

---

# Fluides - Capillarité

---

## Capillarité

- De Gennes, Brochard-Wyart, Quéré, *Gouttes, Bulles, Perles et Ondes*
- Cabane, Hénon, *Liquides : Solutions, dispersions, émulsions, gels*

## Hydrodynamique

- E. Guyon, J.-P. Hulin et L. Petit, *Hydrodynamique physique*
- D. J. Tritton, *Physical fluid dynamics*
- L. Landau, *Mécanique des fluides*
- Giles, *Mécanique des fluides et hydraulique*, série Schaum
- consulter aussi les notices des appareils...

Ce T.P. traite des phénomènes de transport diffusif, capillarité et d'écoulement de fluides.

**Attention :** il comporte trois grandes parties (transport diffusif, capillarité et hydrodynamique). A l'intérieur de ces parties, il est précisé le degré d'importance des expériences. Faites l'impasse sur celles facultatives dans un premier temps.

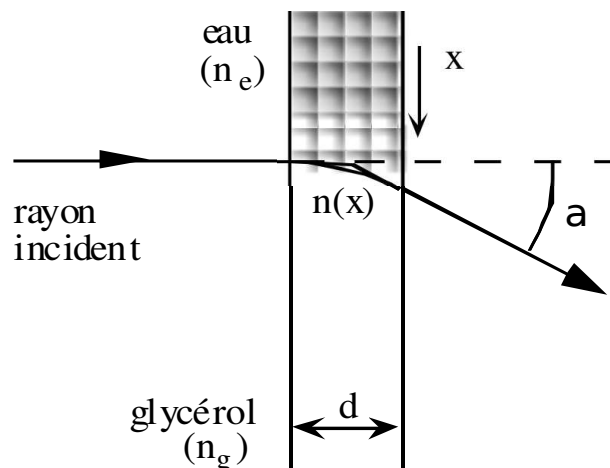
## I) TRANSPORT DIFFUSIF

### 1) Mesure du coefficient de diffusion du glycérol dans l'eau (important)

L'expérience est décrite dans *Optics* de Sommerfeld (p. 347). Elle a fait l'objet d'une partie de la Composition 2002, en ligne sur le site de Montrouge. On s'y reportera pour les calculs correspondant à l'expérience. La notice a été éditée dans le BUP n°819 (décembre 1999).

#### a) Principe

L'eau et le glycérol ayant des indices optiques différents, la diffusion de l'un dans l'autre crée un gradient de concentration, et donc d'indice, dans la zone de mélange. L'eau et le glycérol étant miscibles, il n'y a pas d'interface entre les deux. On propose d'utiliser la déviation d'un faisceau lumineux par le gradient d'indice pour mesurer la diffusivité du glycérol dans l'eau.



Si la déviation  $\alpha$  du rayon est petite :

$$\alpha = d \frac{dn}{dx}$$

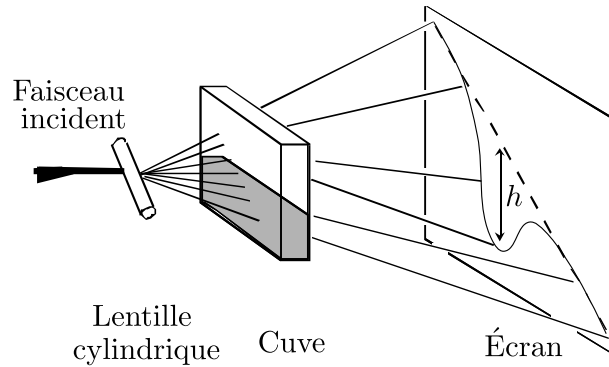
L'indice optique est une fonction linéaire de la concentration, et on trouve finalement que la déviation maximum vaut :

$$\alpha_{\max} = \frac{(n_g - n_e)dC_0}{2\sqrt{\pi Dt}}$$

où  $D$  est la diffusivité et  $t$  le temps ( $t = 0$  correspondrait à l'instant où les 2 liquides n'ont pas encore diffusé).  $C_0$  est la fraction volumique du glycérol dans le mélange eau-glycérol utilisé (plus loin, on suggère  $C_0 = 50\%$ ).

## b) Réalisation de l'expérience

Élargir un faisceau laser avec un agitateur en verre pour réaliser une nappe, inclinée à  $45^\circ$  par rapport aux côtés de la cuve. On fera les observations sur un écran recouvert d'un papier millimétré situé à environ 50 cm de la cuve.



Quand la cuve est vide, la trace de la nappe sur l'écran est une ligne inclinée à  $45^\circ$  (trait pointillé sur la figure ci dessus). Repérer cette trace sur le papier.

Remplir à moitié d'eau, puis verser doucement le glycérol dans le fond de la cuve à l'aide de la burette. L'extrémité de la burette doit être sur le côté de la cuve et plonger jusqu'au fond pour limiter au maximum le mélange des deux liquides par convection. La nappe laser est alors fortement déformée : l'allure de la trace sur l'écran est indiquée en trait gras sur la figure.

## c) Précautions

- être sûr que tout est prêt avant de verser le glycérol : la diffusion est un phénomène irréversible ! En cas de fausse manœuvre, il faut tout recommencer après avoir bien nettoyé la cuve.
- purger la burette
- ne pas secouer la cuve pendant l'expérience (il ne faut surtout pas essayer d'enlever la burette après avoir versé le glycérol)
- *utiliser plutôt un mélange eau-glycérol (50%)* que du glycérol pur, dont l'indice est trop différent de celui de l'eau ; la déviation est alors très importante et on sort du domaine de validité des formules ci-dessus. Si on utilise un mélange, celui-ci doit être bien homogène.
- il faut veiller à placer la cuve de manière à ce que le faisceau soit visible pendant toute l'expérience. En particulier, si la cuve est placée sur un support élévateur, il faut la placer au bord de celui-ci, le plus loin possible du laser (pour éviter que le faisceau ne soit arrêté par le support). D'autre part, il faut utiliser un écran de taille suffisante, surtout vers le bas (là où est dévié le faisceau).

Relever la déflexion maximum  $h_{max}$  en fonction du temps ; il est souhaitable de prendre des points pendant au moins une vingtaine de minutes.

En pratique, la formule qui donne  $\alpha_{max}$  ne permet pas d'ajuster de manière satisfaisante les résultats expérimentaux. En remplaçant  $t$  par  $t + t_0$  où  $t_0$  est un paramètre libre, l'ajustement est satisfaisant.  $t_0$  en général de l'ordre de 200-500s.

L'origine de ce temps  $t_0$ , nettement plus élevé que le temps nécessaire pour verser le glycérol, n'est pas claire :  $t_0$  ne doit pas être interprété comme étant l'instant du "mélange". L'hypothèse la plus probable est que le faisceau qui arrive à l'interface (endroit où le gradient d'indice est maximal) est

dévié dans la cuve vers un endroit où le liquide est encore homogène et ne subit plus de déviation en l'absence de gradient d'indice. Tout se passe alors comme si la cuve avait une largeur plus faible et la déviation vaut donc moins que  $d$  ( $dn/dx$ ) aux temps courts. Cette hypothèse est compatible avec l'observation expérimentale que  $t_0$  augmente fortement si la largeur de la cuve augmente.

Ainsi, pour montrer que l'on a affaire à une loi de diffusion, il faut effectuer un ajustement linéaire et tracer  $h_{max}$  en fonction de  $1/(t + t_0)^{0,5}$ , ou  $h_{max}^2$  en fonction de  $1/t$ . La pente est reliée à  $D$  (donné dans les articles de la notice) et l'abscisse à l'origine est  $t_0$ .

Enfin, à partir de la forme du plan laser, déduire le profil vertical du gradient de concentration et le comparer à une gaussienne.

### Valeurs numériques

indice de l'eau  $n_e = 1,33$ , du glycérol  $n_g = 1,47$ .

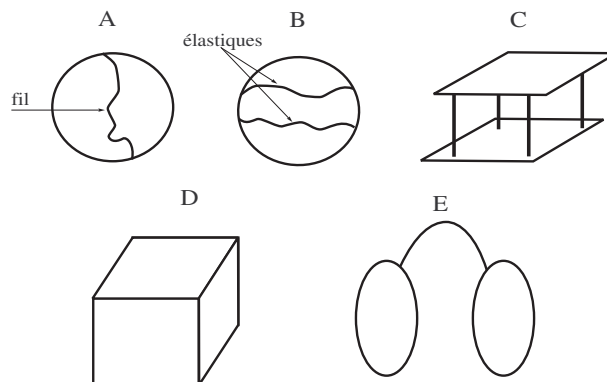
## II) CAPILLARITE

**Note** Pour les expériences quantitatives, utiliser de l'eau distillée (ou permutée) et du matériel propre, rincé préalablement à l'alcool et séché. Une quantité infime de contaminants peut modifier de manière considérable la tension de surface.

En particulier, il faut prendre soin de ne pas recontaminer les objets (verrerie, lame du tensiomètre. . .) lavés à l'alcool et à l'eau distillée en les touchant sans gants ou en passant les mains non gantées au dessus. Si on ne dispose pas de chiffons en papier ne laissant pas de fibres, la meilleure solution pour le séchage est de laisser l'alcool s'évaporer.

### 1) Expériences qualitatives sur les lames de savon (facultatif)

On dispose des objets suivants :



Plonger l'objet A dans l'eau savonneuse et percer l'un des côtés de la lame. On illustre ainsi la loi de la surface minimale (en tenant compte des contraintes imposées à la lame) et on met aussi directement en évidence la force de tension superficielle agissant sur le fil.

Plonger l'objet B et percer les parties supérieures et inférieures de la lame. Tirer sur le fil inférieur et vérifier que cela n'a aucune action sur la forme de l'élastique supérieur. On illustre ainsi que la force par unité de longueur ne dépend pas de la surface de la lame, le comportement est donc très différent de celui d'une lame élastique usuelle (ballon de baudruche).

### Remarque

La concentration des tensioactifs en solution est toujours le résultat d'un équilibre entre la surface et le volume, entre lesquels les tensioactifs s'échangent. Les molécules tensioactives mises en solution dans l'eau s'adsorbent majoritairement à la surface afin de minimiser les interactions entre les queues hydrophobes et l'eau. Si la quantité de tensioactifs en solution est progressivement augmentée, on observe que la tension de surface varie qualitativement de la façon suivante :

(i) À faible très concentration, l'interface n'est pas saturée. Une augmentation de concentration entraîne alors une baisse de la tension de surface due à l'augmentation de la concentration en surface. (ii) Puis, quand la concentration est suffisante l'interface est saturée. La concentration reste constante en surface tandis qu'elle augmente en volume. La tension de surface continue à diminuer lorsque la concentration en tensioactif augmente. (iii) Enfin, au delà d'une concentration seuil, appelée concentration micellaire critique (cmc), la tension de surface reste constante. En effet, malgré l'ajout de tensioactif, quand la cmc est atteinte, les molécules s'associent en volume de façon à rassembler leurs parties hydrophobes en exposant leurs têtes polaires vers l'extérieur. Ces agrégats sont appelés "micelles". Une bonne référence sur le sujet est le livre de Cabane et Hénon (chap. 15 et 16, p. 294).

En définitive, la tension de surface  $\gamma(T)$  est indépendante de l'aire de la surface pour un corps pur. Pour une solution contenant un tensioactif comme le savon (qui est en fait un mélange contenant notamment des tensioactifs), la tension de surface à l'équilibre ne dépend de l'aire que pour des variations d'aire telles que la concentration volumique de tensioactif change (condition nécessaire). Ce cas est rare en pratique (concentrations faibles en tensioactif, grand rapport aire/volume). Dans les différentes expériences présentées ici, la concentration en tensioactifs sera toujours supérieure à la cmc et la surface sera donc toujours saturée.

Plonger l'objet C. Interpréter la forme obtenue en termes de surface minimale. La symétrie observée obéit-elle aux lois de Curie ? (pour la réponse, cf. BUP n°689). Vérifier que l'angle de raccordement entre les différentes parties de la lame est  $120^\circ$  ce qui illustre indirectement le fait que la force exercée par chaque lame sur une unité de longueur de la ligne de raccordement ne dépend pas de sa surface. En effet, pour que la somme de trois forces faisant entre elles des angles de  $120^\circ$  soit nulle, il faut que les trois forces soient identiques. Le cube D présente le même phénomène mais attention, les lames ne sont pas planes.

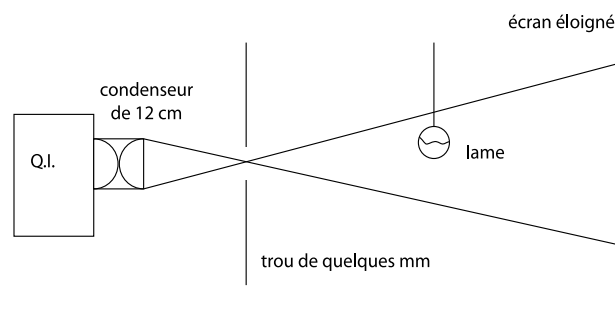
Avec l'objet E, on obtient en général une lame sur chaque anneau. Pour obtenir une lame unique les liant (ce qui correspond à une surface plus faible s'ils sont suffisamment proches, cf. Landau de mécanique des fluides, p.294) il faut transitoirement les rapprocher et souffler de sorte que les deux lames adhèrent l'une à l'autre. Vérifier que les signes des rayons de courbure principaux en un point de la lame sont opposées (les deux côtés de la lame étant à la pression atmosphérique, la loi de Laplace impose  $\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} = 0$ . Il est difficile de vérifier quantitativement que  $R = -R'$ ).

### Note

les lames étant de petites dimensions, on pourra éventuellement rendre l'expérience visible de loin en formant une ombre qui les agrandit 2 à 4 fois. Alternativement, on pourra utiliser une webcam et un vidéoprojecteur.

## 2) Loi de Laplace

Rappelons que c'est une loi générale de la tension superficielle. On propose de la vérifier ici dans le cas d'une bulle de savon. Elle s'écrit alors :  $\Delta P = \frac{4\gamma}{R}$  où  $R$  est le rayon de la bulle,  $\gamma$  la tension de surface et  $\Delta P$  la surpression à l'intérieur de la bulle.



### a) Expérience qualitative, spectaculaire

Former à chaque extrémité du « générateur de bulles » des bulles de tailles différentes. Les mettre en communication. Vérifier que la grosse « mange » la petite.

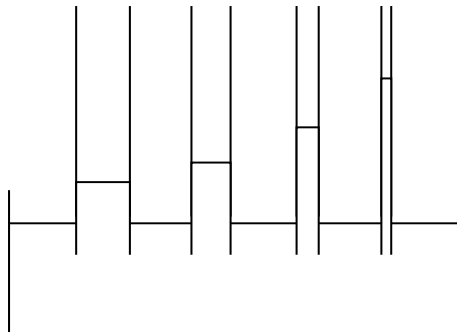
### b) Expérience quantitative

Utiliser le « générateur de bulles » composé d'une poire et de trois robinets (il vaut mieux regarder la notice pour son emploi). En utilisant le capteur de pression différentiel dont l'une des entrées est à la pression atmosphérique, mesurer la surpression pour différentes valeurs du rayon de la bulle (mettre un papier millimétré derrière la bulle). On pourra faire la mesure, à la volée, sur une même bulle, en prenant soin de prendre des points pour la plus petite et la plus grosse bulle possible. Vérifier la loi de Laplace en traçant  $\Delta P$  en fonction de la courbure de l'interface et en déduire la valeur de  $\gamma$  pour l'eau savonneuse.

## 3) Loi de Jurin (important)

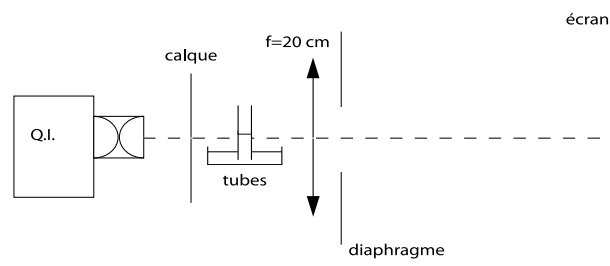
Il s'agit de vérifier expérimentalement la loi de Jurin qui prévoit l'ascension des liquides dans les tubes capillaires.

Réaliser l'expérience avec de l'alcool, l'eau posant trop de problèmes de mouillage imparfait. On dispose de 4 tubes de diamètres différents. Avant de les immerger dans l'alcool, chasser tout liquide résiduel pour éviter la formation de bulles (pourquoi ?). Il est aussi possible de plonger les tubes dans la cuve et de faire couler de l'alcool dans les tubes grâce à une pipette en plastique.



Faire l'image des tubes avec une lentille comme indiqué ci-dessous (attention, les images sont inversées sur l'écran !)

Tracer l'ascension  $h$  du liquide dans le tube en fonction du rayon  $r$  du tube. Cette hauteur  $h$  est la différence de hauteurs entre le ménisque dans le tube et la zone de la cuve où la surface du liquide



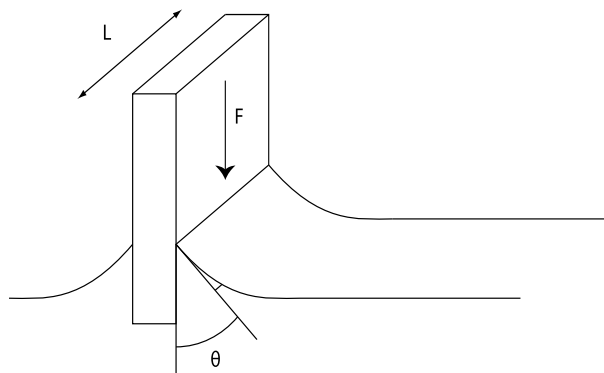
est horizontale et plate (pourquoi ?). La relation théorique est :  $h = 2\gamma \cos \theta / \rho g r$ , où  $\theta$  est l'angle de contact de l'alcool sur le verre. En déduire une estimation de  $\gamma$  en prenant  $\theta = 0$  (mouillage total du verre par l'alcool).

#### 4) Tensiomètre à lame mouillée

Cet appareil sert à mesurer la tension superficielle d'une interface liquide-gaz.

##### a) Principe

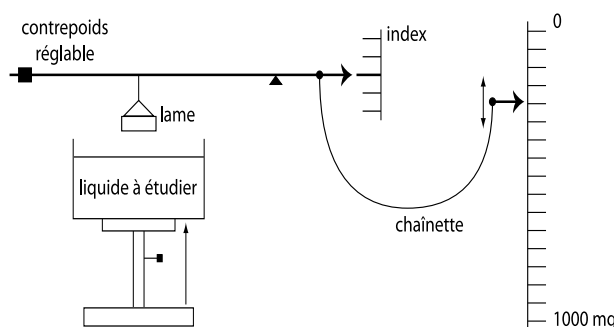
On mesure avec une balance la force qu'exerce le fluide sur une lame solide plongée dans celui-ci.



On établit que la lame mince est soumise de la part du liquide à une force dirigée vers le bas qui vaut :

$$F = 2L\gamma \cos \theta$$

où  $L$  est la largeur de la lame,  $\theta$  l'angle de raccordement du liquide sur la lame et  $\gamma$  est la tension superficielle de l'interface liquide/gaz étudiée. La mesure de la force conduit directement à la valeur de  $\gamma \cos \theta$ . Dans la pratique, on fait en sorte d'avoir  $\cos \theta \approx 1$  en utilisant une lame spécialement traitée pour être parfaitement mouillée par les liquides usuels. On s'arrange aussi pour que le bas de la lame soit au même niveau que le liquide loin du ménisque, de façon à annuler la différence de pression entre le haut et le bas de la lame (c'est-à-dire pour annuler la résultante de la poussée d'Archimède).



## b) Expérience

### Précautions importantes

- Régler soigneusement l'horizontalité du tensiomètre à l'aide des vis situées sous son support. Le fil à plomb doit se trouver à la verticale de la position indiquée.
- Avant d'effectuer les mesures, bien rincer les récipients et la lame à l'eau puis à l'alcool ordinaire. Ceci permet d'éliminer toute trace de graisse et de savon (la graisse empêche le mouillage parfait et le savon abaisse considérablement la tension superficielle de l'interface eau/air (voir ci-dessous)).
- Faire la mesure avec de l'eau permutée propre.

**Mesure** Mettre en place la lame plate. La chaînette étant sur zéro, régler le contrepois pour rétablir l'horizontalité du bras de la balance. Monter le liquide jusqu'à effleurement. La lame est attirée vers le liquide. Rétablir l'horizontalité du fléau au moyen de la chaînette. Lire la valeur de la masse qui équilibre la force de tension superficielle.

On a :  $mg = 2\gamma L$ . Or par construction,  $L = 4,905 \text{ cm}$  donc  $\frac{2L}{g} = 10^{-2} \text{ s}^2$ . La mesure de  $m$  en milligrammes divisée par 10 donne directement la valeur de  $\gamma$  en  $\text{mN/m}$ .

Expérience facultative : sans changer l'équilibre de la balance, ajouter une goutte de savon. Interpréter l'effet puis mesurer la nouvelle valeur de  $\gamma$ . Rajouter du savon et vérifier que  $\gamma$  ne varie plus. Interpréter.

## 5) Mesure de tension de surface de l'interface Galinstan/air

On dispose d'un métal liquide à température ambiante, en l'occurrence un alliage ternaire de gallium, d'indium et d'étain. Il est d'une part très salissant et d'autre part cher ; on prendra les précautions adéquates en le manipulant (notamment **on ne le jettera pas**). Cet alliage réagit avec l'aluminium : il faut éviter tout contact entre le galinstan et de l'aluminium (la réaction est lente mais efficace, l'aluminium perd sa tenue mécanique). Pour éviter la formation d'une couche d'oxyde solide, le galinstan est stocké dans un flacon en polyéthylène et surmonté d'une couche d'acide chlorhydrique concentré. Il faut **ouvrir le flacon lentement**, du gaz (lequel ?) peut s'être formé lors de l'oxydation du galinstan (cet oxyde est soluble dans l'acide chlorhydrique).

Pour obtenir sa tension de surface, on mesure avec une balance de précision (0,1g ou plus précis) la masse  $m$  de  $N$  gouttes (une dizaine suffit) formées dans l'air à l'aide d'une seringue munie d'une aiguille droite de diamètre intérieur  $D$ . L'expérience consiste à prélever du galinstan à l'aide d'une seringue, à mesurer la masse du flacon en polyéthylène (on peut aussi utiliser un flacon en verre où on a placé de l'acide), à former une dizaine de gouttes au-dessus du flacon placé sur la balance en



allant suffisamment vite pour éviter la formation d'oxyde à la surface de la goutte et suffisamment lentement pour que la goutte soit formée de manière quasistatique. Il n'est pas recommandé de tarer la balance avant de former les gouttes, certains modèles de balances ayant tendance à stabiliser la valeur à 0 lorsque la masse varie lentement, ce qui est le cas lorsqu'on forme des gouttes.

La tension de surface est donnée par la formule suivante :

$$\frac{m}{N}g = \pi D\gamma$$

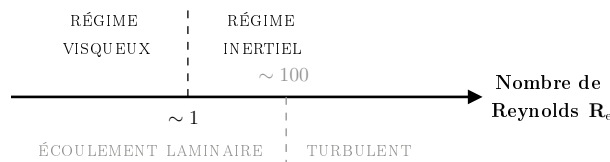
Cette formule suppose qu'il n'y a pas de liquide qui reste accroché à la seringue lorsque la goutte tombe. Cette approximation est bien mieux vérifiée pour le galinstan que pour l'eau (ne pas faire l'expérience avec de l'eau). Comme le galinstan mouille peu l'aiguille (en acier inoxydable), le diamètre à prendre est le diamètre intérieur.

En déduire expérimentalement la valeur de la tension de surface du Galinstan et commenter son ordre de grandeur.

À la fin de l'expérience, il faut remettre le galinstan dans le flacon en plastique (si on a utilisé un autre flacon), et s'assurer qu'il y a de l'acide au-dessus du galinstan.

### III) HYDRODYNAMIQUE

Le nombre de Reynolds ( $R_e$ ) compare l'importance des forces inertielles et visqueuses dans l'écoulement :  $R_e = \rho VL/\eta$  ;  $\rho$  et  $\eta$  sont respectivement la masse volumique et la viscosité dynamique du fluide ;  $V$  est la vitesse moyenne de l'écoulement et  $L$  une longueur caractéristique de l'écoulement dans la direction perpendiculaire à celle de l'écoulement. Il est utile de retenir les ordres de grandeurs des valeurs frontières de  $R_e$  rappelés sur la figure ci-dessous.



**ATTENTION** Dans les écoulements parallèles, l'importance des forces inertielles diminue pour des raisons géométriques. Le passage de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent se produit alors pour des valeurs de  $R_e$  supérieures à 100. C'est le cas, par exemple, de l'écoulement de Poiseuille pour lequel la valeur "seuil" de  $R_e$  est d'environ 2000.

On prendra soin de calculer  $R_e$  dans chaque cas étudié pour estimer l'importance relative des forces visqueuses et inertielles et prévoir la nature laminaire ou turbulente de l'écoulement.

#### 1) Écoulement de Poiseuille (important)

##### Références

- Guyon, Hulin, Petit, *Hydrodynamique physique* 2e édition, p. 202
- Tritton *Physical fluid dynamics*, 2è édition, pp. 9 à 17.

On veut vérifier la loi de Poiseuille qui donne le débit volumique  $Q$  de l'écoulement en fonction du gradient de pression  $\frac{\Delta P}{L}$  mesurée entre deux points de l'écoulement, dans le cas du tube cylindrique :

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \eta L}$$

où  $\eta$  est la viscosité dynamique de l'eau,  $r$  le rayon et  $L$  la longueur du tube. Cette loi est valable en régime visqueux et elle correspond à un champ de vitesse parallèle à l'axe du tube dont la norme suit un profil parabolique. Suffisamment loin du début du tube, cette loi reste valable jusqu'à des nombres de Reynolds  $Re = 2rU\rho/\eta$  de l'ordre de 2000<sup>1</sup>, où  $U$  est la vitesse moyenne dans le tube. La validité de la loi de Poiseuille pour des nombres de Reynolds nettement supérieurs à 1 vient du fait que la solution de Poiseuille annule exactement le terme non linéaire de l'équation de Navier-Stokes  $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad})\mathbf{v}$ , et que cette solution reste solution de l'équation de Navier-Stokes pour un nombre de Reynolds quelconque.

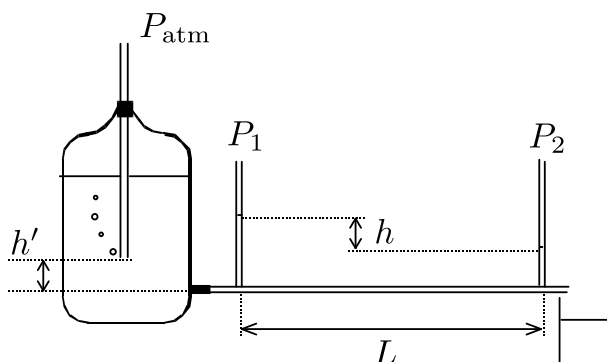


FIG. 1 – Expérience de vérification de la loi de Poiseuille

La surpression dans le tube est imposée en ajustant la hauteur du tube inséré dans la bouteille. La hauteur  $h'$ , légèrement supérieure à  $h$ , donne la différence de pression entre les deux extrémités du tube. Cependant, l'étude de l'écoulement est faite entre les deux dérives, à l'endroit où le régime de Poiseuille est bien établi. Nous mesurerons  $\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g h$  à l'aide de papier millimétré. Pour mesurer le débit, utiliser un chronomètre et un bécher ou une éprouvette graduée de 40-50 ml. Attendre que le régime soit permanent.

Calculer les nombres de Reynolds associés à l'écoulement. Vérifier que, dans une gamme où le débit est suffisamment faible,  $Q$  est effectivement proportionnel à  $h$  et en déduire la viscosité  $\eta$  de l'eau. Comparer aux valeurs tabulées dans le Handbook (la viscosité de l'eau dépend notablement de la température).

## 2) Traînée sur une sphère en régime visqueux : loi de Stokes (important)

### Référence

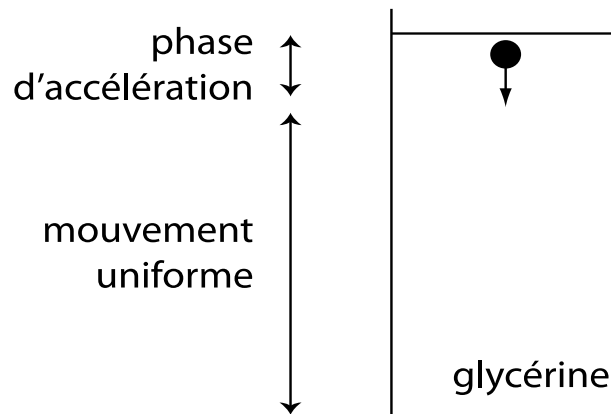
– Guyon, Hulin, Petit, *Hydrodynamique physique* 2e édition, p. 467

On définit le nombre de Reynolds de l'écoulement par  $Re = 2Rv\rho_{\text{fluide}}/\eta$ , où  $R$  est le rayon de la sphère,  $v$  sa vitesse,  $\rho_{\text{fluide}}$  la masse volumique du fluide et  $\eta$  sa viscosité. En régime visqueux, i.e.  $Re < 1$  la force de traînée s'exerçant sur la sphère vaut  $F = -6\pi\eta Rv$ .

L'expérience proposée vise à vérifier la loi de Stokes, et à mesurer la viscosité de la glycérine.

<sup>1</sup> cette valeur ne correspond pas à une instabilité linéaire de l'écoulement, l'écoulement est instable vis-à-vis de perturbations d'amplitude finies. La gamme d'observation du régime de Poiseuille dépend du soin apporté à l'expérience.

<sup>2</sup>Si le long tube n'est pas tout à fait horizontal, il peut y avoir  $h \neq 0$  sans écoulement ; il faut alors corriger cette erreur systématique.



On laisse tomber une bille d'acier. Quand le mouvement est uniforme<sup>3</sup>, on mesure la vitesse  $v$  en prenant le temps que la bille met à parcourir une distance fixée au préalable. Répéter l'expérience avec des billes de différents rayons  $R$ . On pourra mesurer la vitesse moyenne de chute entre deux points à l'aide d'un chronomètre. Une autre solution est d'utiliser la caméra rapide Jeulin et le logiciel Cinéris. Dans ce cas, il convient d'utiliser la caméra en mode *rapide*, et de veiller à éclairer fortement la zone filmée (sans chauffer le glycérol, utiliser par exemple un panneau lumineux placé derrière le cylindre), afin d'assurer un bon contraste entre la bille et le fond. Il est également nécessaire que le diamètre de la bille soit suffisamment grand (5 pixels ou plus).

Tracer  $v_{\text{limite}}$  en fonction de  $R$ , et déterminer  $\eta$  en ajustant vos résultats par la loi de Stokes. Pour quelles valeurs de  $R$  la loi de Stokes est-elle vérifiée ? Est-ce cohérent avec la valeur (à calculer) des nombres de Reynolds ?

### Remarques

- La loi de Stokes est a priori valable en milieu infini (pas de parois). La traînée dépend du rapport de  $R$  au diamètre du tube (voir BUP n°814, mai 1999). L'hypothèse de milieu infini est raisonnable dès que ce rapport excède 100.
- Pour expliquer l'écart éventuellement observé entre la viscosité mesurée et celle tabulée, on pourra considérer l'influence de la température et surtout de la teneur en eau (voir Handbook). La glycérine est hygroscopique, i.e. tend à capter l'eau contenue dans l'air. La viscosité de la solution de glycérine dépend donc fortement de son âge.

### Données

- Masse volumique de l'acier :  $7,8 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
- Masse volumique de la glycérine :  $1,26 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$

## 3) Relation de Bernoulli : mesure de la vitesse d'un fluide avec un tube de Pitot (important)

### Références

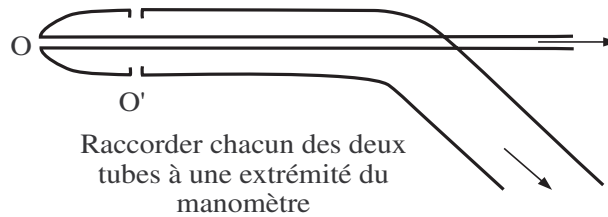
- Guyon, Hulin, Petit, *Hydrodynamique physique* chapitre 5

<sup>3</sup> la phase d'accélération est liée à l'inertie de la bille, à l'inertie du fluide qui rajoute un terme de masse ajoutée et aussi au fait que la bille se trouve près d'une surface libre, si on la lâche à proximité de la surface air/glycérol. Il est recommandé de ne pas discuter cette phase d'accélération en montage.

Dans un écoulement parfait et incompressible (à quelles conditions sont valables ces approximations ? voir notamment Guyon, Hulin, Petit, 2e édition p. 139 pour la condition d'incompressibilité), on a le long d'une ligne de courant :

$$\frac{1}{2}v^2 + gz + \frac{p}{\rho} = C_{ste}$$

Le tube de Pitot est un tube double :



- Utiliser la grosse soufflerie.
- La différence entre les pressions en O et O' donne accès à la vitesse en O' (établir la relation). Pour mesurer cette différence de pression, on utilisera le capteur prévu à cet effet, en branchant chacun des deux tubes à un embout du boîtier. Le capteur délivre un signal de tension continu, linéaire en fonction de  $\Delta P$ .
- Il faut faire attention à la position du tube, car il donne une valeur locale de la vitesse.
- Utiliser aussi l'anémomètre à fil chaud à affichage numérique et le débitmètre à hélice, afin de mesurer  $v$  et de tracer la courbe  $\Delta P(v)$ .

## IV) ANNEXES

Ici figurent quelques expériences à regarder en fin de TP ou lors de la préparation aux oraux.

### 1) Cuve à ondes : ondes capillaires, ondes de gravité (à faire dans le TP ondes 2)

Il s'agit d'une des expériences les plus simples à mettre en œuvre et les plus riches de l'agrégation : mesure de longueur d'onde en ondes progressives et ondes stationnaires (interférences) ; relation de dispersion dispersive, vitesse de phase et vitesse de groupe ; ondes capillaires et ondes de gravité. Si elle n'a pas été abordée dans le TP sur les ondes, il faudra la faire pendant la préparation à l'oral.

### 2) Frottement turbulent

La force de traînée  $F$  exercée par un fluide sur le corps immobile dépend de nombreuses grandeurs dont principalement :

- la vitesse moyenne du fluide loin du corps  $v$ ,
- les dimensions du corps parallèles à  $v$ ,
- la surface  $S$  de la section du corps perpendiculaire à  $v$ ,
- la masse volumique  $\rho$  du fluide,

- la viscosité  $\nu$  du fluide. Pour réduire le nombre de paramètres, on travaille avec des grandeurs sans dimension (l'idée étant que les phénomènes physiques sont indépendants des unités de mesure choisies). On définit alors  $C_x$  le coefficient de traînée tel que :

$$F = -C_x S \frac{\rho v^2}{2}$$

où  $C_x$  dépend de nombres sans dimensions tels que  $Re$  et un nombre qui caractériserait la forme aérodynamique de l'objet (difficile à quantifier en pratique). Cette expression est pertinente lorsque  $C_x$  vaut environ 1, ce qui est le cas à grand  $Re$ . La variation de  $C_x$  avec  $Re$  n'est pas simple (voir Guyon, Hulin, Petit, 2e édition, p. 649).  $C_x$  est approximativement constant pour une sphère dans la gamme  $Re \in [10^2, 10^5]$ .

### a) Expériences possibles

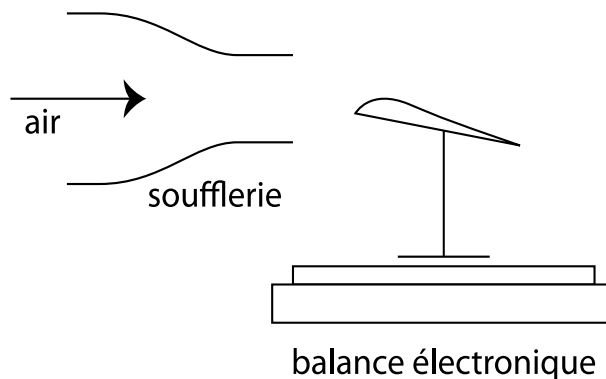
On utilisera pour cela une soufflerie adaptée à la mesure de la force exercée sur des obstacles de formes diverses. On peut penser à plusieurs séries d'expériences :

- en variant le débit pour un même obstacle :  $C_x(Re)$ ,
- à débit constant en changeant les obstacles et leur sens :  $C_x$  en fonction de la forme aérodynamique.

On pourra aussi utiliser le même dispositif que pour établir la loi de Stokes en élargissant la gamme de diamètre de billes pour atteindre de plus hauts nombres de Reynolds.

## 3) Portance d'une aile

Poser l'aile sur la balance électronique et en faire le zéro en l'absence de flux.



Mesurer la portance de l'aile en fonction de l'angle d'attaque et observer l'effet du décrochage (voir Guyon, Hulin, Petit, 2e édition p.535-539). On peut ensuite étudier l'influence de la vitesse à géométrie fixée. On peut également relier la portance au profil de pression sur et sous l'aile, mais cette mesure est qualitative parce qu'on ne peut mesurer la pression qu'en un nombre restreint de points.