

LP 28 Phénomènes de transport.

①

Élément imposé : effet Peltier.

Niveau L2 / BEPST 2

Pré-requis

Bibliographie.

PÉREZ, Thermodynamique.

SANZ, PC/PC* Dumed

TAILLET, Dictionnaire de P

- les d'Onn en électrocinétique [L1]
- Thermodynamique, énergie interne; premier principe [L1/L2]
- Expression du gradient [Mathématiques/Phy. L1]
- Champ électrique, potentiel et tension. [L1]

Leçon qui débiterait la séquence pédagogique de BEPST 2 sur "phénomènes de transport". Le choix est fait de ne traiter ici que la partie conductes élect et thermique; en laissant à part la diffusion particulière et en choisissant de traiter tous les transport convectifs dans un autre autre cours, qu'on rapprocherait de celui sur les machines thermiques.

On se restreint ici à des études en régime permanent et, pour la partie thermique, on préciserait aux élèves qu'on reviendra dessus lors de l'établissement des équations de diffusion (particulière au thermique) (→ dans programme de BEPST).

Les pré-requis concernant des notions principalement acquises en L1 / BEPST1, qui nous permettent ici de traiter simultanément conductes élect et thermique, pour lesquels on soulignera les analogies mais aussi les effets d'interaction et élément imposé.

Parmi les difficultés identifiées :

- la notion de flux, qu'il faudra le souvent rattacher à des exemples, qui n'est pas évidente à appréhender.
- le fait que l'on ait transport sans mouvement macro.

En TD : On pourra reprendre le modèle de DRÜDE qui n'est pas développé ici, car l'ON n'aurait été demandée comme l'est celle de FOURIER.

→ réinvestir notions de mécanique...

aussi, calculs de flux pour utiliser les expressions de surfaces courbes...

↳ et donc de résistance, insistant encore E sur l'analyse BE.

En TP : Boue de conduction, effet thermoélectriques...

Introduction élèves

Ajd, nous parlons même intérêt sur les phénomènes de transport en physique.

Cadre conceptuel qui permet, avec des outils similaires, d'étudier le transport de quantité / entités dans différents domaines de la physiq ($\Theta\Delta$, e^-K).

projection: différents types de transport.

projection: transport pour un système macroscopiquement au repos

On s'intéresse aujourd'hui en particulier au transport par conduction, que nous allons illustrer par le transport de charge et le transport de chaleur.

applications
intéressantes $\Rightarrow$ $\begin{cases} \text{↳ transfert de charge} \\ \text{en biologie;} \\ \text{conductimétrie...} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{↳ géothermie...} \end{cases}$

Objectifs

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

I / Flux et densité de courant

(Rappel : projection grandeur extensive, définition.)

On définit le flux d'un champ vect. $\vec{F}$ à travers une surface S donnée,

$$\Phi = \iint_S \vec{F} \cdot d\vec{S}$$

caractérise donc le transport d'une quantité à travers une surface.

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

A ou $I = \iint_S \underbrace{\vec{j}(r, t)}_{\text{vecteur densité de courant}} d\vec{S}$

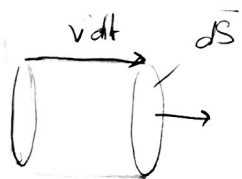
W $\Phi_h = \iint \underbrace{\vec{j}_h}_{\text{vecteur densité de flux thermique}} d\vec{S}$

⚠ L'unité du flux dépend du phénomène étudié !

ces vecteurs caractérisent un transport (d'énergie) par conduction dû à l'existence d'un gradient $\equiv$ d'une non-homogénéité du système étudié.

→ différence de potentiel (tension) pour la charge électrique
→ différence de température pour la chaleur

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



$$dq = \rho \cdot (v dt dS) = \rho v dt dS$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dq}{dt} = \rho v dS \quad I = \iint \rho v dS \quad \vec{j}_e = \rho \vec{v} \quad \vec{j}_e = \rho \vec{v}$$

II / Conduction et résistances.

4

A / Conduction électrique.

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

[S: le temps, force le modèle de DRUDE]

Cette dépendance peut s'obtenir par un modèle simplifié (cf. TD au cours) et est donnée par

$$\vec{j}_e(\vec{r}) = \sigma_0 \vec{E}(\vec{r}) \quad \text{Loi d'OHM locale.}$$

où σ_0 est la conductivité électrique du matériau (métal) en $S.m^{-1}$
(ordre de grandeur $\approx 9.10^7 S.m^{-1}$ pour le cuivre)

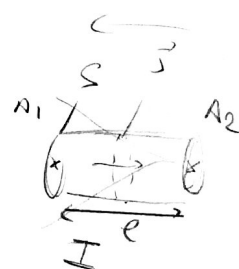
or $\vec{E}(\vec{r})$ le champ électrique dans le conducteur.

et on a
$$\vec{E}(\vec{r}) = - \vec{\text{grad}} V$$

On a donc
$$\vec{j}_e(\vec{r}) = - \sigma_0 \vec{\text{grad}} V$$

transport de $\frac{d\hat{u}}{a}$ ou $\vec{\text{grad. onl}}$ de potentiel

Charge



donc $U = RI$

(+) si $\vec{j}_e$ est considéré uniforme, $I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = j S$

or
$$V(A_2) - V(A_1) = \int_{A_1}^{A_2} \text{grad} V d\ell = - \int_{A_1}^{A_2} \vec{E} d\ell$$

$$-U = V(A_2) - V(A_1) = - \int_{A_1}^{A_2} \frac{1}{\sigma_0} \vec{j}_e d\ell' = - \frac{\ell}{\sigma_0} j$$

Donc
$$U = V(A_1) - V(A_2) = \frac{\ell j}{\sigma_0} = \frac{\ell}{S \sigma_0} I \Rightarrow U = RI \text{ où } R = \frac{\ell}{\sigma_0 S}$$

Loi d'OHM !

Un autre dérivé de transport, transport par conduction thermique.

B/Conduction thermique

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 $\rightarrow$ gradient de température.

Comme pour la conduction électrique, on cherche un vecteur $\vec{j}_h$ vecteur densité de flux thermique tel qu'on ait le flux thermique

$$\Phi_h = \iint_{W} \vec{j}_h \cdot d\vec{S} \quad \text{en } W \cdot m^2$$

L'expression de $\vec{j}_h$ est donnée par la loi phénoménologique de FOURIER
projection: J. FOURIER

$$\vec{j}_h = - \lambda \vec{\text{grad}} T \quad \text{avec } \lambda \text{ la conductivité thermique}$$

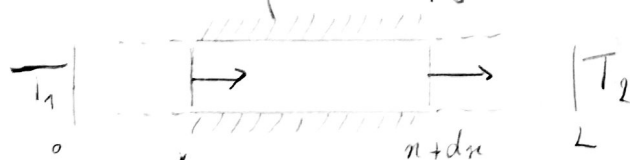
en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Notons qu'on retrouve bien un lien entre le transport (d'énergie, Φ_h ou $\vec{j}_h$) et un gradient caractérisant une inhomogénéité du système. projection: conductivité, adg.

À noter, λ et γ sont liés pour un matériau donné.

Retour sur l'aspect phénoménologique $\rightarrow$ pas de fondement théorique, loi empirique pour décrire efficacement un phénomène dans certaines conditions $\Rightarrow$ (limites) $\rightarrow$ limite ϕ pour gradient trop grand, valable très rapidement des temps, anisotrope.

Application: Barre métallique calorifugée sur les côtés.



Système } entre x et $x+dx$ en régime permanent

Therm. & principe

$$dU = 0 = \delta Q = \delta Q_{\text{côtés}} - j_h(x) \cdot S \cdot dt - j_h(x+dx) \cdot S \cdot dt$$

Donc

$$\frac{dj_h}{dx} = 0 \quad \text{et} \quad j_h = - \lambda \frac{dT}{dx}$$

d'où

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

$$T = A x + B = \frac{T_2 - T_1}{L} x + T_1$$

exp. vérification expérimentale.

$$\boxed{\begin{array}{l} R_{\text{th}} \text{ analogue} \\ T_2 - T_1 = R_{\text{th}} \cdot \Phi_h \end{array}}$$

T_1 vers séparément cond. élec. et γ , avec leur similitude... mais éventuellement ?

III / Effets thermoélectriques.

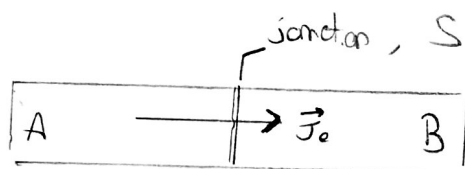
Les effets thermoélectriques sont les effets qui résultent de l'interaction entre la conduction thermique et la conduction électrique.

projection Historique des effets $E \propto$

SEEBECK	1822
PELTIER	1834
THOMSON	1854

En particulier, l'effet PELTIER

2 matériaux A et B en contact (jonction S) avec passage d'un courant I .



$$I = \int_S \vec{j}_e \cdot d\vec{S}$$

↑
Puissance thermique PELTIER.

$$P_{th,P} = \Pi_{AB} I$$

↪ coefficient PELTIER.

On interprète simplement :

Le courant est assuré par le transport par conduction des porteurs de charges.

Ces porteurs de charges transportent aussi une certaine énergie cinétique d'agitation.

Or, le rapport entre transport élect. et transport magnét. est différent en fonction des matériaux $\Rightarrow$ il en résulte un transfert thermique.

Si: $\Pi_{AB} < 0$, le passage du courant de A vers B provoque de la puissance au milieu extérieur.

Si: $\Pi_{AB} > 0$ ———— reçoit de la puissance

Utilisé pour augmenter et/ou diminuer la T de sources chaudes/froides
projection : élément PELTIER

Conclusion

Caractéristique	électrique	thermique
q.tité	charge	énergie interne
cause / gradient	U	ΔT
relation	$U = RI$	$\Delta T = R \phi h.$
conductivité	σ	