

Fiche 28

Phénomènes de transport (systèmes fermés)

Ressources utilisées

- PÉREZ, *Thermodynamique*
- SANZ, *Physique tout-en-un PC-PC**, Dunod
- TAILLET, *Dictionnaire de physique*
- MARUCCO, *Chimie du solide*

Pré-requis

- Loi d'Ohm en électrocinétique [L1]
- Liens entre champ électrique, potentiel et tension [L1]
- Thermodynamique (énergie interne et premier principe) [L1/L2]
- (Thermodynamique, irréversibilité...) [L1/L2]
- Expression du gradient [L1]

Éléments imposés possibles

Effet PELTIER (hors programme) (ou effets thermoélectriques)... analogie électrocinétique/thermique...

Introduction pédagogique

Niveau BCPST2

Difficultés La notion de flux n'est pas facile à appréhender, d'autant plus que sa dimension dépend du phénomène étudié. On la rattachera donc systématiquement à des exemples ; de plus, le phénomène de transport par conduction étudié ici n'implique pas de transport de matière macroscopique, ce qui peut sembler contre intuitif.

Travaux dirigés Modèle de DRÜDE, loi d'OHM locale, loi de FOURIER, calcul de flux, de résistances... faire et refaire ces calculs!

Travaux pratiques barre de conduction ; effets thermoélectriques.

La leçon est placée en BCPST 2. Elle s'inscrit dans le thème "Phénomènes de transport" du programme. On fait le choix de ne traiter que les conductions électrique et thermique. La diffusion particulaire sera traitée à part, tout comme le transport par convection, avec applications aux machines thermiques. On se restreint à des études en régime permanent. Les équations de diffusion (d'ailleurs probablement pas réellement au programme, on y parle seulement de bilans) seront plus approfondies dans le chapitre sur la diffusion particulaire, où l'on fera le parallèle entre particulaire et thermique.

La leçon est ici construite avec l'élément imposé de l'effet PELTIER qui est un élément imposé hautement hors programme pour des BCPST2 et en général pour la deuxième année de licence. Il s'agit alors de le préciser aux élèves, et de n'insister que sur les phénomènes, pas leur caractérisation calculatoire ; on proposerait cette élément

dans un vrai cours pour deux raisons : la culture scientifique (deux effets irréversibles peuvent être couplés... c'est le cas ici) et pour amener à comprendre les outils utilisés en TP (élément PELTIER et thermocouples...).

Introduction

Dans ce thème, on va décrire différents phénomènes de transport, de quantité ou d'entités dans différents domaines de la physique (électronique, thermodynamique, ...).

Remarque Noter que le transport est associé au transport d'une grandeur extensive causé par une inhomogénéité d'une grandeur intensive. On pourra redéfinir ces termes.

Projection

Transport au repos : transport d'une quantité sans mouvement d'ensemble macroscopique.

Transport convectif : transport d'une quantité avec mouvement d'ensemble macroscopique.

Expérience On dépose une goutte d'encre dans l'eau, sans déplacer le récipient. La couleur finit par s'homogénéiser par diffusion. Cependant, il n'y a pas de transport macroscopique de matière.

On se focalise ici sur le transport par conduction, qui sera illustré par le transport de charges (application en conductimétrie) et le transport de chaleur (application en géothermie).

Objectifs Savoir décrire et caractériser le transport d'une quantité (charge, énergie) dans un système au repos macroscopique.

28.1 Flux et densité de courant

On définit le flux comme étant : $\Phi = \iint_S \vec{F} \cdot d\vec{S}$, pour un champ vectoriel \vec{F} à travers une surface S . Il caractérise le transport d'une quantité à travers une surface.

Par exemple, l'intensité du courant électrique I est un flux :

$$I = \iint_S \vec{j}_e(M, t) \cdot d\vec{S} \quad (28.1)$$

où $\vec{j}(M, t)$ est le vecteur densité de courant exprimé en A/m².

On définit de même le flux thermique :

$$\Phi_{th} = \iint_S \vec{j}_{th} \cdot d\vec{S} \quad (28.2)$$

où \vec{j}_{th} est le vecteur densité de flux thermique exprimé en W/m² (Φ_{th} s'exprime en W).

Ces vecteurs densité caractérisent un transport (de charge, d'énergie) par conduction, dû à l'existence d'un gradient, c'est-à-dire d'une inhomogénéité du système étudié :

- une tension (une différence de potentiel) pour la charge électrique ;
- une différence de température pour l'énergie (interne)

Remarque Essayer d'éviter le plus possible l'utilisation du terme *chaleur*.

Maintenant, l'intérêt pour caractériser le transport d'une quantité dans le système, c'est de relier le flux créé à ce qui l'a causé, donc les gradients correspondant... pour cela, il nous faut chercher une expression de \vec{j} !

28.2 Conduction et résistances

28.2.1 Conduction électrique

Dans le cas de l'intensité du courant électrique $I = \frac{dq}{dt}$, le vecteur densité de courant se lit comme la charge électrique qui traverse un conducteur par unité de temps et de surface.

$$dq = \rho(v dt dS) \Leftrightarrow dI = \frac{dq}{dt} = \rho v dS \Leftrightarrow I = \iint \rho v dS \quad (28.3)$$

On en déduit que le vecteur densité de courant électrique s'exprime :

$$\vec{j}_e = \rho \vec{v} \quad (28.4)$$

Dans ce qui précède, nous avons une expression de \vec{j}_e , mais toujours pas de lien entre transport et gradient, en particulier ici le gradient de potentiel.

Cette dépendance peut s'obtenir par un modèle simplifié, (le modèle de DRÛDE) et donnée par la loi d'OHM locale :

$$\vec{j}_e(M) = \gamma_0 \vec{E}(M) \quad (28.5)$$

où γ_0 est la conductivité électrique du matériau, exprimée en S/m ($1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$), et $\vec{E}(M)$ le champ électrique dans le conducteur.

$\gamma_0 = 5,9 \times 10^7 \text{ S/m}$ pour le cuivre.

On sait que :

$$\vec{E}(M) = -\text{grad}V \Leftrightarrow \vec{j}_e(M) = -\gamma_0 \text{grad}V \quad (28.6)$$

On voit bien ici que le transport de charge est dû à un gradient de potentiel.

Objectifs En TD : retrouver la loi d'Ohm globale dans un conducteur cylindrique.

Si \vec{j}_e est considéré uniforme,

$$I = \iint_S \vec{j}_e \cdot d\vec{S} = j_e S \quad (28.7)$$

En outre,

$$\begin{aligned} -U = V(B) - V(A) &= \int_A^B \text{grad}V \cdot d\vec{l} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ \Leftrightarrow U &= \int_A^B \frac{1}{\gamma_0} \vec{j}_e \cdot d\vec{l} = \frac{\rho}{\gamma_0} j_e \end{aligned}$$

On injecte l'expression de j_e (équation 28.7) :

$$U = \frac{l}{S\gamma_0} I = RI \quad (28.8)$$

On reconnaît la loi d'Ohm et on obtient une expression de la résistance dans un conducteur cylindrique :

$$R = \frac{l}{\gamma_0 S} \quad (28.9)$$

28.2.2 Conduction thermique

Remarque Dans toute la leçon, on fera très attention à ne pas confondre flux thermique et vecteur densité de flux thermique. On pourra insister, exagérer le trait...

Il s'agit d'un transport d'énergie à travers un milieu matériel ("conducteur") sans déplacement macroscopique de matière. Il est dû à l'agitation thermique des particules microscopiques, plus forte dans les zones chaudes.

L'équation sur le vecteur densité de flux thermique est donnée par la loi phénoménologique de FOURIER :

$$\vec{j}_{th} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (28.10)$$

avec λ la conductivité thermique exprimée en W/m/K.

Remarque Les hypothèses de la loi de FOURIER, comme pour les autres lois phénoménologiques, sont de considérer un matériau homogène, isotrope et un gradient (de température, de concentration) pas trop important.

L'hypothèse sur le gradient vient du fait que la loi n'est pas empirique (écrite à partir de données expérimentales) mais phénoménologique, dérivée des observations et d'un développement limité au premier ordre pour obtenir une loi linéaire !

Projection

Ordres de grandeur de λ (Source : Sanz (p. 132)).

On retrouve bien un lien entre le transport d'énergie (j_{th}) et un gradient caractérisant une inhomogénéité du milieu.

Remarque λ et γ_0 dépendent du matériau considéré.

On notera que ces deux grandeurs sont liées au sein d'un matériau (voir PÉREZ), ce qui amène à considérer les effets thermoélectriques.

Expérience Barre de cuivre calorifugée

On considère le système compris entre x et $x + dx$ en régime permanent.
Le premier principe de la thermodynamique appliqué au système donne :

$$dU = 0 = \delta Q = j_{th}(x)Sdt - j_{th}(x + dx)Sdt = -\frac{dj_{th}}{dx}(x)Sdtdx \quad (28.11)$$

On en déduit :

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (28.12)$$

La température est une fonction affine de l'abscisse x :

$$T = A x + B = \frac{T_0 - T_1}{L} x + T_1 \quad (28.13)$$

Projection

Tracé de l'allure de la température dans la barre au régime permanent en fonction de l'abscisse.

On montrera, si possible, l'allure des courbes de température acquises pour montrer l'obtention d'un régime permanent. Par ailleurs, à partir du régime transitoire et de son étude, on peut remonter à la conductivité du matériau (voir DUFFAIT et/ou FRUCHART).

On peut alors faire une analogie entre l'électrocinétique et la conduction thermique et définir une résistance thermique.

$$T_0 - T_1 = R_{th}\Phi_{th} \quad (28.14)$$

avec R_{th} la résistance thermique du matériau.

28.3 Effets thermoélectriques

Remarque Tous les effets de couplage des phénomènes irréversibles, dont font partie les effets thermoélectriques, sont décrits par la théorie d'ONSAGER.

On en trouvera une présentation dans de nombreux livres de niveau post-prépa, dont le PÉREZ et le MARRUCCO.

Les effets thermoélectriques sont les effets qui résultent de l'interaction entre la conduction thermique et la conduction électrique.

Projection

Historique des effets, voir PÉREZ, mais qui peut être trompeur sur la nomenclature des effets...

Considérons l'effet PELTIER : deux matériaux A et B sont mis en contact par une jonction notée S au passage d'un courant électrique.

Remarque Attention, selon les sources, les effets semblent décrits différemment... se référer au MARUCCO, *Chimie des solides* p. 398 et p. 531

La puissance thermique dégagée par l'effet PELTIER s'exprime :

$$P_{u,P} = \Pi_{AB} I \quad (28.15)$$

avec Π_{AB} le coefficient PELTIER.

Le courant est assuré par le transport par conduction des porteurs de charges. Ces porteurs de charges transportent également une énergie cinétique d'agitation (au sein d'un matériau, il y a un lien entre conductivité thermique et conductivité électrique). Or, le rapport entre transport électrique et transport thermique est différent en fonction des matériaux. Il en résulte un transfert thermique entre le milieu environnant et la jonction.

Remarque pour « compenser » cette différence : mais c'est à prendre avec des pincettes ici puisque l'effet PELTIER semble nécessiter plusieurs jonctions (au moins deux)... voir correction/ou autre source (par exemple, MARUCCO.)

- Si $\Pi_{AB} < 0$, le passage du courant de A vers B fournit de la puissance au milieu extérieur ;
- Sinon, il reçoit de la puissance.

Ce phénomène est utilisé pour augmenter ou diminuer la température de sources chaudes ou froides.

Projection

Élément PELTIER

On présente l'élément PELTIER (Source : PÉREZ) : une source chaude placée au contact de deux conducteurs eux-même en contact avec une source froide à l'aide de semi-conducteurs. Le courant électrique passe du conducteur d'entrée de la source chaude vers le conducteur de la source froide et enfin vers le conducteur de sortie de la source chaude. Le transfert thermique a lieu de la source froide vers la source chaude. En pratique, ces éléments PELTIER sont montés en série.

Conclusion

Dans cette leçon, on a exclusivement parlé des phénomènes transport par conduction, en particulier de la conduction électrique et de la conduction thermique. On peut dresser une analogie entre ces deux phénomènes, qui sont reliés par les effets thermoélectriques.

Conduction	Électrique	Thermique
Quantité transportée	Charge électrique	Énergie interne
Cause	Différence de potentiel	Gradient de température
Résistance	$U = RI$	$\Delta T = R\Phi_{th}$
Conductivité	Électrique, γ_0	Thermique, λ

FIGURE 28.1 – Analogie entre l'électrocinétique et la diffusion thermique

Le prochain chapitre traitera un autre mode de transport : la convection.

Questions/Réponses

Questions	Réponses
Quelle est la différence entre transport et transfert ?	Le transport est un type de transfert (déplacement de grandeurs extensives).
Qu'est-ce que l'advection ?	De la convection forcée.
Où placer la diffusion de matière dans le tableau comparatif ?	
Quelle loi est associée ?	La loi de Fick.
Quelle est l'équation locale de conservation ? dérivée partielle de la quantité conservée (volumique) + divergence du vecteur densité de flux associé...	
Quelle est-elle au régime permanent ?	Une équation de Laplace : $div \vec{j} = 0$
Qu'est-ce que l'effet PELTIER ?	Lorsqu'un courant implique un gradient de température.
Qu'est-ce que l'effet Seebeck ?	Un gradient de température implique un courant.
Peut-on avoir un effet PELTIER avec une seule jonction ?	
Donner un exemple de matériau utilisé dans les thermocouples.	Cu et constantan (alliage cuivre nickel), des semi-conducteurs : Pt-Cu.
Quel terme faut-il ajouter à l'équation de diffusion s'il y a un mouvement macroscopique ?	
Quel est le nom associé aux rouleaux de convection ?	La convection de RAYLEIGH-BÉNARD.

Est-ce que le modèle de Drude est au programme de BCPST 2? Pourquoi le traiter?	Non. Le traiter pour réinvestir les notions de mécanique (proprement, en TD) pour remonter à la loi d'Ohm locale qui leur est parachutée en cours.
Quel est le transport qui intervient dans la respiration?	Une différence de pression.
