalaire si le milieu est isotrope, un tenseur s'il est anisotrope (ex : graphite). Conductivité thermique en W/m/K. **ODG**: Métaux : cuivre 400 W/m/K, acier 15 W/m/K. Solides non-métalliques : bois, béton, verre 1 W/m/K. Gaz : 0.02 W/m/K dans les cntp. Les matériaux poreux (laines de verre, polystyrène expansé) sont de bons isolants thermiques grâce à l'air piégé dans les pores. Les métaux sont de bons conducteurs car l'essentiel de la conduction thermique est réalisée par les électrons de conduction. On comprend pourquoi les ustensiles de cuisine sont en bois et la casserole en cuivre (autrefois) et pas l'inverse. Application du caractère isolant des gaz : double vitrage avec des gaz inertes (Argon), vase Dewar, laine de verre. Dans les métaux, $\kappa \propto T$ (loi de Wiedemann-Franz) donc il faut faire attention à la dépendance en température. Les nombres de Lorenz anormaux viennent de la contribution des photons à la conductivité thermique.

Les métaux liquides ont une haute conductivité. Le sodium liquide est utilisé comme fluide caloporteur dans les centrales nucléaires.

2.2 Propriétés de la conduction

cf. LP 18. EDP (CI CL), irréversibilité, linéarité, loi d'échelle (revenir sur le conductoscope), loi d'échelle pour les grandeurs microscopiques. Teaser Wiedemann-Franz.

2.3 Régime stationnaire et analogie électrique

Cas stationnaire 1D (on prend des plaques infinies). Profil affine, dessin. Tableau analogie électrique en ARQS. On revient vers le fil rouge.

Régime permanent En régime permanent, l'équation de la diffusion thermique avec source (3.24) s'écrit :

$$\Delta T(M) + \frac{\mathcal{P}_V(M)}{\lambda} = 0$$

En l'absence de production interne d'énergie (3.24) devient :

$$\Delta T(M) = 0$$

En régime permanent et en l'absence de production interne d'énergie, le champ de température $T(M)$ vérifie l'équation de Laplace : $\Delta T(M) = 0$.

Problème plan 1D Considérons un mur plan d'épaisseur L . Quelle est la température $T(x)$ à l'intérieur du mur, défini par $0 \leq x \leq L$, sachant que $T(0) = T_1$ et $T(L) = T_2$? L'équation de Laplace s'écrit $\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$. La température suit donc une loi affine :

$$T(x) = Ax + B$$

où A et B sont des constantes qui dépendent des conditions aux limites. Les conditions aux limites données conduisent à :

$$T(x) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{x}{L}$$

On fait un graphe.

Loi d'Ohm thermique On reprend l'exemple précédent. Le flux thermique, orienté de l'intérieur vers l'extérieur, à travers une section du mur de surface S est : $\Phi_{1 \rightarrow 2} = j_Q S$ où $j_Q = -\lambda \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L}$. Ce flux $\Phi_{1 \rightarrow 2}$ est proportionnel à

la différence de température $T_1 - T_2$. Cette expression fait penser à la loi d'ohm : l'intensité qui traverse un conducteur, flux du vecteur densité de courant électrique à travers une section du conducteur, est proportionnelle à la différence de potentiel à ses bornes.

On généralise cette propriété à une géométrie quelconque et par analogie avec la résistance électrique, on définit la résistance thermique R_{th} par :

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

où $\Phi_{1 \rightarrow 2}$ est le flux thermique à travers une section d'un tube de champ du champ des températures, de forme adaptée à la géométrie du problème, dans le sens $1 \rightarrow 2$. La résistance thermique s'exprime en $K.W^{-1}$. **L'analogie entre les phénomènes de conduction thermique et de conduction électrique est résumée dans un tableau.** Dans le cas unidimensionnel étudié, la résistance thermique s'exprime donc de la façon suivante :

$$R_{th} = \frac{L}{\lambda S}$$

Cette expression correspond en pratique à une plaque d'épaisseur petite devant ses dimensions latérales, de manière à ce que les effets de bord soient négligeables.

Association de résistances L'analogie mathématique a pour conséquence : les résistances thermiques s'associent comme les résistances électriques. Deux résistances thermiques en série sont traversées par le même flux thermique. Deux résistances thermiques en parallèle ont même différences de température à leurs extrémités.

Deux résistances thermiques en série sont équivalentes à une résistance égale à leur somme. Deux conductances thermiques en parallèle sont équivalentes à une conductance égale à leur somme.

Ordre de grandeur En pratique, on veut R_{th} grand pour. Par exemple, la résistance thermique d'une vitre d'épaisseur $e = 5,0\text{mm}$ et de surface $S = 1,0\text{m}^2$ vaut

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda_{\text{verre}} S} = 6,4 \times 10^{-3} \text{K.W}^{-1} \text{ avec } \lambda_{\text{verre}} = 7,8 \times 10^{-1} \text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1} \text{ On peut faire le bloc de cuivre.}$$

Résistance thermique du bloc de cuivre du chauffe eau Calcul et application numérique.

↓ *La diffusion n'est pas suffisante pour homogénéiser la température dans le chauffe-eau (odg). Qu'est-ce qui est différent dans le fluide, qui peut être mis en mouvement ?*

3 Convection thermique

3.1 Convection naturelle et convection forcée

La convection est un moyen de transport de la chaleur basé sur le déplacement d'un fluide. On souligne le lien avec le transport de matière. Dans la mesure où ce fluide peut se déplacer rapidement en emportant de la chaleur avec lui, ce mode de transport est beaucoup plus rapide que le transport diffusif.

Equation de la chaleur dans un milieu en mouvement Remplacer la dérivée temporelle par la dérivée particulaire, identifier le terme de d'advection.

On distingue deux types de convection :

La **convection forcée** Le mouvement du fluide/champ de vitesse est imposé, typiquement par un ventilateur ou une pompe. Ce type de convection est beaucoup plus efficace que la convection naturelle.

La **convection naturelle** vient du couplage avec les équations de Navier-Stokes (couplage à travers $\rho(T)$). Lorsqu'un fluide est soumis à un gradient de température, un gradient de densité va apparaître qui peut entraîner une mise en mouvement du fluide. Ce mouvement va alors être appelé convection naturelle. Notons que selon la géométrie, ce mouvement peut ne pas participer aux transports de chaleur.

Temps typique de convection $\tau = L/v$. Par exemple, pour une casserole, $v = 1\text{cm/s}$, $L = 10\text{cm}$, on trouve 10s, ce qui est plus rapide que la diffusion. Nombre de Péclet ?

3.2 Loi de Newton

Dans le cadre de la convection forcée, le fluide à la surface de l'interface devient prépondérant. Dans le cadre d'un fluide visqueux, le liquide tend à adhérer à la surface du solide, il va donc y avoir formation d'une couche de fluide immobile : on l'appelle couche limite. Comme cette couche est immobile, le transfert thermique va se faire de manière diffusive. [On montre un profil réel et la modélisation](#)

Loi de Newton On peut exprimer le transfert thermique au travers de la couche limite de la même manière que pour le calcul du transfert thermique au travers du mur en supposant un contact parfait. Le flux thermique surfacique du solide vers le liquide est donc [expression]. On donne alors la loi de Newton [expression]. h est une constante qui dépend du fluide et de l'écoulement. Il dépend également du type de convection : en effet, on peut également utiliser ce type de loi dans le cadre de la convection naturelle. C'est pourquoi on préfère faire sécher son linge par grand vent. C'est aussi le principe du sèche-cheveux qui ne se contente pas de chauffer. Il est donc plus élevée en convection forcée (a priori). Des ordres de grandeur sont donnés dans le [tableau].

Résistance thermique de convection La résistance thermique de convection est donnée par $R_{cv} = \frac{1}{hS}$, en kelvins par watt.

4 Application au chauffe-eau solaire

Objectif Le but est d'obtenir le rendement d'un chauffe-eau solaire [schema], avec une modélisation minimale mais qui se veut quand même réaliste. Les trois modes de transferts thermiques interviennent. Une plaque métallique accumulatrice (épaisseur e) dont la surface est absorbante et légèrement réfléchissante (R) reçoit le rayonnement solaire surfacique net $(1 - R)\phi_{sol}$. Nous négligeons, devant ce flux, le rayonnement émis par cette même surface (basse température). En revanche, nous considérons l'échange conducto-convectif de la plaque vers l'extérieur (flux surfacique : $\phi_C = h_1(T_{haut} - T_{ext})$). Nous notons k la conductivité thermique de la plaque. La surface inférieure de la plaque est en contact avec le fluide caloporteur qui s'écoule, de gauche à droite, selon l'axe (Ox) (canal de bh , et de longueur L). La surface inférieure de ce canal est supposée assez correctement isolée (laine de verre) pour qu'il soit licite de négliger toute fuite thermique (vers le bas).

Le cuivre a une épaisseur e , une largeur b et une longueur L .

Hypothèses On fait les hypothèses suivantes

- Régime stationnaire.
- La température de la plaque métallique, bonne conductrice de la chaleur, ne dépend que de z (modèle 1D), ainsi, T_b et T_h sont uniformes dans le plan horizontal.
- Au contraire, nous supposons que la température du fluide ne dépend que de x (entrée à T_1 et sortie à T_2 , débit volumique Q).
- Dans le fluide, le transport convectif domine le transport diffusif.
- Le rayonnement émis par la plaque est négligé.
- Pour le fluide, $u = cT$ (massique).

Objectif Nous souhaitons exprimer la puissance thermique utilisable ainsi que le rendement du convertisseur.

Inconnues et équations Les variables d'entrée sont le flux solaire ϕ_{sol} , la température du milieu extérieur T_{ext} , la température T_1 et le débit Q . Les inconnues sont T_{haut} , T_{bas} , P_{th} la puissance transmise du panneau au fluide. Les 3 équations sont : 2 équations de conservation du flux thermique, appliqué au cuivre et 1 équation bilan pour le fluide en mouvement.

Résolution On écrit la conservation du flux vertical pour le cuivre [calcul] (en régime stationnaire), qui fait apparaître la température moyenne du fluide. On la calcule avec un bilan pour le fluide [calcul]. Avec une approche électrique (théorème de Millman et pont diviseur de tension), on peut calculer les températures hautes et basses de la plaque. *Si en manque de temps, après le bilan, on peut balancer les résultats.* On donne l'AN pour le rendement.

Commentaires Dépendance en λ , e , h ,. Le rendement de 0.7 est réaliste mais plutôt basse (des chauffe-eau solaires peuvent atteindre 0.9). La puissance perdue a servi à chauffer l'air environnant la plaque : on peut être jouer sur l'état de surface pour réduire h_1 et donc les pertes.

Conclusion

Ouverture : cf LP 18 et stage de L3.

Compléments/Questions

Ailette de refroidissement Refroidissement par conducto-convection.

Passage

Plan

Questions

- Expliquer h physiquement, quelle est la différence entre convection naturelle et convection fermée? Estimer l'épaisseur de la couche limite. On équilibre $\nu \text{grad } T$ avec D laplacien T .
- L'analogie thermique-électrique peut être mentionnée si l'on introduit la notion de résistance thermique. Notons qu'elle est aussi à la base des simulations de situations thermiques 2D complexes (pour l'estimation de pertes thermiques ou la caractérisation de performance de refroidissement). On utilise pour cela du papier rhéologique de grande résistance, les isothermes sont réalisées par de la laque d'argent. Un voltmètre permet de tracer les isothermes.
- Dans le cas des métaux, le transport conductif électronique domine le transport phononique du réseau.
- Équation de conservation de l'énergie (ou enthalpie). L'écriture d'un bilan énergétique suggère naturellement de s'appuyer sur le premier principe de la thermodynamique. Dans le contexte qui nous intéresse se pose alors le problème du travail reçu par le système. On peut alors se placer dans le cas d'un système à volume fixé (par des contraintes extérieures). Une situation plus courante consiste à considérer que c'est la pression extérieure qui est fixée (par exemple la pression atmosphérique), le bilan portera alors sur l'enthalpie et C_p se substituera à C_v . La différence sera sensible pour les phases gazeuses
- Là encore, un bilan inconnues-équations s'impose préalablement à tout développement. Après avoir remarqué que les équations de la dynamique (champ de vitesse) et de l'énergie (champ de température) sont couplées ($\rho(T)$), on peut envisager deux situations pratiques : la convection forcée et la convection libre. Dans le cas de la convection forcée on considère que le champ de vitesse est fixé indépendamment de celui de la température (ce qui revient à dire que l'effet moteur n'est pas la température). Dans le cas de la convection libre c'est la température, via son influence sur la masse volumique du fluide, qui est l'effet moteur. Le problème est mathématiquement très complexe. Dans certains cas on peut ne tenir compte de la variabilité de la masse volumique qu'au niveau du terme moteur $\rho(T)g$ de l'équation de la dynamique, il s'agit de l'approximation de Boussinesq (notamment utilisée pour la modélisation de l'instabilité de Rayleigh-Benard).
- L'échangeur thermique (co-courant ou contra-courant) est une application très illustrative et simple de la convection forcée.
- Lorsqu'on met la main sur un barre en métal, elle nous semble généralement "froide" Or elle est à l'équilibre thermodynamique avec l'atmosphère et elle est donc à la même température que l'atmosphère (soit 25 C). La sensation de froid qu'on ressent en touchant un barre en métal provient du flux conductif qui est plus intense entre le métal et notre peau qu'avec l'air, et que nous sommes naturellement à une température plus élevée (soit environ 37 C) que la barre.
- Définition de la température pour un petit nombre de particules : lien avec la définition de la température en thermodynamique, en physique statistique et cinétique. Interprétation du Laplacien en terme d'anomalie locale (cf. BUP Sivardière). Définition de la chaleur. Loi de Fourier : cas non-linéaire, anisotrope, inhomogène. Exemples de processus diffusifs couplés. Exemples de solutions non-stationnaires de l'équation de la chaleur. Notion d'effusivité.
- Dépendance en T de la conductivité thermique? Croit avec T dans les métaux? Ca dépend? (Wiedemann Franz).

Convection seulement pour les fluides?

Définition d'un corps noir ? Est-ce que ça existe en vrai ? Absorbe tout le rayonnement reçu et en émet une certaine partie.

Non, corps gris, il faut prendre en compte leur émissivité

Pourquoi avoir considéré l'eau comme un corps noir, alors que ce n'est pas noir ? Dépend de la gamme de longueurs d'onde absorbée.

Définition des flux : cohérence de la présentation (flux scalaire, vecteur densité de courant, qu'est-ce qu'il se passe si le \mathbf{j} est normal à la surface) ? Grandeur par unité de temps par unité de surface, et partir du scalaire pour aller au vectoriel. Ici, il on a un débit d'énergie.

Origine physique de la conduction ? Échange par collisions de particules (= transfert désordonné)

Pourquoi les métaux sont de bons conducteurs thermiques et électriques ? Loi de Wiedemann, les électrons conduisent l'énergie thermique et électrique.

Démonstration de la loi de Fourier ? Quelle est la grandeur transférée ? On transfère l'énergie des électrons. On regarde la vitesse des électrons et on peut y arriver. Libre parcours moyen qu'on peut relier à la température.

Lien énergie-Température, échelle microscopique-macroscopique ?

Différence isolant-mauvais conducteur ? Pas vraiment de valeur seuil, ce n'est pas forcément un critère physique, c'est isolant au sens "utilisé" (attention lors de la présentation des OdG, juste donner eau-air-cuivre et éventuellement laine de verre

Pourquoi ces limites pour la loi de Fourier ? Qu'est-ce qu'il se passe si le milieu n'est pas isotrope ? Exemple d'un tel milieu ? Si on a pas un gradient faible en température ? Si variations trop rapides ?
Pas isotrope = Tenseur, exemple du graphite
Gradient fort = Plus la linéarité, développement à l'ordre 2 ou 3 (cf optique non-linéaire)
Gradient varie trop rapidement = Phénomène de retard, il faut une formule type potentiel retardé.

Est-ce qu'on peut inverser le temps pour une équation de diffusion ? Non, phénomène irréversible.

Résistance thermique : est-ce que résistance = rapport différence de températures sur flux est valable tout le temps ? Non, c'est strictement valable en régime stationnaire, il faut être en ARQS (régime quasi-stationnaire), il faut discuter des échanges de temps.

Analogie thermique/électrique : tu as parlé de débit, débit de quoi ? i : débit d'électron, et flux : débit d'énergie thermique.

Est-ce qu'on peut définir une capacité thermique, une inductance thermique ? On doit pouvoir : Condensateur = objet avec haute capacité calorifique, inductance pas évident, il n'y en a pas
Attention à la limitation aux analogies !

Plongeur : si y a pas de combinaison ? Il peut rester moins longtemps sous l'eau (une heure environ).
Il faudrait enlever la résistance de la combinaison et voir comment varie le coefficient conducto-convectif.

Que devient la résistance en cylindrique (gradient en cylindrique) ? Attention à la courbure, cela donne une erreur de 10% pour le calcul de la résistance, attention aux chiffres significatifs

Matériau de la combinaison ? Pourquoi isolant ? Néoprène = caoutchouc avec des pleins de bulles d'air donc bon isolant
C'est la même chose pour la laine de verre et le polystyrène expansé.

Pour une ailette de refroidissement : surface de conduction, de convection ? Convection : surface en contact avec le fluide.

Application fondamentale de la convection en TP ? Anémomètre à fil chaud, h dépend de la vitesse (avec le nusselt, le prandtl, notion de couche-limite)

Loi de Newton : pourquoi conducto-convectif? Modèle pour trouver h ? Couche limite au voisinage de la plaque dans laquelle il y a de la diffusion thermique. On a donc couche limite = conduction qui relie au mouvement de convection qui fait en sorte que gradient de température constant aux bornes de la couche limite

Loi de Fourier = phénoménologique, cas de Stefan et Wien? Origin de la loi de Planck? Loi de Planck : Calcul thermo mais avec quantification des échanges d'énergie. Bose-Einstein plus tard.

Tu as dit que la convection est plus efficace que la conduction : ODG? que comparer? Temps qui faut pour une certaine élévation de température, par convection et par conduction (HPrépa).
Exemple du thermos (on peut comparer les influences des différents flux)

Origine du rayonnement? Pourquoi pas besoin de milieu? Onde em

Exemple d'actualité pour le rayonnement? Comment ça marche? Effet de serre, couche de gaz qui absorbe le rayonnement infrarouge émis par la terre (corps noir qui ne rayonne pas dans les mêmes longueurs d'onde que le Soleil) et le renvoie en partie vers le sol, d'où le réchauffement. (gaz à effet de serre absorbent dans l'infrarouge donc les rayons du soleil passent)
exemple du verre qui stoppe que les UV, on ne bronze pas derrière du verre

Loi de Wien : d'où vient-elle? Dérivée de la loi du rayonnement du corps noir de boltzmann

Autre application (cosmologique) du corps noir? Determiner la température des étoiles et du fond diffus cosmologique (rayonnement fossile)

Commentaires