Phénomènes de transport

Niveau : 2ème CPGE

Pré-requis :

- Diffusion thermique
- Thermodynamique
- Mécanique des fluides

Bibliographie :

- FFR

Introduction

Nous n'avons vu en cours de thermodynamique qu'un système tend vers des états particuliers que nous nommons états d'équilibre. Ainsi, si on place un système chaud (une maison) dans un thermostat froid (l'atmosphère), nous avons vu que la température du système tend vers celle du thermostat. Il y a donc un transport de la chaleur du système vers l'extérieur.

Observons cela de manière qualitative.

Experience Qualitative :
Diffusion d'une goutte d'encre (colorant alimentaire bleu) dans une boite de Petri (verre d'eau) remplie d'eau

A l'équilibre thermodynamique, l'encre est répartie uniformément dans l'eau, mais cet état n'est pas atteint instantanément. A l'inverse, la goutte s'étale particulièrement lentement (mais elle s'étale quand même). On agite le bêcher. La goutte se répartie alors très rapidement, l'état d'équilibre est vite atteint.
Nous venons qualitativement de mettre en évidence deux mécanismes de transport de l'encre. L'un, lent, à lieu spontanément même en l'absence de courant macroscopique. On parle de diffusion. Le second, plus rapide, advient en présence de courant macroscopique, lorsqu'on remue le milieu. On parle d'advection. Ce sont ces mécanismes que nous allons étudier aujourd'hui.

Présenter les différents modes de transport : Conduction / convection / rayonnement
Là on parle de conduction (thermique et particules)

I. Transport d'une grandeur conservée

A. Cadre physique

Les phénomènes de transport sortent intrinsèquement de la thermodynamique à l'équilibre, puisqu'on lève l'hypothèse d'homogénéité. Il n'y a pas de phénomènes de transport à l'équilibre. Pour pouvoir les étudier, on suppose l'équilibre thermodynamique local.

Ex : Température dans une pièce, météo, colorant dans le verre.

On dit qu'un système est à l'équilibre thermodynamique local (ETL) si on peut définir des sous-systèmes de taille mésoscopique qui sont à l'équilibre thermodynamique (si on les isole bru- talement, ils sont à l'équilibre).

La condition sur la taille d de ces sous-systèmes est $l_p \ll d \ll L$, où l_p est le libre parcours moyen et L la taille du système.
Ordre de grandeur : Pour l'eau (phase condensée), on prend pour l_p la distance moyenne entre particules $l_p \sim \left(\frac{\rho}{M}\mathcal{N}_A\right)^{-1/3} \sim 10^{-10}$ m. On suppose que $L \sim 10^{-1}$m
Alors $d \sim \sqrt{l_p \times d} \sim 1 \mu m$ **(attention ce n'est pas une formule officielle)**
On suppose que chaque molécule occupe un volume moyen $V_{molecule}$ donc $l_p = V^{1/3}$
Le volume occupé par une mole est : $V_{\text{molaire}} = \dfrac{M}{\rho}$ avec M masse molaire.
Donc, le volume par molécule est : $V_{molecule} = \dfrac{V_{molaire}}{\mathcal{N}_A}$
Par $\rho = 10^3\,\text{kg/m}^3$ et $M = 18 \times 10^{-3}\,\text{kg/mol}$ et $\mathcal{N}_A = 6.02 \times 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$

B. Quantité conservée et densité de courant

On s'intéresse à des grandeurs conservées, autrement dit des grandeurs extensives qui sont constantes pour un système isolé.
Il peut s'agir d'énergie, masse, charge, particules, … etc.
Si une grandeur conservée varie, c'est qu'il y a eu un échange avec l'extérieur.

On se focalise par la suite sur le nombre de particules.
Le système est noté Σ et la densité locale $n(\vec{r}, t)$. Le flux de particules sortant de Σ s'écrit : $d\Phi_n(\vec{r}, t) = \vec{j}_n(\vec{r}, t) \,.\, d\vec{S}$
Le vecteur $\vec{j}_n$ représente le nombre de particules qui traversent $d\vec{S}$ par unité de temps. On appelle ce vecteur la densité de courant de particules.
Plus de détails dans Marchetti Benjamin surtout pour le calcul d'après

C. Équation de conservation

On fait le bilan des particules que contient Σ :

$$N(t) = \iiint_V n(\vec{r}, t)\, dV \quad \text{et} \quad N(t + dt) = \iiint_V n(\vec{r}, t + dt)\, dV$$

À l'ordre 1 en dt on a : $N(t + dt) - N(t) = \displaystyle\iiint_V \frac{\partial n(\vec{r}, t)}{\partial t}\, dt\, dV$

Cette variation correspond aussi au nombre de particules qui sont sorties de Σ entre t et t+dt (avec $d\Phi > 0$ si flux sort du système) :

$$N(t + dt) - N(t) = - \oiint_S d\Phi dt = - \oiint_S \vec{j}_n \,.\, d\vec{S}\, dt$$

En utilisant le théorème de Green-Ostrogradski : $\iiint_V \vec{\nabla}.\vec{j}\,dV\,dt = \iiint_V \frac{\partial n(\vec{r},t)}{\partial t}\,dt\,dV$

Cette égalité est valable pour tout volume V , donc on trouve *in fine* l'équation de conservation du nombre de particules :

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \vec{\nabla}.\vec{j}_n = 0$$

Comment décrire un phénomène de transport concrètement et avancer vers la compréhension de cette équation ? Il faut décrire le comportement du milieu !

II. Phénomènes de diffusion

A. Équations de diffusion en physique

La diffusion est un cas particulier des phénomènes de transport. Il s'agit du mode de transport d'une grandeur sans vitesse d'ensemble. Pour décrire le comportement des milieux en réponse à une inhomogénéité, on cherche des lois phénoménologiques linéaires. Il est très probable que les "vraies" lois ne soient pas linéaires, mais il existe des plages où cette modélisation est acceptable.

Pour les particules, le vecteur densité de courant tend à réduire les inhomogénéités. Fick propose une loi en 1855 : $\vec{j}_n = -D\vec{\nabla}n(\vec{r},t)$

Cette loi (contrairement aux équations de conservation) est vraiment *physique*, car elle décrit ce qu'il se passe dans un milieu. Si on injecte dans l'équation de conservation, on obtient une équation de diffusion : $\frac{\partial n}{\partial t} = D\Delta n$

On a toujours pour cette équation : unicité de la solution et irréversibilité.

On retrouve des équations de diffusion dans différents domaines de la physique ! Faisons quelques comparaisons !

	Conduction thermique	Diffusion de particules	Diffusion de quantité de mouvement
Grandeur extensive transportée	Énergie	Nombre de particules	Quantité de mouvement (sans force extérieure)
Grandeur intensive non homogène	Température	Densité de particules	Vitesse
Équation bilan locale Conservation	$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} + \mathrm{div}(\vec{j}_Q) = 0$	$\frac{\partial n}{\partial t} + \mathrm{div}(\vec{j}) = 0$	$\frac{\partial p_x}{\partial t} + \mathrm{div}(\vec{j}_{p_x}) = 0$
Loi phénoménologique	Loi de Fourier $\vec{j}_Q = -\lambda\,\overrightarrow{\mathrm{grad}}(T)$	Loi de Fick $\vec{j} = -D\,\overrightarrow{\mathrm{grad}}(n)$	Loi de Newton $\vec{j}_{p_x} = -\eta\,\overrightarrow{\mathrm{grad}}(v_x)$
Équation de diffusion	$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c}\Delta(T)$	$\frac{\partial n}{\partial t} = D\Delta(n)$	$\frac{\partial p_x}{\partial t} = \eta\Delta(v_x) = \nu\Delta(p_x)$
Ordres de grandeur du coefficient de diffusion $(\mathrm{m^2\cdot s^{-1}})$	$D_Q = \frac{\lambda}{\rho c} \simeq 10^{-7}$ à 10^{-4}	$D \simeq 10^{-30}$ à 10^{-1}	$D_{p_x} = \nu \simeq 10^{-7}$ à 10^{-5}
Résistance associée (géométrie 1D)	$R_{th} = \frac{1}{\lambda}\frac{L}{S}$	$R_{part} = \frac{1}{D}\frac{L}{S}$	$R_{p_x} = \frac{1}{\nu}\frac{L}{S}$

Dans chaque cas, on part d'une équation de conservation puis il nous faut introduire une information sur la réponse du milieu. À chaque fois, il apparaît un coefficient de transport propre à un milieu. Ce qui est remarquable est qu'on obtient une équation de diffusion, avec un coefficient qui a toujours la même dimension : L^2T^{-1}

Ordres de grandeur :
$D_{eau} = 2 \times 10^{-9}\ m^2s^{-1}$ / $D_{Cu} = 1.2 \times 10^{-4}\ m^2s^{-1}$ / $\nu_{eau} = 10^{-6}\ m^2s^{-1}$
On peut calculer des temps caractéristiques avec $L^2 \sim D\tau$ pour des domaines différents

Exemple : Morceau de sucre dans le café : si on mélange pas à l'intérieur du café le transfert est diffusif.
Le coefficient de diffusion sucre dans l'eau est $D = 0.5 \times 10^{-9}\ \mathrm{m^2s^{-1}}$. Avec une tasse de taille 3cm on a un $\tau \sim 3$ semaines !! Il vaut mieux utiliser une cuillère pour ajouter un transfert convectif au transfert diffusif.

Recap de l'expérience qualitative du début :
On a essayé de déposer délicatement pour éviter les turbulences ; la goutte tombe quand même par gravité, ce qui concurrence la diffusion. Il y a, en effet, forcément de la convection naturelle qui joue aussi, même en l'absence d'une convection forcée. Si on considère qu'il n'y a pas d'advection liée au mouvement de la pipette, l'ordre de grandeur diffusif D ~ 10^{-6} m^2/s et L = 10^{-1} m donc τ = L^2/D ~ 10^4 s, soit 3 heures. On observe que c'est complètement homogène au bout d'une dizaine de minutes. C'est donc la convection naturelle qui domine les phénomènes de transports ici !
Donc la diffusion n'est pas suffisante.

B. Cas de la diffusion de particules

Le phénomène de diffusion moléculaire est très courant. On peut citer différentes observations physiques de la vie courante : étalement d'une tache d'encre sur un buvard, diffusion d'une odeur dans une pièce, diffusion des ions dans les piles et les électrolyseurs etc....
Il existe en fait deux moyens d'effecteur des transports de matière, l'un a son origine au niveau microscopique et l'autre au niveau macroscopique : la diffusion et la convection.

Experience :

C. Exemple de la diffusion thermique

Conclusion

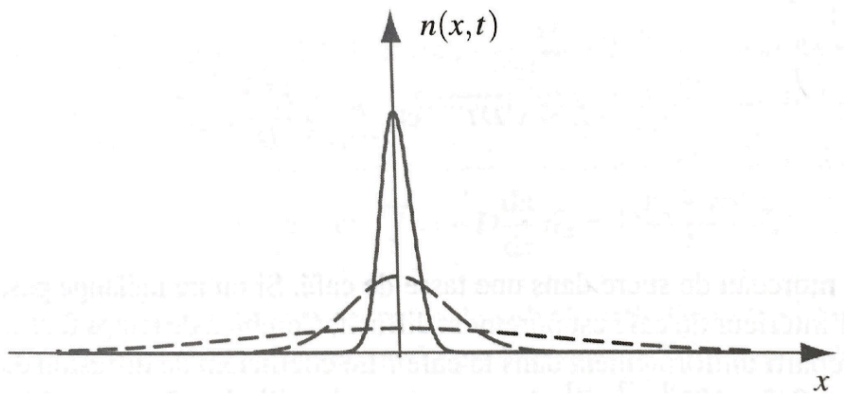
Soit une tache d'encre qui est déposée sur un papier filtre ; elle s'élargit progressivement sous l'effet de la diffusion.
Pour étudier cette expérience, on adopte un modèle unidimensionnel : la densité en particules colorées n ne dépend que de x et du temps t et le colorant est mis initialement en $x = 0$. La densité de particules $n(x,t)$ vérifie l'équation (32). La condition initiale du problème est : $n(x,0) = 0$ si $x \neq 0$. Les conditions aux limites sont : $n(\infty,t) = n(-\infty,t) = 0$ car le colorant progresse à vitesse finie.
Le calcule de la solution sort du cadre de la leçon ; elle s'écrit pour $t > 0$:

$$n(x,t) = \frac{A}{\sqrt{Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{Dt}\right) \tag{35}$$

où A est une constante dépendant du nombre de particules de colorant déposées sur le papier. La représentation graphique de la solution est donnée sur la figure. On observe la tache qui s'étale lentement ; la largeur de la courbe est en gros multipliée par trois chaque fois que la durée est multiplié par dix. On peut définir la largeur $L(t)$ de la tache à l'instant t par :

$$n\left(\frac{L}{2},t\right) = \frac{n(0,t)}{10} \Leftrightarrow L = 4\sqrt{\ln(10)}\sqrt{Dt} \tag{36}$$

L'aire sous la courbe $n(x,t)$ à t fixé représente le nombre total de particules déposées sur le papier. Elle est donc identique pour toutes les courbes.



Titre : LPT4. Phénomènes de transport

Présentée par : Constant Auclair **Rapport écrit par :** Alexandre Cipriani

Correcteur : Guillaume Bermudez **Date :** 11/12/2024

Bibliographie			
Titre	**Auteurs**	**Editeur**	**Année**
*Physique Tout-en-un PC–PC**	M. N. Sanz	Dunod	2014

Compte-rendu détaillé de la leçon

Niveau choisi : PC

Prérequis :

— Diffusion thermique

— Mécanique des fluides

— Second principe de la thermodynamique

Table des matières

1 Transport d'une grandeur conservée **2**
1.1 Cadre physique 2
1.2 Quantité conservée et densité de courant 2
1.3 Équation de conservation pour le nombre de particules 2

2 Phénomènes de diffusion **3**
2.1 Équations de diffusion en physique 3
2.2 Cas de la diffusion thermique 4

L'idée est de faire une leçon-bilan pour connecter plusieurs domaines à la fin de l'année de PC. Lorsque l'on s'intéresse aux phénomènes de transport, on entend le transport d'une grande physique ayant pour origine l'hétérogénéité d'une grandeur intensive. Ce phénomène est irréversible. *Expérience qualitative :* Constant verse une goutte de colorant alimentaire bleu dans un verre d'eau, sans vitesse initiale. La tache bleue "tombe" dans le verre mais s'étale dans le même temps.

1 Transport d'une grandeur conservée

1.1 Cadre physique

Les phénomènes de transport sortent intrinsèquement de la thermodynamique à l'équilibre, puisqu'on lève l'hypothèse d'homogénéité. Il n'y a pas de phénomènes de transport à l'équilibre. Pour pouvoir les étudier, on suppose l'équilibre thermodynamique local.

Exemples : Température dans une pièce, météo, colorant dans le verre.

On dit qu'un système est à l'**équilibre thermodynamique local** (ETL) si on peut définir des sous-systèmes de taille **mésoscopique** qui sont à l'équilibre thermodynamique (si on les isole brutalement, ils sont à l'équilibre).

La condition sur la taille d de ces sous-systèmes est $\ell_p \ll d \ll L$, où ℓ_p est le libre parcours moyen et L la taille du système.

Ordre de grandeur : Pour l'eau (phase condensée), on prend pour ℓ_p la distance moyenne entre particules $\ell_p \sim \left(\frac{\rho}{M}\mathcal{N}_A\right)^{-1/3} \sim 10^{-10}\ \mathrm{m}$. On suppose $L \sim 10^{-1}\ \mathrm{m}$. On peut typiquement considérer $d \sim 1\ \mu\mathrm{m}$.

1.2 Quantité conservée et densité de courant

On s'intéresse à des **grandeurs conservées**, autrement dit des grandeurs extensives qui sont constantes pour un système isolé. Il peut s'agir d'énergie, masse, charge, particules, ... Si une grandeur conservée varie, c'est qu'il y a eu un échange avec l'extérieur.

On se focalise par la suite sur le **nombre de particules**. Le système est noté Σ et la densité locale $n(\vec{r},t)$. Le flux de particules sortant de Σ s'écrit : $\mathrm{d}\Phi_n(\vec{r},t) = \vec{j}_n(\vec{r},t)\cdot\mathrm{d}\vec{S}$. Le vecteur $\vec{j}_n$ représente le nombre de particules qui traversent $\mathrm{d}\vec{S}$ par unité de temps. On appelle ce vecteur la densité de courant de particules.

1.3 Équation de conservation pour le nombre de particules

On fait le bilan des particules que contient Σ :

$$N(t) = \iiint_V n(\vec{r},t)\mathrm{d}V \text{ et } N(t+\mathrm{d}t) = \iiint_V n(\vec{r},t+\mathrm{d}t)\mathrm{d}V. \tag{1}$$

À l'ordre 1 en $\mathrm{d}t$, on a :

$$N(t+\mathrm{d}t) - N(t) = \iiint_V \frac{\partial n(\vec{r},t)}{\partial t}\mathrm{d}t\mathrm{d}V. \tag{2}$$

Cette variation correspond aussi au nombre de particules qui sont sorties de Σ entre t et $t+\mathrm{d}t$[1]. Autrement dit,

$$N(t+\mathrm{d}t) - N(t) = -\oiint_S \mathrm{d}\Phi\mathrm{d}t = -\oiint_S \vec{j}_n\cdot\mathrm{d}\vec{S}, \tag{3}$$

et en utilisant le théorème de Green-Ostrogradski on trouve :

$$N(t+\mathrm{d}t) - N(t) = -\iiint_V \vec{\nabla}\cdot\vec{j}_n(\vec{r},t)\mathrm{d}V\mathrm{d}t = \iiint_V \frac{\partial n(\vec{r},t)}{\partial t}\mathrm{d}V\mathrm{d}t. \tag{4}$$

Cette égalité est valable pour tout volume V, donc on trouve *in fine* l'équation de conservation du nombre de particules :

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot\vec{j}_n = 0}. \tag{5}$$

Comment décrire un phénomène de transport concrètement et avancer vers la compréhension de cette équation ? Il faut décrire le comportement du milieu !

1. Il faut faire attention aux signes ; ici $\mathrm{d}\Phi$ est positif lorsque les particules *sortent* du système, d'où le signe.

2 Phénomènes de diffusion

2.1 Équations de diffusion en physique

La diffusion est un cas particulier des phénomènes de transport. Il s'agit du mode de transport d'une grandeur **sans vitesse d'ensemble**. Pour décrire le comportement des milieux en réponse à une inhomogénéité, on cherche des **lois phénoménologiques linéaires**. Il est très probable que les "vraies" lois ne soient pas linéaires, mais il existe des plages où cette modélisation est acceptable.

Pour les particules, le vecteur densité de courant tend à réduire les inhomogénéités. Fick propose une loi en 1855 :

$$\overrightarrow{j}_n = -D\overrightarrow{\nabla} n(\overrightarrow{r}, t). \tag{6}$$

Cette loi (contrairement aux équations de conservation) est vraiment *physique*, car elle décrit ce qu'il se passe dans un milieu. Si on injecte dans l'équation 5, on obtient une équation de diffusion :

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot (-D\overrightarrow{\nabla} n) = 0 \Leftrightarrow \boxed{\frac{\partial n}{\partial t} = D\Delta n}. \tag{7}$$

On retrouve des équations de diffusion dans différents domaines de la physique ! Faisons quelques comparaisons !

Slide :

	Diffusion de particules	Diffusion thermique	Diffusion de quantité de matière
Équation de conservation locale	$\frac{\partial n}{\partial t} + \mathrm{div}\vec{j}_n = 0$	$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \mathrm{div}\vec{j}_Q = 0$	$\rho\frac{\partial v_x}{\partial t} + \mathrm{div}\left(\frac{\mathrm{d}\vec{F}_t}{\mathrm{d}S}\right) = 0$
Loi de réponse linéaire	$\vec{j}_n = -D\overrightarrow{\mathrm{grad}}n$ Loi de Fick	$\vec{j}_Q = -\kappa\overrightarrow{\mathrm{grad}}T$ Loi de Fourier	$\frac{\mathrm{d}\vec{F}_t}{\mathrm{d}S} = -\eta\frac{\partial v_x}{\partial y}\vec{e}_x$ Loi de Newton
Coefficient de Transport	D $(\mathrm{m}^2/\mathrm{s})$ Diffusivité	κ $(\mathrm{W/m/K})$ Conductivité thermique	η $(\mathrm{Pa.s})$ Viscosité dynamique
Coefficient de diffusion	D $(\mathrm{m}^2/\mathrm{s})$	$D_{\mathrm{th}} = \kappa/\rho c$ $(\mathrm{m}^2/\mathrm{s})$	$\nu = \eta/\rho$ $(\mathrm{m}^2/\mathrm{s})$
Équation de diffusion	$\frac{\partial n}{\partial t} = D\Delta n$	$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{\mathrm{th}}\Delta T$	$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \nu\Delta\vec{v}$

D'après Gey Lucas, Rossetti Sylvio, Leçon Phénomènes de Transport, ENS Lyon 2018

Référence de qualité discutable... Quitte à prendre des tableaux comparatifs, il y en a de très bien dans les ouvrages de référence / les TD de thermo de Montrouge.

Dans chaque cas, on part d'une équation de conservation puis il nous faut introduire une information sur la réponse du milieu. À chaque fois, il apparaît un coefficient de transport propre à un milieu. Ce qui est remarquable est qu'on obtient une équation de diffusion, avec un coefficient qui a toujours la même dimension, $L^2.T^{-1}$.

Ordres de grandeur : $D_{\mathrm{eau}} = 2 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{m}^2.\mathrm{s}^{-1}$, $D_{\mathrm{Cu}} = 1.2 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m}^2.\mathrm{s}^{-1}$, $\nu_{\mathrm{eau}} = 10^{-6}\ \mathrm{m}^2.\mathrm{s}^{-1}$. On peut calculer des temps caractéristiques avec $L^2 \simeq D\tau$ pour des domaines différents !

Simulation Python : Elle n'a pas fonctionné en direct, car l'ordinateur de la 302 n'a pas les packages de Montrouge !

2.2 Cas de la diffusion thermique

Expérience : Mesure de la conductivité thermique λ du cuivre (vieille version, présentée dans le montage n°38 de Marie-Louise). On fournit une puissance électrique $\mathscr{P} = \frac{U^2}{R}$ à l'une des extrémités d'un barreau de cuivre de longueur L. L'autre extrémité est au contact d'un réfrigérant qui maintient sa température constante.

On souhaite se placer en régime permanent : pour cela on calcule le temps typique $\tau \simeq \frac{L^2}{D_{\mathrm{th}}} = 5\ \mathrm{min}$. Le dispositif ayant été allumé au début de la leçon, le régime permanent est atteint.

Si toute la puissance électrique est fournie au barreau, alors on a :

$$\mathscr{P} = \frac{U^2}{R} = j_{\mathrm{th}} S = \lambda \frac{\Delta T}{L} S \Rightarrow \boxed{\lambda = \frac{LU^2}{RS\Delta T}} \tag{8}$$

Après l'intervention de Guillaume, le dispositif fonctionne et on mesure $\Delta T = 12.4\ \mathrm{K}$. Les incertitudes sont estimées avec la méthode de Monte-Carlo. On trouve : $\lambda = (476 \pm 9)\ \mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}$. C'est le bon ordre de grandeur, même si on est assez loin de la valeur attendue (300–400). Tous les cuivres sont différents.

Il existe d'autres modes de transport, comme la convection ou le rayonnement.

Questions posées par les enseignant·e·s, et réponses

Question : Tu as dit qu'il n'y avait pas de convection quand la goutte de colorant est mise dans le verre. C'est vrai ?
Réponse : J'ai essayé de déposer délicatement pour éviter les turbulences ; la goutte tombe quand même par gravité, ce qui concurrence la diffusion. Il y a, en effet, forcément de la convection naturelle qui joue aussi, même en l'absence d'une convection forcée.
Si on considère qu'il n'y a pas d'advection liée au mouvement de la piepette, l'ordre de grandeur diffusif $D \sim 10^{-6}$ m^2/s et $L = 10^{-1}$ m $\tau = L^2/D \sim 10^4$ s, soit 3 heures. On observe que c'est complètement homogène au bout d'une dizaine de minutes. C'est donc la convection naturelle qui domine les phénomènes de transports ici !
Cet exemple doit être utilisé pour dire que la diffusion n'est pas suffisante.

Question : Tu as dit que les phénomènes de transport sont hors-équilibre. Pourquoi y a-t-il toujours un courant qui apparaît ?
Réponse : Le système évolue vers un équilibre global, il évolue donc vers un état qui supprime les inhomogénéités.

Question : Dans les critères de l'ETL, est-ce que L représente vraiment la taille du système ?
Réponse : Il faut forcément être $\ll L$ pour l'approximation des milieux continus, mais il y a aussi des effets de gradients.

Question : Dans un liquide, ok pour dire que ℓ_p est la distance inter-particules. Et dans un gaz ?
Réponse : On s'attend à ℓ_p plus grand que la distance entre les particules, les choses sont plus compliquées à cause de la faible densité. Par analyse dimensionnelle, $\ell_p = \frac{1}{n\sigma}$ où n est la densité et σ la section efficace de collision.

Question : Quelle est la définition d'un flux ?
Réponse : C'est une quantité de particules (par exemple) qui passe par unité de temps à travers une surface S. Le vecteur $\overrightarrow{j}$ est la densité surfacique de flux.

Question : Y a-t-il d'autres équations de conservation vues en PC ?
Réponse : Oui, conservation de la masse, de la charge et de l'énergie interne (1er principe en diffusion).

Question : Mais du coup, la loi de Fick se démontre ou pas ?
Réponse : C'est une loi phénoménologique, c'est-à-dire la loi la plus simple qu'on puisse imaginer pour expliquer un phénomène. D est mesuré expérimentalement.
Une loi phénoménologique explique les résultats expérimentaux heuristiquement, et ne provient pas de principes fondamentaux. Introduites en prépa, les lois de conduction sont phénoménologiques. On peut donner un cadre plus général, la théorie de la réponse linéaire, pour unifier toutes ces lois mais finalement, elle est tout aussi phénoménologique, bien qu'on utilise le second principe pour montrer sa cohérence. On peut démontrer toutes ces lois à partir de la physique statistique, mais c'est très pédestre.

Question : Quel cadre permet d'unifier les relations qui font apparaître des gradients ?
Réponse : C'est la théorie de la réponse linéaire. On peut relier les différents courants qu'on observe (thermique, électrique, ...) par une matrice.
De manière générale, pour un ensemble de variables primitives (extensives) X_i $(U, N, V, Q, ...)$ et

leurs variables conjuguées (par l'entropie) $x_i = \left(\frac{\partial X_i}{\partial S}\right)_{x_{j\neq i}}$ *on a les flux* $\vec{j}_i$ *qui s'écrivent*

$$\vec{j}_i = L_{ij}\vec{\nabla}x_j, \quad \text{avec} \quad L_{ij} = L_{ij}.$$

Question : À propos des prérequis, tu as déjà fait la diffusion thermique et là on fait la diffusion de particules. Comment tu articules ?
Réponse : La diffusion de particules est au programme de PC. Avoir fait la diffusion thermique est un plus pour mieux comprendre : les étudiants ont déjà vu des équations de conservation et de diffusion, mais ici on fait des considérations plus générales.

Question : Tu utilises le nabla, qu'en dire par rapport au programme ?
Réponse : Les programmes recommandent d'utiliser les notations "grad", "rot" et "div" pour ne pas confondre les opérateurs. De plus, la notation peut faire croire qu'il suffit de faire des produits scalaires ou vectoriels avec le nabla pour avoir les opérateurs, ce qui n'est vrai qu'en cartésiennes. Je trouve toutefois la notation nabla plus cohérente à condition de bien montrer quelle opération est faite.

Question : Explique la loi de Newton.
Réponse : Lorsqu'il y a un gradient de vitesse dans un fluide visqueux, de la quantité de mouvement est diffusée depuis les zones de vitesse rapide vers celles de vitesse lente. L'équation de diffusion qu'on obtient est alors l'équation de Navier-Stokes lorsque le Reynolds est petit devant 1.

Question : Si cet exemple traite la diffusion de quantité de mouvement, pourquoi l'argument des dérivées n'est pas $\rho\vec{u}$?
Réponse : Le fluide est supposé incompressible. L'équation de Navier-Stokes n'est valable (avec le tenseur des contraintes qu'on connaît) que pour des fluides incompressibles. Sinon, il y a des termes plus compliqués.

Question : Peux-tu dériver l'équation de diffusion de la quantité de mouvement à partir de Navier-Stokes ?
Réponse : Il faut se placer dans le régime où le Reynolds est petit pour ôter la dérivée convective, et négliger les effets gravitationnels et de pression (par exemple prendre un écoulement orthogonal à $\vec{g}$).
Je ne recommande pas d'utiliser l'équation de diffusion de la quantité de mouvement, elle décrit une situation irréaliste ou le fluide n'est pas soumis à des forces de pression. Il y a bien une diffusion de quantité de mouvement dans les fluides, mais il y a également des puits et des sources de quantité de mouvement qu'on appelle dans le langage courant des forces.

Question : Le coefficient de diffusion thermique de l'eau est comment par rapport au cuivre ?
Réponse : Je m'attends à avoir une plus petite conductivité.
Et non ! Le transport de chaleur par les électrons libres est beaucoup plus efficace que par les collisions dans l'eau, bien que cette dernière soit moins dense.

Question : Qu'est-ce qui fait la différence entre diffusion et convection d'un point de vue phénoménologique ? Quelle grandeur introduire pour comparer les deux ?
Réponse : Cela dépend de la vitesse locale du fluide. Pour la diffusion, on a $L^2 \sim D\tau_d$. Pour la convection, $L \sim \tau_c u$. On peut donc introduire un nombre : $\frac{\tau_d}{\tau_c} = \frac{Lu}{D}$. C'est un nombre sans dimension analogue au nombre de Reynolds ! Le nombre de Reynolds est juste le rapport entre diffusion et convection de la quantité de mouvement.

Question : On peut résoudre facilement une équation de diffusion ?
Réponse : Non, c'est très délicat. Le plus souvent on utilise des résolutions numériques (je comptais le faire avec mon programme Python). Le profil typique est une gaussienne dont l'écart-type augmente avec le temps.

Question : Que dire de la conductivité électrique d'ailleurs ?
Réponse : Il y a beaucoup plus d'ordres de grandeur différents que pour la conduction thermique. C'est à cause de la théorie des bandes qui occasionne de gros changements de régime, contrairement à la diffusion.

Question : Comment fonctionne un thermocouple ?
Réponse : Il repose sur l'effet Seebeck et repose sur la théorie de la réponse linéaire. La densité de courant électrique s'écrit $\overrightarrow{j} = -\sigma\overrightarrow{\nabla}V + \alpha\overrightarrow{\nabla}T$. En circuit ouvert, la différence de tension est proportionnelle à la différence de température. Il faut utiliser deux métaux différents pour avoir une tension non nulle.

Question : Mais le boîtier du thermocouple donne également la température de chaque couple dans l'absolu, pourquoi ?
Réponse : Les thermocouples donnent la différence de température entre la soudure au bout du fil, et celle dans le boitier de mesure. Il y a dans le boitier une sonde de platine ou une thermistance pour avoir la température dans l'absolu.

Question : Tu as dit : $\overrightarrow{\nabla}T = \frac{\Delta T}{L}$. C'est une approximation ?
Réponse : C'est exact en régime stationnaire et en l'absence de pertes latérales sinon on a un profil semblable à celui de l'ailette de refroidissement.

Question : Du coup on sur ou sous-évalue λ ?
Réponse : Un raisonnement simple consiste à dire qu'on sur-évalue le flux thermique qui créée le ΔT et donc qu'on sur évalue j_q, bien que dans les fait, on aurait également tendance à sur-évaluer ΔT.

Question : Quelles sont les conditions aux limites de part et d'autre du barreau ?
Réponse : Du côté de la résistance chauffante, la continuité est celle du flux thermique (il s'établit une température unique en régime permanent, mais on ne la contrôle pas ; on contrôle le flux). Du côté du réfrigérant, la température est fixée et contrôlée.

Question : Quel processus permet, du côté de l'eau, les transferts thermiques ? Et qu'en déduire ?
Réponse : C'est la conducto-convection, ce qui fixe plutôt un flux. Puisqu'on fixe le flux en entrée, on doit aussi fixer le flux en sortie. Finalement, les températures et les flux sont tous continus en régime permanent. Dans cette étude, les conditions aux limites choisies ne changent pas la résolution du problème.

Question : Explique la méthode de Monte-Carlo.
Réponse : ... cf. Martincertitudes

Question : Quelle est l'erreur dominante, pourquoi ?
Réponse : Il y a une erreur systématique à cause de l'isolation imparfaite du barreau, et aussi à cause du thermocouple qui affiche une différence de température même sans chauffer. Sinon, l'erreur aléatoire dominante reste celle du thermocouple ($0.5\ \mathrm{K}$ sur $12\ \mathrm{K}$). Pour éliminer cette erreur systématique, on pourrait tracer une droite en faisant varier la puissance imposée au barreau.

Commentaires des enseignant·e·s

Remarque générale sur les bonnes pratiques

— Mettre plein d'ordres de grandeur et les mettre en regard et les interpréter.

— Systématiquement préciser les unités quand on introduit de nouvelles grandeurs.

— Il faut toujours faire une belle slide d'intro avec des images, et de conclusion en cas de manque de temps pour conclure. Surtout les docteurs car vous pouvez les préparer à l'avance !

— Attention aux ressources directement tirées d'internet, types plans des lyonnais et compagnie, ils contiennent parfois des bêtises (c'était le cas ici). Référez-vous aux ouvrages de référence ou à vos cours/TD !

Pour cette leçon en particulier :

Les points importants à faire passer

— le second principe implique que les inhomogénéités macroscopiques tendent spontanément à s'homogénéiser (équilibre thermodynamique) par le biais des des phénomènes de transport ;

— 3 types de phénomènes de transport : diffusion, convection, rayonnement ;

— le cadre unifié avec l'équation de conservation qui est toujours la même pour toute grandeur conservée ;
Note : Presque tout le programme de PC est construit autour des équations de conservation ! !

— les lois d'échelle : $\tau \sim L/U$ en convection et $\tau \sim L^2/D$ en diffusion ;

— les phénomènes diffusifs sont généralement plus lents dans les fluides que les autres ;

— cette leçon doit être riche en ordres de grandeurs et en exemples jolis pour pas faire catalogue.

Plan et choix pédagogiques

C'est une leçon délicate. Il ne faut pas être trop général sinon c'est imbuvable ou catalogue, mais il faut en même temps faire intervenir plusieurs domaines de la physique et plusieurs phénomènes de transport.

On ne peut pas traiter dans trois parties différentes la diffusion **et** la convection **et** le rayonnement mais il faut quand même les mentionner comme étant les trois différents types de phénomènes de transport et les définir.

Pour l'agreg docteurs, à cause de l'expérience quantitative, ce n'est pas vraiment envisageable de faire une partie entière sur la convection ou le rayonnement, par manque de temps et parce que ça dépasse le niveau agreg pour la convection.

Le plan doit être transversal mais sans catalogue : il faut bien montrer les analogies et différences [Jury 2015].

Vu le titre (Phénomène**s** de transport), il est nécessaire d'aborder de manière générale les trois types de transferts et de bien faire le lien entre les différents phénomènes de transports, par exemple avec les lois d'échelle en convection et en diffusion. [Jury 2016]

Vu le choix d'expérience (tout à fait adapté ici), une description plus approfondie de la conduction thermique en régime stationnaire (et éventuellement la notion de résistance thermique) aurait été nécessaire.

Pour ce qui est du calcul, celui-ci est bien, mais peut être fait plus simplement à 1D, plutôt que de sortir les intégrales triples. C'est tout aussi technique, c'est la même physique, mais ça fait gagner du temps et ça fait plaisir au prof de prépa (toujours faire plaisir au prof de prépa).

N'oubliez pas de bien préciser les hypothèses d'utilisation des lois de conduction (Fick, Fourier...).

Enfin, je ne recommande pas à l'utilisation de l'équation de diffusion de quantité de mouvement dans le cadre de la loi de Newton car elle est piégeuse (cf. questions)

Choix d'expérience pour les docteurs

— diffusion dans le glycérol (mais coton théoriquement et lente et peu spectaculaire), c'est tombé à l'écrit il y a 10 ans, donc un peu vieillot.

— conductivité thermique du cuivre (barreau loi de Fourier)

— conductivité électrique du cuivre (dans le cristallisoir, mais cela implique d'expliquer la loi de conduction de Wiedmann–Frantz dans les métaux),

— diffusion de charge (mais très longue),

— loi de Stefan,

— mesure du profil de température sur les barreaux de cuivre à la caméra thermique,

Dans l'expérience, il faut impérativement préciser l(es) incertitude(s) dominante(s).

Autres expériences qualitatives (liste non exhaustive)

— diffusion d'un colorant dans l'eau (attention à bien l'interpréter (cf. questions).

— convection avec des colorants (expérience à chercher chez les chimistes)

— thermographie infrarouge : faire joujou avec la caméra pour visualiser la diffusion (radiateur, plaque chauffante...)

Exemples d'éléments imposés

— (2024) Illustrer expérimentalement un phénomène de diffusion.

— (2024) Présenter la diffusion en profondeur d'une fluctuation périodique de température (effet de cave).

— (2024) Présenter et réaliser une expérience mettant en jeu le phénomène de conducto-convection.

— (2024 & 2023) Présenter et exploiter, à l'aide du code fourni, une simulation de la marche au hasard à une dimension d'un grand nombre de particules à partir d'un point et caractériser l'étalement spatial de cet ensemble de particules au cours du temps.

Titre : T3 : Phénomènes de transports

Présentée par : Théo Meier **Rapport écrit par** : Mathis Demouchy

Correcteur : Guillaume Bermudez **Date** : 29/11/2023

Bibliographie		
Titre	**Auteurs**	**Éditeur**
J'intègre physique PC/PC* tout en un (6e édition)	MN. Sanz	Dunod
Transferts thermiques, introduction aux sciences des transferts	J. Taine, JP. Petit	Dunod

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2e année

Pré-requis :
- Éléments d'analyse vectorielle
- 1er et 2nd principes de la thermodynamique
- Notion de volume mésoscopique

Introduction

En thermodynamique, on a étudié jusqu'à maintenant des systèmes à l'équilibre on va maintenant étudier des phénomènes hors équilibre.

Trois types de phénomènes de transport :
- Diffusion : Origine microscopique
- Convection : origine Macroscopique

Expérience : Goute d'encre dans de l'eau : mélange pour convection, laisse au repos pour diffusion

- Rayonnement : transmission via les ondes électro-magnétiques

Slides : Exemples de phénomènes de diffusions (déchets radioactifs, isolation) et de convection (allées de tourbillons de Von Kàrman[1], phénomènes météorologiques)

[1] *L'exemple des allées tourbillonnaires de Von Karman est un peu éloigné de la convection, c'est une instabilité purement hydrodynamique.*

I – Diffusion de la matière

1. Bilan de matière 1D

Fait le bilan de matière sur une tranche de matière 1D :

$$\begin{aligned} dN_{var} &= (n(x,t+dt) - n(x,t))Sdx \\ &= \frac{\partial n}{\partial t} Sdxdt \end{aligned}$$

$$dN_{ech} = -\frac{\partial j}{\partial x} Sdxdt$$

$$dN_{var} = dN_{ech} \Rightarrow \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial j}{\partial x} = 0$$

En 3D :

$$\frac{\partial n}{\partial t} + div(\vec{j}) = 0$$

2. La loi de Fick

$\vec{j} = -Dgr\vec{a}d(n)$, avec D le coefficient de diffusion en m^2/s

<u>Odg en m^2/s :</u> gaz 10^-6 à 10^-4, liquides 10^-12 à 10^-7, solides 10^-30 à 10^-16

<u>Hypothèses :</u>

- $||gr\vec{a}d(n)||$ suffisamment petit
- Milieu isotrope et ayant des propriétés physiques homogènes
- Variations temporelles lentes

⇨ $\frac{\partial n}{\partial t} = D\Delta n$

Equation pas invariant par t -> -t, rend compte de phénomènes irréversibles.

<u>Loi d'échelle :</u>

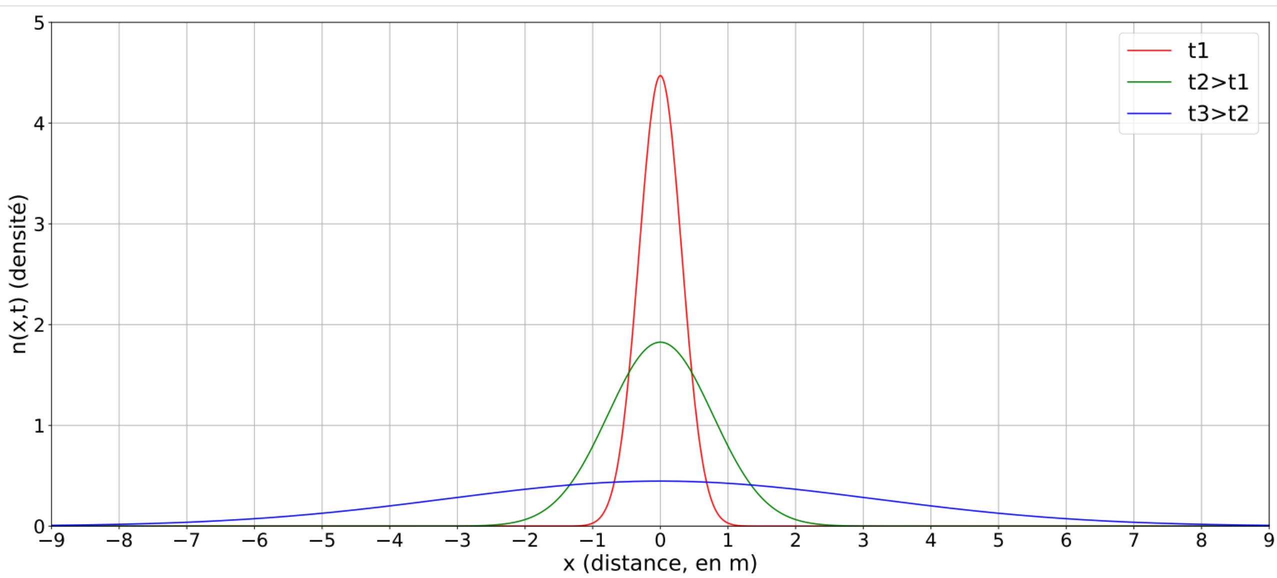
$$\begin{aligned} &\frac{\partial n}{\partial t} \approx \frac{n}{T*} \\ &\Delta n \approx \frac{n}{L*^2} \\ &\Rightarrow T* \approx \frac{L*^2}{D} \approx \frac{(3\times10^{-2}\ \mathrm{m})^2}{1\times10^{8}\ \mathrm{m^2/s}} \approx 10\ \mathrm{h} \end{aligned}$$

3. Etude d'une solution

Solution pour les conditions initiales :

$$\begin{cases} n(t=0, x\neq 0) = 0 \\ n(t, x=\pm\infty) = 0 \end{cases}$$

$$n(x,t) = \frac{A}{\sqrt{Dt}}\exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$



On retrouve la taille caractéristique obtenue grâce à la loi d'échelle, la forme correspond à celle qu'on attendrait, avec conservation du nombre total de particules.

II – Diffusion d'énergie thermique

1. Bilan d'énergie

Système V, fermé par surface S

Hypothèse :

- Equilibre thermodynamique local : T définie en tout point
- Pas de variation d'énergie mécanique
- Pas d'échange de travail

$$\begin{aligned} &dU = \delta Q \\ &\delta Q = \phi_{ech}dt = -\oiint \vec{j}\cdot d\vec{S}dt \\ &U = \iiint \rho c T d\tau \end{aligned}$$

⇨ $$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} + div(\vec{j}) = 0$$

2. La loi de Fourier

$$\vec{j} = -\lambda \vec{grad}(T)$$

λ : conductivité thermique (W/m/K)

<u>Hypothèse :</u> $\lambda(T) = \lambda_0$

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

$\frac{\partial T}{\partial t} = D \Delta T$, avec $D = \frac{\lambda}{\rho c}$

<u>Nombre de Péclet :</u> $P_e = \frac{UL}{D}$

- $P_e \gg 1$ convectif
- $P_e \ll 1$ diffusif

3. Bilan d'entropie

$$\delta S_{creee} = dS - \delta S_{ech}$$

$$\begin{aligned}
\delta S_{ech} &= \frac{\delta Q}{T} \\
&= \frac{\phi(x,t)dt}{T(x,t)} - \frac{\phi(x+dx,t)dt}{T(x+dx,t)} \\
&= -\frac{\partial(\phi/T)}{\partial x} dxdt \\
&= -\frac{\partial(j/T)}{\partial x} Sdxdt \\
&= \lambda \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{T}\frac{\partial T}{\partial x}\right) Sdxdt
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\delta S_{creee} &= \left[\rho c \frac{1}{T}\frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{T}\frac{\partial T}{\partial x}\right)\right] Sdxdt \\
&= \lambda \left(\frac{1}{T}\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 Sdxdt \geq 0
\end{aligned}$$

Conclusion

On a étudié des phénomènes de diffusion, régis par une équation aux dérivées partielles, dont les solutions dépendent des conditions aux limites. Une en particulier est intéressante, car rend compte de phénomènes convectifs :

- Conditions aux limite d'échanges conducto-convectifs
  => Loi de Newton : $j_x(P,t) = -h(T(P,t) - T_{ext})$

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manque, l'enseignant pourra compléter le document)

1. A quels moments aurais-tu introduit les prérequis ?

- Analyse vectorielle : une heure pour les introduire, mais diffusion = premier cours où les élèves les utilisent vraiment.
- Notion de volume mésoscopique : déjà été vu en première année (si PCSI) en statique des fluides. Pas explicitement au programme de PCSI

2. Expliquer pourquoi il y a transfert thermique du soleil vers nous.

Le soleil est un corps qui a une température élevée, donc qui rayonne dans le visible.

3. Exemple plus parlant de transfert thermique sans rayonnement visible.

Rayonnement du corps noir, les corps humains. Chauffage.

4. Quelle loi pour le corps noir ?

Loi de Stephan $P_s = \sigma T^4$ avec Ps puissance surfacique.

5. Réexpliquer la méthode de stockage des déchets radioactifs. Pourquoi c'est dangereux ?

Il faut adapter la couche de béton pour compenser la diffusion des déchets dans le sol. Déchets dangereux car rayonnements gamma.

6. Exemple de création d'énergie thermique ?

Réactions chimiques exothermiques, effet Joule.

7. En quoi la loi de Fick est expérimentale ? Est-ce que c'est Fick d'abord ? Est-ce que Fourier était un expérimentateur ?

On l'a vu expérimentalement d'abord. C'est Fourier d'abord. C'est une loi phénoménologique, pas expérimentale / empirique. Il y a des justifications théoriques de ces lois : approche microscopique avec marches aléatoires etc.

8. Coeff de diffusion plus grand dans les phases condensées, pourquoi ?

Solides : plus denses, plus structurés.

9. De quoi dépend le coefficient de diffusion ?

Milieu dans lequel on diffuse, température. De la nature de la particule qui diffuse.

10. Hypothèse de la loi de Fick : Opérateur linéaire, que dire devant une classe de CPGE ?

Des étudiants de CPGE sont familiers avec la notion de linéarité, loi valide que pour des petites variations. Attention, ne pas dire « opérateur » linéaire pour des CPGE.

11. **Comment écrire la loi dans milieux anisotropes ?**

Remplacer lambda scalaire par matrice.

12. **Milieu avec grad n grand ?**

Coefficient dépend de n. Ou éventuellement (grad n)²…

13. **Citer des équations réversibles et irréversibles vu en CPGE.**

Réversible : D'Alembert (ondes), oscillateur harmonique

Irréversible : Diffusion

L'équation de Schrödinger est un cas particulier car elle est réversible temporellement par la transformation $t \to -t, \psi \to \psi^*$. Ce qu'on ne peut pas faire avec l'équation de diffusion car il n'y a pas de i devant la dérivé temporelle

14. **Loi d'échelle : est-ce que c'est vraiment n qu'il faut considérer ?**

Non : Δn

15. **Temps caractéristique de 10h, pourquoi ça s'est diffusé au cours de la leçon ?**

Mauvais coefficient de diffusion, ce n'est qu'une loi d'échelle.

Convection forcée lié à l'écoulement créé par la chute de la goutte

et naturelle due aux différences de densité entre l'eau et l'encre.

16. **Comment faire pour ne pas avoir de convection ?**

Etudier dans un solide (ex : papier).

Faire l'expérience en milieu gel pour éviter la convection et conserver un coef de diffusion proche de l'eau.

17. **Régime permanent de diffusion.**

Lois affines en 1D. En plus hautes dimensions, solutions de l'équation de Laplace, donc il faut décomposer le laplacien sur une base propre.

18. **Quel est l'avantage d'une loi d'échelle ?**

Résoudre l'eq en général et l'appliquer à différents problèmes.

19. **Exemple de l'énergie thermique, pourquoi exemple de la casserole ? Qu'est-ce qui est dominant comme phénomène ? Autre phénomène mieux ?**

Au moins au début, phénomènes de diffusion. Après : phénomènes de convection. Casserole : mauvais exemple. Isolation des fenêtres.

20. **Comment utiliser la loi de Joule dans le cadre de cette leçon ?**

Il faut faire l'hypothèse que la capacité soit indépendante de T

21. **Comment faire si C dépend de T ?**

Ça change rien, l'expression utilisée, dU/dt = c dT/dt provient du fait que c'est une différentielle totale dU = c dT.

22. **D'autres équations similaires à la loi de Fick ?**

Loi d'Ohm.

23. Pourquoi les odg de D sont si disparates ? Pourquoi cuivre conduit mieux l'électricité que le diamant ? Pourquoi le diamant conduit bien la chaleur ?

Peu dense => plus compliqué

Electrons libres dans cuivre. Transporte courant et chaleur.

Energie thermique transférée par le cristal. Propagation de proche en proche (phonons).

24. Comment généraliser ces lois pour toute grandeur ? Correspondance dans le cas de la loi d'Ohm

Grandeur intensive de stock, grandeur intensive de flux

Grandeur totale conservée : charge électrique

Courant = grad(potentiel)

25. Liens entre conductivité thermique et électrique ?

Rapport des deux est égale à une constante à basse température. Loi de Wiedemann et Franz.

26. Préciser l'ETL

Libre parcours moyen petit devant longueur caractéristique du système.

27. Comment construire le nombre de Péclet ?

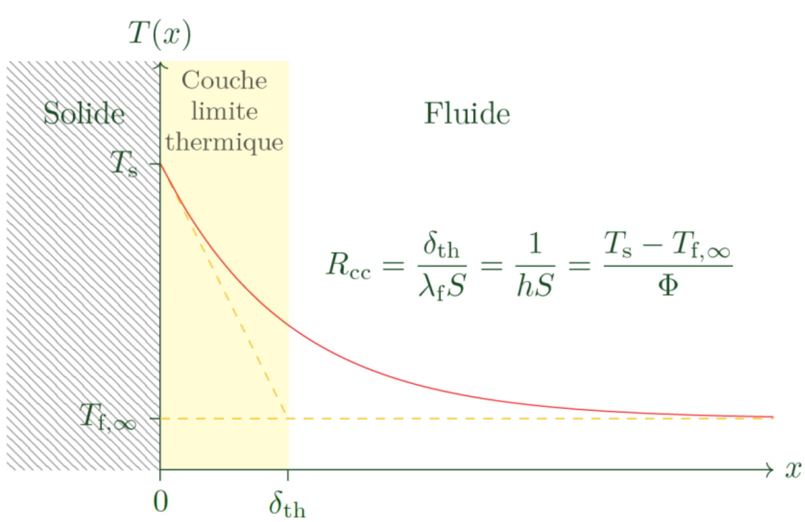
Souhait de créer un nombre adimensionné. Temps caractéristique de diffusion / temps caractéristique de convection (L/U).

$$Pe = \frac{\tau_d}{\tau_c} = \frac{L^2/D}{L/U} = \frac{UL}{D}$$

Analogue au nombre de Reynolds.

28. Petit modèle pour obtenir la loi de Newton.

Vu en TD :



29. Toujours toi qui touille pour convection ?

Non, il peut y avoir convection naturelle. Ex : bougie.

30. **La physique est-elle réversible en général ?**

Au niveau microscopique oui. Mais bilan entropique au niveau de l'univers dit que non (un peu foireux).

Commentaires lors de la correction de la leçon

(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

Oral et tableau

Eviter de trop dire « mon », « ma ».
Eviter de dire « dans cette leçon, j'ai pas fait ça », « pour une leçon d'agreg ça aurait été bien de faire ça », plutôt se mettre dans la peau d'un prof sans disserter sur les modalités des leçons d'agreg.

Contenu disciplinaire

Très bon contenu, connaissances solides.

Hypothèse de la loi de Fick arrivent un peu tard. Le calcul de l'entropie n'est pas indispensable, mais c'est bien de le connaître pour les questions.

Un peu imprécis sur les lois de Joule.

Eviter de ne traiter que de la diffusion. Une partie comparant diffusion et convection ou rayonnement est souhaitable.

Généralités : incontrournables

Trois modes de transport -> les comparer (temps, rayonnement = transport thermique uniquement)
Plusieurs quantités transportées (matière, chaleur…)
Ne pas faire un catalogue : lier et comparer les différents phénomènes.
Ne pas se limiter à la diffusion.
Lois de conservation
Equilibre thermodynamique local
Différentes lois d'échelle
Mettre des Odg

Eventuellement :
Résistances thermiques
Bilan entropique

Expériences quantitatives docteurs :

Diffusion moléculaire (glycérol dans de l'eau)
Lois de la conduction (barreau de cuivre, conductivité électrique en température)
Loi de Stephan
(Diffusion de charge)
Strioscopie

Ouvertures :

Théorie de la réponse linéaire : flux en gradient de potentiels
Théorie de diffusion : marche aléatoire, modèle de Drude

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

Utilisation du viscosimètre de Couette

Etudier une marche aléatoire