MP34 - Phénomènes de transport

May 2, 2019

Contents

- 2015, 2016, 2017 : Des transports autres que diffusifs peuvent faire l'objet de ce montage. Lors de la mesure du coefficient de diffusion du glycérol, par la déviation d'une nappe laser, les candidats doivent être à même d'expliquer précisément la nature de l'image observée sur l'écran et son origine physique.

- 2014 : Des transports autres que diffusifs peuvent faire l'objet de ce montage.

- 2010, 2011, 2013 : Le choix des expériences doit veiller à souligner l'aspect transport. Il existe d'autres phénomènes de transport que ceux régis par une équation de type $j = \alpha gradV$.
- 2012 : Ce montage est ouvert à de nombreux domaines, pouvant donner lieu à des études comparées ; on pensera à exploiter les régimes transitoires et les régimes permanents. Le choix des expériences doit veiller à souligner l'aspect transport. Il existe d'autres phénomènes de transport que ceux régis par une équation de type $j = \alpha grad(V)$.
- 2009 : La mesure de la conductivité thermique d'un métal par sa réponse en température à une excitation alternative a posé problème à de nombreux candidats par suite de l'analyse des mesures à l'aide d'une loi non valide avec les conditions aux limites concernées. Le régime permanent implicitement mis en jeu doit être précisé, de même que son temps d'établissement.
- Jusqu'en 2000, le titre était : Phénomènes de transport (transferts thermiques, transports de matière, de charge...).
- 2000 : Il faut garder à l'esprit qu'on distingue, dans certains domaines, plusieurs modes de transport : conduction, convection, diffusion... Connaître a priori l'ordre de grandeur de quelques coefficients de diffusion est indispensable. Les dispositifs dédiés permettant d'étudier l'effet Hall sur des échantillons sélectionnés semblent poser, malgré leur simplicité, de gros problèmes d'utilisation.

Références :

- BUP 827 Pour la loi de Stephan
- BUP 819 diffusion du glycérol
- Calecki diffusion du glycérol calculs
- *Physique expérimentale* Fruchart Lidon ...**Jolidon** convection et viscosimètre à billes

La manip de diffusion du glycérol doit être lancée dès le début de la préparation !!!

Attention à ne pas utiliser le terme "propagation" lorsqu'on parle de diffusion. La notion de progression est plus appropriée.

Les caractéristiques du matériel utilisé pour les expériences de cours doivent être connues et à disposition.

Pour certaines précisions sur la théorie de la diffusion : voir LP18

1 Introduction :

Les phénomènes de transport concernent les situations où on a un déplacement d'une grandeur,scalaire ou vectorielle, sans qu'il n'y ait disparition ou création de celle- ci. Ils naissent dans les systèmes hors équilibre. Ils sont généralement classés en quatre catégories : la convection lorsqu'il y a déplacement macroscopique de matière, la diffusion due à l'inhomogénéité d'un paramètre intensif, la dérive sous l'action d'un champ de force et le rayonnement lorsque le transport ne nécessite pas de milieu matériel. Les phénomènes de transport mettent en jeu une grande diversité de grandeurs comme la quantité de matière, l'énergie thermique ou la quantité de mouvement.

Dans ce montage, nous ne nous intéresserons pas à la dérive, nous allons décrire principalement les phénomènes de diffusion pour en faire ressortir les différentes propriétés et la variétés des situations qui les caractérisent.

2 Convection

Jolidon p407

2.1 Expérience :

Experience :

Pour rendre cette expérience quantitative, on mesure le temps nécessaire pour qu'une particule de sciure parcoure la longueur L du tube vertical. On mesurera cette distance à la règle et la durée τ au chronomètre. On fera 8 fois la mesure dont une fois devant le Jury.

On observe[1] que la sciure[2] se met en mouvement : c'est le signe de la convection thermique naturelle.
En effet, la densité du fluide dépend de la température : plus il est chaud, moins il est dense[3].
La poussée d'Archimède introduit ici un mouvement macroscopique de fluide dû à un gradient de température (par conservation du débit). Un gradient de température a ainsi entraîné un transport de matière et d'énergie thermique.

On déduit la vitesse $V = \frac{L}{\tau}$ On inscrit la valeur de τ.

Tr

On comparera le temps τ avec celui obtenu lors de la diffusion visqueuse.

Si non, cette expérience peut n'être que quantitative; Il faut alors illustrer qu'il y a déplacement macroscopique de matière.

[1]Le régime de convection est obtenu pour un grand nombre de Rayleigh :

$$R_a = \frac{g\beta d^3 \Delta T}{\nu D_{th}} \tag{1}$$

d une distance caractéristique
β la dilatation thermique isobare
D_{th} la diffusivité thermique

[2]Elle a une densité très proche de celle de l'eau et est donc facilement mise en mouvement. Elle permet alors de voir l'écoulement.

[3]C'est faux pour l'eau entre 0 et 4 C° où sa densité est croissante. Le maximum est à 4 C°

2.2 Incertitudes :

- Incertitude sur τ au chronomètre :
  - erreur systématique due au temps de réaction de l'expérimentateur ($\delta\tau = 0.1\ s \times 2$) semble honnête pour chaque mesure.
  - On ajoute l'écart-type sur une série de $N = 8$ mesures avec le même rayon.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\tau_i - \overline{\tau})^2} \tag{2}$$

  où $\overline{\tau}$ est la valeur moyenne de la série.

  Donc :

$$u(\tau) = \sqrt{\delta\tau + \sigma} \tag{3}$$

- Longueur : mesure à la règle, $u(L) = 2 \times \frac{0.001\,m}{\sqrt{12}}$

$$u(V) = V \times \sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(\tau)}{\tau}\right)^2} \tag{4}$$

3 Diffusion de particule : le glycérol dans l'eau

Cette manip doit être lancée en tout premier dans le montage.
voir BUP 819 et Calecki pour les calculs.

3.1 Expérience :

Experience :

On remplit une cuve d'eau et **DÉLICATEMENT** on dépose la solution eau-glycérol $50 - 50$ (en volume) au fond de la cuve avec une burette. On éclaire la cuve avec une nappe laser inclinée à 45°, passant par l'interface.

Précautions : Éviter d'introduire un mouvement de convection (ne pas enlever la burette après avoir introduit le glycérol).
Il faut avoir un indice optique relativement proche de l'eau, d'où un mélange eau-glycérol $50-50$. A l'instant $t = 0$, les deux liquides ne sont pas mélangés, l'interface est donc horizontale. Puis ils diffusent l'un dans l'autre suivant la direction verticale : la concentration en glycérol et donc l'indice optique dépend alors du temps et de l'altitude.

3.2 Théorie

3.2.1 Principe:

Le "moteur" de la diffusion est l'agitation thermique qui met en mouvement les particules. Ici, le paramètre inhomogène à considérer est la densité des particules C. On utilise la loi phénoménologique de Fick :

$$\overrightarrow{j} = -D\overrightarrow{grad}(C) \tag{5}$$

La conservation du nombre de particules en l'absence de sources donne :

$$\frac{\partial}{\partial t}C = -D\Delta C \tag{6}$$

l'indice optique de la solution varie en fonction de la concentration en glycérol. Un faisceau lumineux traversant un milieu possédant un gradient de concentration en glycérol sera alors dévié proportionnellement au gradient.

3.2.2 Hypothèses :

- La température est constante
- mélange uniquement diffusif
- L'épaisseur du milieu est suffisamment faible pour avoir un gradient de concentration constant sur toute l'épaisseur
- Milieux semi-infinis
- Temps assez long pour pouvoir confondre θ et $tan\theta$ en $z = 0$
- On néglige l'influence de la pesanteur

3.2.3 Équations :

Pour des faibles déviations, on a (z **est la direction horizontale**) :

$$\theta = e\frac{\partial n}{\partial z} \tag{7}$$

De plus, on suppose que l'indice du mélange est la moyenne pondérée des indices des deux solutions :

$$n = (1 - C)n_{eau} + C\, n_{glycerol} \tag{8}$$

Avec l'équation de diffusion, on peut trouver :

$$\theta = -e(n_{eau} - \; n_{glycerol})\frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}}exp\left(-\frac{z^2}{4Dt}\right) \tag{9}$$

En inclinant la nappe laser à 45° par rapport à la verticale, on décale horizontalement les points d'impact des rayons qui traversent la cuve à des altitudes différentes. La déviation est alors proportionnelle à l'écart vertical entre un point de la trace et la droite qu'on aurait en l'absence de cuve. L'écart maximal se trouve en $z = 0$.
En $t = 0$, on a un segment lumineux puisque le gradient d'indice optique est une fonction δ de Dirac. Puis, d'après l'expression précédente, la trace sur l'écran ressemble à une gaussienne qui s'étale en s'aplatissant au cours du temps.
Pour avoir $tan\theta \approx \theta)$), on doit se limiter à des temps assez grands en $z = 0$. la hauteur $h(t)$ du faisceau laser arrivant sur l'écran (à une distance L de la cuve) est :

$$h(t) = eL \times \frac{n_{glycerol} - n_{eau}}{\sqrt{4\pi Dt}} \tag{10}$$

3.3 Analyse :

On trace :

$$f(t) = \frac{1}{h^2} \times \frac{(eL(n_{glycerol} - n_{eau})^2}{4\pi} = Dt \tag{11}$$

C'est une droite de pente D. Pour des valeurs de comparaisons, voir **https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1**

Incertitudes :

- sur les proportions du mélange.
- sur le temps pour la mesure de chaque points
- sur la mesure de chaque point à la règle.
- sur les mesures de e et L

La température de la pièce (avant et après) doit être écrite au tableau. Elle a son mot à dire.

4 Diffusion de la quantité de mouvement

C'est une manip longue car on répète les mesures

Jolidon p433

4.1 Théorie :

On retrouve une équation de diffusion dont le coefficient est la **viscosité cinématique** ν. La viscosité est responsable des forces de frottement qui s'exerce sur un objet dans l'écoulement d'un fluide visqueux. Le but est ici de déterminer ce coefficient de diffusion (la viscosité cinématique), cette fois en régime permanent. Principe Pour cela on fait tomber des billes de rayon r et masse volumique ρ_B dans une éprouvette cylindrique remplie d'un fluide de masse volumique ρ_F, ici de l'huile Rotitherm.

4.1.1 Hypothèses :

- Régime stationnaire atteint
- Écoulement rampant ($R_e << 1$)
- Le fond de l'éprouvette n'a pas d'influence sur l'écoulement

4.1.2 Mise en équation

- **Force de frottement fluide** donnée par la formule de Stokes[4]. à bas nombre de Reynolds :

$$\overrightarrow{f} = 6\,\pi\,\eta\,\frac{r}{1 - 2.1\frac{r}{R}} \tag{12}$$

Où R est le rayon du tube et r le rayon de la bille.

[4] Normalement $\overrightarrow{f} = -6\pi\eta\overrightarrow{v}$.
D'après Jolidon, la forme différente ici tient compte du fait que le milieu n'est pas infini. Il y a alors des recirculations de fluide. Ici, on a gardé que le premier terme correctif lorsque $R_e \longrightarrow 0$ ce qui correspondrait à une correction de l'ordre de 7% (Voir Jolidon paragraphe 4.4 pour plus de détails)

- Poussée D'Archimède $\overrightarrow{\Pi} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_f \overrightarrow{g}$
- Poids $\overrightarrow{P} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_B \overrightarrow{g}$

Quand le régime permanent est atteint, la vitesse de la bille est constante et vaut :

$$V = \frac{2}{9} \times \frac{\rho_B - \rho_F}{\eta} r^2 \left(1 - 2.1\frac{r}{R}\right) \tag{13}$$

Tr

On va utiliser la formule précédente pour déterminer expérimentalement la viscosité du fluide : η. Pour cela, on va chercher à mesurer V.

On peut mettre en évidence que de la quantité de mouvement transférée de la bille vers le fluide car Pi et P ne suffisent pas à se compenser et on devrait alors observer un mouvement rectiligne accéléré.

4.2 Expérience :

Experience :

Matériel : Éprouvette remplie d'huile[a] Rotitherm M220, billes en acier de différents rayons, chronomètre, règle

Mesurer le temps de chute τ d'une bille entre deux graduations séparées parla distance $L \approx 10\,cm$, plusieurs fois (8 fois) pour plusieurs rayons, et remonter à la vitesse $V = \frac{L}{\tau}$.

[a] Le fluide choisi est de l'huile de silicone. Elle est préférable au glycérol car le glycérol s'hydrate à l'air libre ce qui va altérer ses propriétés et notamment sa viscosité.

On réalise un ajustement de la forme $V = f(r) = a\,r^2 - b\,r^3$ au vu de l'équation précédente. Le coefficient a permet de remonter à la viscosité dynamique de l'huile η_{exp} .

$$\eta_{exp} = \frac{2}{9}\frac{(\rho_B - \rho_f)}{a} g \tag{14}$$

4.3 Incertitudes :

- Incertitude sur τ au chronomètre :
  - erreur systématique due au temps de réaction de l'expérimentateur ($\delta\tau = 0.1\ s \times 2$) semble honnête pour chaque mesure.
  - On ajoute l'écart-type sur une série de $N = 8$ mesures avec le même rayon.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\tau_i - \overline{\tau})^2} \tag{15}$$

où $\overline{\tau}$ est la valeur moyenne de la série.

Donc :

$$u(\tau) = \sqrt{\delta\tau + \sigma} \tag{16}$$

- Longueur : mesure à la règle, $u(L) = 2 \times \frac{0.001\,m}{\sqrt{12}}$
- Diamètre des billes : mesure au pied à coulisse et données constructeur. Graduation/$\sqrt{12}$ (l'incertitude sur r est donc la moitié de celle-ci.
- Masse m des billes : dernier digit de la balance et données constructeur.

On déduit l'incertitude sur la masse volumique des billes :

$$u(\rho) = \rho_B \times \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + 3\left(\frac{u(r)}{r}\right)^2} \tag{17}$$

Enfin, le fit nous donne les valeurs de $u(a)$ On déduit que :

$$u(\eta_{exp}) = \eta_{exp} \times \sqrt{\left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_B)}{\rho_B}\right)^2} \tag{18}$$

Tr

> Bien d'autres situations qui mettent en jeu la diffusion. Elles ont toutes en commun d'avoir pour origine l'inhomogénéité d'un paramètre physique. C'est un transport qui se fait de proche en proche, sans déplacement de matière contrairement à la convection. C'est aussi un phénomène bien moins efficace que la convection comme le montrent les temps caractéristique. La convection et la diffusion, tout comme la dérive ou migration que nous ne présenteront pas dans ce montage, nécessitent un milieu matériel. Nous allons maintenant étudier un mode de transport pour lequel un **milieu matériel** n'est pas nécessaire : le rayonnement.

5 Rayonnement

BUP 827

5.1 Théorie :

5.1.1 Principe

D'après la loi de Stefan, la puissance surfacique[5] émise par un corps noir à la température T est :

$$j = \sigma T^4 \tag{19}$$

où $\sigma = 5,6703\,10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann. Nous allons vérifier cette loi avec une ampoule de tungstène, assimilée à un corps noir.

[5] La plupart des gens utilise la notation P pour désigner cette quanité. Personnellement, je trouve que c'est trompeur pour les élèves. Je préfère utiliser la notation *norme du vecteur densité de courant de puissance* : j.

Mise en équation On a la relation entre la résistance et la température du tungstène (BUP 827) :

$$T = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a\frac{R}{K}}}{2a} \tag{20}$$

avec a et b obtenue à partir de la relation entre la résistivité et la température qu'on considère connue,

$$a = 2,54\,10^{-14}\ m/K^2 \qquad b = 23.0\,10^{-11}\ m/K \tag{21}$$

et

$$K = \frac{R(T_0)}{aT_0^2 + bT_0} \tag{22}$$

où $T0 = 2400\ K$ qui correspond au point de fonctionnement de l'ampoule aux valeurs nominales, pour l'ampoule utilisée ($6\ V$ et $0.1\ A$) soit :

$$K = 8.6\,10^7\ m^{-1} \tag{23}$$

On détermine aussi la puissance rayonnée en considérant qu'elle correspond à toute l'énergie fournie, donc à l'équilibre thermique, la puissance totale rayonnée est $P = UI$.

5.1.2 Hypothèses :

- Régime permanent
- Le tungstène est un corps noir.
- Les pertes se font uniquement par rayonnement.

5.2 Expérience

Experience :

Transformateur
Ampoule faible puissance
Voltmètre
Ampèremètre

Mesurer le courant traversant l'ampoule et la tension à ses bornes. On a alors accès à la résistance et à la puissance fournie à l'ampoule.

On trace $ln(P) = f(T)$, on doit obtenir une droite de pente 4.

5.3 incertitudes

Sources :

- sur U, dernier digit de l'ampèremètre et du voltmètre $+0.1\times$ valeur (voir la notice pour vérifier...
- sur I, dernier digit de l'ampèremètre et du voltmètre $+0.1\times$ valeur (voir la notice pour vérifier...

$$u(P) = P\sqrt{\left(\frac{u(I)}{I}\right)^2 + \left(\frac{u()}{I}\right)^2} \tag{24}$$

5.4 Vérification du modèle :

- En réalité, le tungstène **n'est pas vraiment un corps noir**, (et il peut être entouré par du verre...) il faut donc prendre en compte son émissivité ϵ :

$$P = \epsilon\sigma T^4 \tag{25}$$

qui vaut $\epsilon = 0.115$ à $1000\ K$ et $\epsilon = 0.28$ à $2000\ K$.

- Échanges d'énergie par convection avec le support métallique et convection avec le gaz qui l'entoure, donc il a des termes supplémentaires (notamment convecto-diffusif avec le coefficient de Newton). Cependant, les ampoules faible puissance contiennent peu de gaz.

- La loi de Stefan s'applique sur un corps convexe, or le filament à une structure spiralée, certains tronçons absorbent l'énergie émise par d'autres parties.

Tr

> Il serait bon d'améliorer cette expérience avec une thermistance par exemple qui mesurerait une portion du flux lumineux.

6 Conclusion

Dans ce montage, on s'est intéressé à plusieurs types dde transport. Que ce soit de la chaleur, des particules ou de la quantité de mouvement.

On aurait aussi pu s'intéresser à essayer de lier ces grandeurs. Par exemple, dans les métauux, conduction électrique et thermique sont liées (loi de Wiedermann Franz)...