

LP n° 18 : Phénomènes de transport.

NIVEAU : CPGE

On place cette leçon au niveau PC, ce qui écarte d'office l'éventualité d'une étude approfondie de la convection et du rayonnement. La première peut tout de même être abordée par le spectre des fluides, le second fait l'objet d'une approche documentaire.

PRÉREQUIS :

- Thermodynamique à l'équilibre
- Mécanique des fluides
- Notion de flux
- Loi d'Ohm Locale?
- Rayonnement thermique (lois de Wien et Stefan)

PLAN :

1. Introduction à l'étude des systèmes hors équilibre

2. Transport de particules

3. Transport d'énergie sous forme de transfert thermique

BIBLIOGRAPHIE :

- [31] B. Diu, *Thermodynamique* (2007) - Chap. 9.
- [66] *Physique PC/PC**, Dunod (Ancien programme, 2006).
- [71] *Physique PC/PC**, Dunod (2014).

IDÉES À FAIRE PASSER :

Pour moi, cette leçon n°18 suit la n°17 et précède la n°19 pour de bonnes raisons :

- Le rayonnement n'a pas lieu d'être introduit ici. Il ne fait l'objet au programme de PC que d'une approche documentaire et à mon avis il faut ici le supposé connu.
- Il ne s'agit pas non plus de traiter des bilans thermiques et des applications des différents phénomènes.

En bref, il faut introduire les différents phénomènes dans toute leur diversité, préciser leurs différentes propriétés et éventuellement les comparer entre eux.

Introduction : [71], p. 119 & [31], p. 461 - On a précédemment étudié la thermodynamique des transformation entre état d'équilibre sans jamais se poser la question du chemin suivi (c'était d'ailleurs le grand intérêt des fonctions d'état!). Dans cette leçon, on va lever l'hypothèse d'équilibre thermodynamique et s'intéresser aux mécanismes de transport des grandeurs usuelles (matière, énergie, charge, ...).

1 Introduction à l'étude des systèmes hors équilibre

Phénomènes de transport = Inhomogénéité de grandeur intensive -> transport d'une grandeur extensive -> rétablir l'homogénéité

1.1 Évolution des grandeurs conservées

On va s'intéresser à des grandeurs conservées sans terme de source, typiquement les particules (sans réaction chimique), l'énergie ou encore la charge. Ainsi, on s'assure que les variations de ces grandeurs X dans un système donné ne peuvent être dues qu'à des échanges avec l'extérieur.

Surtout, le fait de travailler avec des grandeurs conservées implique que l'équilibre ne peut être atteint grâce aux collisions microscopiques mais ne peut advenir que du transport d'une certaine quantité d'un point à un autre de l'espace.

Reste encore un problème avant de commencer l'étude : les grandeurs thermodynamiques usuelles (température, entropie, énergie, pression, ...) n'ont été définies que pour un système à l'équilibre de sorte que dans notre étude où l'équilibre est justement perturbé il n'est pas acquis que ces grandeurs seront définies.

1.2 Nécessité de l'équilibre thermodynamique local

[31], p. 464 & [71], p. 120 - Définir les trois échelles et comment arriver à l'équilibre local par découpage en sous-volumes mésoscopiques. Donner des exemples d'échelles. Limite de l'hypothèse : déséquilibre pas trop fort ne permettant plus l'approximation linéaire.

1.3 Description locale des flux

Cette nouvelle notion d'équilibre implique une description locale de la répartition d'une quantité dans un système. Définir la densité volumique, [31], p. 468.

Enfin pour décrire efficacement le transport on définit la densité de courant \vec{j} , d'après [31], p. 468. La connaissance de cette grandeur en tout point permet la description complète de l'évolution du système.

Transition : Nous avons établi les conditions générales de l'étude des phénomènes de transport. Nous pouvons donc entamer l'étude successive de deux grands types de transport au programme de PC : le transport de matière et le transport d'énergie sous forme de transfert thermique.

2 Transports de particules

Lorsqu'on veut étudier un phénomène de transport quel qu'il soit, ici le transport de particules, on doit commencer par déterminer la cause du transport et exprimer la densité volumique de courant associée. Dans un premier temps on s'intéresse à la diffusion de particules (i.e. sans convection) donc dans une région de l'espace où pression et température sont uniformes. Il faut prendre le temps, pour répondre aux questions, de lire [31], pp. 473-483.

2.1 Loi de Fick

Qu'est ce qui impose le déplacement des particules? [71], p. 95 - On constate expérimentalement que les particules se meuvent depuis les zones où la concentration est la plus élevée vers les zones de plus faible concentration (voir mécanisme microscopique dans [31], p. 479).

Que vaut la densité volumique de courant surfacique? [71], p. 95 - Donner la loi de Fick et sa signification : diffusion des particules des zones de densités les plus élevées aux plus faibles. Définir le coefficient de diffusion, unité et ordres de grandeurs. Limite de validité (p. 96). On peut éventuellement (et selon le temps imparti) évoquer l'interprétation microscopique de la loi, cf. [31], p. 479.

2.2 Équation de diffusion

[71], pp. 91-93 - Bilan de particules sur un volume mésoscopique 1D et généralisation à 3D, puis combiner avec la loi de Fick pour obtenir l'équation de diffusion 3D ([71], p. 96).

On verra que cette forme d'équation est très générale pour la description des phénomènes diffusifs. De ce fait, il est cohérent de s'arrêter quelques instants sur son étude : voir [71], p. 97 et [31], p. 480 - Phénomène irréversible (expliquer que c'est très intuitif : si on fait tomber une tache d'encre sur un buvard c'est parfaitement impossible qu'elle revienne à sa forme initiale), évolution au cours du temps en $L \approx \sqrt{DT}$ par adimensionalisation de l'équation de diffusion (p. 99) et expérience :

Expérience : Diffusion du glycérol dans l'eau. Voir MP33. Trouver la loi en racine de t et le coefficient de diffusion.

Remarque : la diffusion est un mécanisme de transport très peu efficace! Si on veut mélanger deux types de molécules il est extrêmement long d'attendre qu'elles diffusent les unes dans les autres! C'est bien plus efficace de forcer la convection (mais aussi beaucoup plus compliqué à décrire!) - On peut le faire expérimentalement en agitant la cuve de glycérol...

2.3 Diffusion sous l'effet d'une différence de potentiel

Voir [31], p. 483 selon le temps.

Transition : Sur l'exemple commun des particules on a bien compris la phénoménologie attachée au mécanisme de diffusion. On se propose donc de prolonger ce raisonnement à l'étude d'une grandeur plus proche du cours de thermodynamique : l'énergie.

3 Transport d'énergie sous forme de transfert thermique

3.1 Modes de transport possibles

Voir [31], p. 487 - Rayonnement (déjà vu) et convection (déjà évoqué plus haut) on peut dire ici que le gradient de température est généralement la cause la convection naturelle. Montrer des images des courants océaniques ou des mouvements dans une casserole d'eau? - Cellule atmosphérique?

Aussi, diffusion de l'énergie sous forme de transfert thermique comme on en a l'habitude depuis longtemps : en mettant en contact deux objets à des températures différentes on sait bien que la « chaleur » diffuse de l'objet chaud vers l'objet froid.

3.2 Loi de Fourier

Même principe que la loi de Fick. Voir [71], p.p. 130-131 et [31], p. 488.

3.3 Équation de la chaleur

On refait le bilan 1D pour trouver l'équation locale généralisée à 3D et on injecte Fourier, cf. [71], p. 132. INSISTER LOURDEMENT SUR LE FAIT QUE C'EST EXACTEMENT LA MÊME ÉQUATION QUE PRÉCÉDEMMENT DONC TOUT S'APPLIQUE DE MANIÈRE ANALOGUE!. Traiter l'exemple du choc thermique de [31], pp. 500-501.

Expérience : Diffusion thermique dans le barreau de cuivre. On fait un relevé des points au cours du temps et on peut vérifier à nouveau la loi en racine de t .

On a le même argument que précédemment pour exprimer l'irréversibilité mais on a surtout ici le seconde principe de la thermodynamique à notre disposition : faire le bilan entropique dans le [71], p. 134.

3.4 Transport d'énergie à l'interface entre un solide et un fluide

Modélisation par la conduction dans la couche limite. Intuiter la loi de Newton [71], p. 123.

Conclusion : Possibilité d'ouvrir sur l'effet Seebeck qui fait le lien entre différents modes de transport dans les métaux, ou la loi de Wiedmann-Franz. On peut aussi ouvrir sur le transport de quantité de mouvement et le nombre de Reynolds qui permet de quantifier l'importance relative de la convection et de la diffusion.

BONUS :

- Il faut remarquer que le meilleur moyen de négliger la convection sans plus de cérémonie, c'est de travailler dans des solides!
- Cette leçon à l'air longue, mais je pense que la partie sur la loi de Fourier et l'équation de la chaleur étant très analogue à la partie sur la diffusion de particule on peut facilement l'expédier.

