

27 juin 2020

LP19 - Bilans thermiques : flux conductifs, convectifs et radiatifs

Gauthier Legrand et Francis Pagaud

27 juin 2020

Bibliographie

- http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=%206012
BUP n°781 page 297 "Introduction de quelques notions sur les transferts thermiques"
- Thermodynamique, **Olivier, Gié** les deux derniers chapitres
- Physique tout-en-un MP-MP*, **Salamito, Sanz** chapitre 23
- Thermodynamique PC-PSI, **Choimet** (Précis Bréal) pas mal mais moins complet que le Dunod
- <https://sciencetonnante.wordpress.com/2020/02/07/la-temperature-ressentie/>
- Physique Tout-en-un MP-MP* (ancien programme), **Marie-Noëlle Sanz, Bernard Salamito** (Dunod)
- cours MP <http://www.seigne.free.fr/Cours/TransfertTherm.pdf>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature_ressentie

Pré-requis :

- Équation de la chaleur
- Notions des modes de transfert thermique (terminale S)
- Loi de Stefan et de Fourier
- Équilibre thermodynamique local

Table des matières

1	Différents transferts thermiques	2
1.1	Conduction	2
1.2	Convection	4
1.3	Rayonnement	5

2 Etude d'un capteur solaire	6
2.1 Régime transitoire / effet non stationnaire	6

Commentaires du jury

2017 Il ne faut pas oublier de faire des bilans thermiques dans cette leçon qui ne consiste pas en un catalogue des divers flux.

2015 Le traitement d'au moins un exemple mettant en jeu plusieurs mécanismes de transferts thermiques est l'un des objectifs de cette leçon.

Introduction

Remarques personnelles (F) : 30 min c'est short, je ferais une grande partie par phénomène et notamment une confrontation des phénomènes conduction-convection dans le II/ Convection (avec notamment l'exercice du Olivier p. 402).

Reste à faire python, slide, vérifier les odg et les unités

La grandeur importante pour le corps humain n'est pas vraiment la température mais plutôt une grandeur qui lui est reliée : le flux thermique. En effet à 25°C dans l'air on est bien, mais pareil dans l'eau on a vite froid.

Glaçon qui fond plus ou moins vite selon la surface sur laquelle on le pose : poêle vs polystyrène. Vidéo : <https://youtu.be/c4KRw0yrNPw?>. Sinon, on a ça pour coller plus à l'intro : https://www.youtube.com/watch?v=_hHFGP4TpfU, le cube hors de l'eau fond moins vite. (la vidéo est pas très claire : le trait pour le niveau d'eau peut porter à confusion)

Problématique :

1 Différents transferts thermiques

L'idée de cette partie est de tenter de donner une justification de la notion de température ressentie qu'on nous donne à la météo.

1.1 Conduction

Source : Dunod MP chapitre 23

"La conduction thermique est le mode de transfert thermique entre deux systèmes séparés par un milieu matériel immobile, par exemple une paroi solide. Le transfert d'énergie résulte des collisions entre les particules microscopiques (molécules ou atomes) des systèmes et celles de la paroi. Ces particules sont animées d'un mouvement d'agitation thermique. Les particules du système ayant la température la plus élevée (« système chaud ») ont une

énergie cinétique d'agitation thermique supérieure à celle du système ayant une température plus basse (« système froid »). Lors des chocs, les premières cèdent de l'énergie aux particules de la paroi alors que les deuxièmes reçoivent de l'énergie de la paroi. Dans la paroi l'énergie est transportée de proche en proche par les vibrations des particules qui sont liées entre elles. Par exemple le transfert thermique à travers les murs d'une maison ou à travers le fond d'une casserole est un transfert conductif."

- On introduit alors la notion de courant thermique tel que $\delta Q = \vec{j}_{th} \cdot \vec{dS} dt$. Ce courant s'exprime en $W \cdot m^{-2}$ et correspond au flux surfacique thermique conductif.
- La loi de Fourier est une loi phénoménologique linéaire, qui définit la conductivité thermique λ du matériau $\lambda > 0$ **témoigne de l'irréversibilité de la conduction (cf Dunod page 764). Les précisions sur les conditions d'application de cette loi sont dans le Diu.**
- **Sur slide** quelques odg (et sa dépendance avec la température?) si on est joueur on peut dire que pour les métaux une bonne approximation est de considérer que $\lambda \propto \sigma$ la conductivité électrique, cf loi de Wiedemann et Franz
- On se place dans un régime stationnaire (ou au moins en ARQS) pour pouvoir utiliser l'analogie électrocinétique.
- Dans ce cas $\text{div} \vec{j}_{th} = 0$ le flux est conservatif et a la même structure algébrique que la densité de courant, on peut donc formellement dresser une analogie
- On introduit alors la notion de résistance thermique **cf Dunod page 751** → parler association série / parallèle

On donne alors l'ODG du corps humain avec et sans vêtement. On considère que le corps humain est environ à 37°C et que c'est sa peau qui le sépare de l'extérieur sur une épaisseur $e \simeq 1\text{cm}$ (la peau est globalement de l'eau). On considère que la surface de la peau est de 2m^2 (cf https://fr.wikipedia.org/wiki/Surface_corporelle). La température extérieure est de 25°C

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} = \frac{10^{-2}}{0,6 \times 2} \simeq 8.10^{-3} \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\text{Donc le flux sortant est } \Phi = \frac{T_{\text{corps}} - T_{\text{ext}}}{R_{th}} \simeq 1440\text{W}$$

Quand on s'habille on ajoute une couche de résistance thermique en série (car entre les dipôles *épaisseur d'isolant thermique* il y a le même potentiel *température*). On considère la même épaisseur e d'une couche de laine $\lambda = 0.04\text{W/m/K}$, sur la même surface S (change pas grand chose de prendre en compte l'épaisseur supplémentaire)

Ainsi la résistance totale est cette fois $R_{th} = R_{th}^1 + R_{th}^2$ avec $R_{th}^2 \simeq 1,25 \times 10^{-2} \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ et donc le flux sortant est $\Phi \simeq 90\text{W}$

Ces odg sont à comparer avec les 100 W que fournit le corps humain (calories que l'on brûle quand on est au repos). Il ne faut pas oublier que le modèle reste très grossier : on considère qu'on est intégralement recouvert d'habits ce qui n'est pas vrai (le visage et les mains notamment). Dans ce cas il faut considérer séparément les flux émis (et donc calculer séparément les résistances thermiques) de chaque partie du corps selon qu'elle soit habillée ou non. Ainsi on aurait $\Phi_{tot} = \frac{\Delta T}{R_{th}^{\text{habillé}}} + \frac{\Delta T}{R_{th}^{\text{peau}}}$

$$\Phi_{tot} = \frac{\Delta T}{R_{th}^{\text{habillé}}} + \frac{\Delta T}{R_{th}^{\text{peau}}}$$

Ça fait quand même bizarre de mettre l'équation de la chaleur en pré-requis et de

détailler autant le transfert thermique. Si on peut faire la fin de la leçon sans l'équation de la chaleur c'est cool, sinon il faudrait l'introduire ici (en l'admettant peut-être?). À la limite on peut l'introduire au moment de faire l'exercice quand on devra faire le bilan des transferts

Transition : Dans la vie quotidienne on a un plus grand ressenti de froid quand il y a du vent. La convection est un moyen très efficace de transfert thermique

1.2 Convection

Source : BUP + Olivier page 395 (+ Physique Tout-en-un MP·MP* (ancien programme), Marie-Noëlle Sanz, Bernard Salamito, Dunod page 815???)

Le transfert convectif est le transport d'une quantité physique, lié à un transfert macroscopique de masse au sein du système. Le point important différenciant ce mode de transfert du transfert conductif est donc le transport macroscopique de matière. Comme le transfert convectif est lié à un mouvement, il est défini par rapport à un référentiel donné et de ce fait dépend du choix de ce référentiel.

- convectif Si c'est le système qu'on étudie qui est en mouvement alors il faut considérer une dérivée convective de la chaleur, et l'équation de la chaleur est couplée aux mouvements du fluide qui sont donnés par l'équation de Navier-Stokes. C'est un problème très compliqué que l'on n'étudiera pas dans cette leçon. (convection au sein du fluide lui-même)
- conducto-convectif On va plutôt considérer que le système étudié est en contact avec un fluide en mouvement et regarder comment cela modifie les échanges thermiques entre le système et le fluide. (au contact d'un solide)

Justification de la loi de Newton qui donne le flux total $\Phi = hS\Delta T$. On le fait dans le cas simple pour avoir un ordre de grandeur. Les échanges thermiques sont très rapides à cause des turbulences, on considère donc une valeur moyenne temporelle (pas d'og sur les échelles de temps).

Sur slide : Profil de température du BUP.

En pratique ce qui se passe est complexe et la loi est surtout phénoménologique : on trouve le coefficient h expérimentalement.

- le coefficient h augmente avec la vitesse du fluide, c'est pour ça qu'on utilise des ventilateurs mais du coup ça ne devrait plus marcher si la température de l'extérieure est plus élevée que celle de la peau. Il faut en effet prendre aussi en compte l'évaporation de l'eau que l'on respire qui est favorisée avec le ventilateur. L'évaporation étant endothermique cela refroidit le corps.
- Des lois phénoménologiques donnent la valeur de h en fonction de la vitesse sous la forme $h = h_0 + A\sqrt{v}$. Dans le cas des hautes vitesses c'est ce phénomène qui prédomine et on peut négliger la conduction association en série des résistances ? le h_0 prend-il déjà en compte la diffusion ?

Dans le cas la résistance thermique est $R = \frac{1}{Sh}$ (le flux surfacique est $\phi = h\Delta T$ donc $R = \Delta T/\Phi = \Delta T/(\phi*S) = 1/(h*S)$), et on peut calculer la température effective telle que $h(v)(T_{\text{corps}} - T_{\text{ext}}) = h(v=0)(T_{\text{corps}} - T_{\text{ressentie}})$ c'est à dire qu'on cherche la température

telle qu'on ait le même flux pour un vent de vitesse nulle. Typiquement on a $R_0 = 0.1$ et $R(v = 50\text{km/h}) = 0.05$ en $\text{W/m}^2/\text{K}$ (Science étonnante) et on trouve un température ressentie de 15°C pour un vent à 50 km/h et une température de 25°C .

En pratique il faut ajouter en série la résistance des vêtements et l'effet est moins grand, mais il faut quand même considéré qu'une partie du corps n'est pas isolée (mains, visage) donc c'est plus compliqué à évaluer pour que ça ait vraiment un sens. [Code Py intéressant à montrer ?](#)
Le problème c'est que ce code amène pleins de questions sursa modélisation...

Transition : On a vu la conduction et la convection. Ces phénomènes n'expliquent pas pourquoi on a plus chaud au soleil qu'à l'ombre.

1.3 Rayonnement

Source : Olivier page 459

ça peut être bien de faire ça en plan détaillé pour avoir le temps de traiter un exercice sympa. Sinon une autre possibilité c'est de traiter à fond l'histoire de température ressentie en complétant le modèle avec la résistance thermique due au rayonnement.

À la différence des deux précédents celui-ci n'a pas besoin de support physique. On donne la loi de Stefan qui n'est valide que pour un corps noir à l'équilibre thermodynamique (local est suffisant).

Python rayonnement du corps noir : on donne le spectre via la loi de Planck (en pointant λ_M via Wien), la couleur perçue (le code prend-il en compte la réponse spectrale de l'oeil?) et le flux surfacique via la loi de Stefan.

On donne l'ODG du flux surfacique reçu par la Terre via le rayonnement du Soleil

Calcul fait dans le Dunod de PC page 167

- $\phi_S = \sigma T_S^4$ donc le flux total est $\Phi_S = 4\pi R_S^2 \sigma T_S^4$
- le flux reçu surfacique reçu à la surface de la Terre est donc (section efficace) $\phi_T = \frac{\Phi_S}{\pi R_T^2} = \frac{4R_S^2}{R_T^2} \sigma T_S^4 \simeq \text{W}$
- En réalité ce n'est pas le flux que l'on récupère car on suppose ici une incidence normale, ce qui est rarement le cas pour le corps humain et un corps noir sur toutes les fréquences (alors que les rayons X, ben voilà...)

ODG si on a seulement le visage exposé au soleil, on reçoit un flux d'environ $\Phi = \phi_T S_{visage} \simeq 10\text{cm}^2 \times \phi_T$

C'est pour ça que les températures sont données à l'ombre parce que leur ressenti dépend énormément de la surface exposée au soleil et de son angle d'incidence.

Dans le cas où le corps noir est placé dans une enceinte il émet un flux σT^4 et reçoit un flux σT_P^4 (il faut que le corps noir soit convexe sinon il reçoit une partie de son propre flux, et qu'il soit petit pour que le rayonnement du corps noir ne perturbe pas le rayonnement de l'enceinte).

Dans la limite où $T \simeq T_P$, on peut linéariser le flux surfacique sortant du corps noir $\phi = \sigma(T^4 - T_P^4) \simeq 4T_P^3 \sigma(T - T_P)$ on identifie comme pour la loi de Newton $h = 4\sigma T_P^3$ on peut aussi prendre T ou $T_m = \frac{T+T_P}{2}$ à la place de T_P ça change pas grand chose.

Pour l'exercice on considère qu'on se met à l'ombre pour ne pas avoir le rayonnement du Soleil.

Sur slide on récapitule tout en disant quel phénomène prédomine selon le domaine de la physique considéré

Transition : appliquons maintenant tout ceci

2 Etude d'un capteur solaire

Peut-être des trucs biens dans le Portelli ?

Source : Olivier page 447 + Physique Tout-en-un MP·MP* (ancien programme), Marie-Noëlle Sanz, Bernard Salamito, Dunod page 867

Si on présente le capteur solaire (ce qui est très tendu en 40 min !) : on veut calculer son rendement, càd le flux porté par le fluide caloporteur par rapport au flux solaire incident. On fait tout en surfacique.

Hypothèses :

- Tout est en conducto-convectif au niveau des interfaces liquide-solide.
- Le verre est transparent au Soleil mais corps noir pour le reste.
- Rayonnement de l'atmosphère \sim rayonnement d'équilibre thermique.
- Rayonnement de l'atmosphère réfléchi par une couche métallisée : la laine de verre.
- Températures proches, simplification de la loi de Stefan

Pour la résolution, le raisonnement est détaillé et on peut s'appuyer dessus. Sinon on peut calculer les températures successives avec des résistances thermiques, ce qui sera bien plus efficace et simple !

On peut ré-écrire l'ensemble $\Phi_5 = \frac{T_F - T_0}{\frac{1}{h_F} + \frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h}}$ et $\Phi_4 = \frac{T_0 - T_F}{R_1 + R_2} + \Phi_S \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ si ça nous intéresse.

2.1 Régime transitoire / effet non stationnaire

Source :

Repartons du plus général, l'équation de la chaleur. Elle s'écrit dans le cas dans le cas général :

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\text{grad}} T \right) = \text{div} \left(\lambda \vec{\text{grad}} T \right) - \frac{\sigma}{w} (T^4 - T_0^4)$$

à laquelle il faut combiner les équations de Navier-Stokes.

On va simplifier le problème qui est pour l'instant trop compliqué.

Dans le Choimet et Olivier (physique Pc-PC*) il y a un exercice "L'âge de la Terre mesuré par Lord Kelvin" en gros c'est juste l'équation de la diffusion et connaissant à la température initiale on remonte à l'âge de la Terre. Ça parle pas de convection ni de rayonnement, mais on peut facilement ajouter le dernier je pense.

Sinon page 402 du Olivier il y a une application qui compare le temps de diffusion versus temps de convection en utilisant la loi de Newton.

Conclusion

Ouvertures possibles :

Au sujet du banc Kofler

Rien trouvé en biblio dessus. Voici le raisonnement :

- On considère un barre métallique de section carrée de côté w et de longueur L . On la considère comme un corps noir. En $x = 0$ la température est fixée à T_0 et en $x = L$ à $T_0 + \Delta T$. On suppose que la conductivité thermique varie peu sur l'échelle de température du banc (cent à deux cents degrés), on va donc faire une approximation à la Boussinesq $\lambda(T) = \lambda_0 + \alpha(T - T_0)$
- On peut faire tout le bilan depuis le début en considérant l'apport d'énergie $\delta Q = -\sigma(T^4 - T_0^4)w dx dt$ (approximation seule la surface supérieure rayonne).
- L'équation de la chaleur devient alors $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \right) - \frac{\sigma}{w} (T^4 - T_0^4) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 - \frac{\sigma}{w} (T^4 - T_0^4)$
- C'est le régime stationnaire qui nous intéresse. Ça se résout numériquement mais c'est compliqué. En tout cas il n'y effectivement aucune raison que le profil soit linéaire.

Commentaires pendant la prépa aux oraux

- flux thermique de rayonnement pour l'environnement est-il bien de la forme σT_0^4 ?
- Attention aux abus de langage, la chaleur est un échange on ne peut pas dire "transfert de chaleur"
- Pourquoi les métaux conduisent mieux la chaleur ? Diu thermo paeg 492 : ce sont les mêmes électrons qui participent au transferts thermique et électrique, beaucoup plus efficace que celui des atomes.
- être au taquet sur le corps noir, la démo de la loi de Wien et Stefan
- Etre au taquet sur l'effet de Serre et la température de la Terre.
- les angles solides pour le rayonnement
- BUP très intéressant sur l'effet de serre <https://www.hprevot.fr/plus-subtil.pdf>

Questions

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 j est normal à la surface) ? Grandeur par unité de temps par unité de surface, et partir du scalaire pour aller au vectoriel. Ici, 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-Franz, 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 quasistationnaire), 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 ? Origine 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 ? Déterminer la température des étoiles et du fond diffus cosmologique (rayonnement fossile)

•