Phénomènes de transport

June 7, 2025

Référence

Expérience : Diffusion du glycérol

Livre :

- Physique PC/PC* Tout-en-un, Dunod, 2016
- Thermodynamique, DGLR
- Thermodynamique - Fondements et applications, Perez
- Physique pour l'agrégation, FFR

Prérequis :

- Thermodynamique
- Mécanique des fluides

Niveau : PC

Introduction

Inhomogénéité dans un système thermo <=> phénomènes de transports

1 Transport d'une grandeur conservée

1.1 Cadre physique

Dans un système thermodynamique hors équilibre, il y a un échange avec l'extérieur ou une redistribution entre différents sous-systèmes d'au moins une variables d'état du système.

Ex : Deux systèmes collées à une température T différentes

Les grandeurs impliquées dans l'évolution du système sont conservées car elles sont transportées d'un sous-système à un autre sans création ou destruction. Ce phénomène irréversible est appelé phénomène de transport et pour l'étudier, il est nécessaire de remplir deux conditions.

Il est nécessaire d'avoir un équilibre thermodynamique local dans le système étudié, c'est-à-dire que l'on peut définir des sous-systèmes de taille mésoscopique qui sont chacun à l'équilibre thermodynamique.

Mésoscopique : échelle de taille intermédiaire entre le micro et le macro

Ex : pour de l'eau, $l_p \ll l_{meso} \ll L$

Il faut aussi que les écarts à l'équilibre soient suffisamment faibles pour pouvoir les traiter par un dvpt limité au premier ordre. C'est la théorie de la réponse linéaire.

1.2 Équation de conservation

On s'intéresse donc à l'évolution de grandeurs conservées, c'est-à-dire à des grandeurs extensives qui sont constantes pour un système isolé. Il peut s'agir de la masse, l'énergie, le nombre de particules ou de la charge par exemple. S'il y a une variation d'une de ces grandeurs, il y a eu échange avec l'extérieur.

Soit un système Σ avec une densité locale $n(\overrightarrow{r},t)$. On peut écrire le flux de particules sortant de Σ à travers un élément de surface $d\overrightarrow{S}$ comme étant $d\phi_n(\overrightarrow{r},t) = \overrightarrow{j_n}(\overrightarrow{r},t)d\overrightarrow{S}$ où $\overrightarrow{j_n}(\overrightarrow{r},t)$ est le vecteur densité de courant de particules. Ce vecteur représente le nombre de particules qui traversent $d\overrightarrow{S}$ par unité de temps.

Bilan des particules dans Σ :

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

Donc $N(t+dt) - N(t) = \iiint_V n(\overrightarrow{r},t+dt) - n(\overrightarrow{r},t)dV = \iiint_V \frac{\partial n}{\partial t}(\overrightarrow{r},t)dtdV$

Cette variation du nombre de particules correspond également au nombre de particules qui sont sorties de Σ entre t et t+dt :

$N(t+dt) - N(t) = -\oiint_S d\phi_n(\overrightarrow{r},t)dt = -\oiint_S \overrightarrow{j_n}(\overrightarrow{r},t)dtd\overrightarrow{S} = -\iiint_V div(\overrightarrow{j_n}(\overrightarrow{r},t))dtdV$ (Théorème de Green-Ostrogradski)

Ainsi on a $\iiint_V \left(\frac{\partial n}{\partial t}(\overrightarrow{r},t) + div(\overrightarrow{j_n}(\overrightarrow{r},t))\right) dtdV = 0$

Comme cette égalité est valable pour tout volume V, on obtient l'équation de conservation du nombre de particules :

$\frac{\partial n}{\partial t}(\overrightarrow{r},t) + div(\overrightarrow{j_n}(\overrightarrow{r},t)) = 0$

2 Diffusion

2.1 Équation de diffusion

Phénomène de transport d'une grandeur sans vitesse d'ensemble (sans déplacement macroscopique)

Pour décrire le comportement des milieux en réponse à une inhomogénéité, on cherche des lois phénoménologiques linéaires.

Dans le cas de la diffusion de particules, Fick propose la loi phénoménologique suivante :

$\overrightarrow{j_n}(\overrightarrow{r},t) = -D\overrightarrow{grad}(n(\overrightarrow{r},t))$ où D est le coefficient de diffusion et il s'exprime en $m^2.s^{-1}$

En injectant la loi de Fick dans l'équation de conservation, on obtient l'équation de diffusion :

$\frac{\partial n}{\partial t}(\overrightarrow{r},t) + div(-D\overrightarrow{grad}(n(\overrightarrow{r},t))) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial n}{\partial t}(\overrightarrow{r},t) = D\Delta(n(\overrightarrow{r},t))$

On retrouve des équations de diffusion dans d'autres domaines de la physique.

Comparaison entre différentes diffusions (prendre tableau du FFR

Ordre de grandeur et tout le tintouin

2.2 Application à la diffusion du glycérol

Expérience de la diffusion du glycérol

3 Phénomènes de transport

3.1 Diffusion, convection et radiation

Parler des différences entre convection, diffusion et radiation

3.2 Compétition entre les phénomènes de transport

Reynolds et autres nombres sans dimension

Expérience quantitative

Objectif de l'expérience

Mesurer le coefficient de diffusion du mélange eau-glycérol.

Matériels

- Laser
- Tube Plexiglass à 45° pour faire une nappe laser
- Support élévateur
- Cuve + Burette pour diffusion particulaire (Loi de Flick)
- Eau permutée
- Mélange eau + glycérol (50
- Papier millimétré + scotch
- Écran (à placer à environ 50 cm de la cuve)
- Chronomètre
- Mètre

Protocole

Mettre en place la nappe laser en s'assurant de la sécurité du dispositif. Remplir la burette du mélange eau+glycérol. Remplir une partie de la cuve d'eau permutée (environ 1/3). Verser le mélange dans la cuve avec la burette (environ 1/3) et lancer le chronomètre. Mesurer la hauteur du pic de déviation au cours du temps. Mesurer la distance entre la cuve et l'écran. Tracer l'évolution temporelle de la déviation pour remonter au coefficient de diffusion.

Précautions expérimentales

Bien faire attention à la nappe laser à l'installation et lorsque la manip est lancée. S'assurer que la cuve est au bord du support élévateur pour que le maximum de déviation arrive bien sur l'écran. Insérer le mélange doucement pour limiter au maximum la convection. Bien mesurer la distance entre la cuve et l'écran.