

LP8 : Phénomènes de transport

Alexandre Fafin

22/04/18

Références

- [1] J.-M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale. Tome 2 : thermodynamique et applications*. Pierron, 1997.
- [2] M.-N. Sanz. *Physique tout-en-un, PC, PC**. Dunod, 2014.

Niveau

L2

Prè-requis

— Thermodynamique

Objectifs

Table des matières

1 Modes de transport

1.1 Équilibre thermodynamique locale

2 Un mode de transport : la diffusion

2.1	Densité de courant de particules	2
2.2	Loi de Fick	3
2.3	Equation de la diffusion	3
2.4	Diffusion du glycérol dans l'eau	3
2.5	Analogies	3

3 Rayonnement thermique

3.1	Corps noir	3
3.2	Loi de Planck	3
3.3	Loi de Wien	3

Introduction

Phénomènes hors-équilibre pas décrits par la thermo à l'équilibre qu'on a étudié jusqu'à maintenant (uniquement transformation quasi-statique et réversible). Nous n'avons jusqu'à maintenant jamais suivi l'évolution temporelle d'un système entre deux états d'équilibres (sans passer par une succession d'états d'équilibres).

1 Modes de transport

Un phénomène de transport : quantité conservée (masse, énergie, charge électrique, nombre de particules, impulsion, énergie, moment cinétique...) qui est transportée dans le système. Plusieurs modes de transport

- Diffusion (mouvements microscopiques)
- Convection (mouvements macroscopiques)

On distingue dans le cas des transferts thermiques un troisième mode de transport : le rayonnement thermique. Transfert thermique par l'intermédiaire d'un champ électromagnétique.

On peut prendre l'exemple du transport d'énergie thermique au voisinage d'un feu de bois. **Manip** : Convection avec un tube en U et de la sciure de bois.

- Convection naturelle : mouvement du fluide apparaît spontanément, à cause de la différence de température.
- Convection forcée : Mouvement du fluide provoquée par une cause extérieure. Exemple : refroidissement par ventilateur de circuits intégrés.

1.1 Equilibre thermodynamique locale

Les grandeurs telles que l'entropie, la température, le potentiel chimique n'ont été définies que pour des systèmes à l'équilibre.

Pour que les outils de la thermodynamique puissent être utilisés dans l'étude d'un processus irréversible, il est indispensable que soit réalisé l'équilibre local. Prenons l'exemple de la température d'un barreau dont les extrémités sont maintenues, par deux thermostats, à des températures invariables différentes T_1 et T_2 . C'est un système qui ne sera jamais à l'équilibre thermodynamique. Un flux de chaleur va s'écouler le long de la barre pour tenter, sans jamais y parvenir, de rétablir l'équilibre thermique de l'ensemble. On peut cependant diviser la barre en volumes d'échelle mésoscopique [2], très inférieur à la distance caractéristique de variation de la température. Ainsi la température est définie localement par une valeur unique en un point M . Notre barreau peut alors être décrit comme une réunion de systèmes thermodynamiques à l'équilibre.

2 Un mode de transport : la diffusion

On ne développera ici que l'exemple de la diffusion de particules. **Manip** : Diffusion d'une substance colorée (buvard ou eau).

2.1 Densité de courant de particules

Définition du flux de particules ϕ : débit de particules à travers une surface S à l'instant t . Le nombre de particules dN traversant S pendant dt est :

$$dN = \phi dt \quad (1)$$

Le flux de particules à travers S (orientée) à l'instant t peut s'écrire à l'aide du vecteur densité de courant de particules \vec{j} :

$$\phi = \iint \vec{j}(M, t) \cdot \vec{dS} \quad (2)$$

Le flux est algébrique : son signe est lié au sens choisi pour la normale : positif si les molécules traversent l'élément de surface dans le sens de la normale, négatif dans le cas contraire.

A partir d'un cylindre de longueur vdt exprimons le nombre de particules dN qui traversent \vec{dS} entre t et $t + dt$. On note n le nombre de particules par unité de volume.

$$dN = n d\tau = n \vec{v} \cdot \vec{dS} dt \quad (3)$$

Ainsi par identification le vecteur densité de courant de particules au point M et à l'instant t s'écrit :

$$\vec{j}(M, t) = n(M, t) \vec{v}(M, t) \quad (4)$$

j s'exprime en $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Faire un bilan de particules à une dimension. On arrive à :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = - \frac{\partial j_x}{\partial x} \quad (5)$$

Cette équation peut se généraliser à trois dimensions par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = 0 \quad (6)$$

Problème : il faut une autre équation (vectorielle) entre j et n pour déterminer entièrement ces grandeurs

2.2 Loi de Fick

Loi phénoménologique (constatation expérimentale mais non démontrée). On suppose une loi linéaire. La diffusion s'arrête lorsque le gradient de particules est nul. Loi valable si ce gradient n'est pas trop important.

Définition du coefficient de diffusion D . Donner quelques valeurs du coefficient de diffusion.

2.3 Equation de la diffusion

Etablir l'équation de la diffusion. Définir la longueur et le temps caractéristique. Remarques :

- Attention à ne pas confondre avec une équation de propagation.
- Phénomène irréversible !

2.4 Diffusion du glycérol dans l'eau

Manip Remonter au coefficient de diffusion du glycérol. [1]

2.5 Analogies

3 Rayonnement thermique

3.1 Corps noir

Le corps noir est un modèle : un corps noir est un corps qui absorbe l'intégralité du rayonnement électromagnétique qu'il reçoit. Discuter rapidement de la réalisation pratique d'un corps noir.

Inhomogénéité à l'origine de la diffusion	c	T	V
Flux surfacique	$\vec{j}_{part} = -D_{mol} \overrightarrow{\text{grad}}(c)$	$\vec{j}_{th} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)$	$\vec{j} = -\sigma \overrightarrow{\text{grad}}(V)$
Grandeur extensive transportée	$\delta N = \vec{j}_{part} \vec{S} dt$	$\delta Q = \vec{j}_{th} \vec{S} dt$	$\delta q = \vec{j} \vec{S} dt$
Eq. de conservation	$\text{div} \vec{j}_{part} + \frac{\partial c}{\partial t} = 0$	$\text{div} \vec{j}_{th} + \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = 0$	$\text{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$
Eq. de propagation	$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{mol} \Delta c$	$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{th} \Delta T$	$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \sigma \Delta V$
Loi physique	Loi de Fick	Loi de Fourier	Loi d'Ohm

Un corps noir à une température T émet un rayonnement thermique dont le spectre est indépendant du rayonnement incident

Densité spectrale : répartition des photons par longueur d'onde (ou fréquence).

3.2 Loi de Planck

Ne pas chercher à la démontrer.

3.3 Loi de Wien

Démonstration de la loi de Wien.

Manip Lampe avec intensité variable + prisme à vision direct. Quand on baisse la température du filament, la couleur bleue du spectre disparaît.

Conclusion

Phénomène de transport = irréversible. Applications : diffusion des dopants dans les semi-conducteurs, isolation des bâtiments