

# M34 Phénomènes de transport

Caroline BOULOC, Sandra MONTALESCOT

2012-2013

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Transport de particules</b>	<b>2</b>
1.1	Mise en évidence de la convection dans un liquide . . . . .	2
1.2	Mesure optique de la diffusivité du glycérol dans l'eau . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Conduction thermique et électrique</b>	<b>5</b>
2.1	Mesure de la conductivité thermique du cuivre . . . . .	5
2.2	Mesure de la conductivité électrique de l'aluminium . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Diffusion de quantité de mouvement : mesure de la viscosité dynamique du glycérol</b>	<b>8</b>

## Bibliographie

- Dictionnaire de physique expérimentale T2 Thermodynamique et applications, QUARANTA & DONNINI  
-> plein de manip' proposées, beaucoup de qualitatives aussi, mais de grosses erreurs par endroits (valeurs numériques, exploitation des résultats)
- Optics, SOMMERFELD -> manip' de diffusion du glycérol dans l'eau
- Physique pratique T2 Mécanique et thermodynamique, BERTY, ESCAUT, MARCHAND, MARTIN & OUS-TRY -> quelques idées de manip' qualitatives

# Introduction

(Quaranta)

On appelle “phénomènes de transport” l’ensemble des phénomènes irréversibles se produisant dans des systèmes matériels hors équilibre. On s’intéresse donc au flux d’une grandeur extensive qui résulte d’un gradient d’une grandeur intensive.

Ce montage s’intéresse principalement aux phénomènes de diffusion dans différents domaines de la physique, mais il faut également parler de convection, la mettre en évidence et éventuellement faire une expérience quantitative dessus (mesure de débit,...). La mise en évidence du transport radiatif est assez compliquée, et il n’y a pas le matériel nécessaire à l’ENSC donc oubliez-le, ou citez-le simplement dans votre conclusion si vous êtes prêts à répondre aux questions associées.

*Rq : Les remarques du correcteur sont disséminées dans tout le compte-rendu.-*

## 1 Transport de particules

### 1.1 Mise en évidence de la convection dans un liquide

(Quaranta)

Le tube carré représenté à la figure 1 contient de l’eau. On le chauffe à l’aide d’une lampe à alcool ou d’un petit bec bunsen. Lorsque l’on verse du colorant par l’ouverture (située au dessus de la lampe, pour être vraiment démonstratif), le colorant part sur le côté au lieu de descendre tout droit, mettant en évidence un mouvement de convection de l’eau.

**Interprétation :** Les particules de fluide chauffées se dilatent donc leur masse volumique diminue et elles remontent sous l’effet de la poussée d’Archimède. Arrivées en haut, elles se refroidissent donc se recontractent et redescendent.

**Remarque :** Il vaut mieux commencer à chauffer l’eau un petit peu avant (5 ou 10 secondes) de mettre le colorant, ainsi on ne le verra pas trop descendre, il partira directement sur le côté.

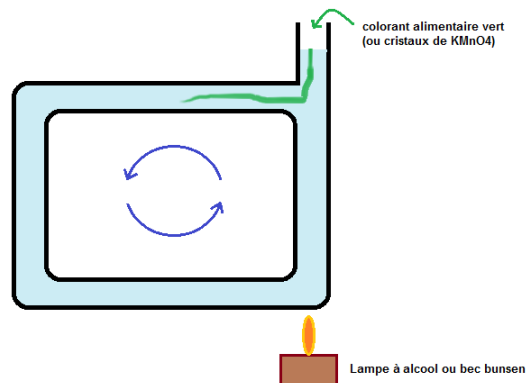


FIGURE 1 – Mise en évidence d’un mouvement de convection à l’aide de colorant

#### Matériel :

- tube carré spécial
- colorant alimentaire (ou cristaux de  $KMnO_4$ )
- lampe à alcool ou petit bec bunsen
- pied, noix, pinces
- écran blanc

**Autre expérience de convection possible :** Mesure du débit à travers une conduite cylindrique lorsqu’on impose un gradient de pression à ses extrémités. Cette expérience présente l’avantage d’être quantitative, mais est plus longue.

## 1.2 Mesure optique de la diffusivité du glycérol dans l'eau

Attention! Ne pas se fier au protocole du Quaranta, il est faux! Prendre plutôt le Sommerfeld (mais attention, dans l'index il y a une erreur dans le numéro de la page, ce n'est pas p3 mais p347, dans les compléments à la fin du livre. cf table des matières)

/!\ EXPERIENCE A LANCER AU TOUT DEBUT DES 40 MINUTES /!\ Il faut prendre des points pendant toute la préparation, toutes les 5 minutes environ, et traiter les données à la fin.

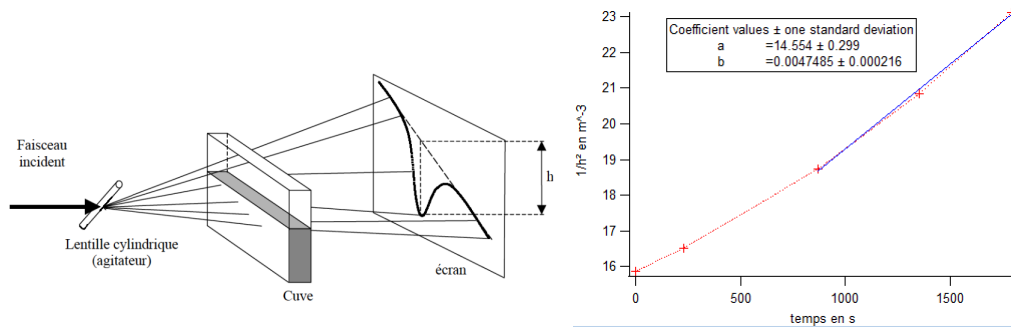


FIGURE 2 – Mesure optique de la diffusivité du glycérol dans l'eau : montage (à gauche) et points expérimentaux + ajustement (à droite)

### Préparation et mesures :

- Commencez par positionner le laser, la lentille cylindrique, la cuve et l'écran de manière à éclairer \*TOUTE\* la cuve (jusqu'aux bords!!) avec un faisceau en "feuille de lumière" à 45° et à avoir une bonne image. Attention, la déviation attendue peut descendre très bas, donc placez la cuve sur un support élévateur, la face de sortie bien au bord du support (pour ne pas couper un morceau du faisceau dévié), et l'écran pas trop loin pour éviter un grandissement vraiment trop important.
- Repérez au crayon sur l'écran (recouvert de papier millimétré!) la trace du faisceau lumineux non-dévié, mesurez le grandissement vertical par rapport à la face de sortie en mesurant la taille de l'image de la cuve (le bas de l'image correspond au bas de la cuve (pas de faisceau en dessous), et l'une des discontinuités vers le haut correspond au haut de la cuve. Placez un objet opaque au dessus de la cuve et regardez où s'arrête votre image pour repérer l'image du bord supérieur.
- Mesurez la distance  $L$  entre la face de sortie de la cuve et l'écran (une cinquantaine de cm, c'est bien.) et  $e$  la largeur intérieure de la cuve (épaisseur de fluide traversée par le laser).
- Préparez un mélange 50% eau distillée - 50% glycérol (environ 30 à 50mL suffiront), mélangez bien. Si vous avez un réfractomètre, mesurez son indice de réfraction. Sinon, faites précisément votre mélange et calculez son indice par  $n_{mélange} = n_{eau} + x_{glycérol} \times (n_{glycérol} - n_{eau})$  où  $x_{glycérol}$  est la fraction de glycérol dans votre mélange (l'indice du mélange suit une loi affine en la fraction de glycérol). Vous aurez besoin de cet indice pour les calculs, donc ne l'oubliez pas!
- Devant le jury : remplissez à moitié la cuve avec de l'eau distillée, puis rajoutez une couche d'un mélange eau+glycérol (50-50%) sous la couche d'eau. Pour cela, il faut avoir placé une burette dans la cuve pour injecter \*DOUCEMENT\* le mélange eau+glycérol directement dans le fond de la cuve. Il faut à tout prix éviter les mouvements de convection pour obtenir une interface bien lisse (sinon, il faut attendre qu'elle se reforme par décantation, et ça peut vous faire perdre 3 ou 4 minutes de montage...). /!\ Ne pas retirer la burette!!!! /!\ Sinon vous mélangerez tout. || /!\ La première chose qui sort de votre burette est une bulle, qui crée de la convection parce qu'elle remonte à la surface. Faites-la sortir doucement, fermez la burette entre elle et le mélange, attendez que la surface se stabilise, et ensuite seulement versez le mélange /!\
- Une fois l'interface stabilisée, lancez un chronomètre (l'origine des temps ne compte pas, donc peu importe quand vous le déclenchez) et mesurez la distance maximale  $h$  du faisceau par rapport à la situation sans interface (que vous avez tracée au crayon) toutes les 5 minutes environ.
- Enregistrez sous Igor (ou Regressi, ou Excel, ou Paint) cet écart maximal  $h$  et le temps  $t$  auquel vous l'avez mesuré.
- Mesurez éventuellement

**Exploitation des mesures :** Les rayons lumineux qui traversent la cuve ressortent non déviés s'ils ne traversent que des milieux d'indice homogène. Dans les zones d'eau pure ou de mélange homogène (loin de l'interface, quoi), c'est le cas. Mais dans la zone autour de l'interface, il existe un gradient d'indice optique orienté vers le bas, et les rayons lumineux sont déviés vers le bas lors de la traversée. On observe donc un faisceau déformé comme sur la figure 2. (NB : le fait d'éclairer avec une feuille de lumière à 45° permet de sonder simultanément toutes les couches du mélange et la déviation associée, et on fait apparaître directement la gaussienne de diffusion qui nous permet de remonter à la largeur de l'interface!)

La déviation maximale du faisceau (l'angle maximal en sortie par rapport au faisceau incident) correspond au centre de l'interface et est reliée au gradient d'indice dans le milieu par la relation  $\alpha \approx e||\vec{grad}(n)||$ , et  $\alpha \approx \frac{h}{L}$  pour de petits angles de sortie (cf remarque à la fin de cette sous partie concernant cette approximation). De plus,  $||\vec{grad}(n)|| \approx \frac{n_{mélange} - n_{eau}}{\Delta z}$  où  $\Delta z$  est l'épaisseur de l'interface et vaut  $\Delta z = 2\sqrt{\pi D(t - t_0)}$  avec D la diffusivité du glycérol dans l'eau (que l'on cherche) et  $t_0$  la date à laquelle les deux liquides n'ont pas encore diffusé (vous ne pas mesurerez pas et peu importe, elle disparaîtra lors de l'ajustement des courbes). Ainsi, on a :

$$h \approx \frac{Le(n_{mélange} - n_{eau})}{2\sqrt{\pi D(t - t_0)}}$$

En traçant  $\frac{1}{h^2} = f(t)$  et en l'ajustant par une droite affine, on remonte donc facilement à D.

**Valeurs tabulées :**  $n_{eau} = 1.33$ ,  $n_{glycérol} = 1.47$ ,  $D \approx 3.10^{-10} m^2 s^{-1}$  à 20°C pour un mélange 50-50%. Valeur peu fiable (on trouve des valeurs différentes suivant les sites, sans que soient précisées la température ou la concentration en glycérol, mais l'ordre de grandeur est toujours le même, autour de  $5.10^{-10} m^2 s^{-1}$ ). D dépend de la concentration en glycérine et de la température. En gros, si vous trouvez du  $10^{-10} m^2 s^{-1}$  c'est bien.

#### Matériel :

- petit laser + support
- agitateur en verre (il en existe un petit monté sur un support de lentille) qui sert de lentille cylindrique
- cuve transparente (environ 10x4x2cm) + support(s) Boy
- écran recouvert de papier millimétré
- chronomètre
- petite burette + support, noix et pince
- glycérol et eau distillée
- béchers, éprouvette graduée et agitateur (pour faire le mélange eau + glycérol) + papier essuie-tout car on en met toujours à côté
- pied à coulisse pour mesurer e
- longue règle pour mesurer L
- ordinateur + Igor + vidéoprojecteur
- thermomètre pour faire croire que vous comparez votre valeur à la valeur tabulée à la même température, même si en fait vous aurez bien du mal à trouver cette valeur dans le Handbook puisqu'elle est de toute façon fautive dans le Handbook qui est dans la salle de thermo...)

#### Remarques

- L'angle de sortie n'est en fait pas négligeable, une approximation de petits angles n'est donc pas nécessairement justifiée... ceci peut expliquer en partie l'écart entre la valeur expérimentale et la valeur tabulée. En fait, plus on se place au début de l'expérience (angle de déviation maximal), moins cette approximation est justifiée... Il est globalement de l'ordre de 10° au cours de la manip, bien plus les premières minutes. On ne fait pas l'expérience avec du glycérol pur car la différence d'indice serait trop importante et il ne serait vraiment plus possible de considérer que  $\alpha$  est petit.
- Il s'agit de la seule mesure de coefficient de diffusion de particules que l'on puisse réaliser dans le cadre d'un montage. Cette expérience est classique mais attendue par le jury. Et il faut impérativement l'avoir déjà faite pendant l'année, elle ne s'improvise pas en 4h de préparation le jour de l'oral...
- Ne prenez pas en compte les premiers points dans votre ajustement de courbe, ils vous donneraient une valeur trop basse pour D (la pente augmente au début puis se stabilise).
- Si vous trouvez les valeurs tabulées de D en fonction de la concentration en glycérol et de la température dans la littérature, n'hésitez pas à communiquer la référence bibliographique à toute la classe. C'est l'un des gros problèmes de cette manip...

- La diffusion étant un phénomène irréversible, il n'y a pas de retour en arrière possible une fois le mélange eau+glycérol versé. Assurez-vous donc que vous êtes bien prêt avant de le verser.
- Il faut éviter de bousculer la cuve pendant la manip, sous peine de causer de la convection qui accélérerait le mélange. Toutefois, si la secousse est faible, on constate seulement des oscillations de la surface (donc du faisceau en sortie), et si l'oscillation est un peu trop forte, une fois que l'interface se sera re-stabilisée, vous aurez simplement une discontinuité dans votre courbe, avec la même pente de part et d'autre, donc vous pourrez tout de même calculer D.
- Cette manipulation n'est pas du tout reproductible, vous devrez reprendre tous les points de mesure devant le jury (d'une fois à l'autre  $n_{mélange}$ , L et  $t_0$  varient!).
- Il existe d'autres protocoles sur cette expérience, qui proposent de mesurer la largeur du pic plutôt que sa hauteur. Si vous tenez absolument à passer 15 de vos 40 minutes de montage à prendre les points de mesure par cette méthode avec 80% de chance de déplacer malencontreusement votre écran au cours des relevés donc de changer la valeur de L en plein milieu, allez-y. Sinon, oubliez cette méthode :)

## 2 Conduction thermique et électrique

(=diffusion de chaleur sous l'effet d'un gradient de température et diffusion de charges sous l'effet d'un gradient de potentiel)

### 2.1 Mesure de la conductivité thermique du cuivre

On utilise une longue barre en cuivre calorifugée chauffée à l'une de ses extrémités grâce à une résistance chauffante incluse dans la barre. Le puissance thermique à l'extrémité de la barre est constante :  $P_0 = 30 \pm 1 W$ . On étudie la distribution des températures dans la barre en régime permanent grâce à 5 thermocouples fixés tous les  $10.0 \pm 0.2 cm$  sur la barre.

**ATTENTION !** Il faut entre 2 et 3 heures à la barre pour atteindre son régime permanent ! Pensez à la brancher assez tôt en préparation !

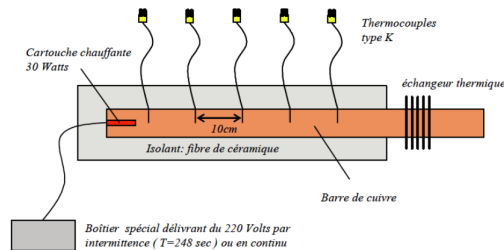


FIGURE 3 – Barre calorifugée

On travaille en régime permanent et on néglige les pertes. On a alors, dans la barre,  $\frac{d^2T}{dx^2}(x) = 0$  donc  $T(x) = T_0 - \frac{j_0}{\lambda}(x - x_0)$  où  $\lambda$  est la conductivité thermique du cuivre,  $T_0$  est la température de la barre au niveau de la cartouche chauffante,  $x - x_0$  est la distance à la cartouche chauffante et  $j_0 = \frac{P_0}{S}$  est le flux thermique imposé à l'extrémité de la barre (attention à ne pas confondre  $j_0$  et  $P_0$  dans les applications numériques...!).

On trace donc la température en fonction de la distance à la cartouche chauffante (voir figure 4). Le faible écart à la linéarité (quelques  $\sigma$ ) permet de justifier l'hypothèse d'une conduction sans pertes. Le coefficient directeur de cette droite est  $\frac{j_0}{\lambda}$ , et connaissant  $j_0$ , on en déduit  $\lambda$ .

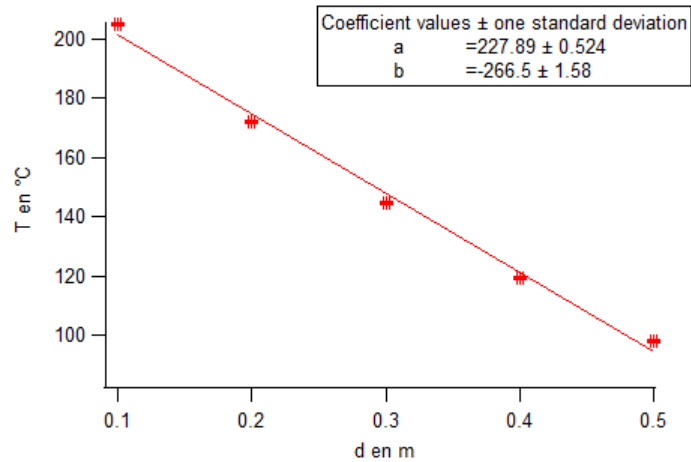


FIGURE 4 – Evolution de la température le long de la barre en régime permanent. Le léger écart à la linéarité est principalement dû aux pertes latérales négligées que nous négligerons.

#### Remarques :

- Il est tout à fait normal de trouver une valeur supérieure à la valeur tabulée, car le flux thermique dans la barre est doublement surestimé : nous avons réglé les pertes le long de la barre mais aussi et surtout les pertes au niveau de la cartouche chauffante (une partie de l'énergie injectée ne part pas du côté des thermocouples). On trouve tout de même le bon ordre de grandeur, mais avec une erreur de 50% environ sur la valeur tabulée.
- Le modèle sans pertes est très bon, l'écart à la linéarité étant très faible. Ne pas chercher à faire un modèle avec pertes, comme la barre n'est pas infinie cela vous donnerait une expression monstrueuse.
- En fait, l'écart à la linéarité peut être imputé aux pertes latérales, mais l'écart de  $\lambda_{exp}$  à sa valeur tabulée est du principalement à la valeur surestimée de  $j_0$ . Ne pas incriminer les pertes latérales ici, leur rôle est mineur.
- Cette expérience est suffisante, il n'est pas nécessaire d'aller chercher une expérience d'onde thermique, qui est plus compliquée à mettre en place, plus difficile à analyser, prend beaucoup de temps (y compris en préparation), et déplaît fortement à l'un des membres du jury. De plus, elle ne permet pas de faire l'analogie directe avec l'expérience suivante.

#### Matériel :

- barre en cuivre calorifugée
- alimentation associée
- boîtier TC08 + logiciel Picolog
- Igor ou Regressi + vidéoprojecteur

## 2.2 Mesure de la conductivité électrique de l'aluminium

Cette expérience est complètement analogue à l'expérience précédente et il serait intéressant de les présenter de la même manière pour mettre en évidence cette analogie.

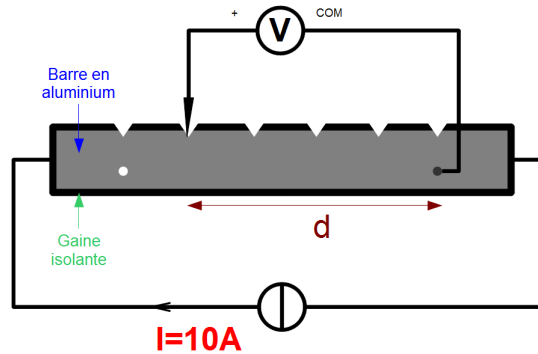


FIGURE 5 – Mesure de la conductivité électrique de l'aluminium

On utilise une longue barre en aluminium (ou en cuivre) recouverte d'une grosse gaine isolante (pour éviter les courts-circuits), avec quelques trous creusés tous les  $3.5 \pm 0.1 \text{ cm}$  pour venir relever des tensions en différents points de la barre. On fait circuler un courant continu dans cette barre (environ 10A pour avoir des tensions détectables, ce qui nécessite une alimentation puissante et un voltmètre de précision), et on relève la différence de tension entre un point de référence et les trous situés à différentes distances du point de référence. On trace ensuite l'évolution de la tension  $U$  avec la distance  $d$  au point de référence. En théorie, on a  $U=RI$  avec  $R = \frac{L}{\sigma S}$  où  $L$  est la distance entre les deux électrodes,  $S$  la section de la barre et  $\sigma$  la conductivité électrique du matériau. Un ajustement par une droite affine donne donc accès à la conductivité électrique du matériau. Valeur tabulée :  $\sigma_{Al} = 37.7 \cdot 10^6 \text{ Sm}^{-1}$  à température ambiante.

#### Remarques :

- Les tensions mesurées sont de l'ordre de la dizaine de  $\mu V$  pour une intensité de 10A environ. Pour le barreau de cuivre, c'est de l'ordre du microvolt, donc presque impossible à mesurer proprement.
- La barre est certainement constituée d'un alliage plutôt que d'aluminium seul car ce dernier est très malléable... toutefois la valeur expérimentale est très proche de la valeur tabulée pour l'aluminium, et loin de celle du Dural. Et aucune étiquette ne précise quel est l'alliage utilisé... mystère à résoudre.
- L'expérience marche vraiment bien une fois qu'on a trouvé le bon matériel (alim de puissance, fils d'électrotechnique qui supportent du 16A, voltmètre de précision...)
- Vérifier que les trous où l'on vient placer la sonde ne sont pas recouverts d'une couche d'oxyde (principalement pour la barre en cuivre). Le cas échéant, penser à gratter cette couche d'oxyde avant le début de l'expérience.
- Le fil qui sert de référence pour la mesure de tension peut être branché dans l'un des trous plus profonds situés vers les extrémités de la barre (pour ne pas avoir besoin de le tenir pendant qu'on relève les tensions)
- Pour faire l'analogie avec l'expérience précédente, vous aurez besoin de tracer  $U=f(d)$  (à  $I$  constant, donc). Mais l'intensité a une fâcheuse tendance à changer au cours du temps, ce qui rend cette tâche difficile, et surtout vous impose de retrouver exactement le même courant devant le jury qu'en préparation si vous voulez ne mesurer que 3 points devant le jury et les superposer à votre courbe de préparation, ce qui n'est pas évident. Deux solutions : 1) mesurer  $U$  et  $I$  à chaque fois, tracer  $R=f(d)$ , et ne refaire que quelques points devant le jury ou 2) attendre que  $I$  se stabilise et refaire plein de points de mesure devant le jury (7 ou 8), ce qui n'est pas très long en fait. Vous n'utiliserez pas votre courbe de préparation dans ce cas.

#### Matériel :

- barre en cuivre ou en aluminium avec des trous creusés à intervalles réguliers
- alimentation capable de débiter du 10A
- fils d'électrotechnique (pour éviter de faire fondre/brûler des fils devant le jury...) pour la partie du circuit où circulent 10A
- fil normal + fil avec une sonde au bout (embout pointu) pour la mesure de tension
- voltmètre de précision (capable de mesurer des  $\mu V$  avec une faible incertitude)
- Wattmètre ou ampèremètre de puissance pour mesurer l'intensité
- Igor ou Regressi, ordinateur, vidéoprojecteur

### 3 Diffusion de quantité de mouvement : mesure de la viscosité dynamique du glycérol

On étudie la chute d'une petite bille en verre dans du glycérol pour : 1. Vérifier la forme de la force de Stokes (la vitesse limite est inversement proportionnelle au carré du rayon de la bille) 2. Mesurer la viscosité dynamique du glycérol 3. Mettre en évidence la sortie du régime laminaire pour des hauts Reynolds.

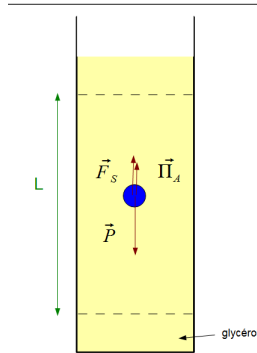


FIGURE 6 – Chute d'une bille dans le glycérol

A bas Reynolds (bille de faible rayon), la bille est soumise à :

- Son poids  $\vec{P}$
- La poussée d'Archimède  $\vec{\Pi}_A = (\rho_{glycérol} - \rho_{bille}) \times \frac{4}{3}\pi R^2 \times \vec{g}$
- La force de Stokes  $\vec{F}_S = 6\pi R\eta\vec{v}_{lim}$  où  $\vec{v}_{lim}$  est la vitesse limite atteinte par la bille au cours de sa chute. En pratique, cette vitesse est atteinte au bout de quelques millimètres pour une bille avec un rayon de quelques millimètres.

Pour chaque bille lancée, on mesure 1. son rayon au pied à coulisse (avant de la lancer, c'est mieux...) 2. le temps mis pour chuter d'une distance L (repérée par 2 cordelettes et du papier millimétré), avec un chronomètre. On calcule ensuite la vitesse limite de la bille et le Reynolds associé. En répétant ceci une dizaine de fois par rayon de bille et ce pour différents rayons de bille, on trace ensuite la courbe  $v_{lim} = f(\frac{1}{R^2})$ , qui fait apparaître une zone linéaire à bas rayon (bas Reynolds) et une non-linéarité lorsque le Reynolds devient grand.

A partir de la pente de la courbe dans la zone linéaire, on déduit la viscosité dynamique du glycérol :

$$\eta = \frac{2(\rho_{bille} - \rho_{glycérol})gR^2}{9v_{lim}}$$

. Dans notre expérience, avec un seul point de mesure, nous trouvons  $\eta = 0.82 \pm 0.2Pl$  à 23°C.

**Valeurs tabulées :**

T(°C)	$\eta$ (Pl)
20	1.490
25	0.954
30	0.629

**Remarques :**

- le glycérol a tendance à absorber de l'eau donc si la cuve n'a pas été remplie depuis longtemps, la valeur mesurée sera plus faible que la valeur tabulée pour du glycérol pur.
- il faut environ 30s à une bille de 2mm de rayon pour chuter de L=20cm. Prévoir 3 bons quarts d'heure de préparation si vous voulez faire toute l'étude statistique...
- l'étude statistique (10 lancers pour chaque rayon, etc) est utile pour compenser le fait que les bille ne soient généralement pas très sphériques ainsi que le temps de réaction de l'expérimentateur au déclenchement et à l'arrêt du chronomètre, qui reste la principale source d'incertitude...
- NE PAS FAIRE CONFIANCE AU HANDBOOK POUR LA VALEUR TABULEE DE  $\eta$ ! Du moins pas à celui de l'ENSC, qui donne une valeur absurde (à 3 ordres de grandeur près...)



- Il est bon dans tous les cas de calculer le nombre de Reynolds pour chaque lancer afin de vérifier si vous êtes en régime laminaire ou non.
- La masse volumique des billes de verre est donnée sur la boîte dans une unité bizarre et non précisée (peut-être du  $mg/cm^3$  ou quelque chose comme ça). Retenez que sa densité est de l'ordre de 2 ou 3, cela vous évitera une erreur d'un facteur 10 ou 100...

### Matériel :

- cuve remplie de glycérol
- billes en verre de différents rayons et de même densité (de  $R=1mm$  à  $R=1cm$  environ)
- chronomètre
- pied à coulisse

## Questions et remarques

- Attention à ne pas parler de “valeurs théoriques” dans ce montage : en diffusion il n’y a que des valeurs tabulées !
- Globalement, toutes les valeurs tabulées dont vous avez besoin dans ce montage sont fausses dans le Handbook de l'ENSC. De plusieurs ordres de grandeur. Méfiez-vous.
- En conclusion, on peut évoquer le rayonnement ou bien la compétition qui existe généralement entre conduction et convection (caractérisée par le nombre de Reynolds dans le cas du transport de quantité de mouvement dans un fluide).

### Questions posées auxquelles je n’ai pas déjà répondu dans le CR :

- Est-ce que tout corps chauffé se dilate (donc “monte”) ? Existe-t-il des corps qui se contractent lorsqu’on les chauffe (à P constante) ? -> Oui, certains polymères en pelote par exemple.
- Peut-on s’électrocuter avec les 10A qu’ont fait circuler dans l’expérience 2.2 ? -> Non, la résistance du corps humain est de l’ordre de  $10^5\Omega$  à  $10^6\Omega$  (mouillé/sec), et un courant devient mortel à partir de 20mA, ce qui nécessite d’appliquer entre 2000 et 20 000V, que nous n’atteignons pas ici. Dans cette expérience, même si on attrape la barre d’aluminium à pleines mains, elle nous court-circuite par sa résistance très faible et le courant qui nous traversera sera infime (même pas du  $\mu A...$ ).
- Quel rapport existe-t-il entre la conductivité électrique et la conductivité thermique ? Loi de Wiedemann et Franz pour un métal : leur rapport est une constante. Plus un métal est bon conducteur thermique, plus il est bon conducteur électrique. En effet, ces deux phénomènes de conduction sont dûs aux mêmes porteurs : les électrons. (Attention, cette loi n’est valable que pour les métaux. Dans les autres matériaux, c’est généralement décorrélé.)
- Quand la force de Stokes est-elle valable ? -> Régime laminaire (bas Re) et bille sphérique.
- Comment remesurer la masse volumique des billes de verre utilisées ? -> En peser 500, les plonger dans de l’eau, mesurer la différence de volume.
- Est-ce que la viscosité dynamique du glycérol varie beaucoup avec la température ? -> Oui.

### Autres expériences possibles :

- Pour la mesure de débit, soit avec une conduite cylindrique en imposant un gradient de pression, soit mesurer la loi de d’Arcy dans une conduite cylindrique avec un bouchon poreux en sable en imposant une différence de pression entre les 2 extrémités.
- Ne PAS présenter l’expérience de la goutte d’encre qui diffuse dans un gel d’agar-agar pour mesurer un coefficient de diffusion de particules !! D’autres phénomènes interviennent dans cette expérience, il n’y a pas que de la diffusion.
- Pour faire une expérience de mesure de conductivité électrique avec une super analogie avec l’expérience du 3 (chute d’une bille), on peut étudier la chute d’un aimant dans un tuyau conducteur. On peut montrer que la vitesse limite est proportionnelle à la résistivité électrique, donc connaissant celle du cuivre, on peut mesurer celle du laiton et de l’autre tuyau en métal (duralumin?).