
Physique pour les chimistes - Capillarité

- Guyon, Hulin et Petit, *Hydrodynamique physique*, chapitre 1.4 de la deuxième édition
- de Gennes, Brochard-Wyart et Quéré, *Gouttes, Bulles, Perles et Ondes*, Belin
- Bruhat, *Mécanique*
- Fleury Mathieu, *Mécanique Physique*
- Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale*, tome 1 Mécanique, entrée *capillarité*

Rappels théoriques :

- En général la création d'une interface entre deux milieux différents a un coût énergétique (donc un système tendra à minimiser la surface de ses interfaces en respectant les autres contraintes géométriques qui lui sont imposées). On note $\delta W = A \delta S$ le travail à fournir pour augmenter de δS l'aire de l'interface. La constante de proportionnalité $A > 0$ est appelée tension de surface. Le travail δW est ainsi positif, et donc effectivement reçu par le système. La tension de surface est homogène à une énergie par unité de surface, mais également à une force par unité de longueur. Cette force s'exerce sur le pourtour de l'interface, et est localement orientée perpendiculairement à ce pourtour et à la normale à l'interface (faire un dessin pour se la représenter). À titre d'exemple, pour l'interface entre l'eau et l'air à température ambiante, on a $A \approx 70 \text{ mN.m}^{-1}$.
- Une conséquence de l'existence de la tension de surface est la loi de Laplace. Imaginons une goutte sphérique et isolons par la pensée une petite portion de sa surface. Représenter la force par unité de longueur le long du pourtour de cette surface, exercée par le reste de l'interface. En déduire l'orientation de la force résultante. À l'équilibre, pour compenser cette force, il doit exister une différence de pression ΔP entre les deux côtés de l'interface, la pression étant supérieure du côté du centre de courbure. Dans l'espace euclidien, une surface possède localement deux courbures principales (associées à deux rayons de courbure R et R') selon deux directions perpendiculaires, appelées directions principales. La loi de Laplace s'écrit : $\Delta P = A \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$. Dans le cas d'une interface sphérique $R = R'$, on a donc plus simplement $\Delta P = \frac{2A}{R}$.
- Les effets de tension de surface sont souvent en compétition avec la gravité, par exemple lors de l'ascension d'un liquide dans un capillaire. Par analyse dimensionnelle la longueur caractéristique sur laquelle ces deux effets sont du même ordre est $\sqrt{\frac{A}{\rho g}}$, qu'on appelle longueur capillaire. Pour la plupart des liquides elle est de l'ordre du millimètre (faire l'application numérique dans le cas de l'interface eau-air à température ambiante). C'est en effet à cette distance d'une paroi en verre que la courbure d'un ménisque devient négligeable, et c'est aussi pour de telles longueurs d'onde que change le type de relation de dispersion pour les ondes de surface de la cuve à ondes que vous étudierez dans un autre TP.

I) Expériences qualitatives sur les lames de savon

On dispose des objets présentés sur la figure 1.

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).

Avec l'objet E, on obtient en général une lame sur chaque anneau. Pour obtenir une lame unique les liant 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 opposés (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 $R = -R'$).

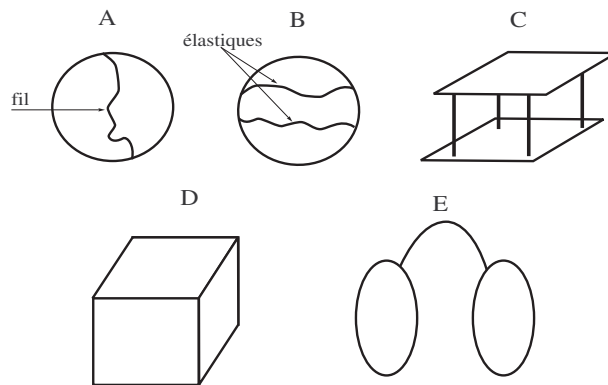
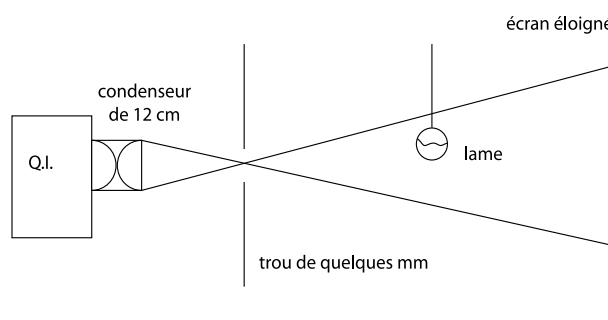


FIG. 1 – Différents objets à plonger dans de l'eau savonneuse

Note : les lames étant de petites dimensions, on pourra rendre l'expérience visible de loin en formant une ombre qui les agrandit 2 à 4 fois (cf. figure ci-dessous). Il est également possible d'utiliser une webcam et un vidéoprojecteur.



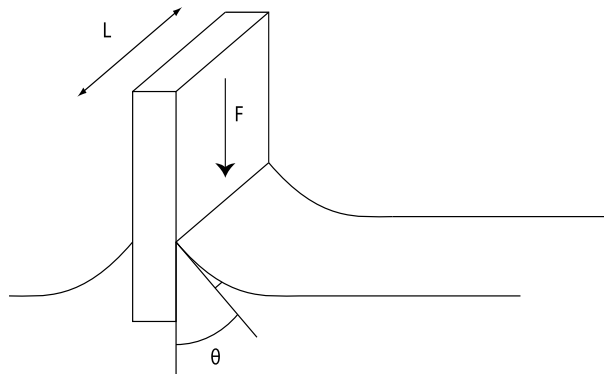
II) Tensiomètre à lame mouillée

Cet appareil sert à mesurer la tension superficielle des liquides.

1) Principe

On mesure avec une balance la force qui s'exerce sur une lame solide lorsqu'elle affleure la surface libre d'un liquide.

On établit que la lame mince (périmètre $\approx 2L$) est soumise de la part du liquide à une force dirigée vers le bas qui vaut : $F = 2LA \cos \theta$, où L est la largeur de la lame, θ l'angle de raccordement du liquide sur la lame et A la tension superficielle du liquide étudié. La mesure de la force conduit directement à la valeur de $A \cos \theta$. En pratique, le matériau de la lame est choisi pour être un solide qui est "parfaitement" mouillé par tous les liquides usuels. Ainsi, on a $\cos \theta \approx 1$ dans la formule ci-dessus. Un choix commun de matériau est le platine (dont la surface est facilement régénérée par une flamme). De plus, on s'arrange pour que la lame effleure l'eau au moment de la mesure de façon à annuler la poussée d'Archimède.



2) Expérience

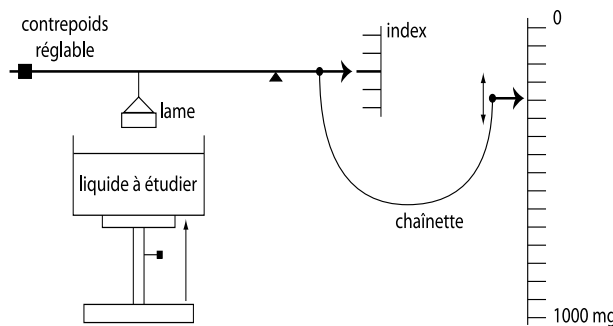


FIG. 2 – Schéma de la balance

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'eau, voir ci-dessous). Ne pas essuyer la lame, mais la laisser sécher par évaporation. Il faut aussi régler l'horizontalité de la balance, grâce au fil à plomb.

Avec le support porte-liquide abaissé au maximum, accrocher la lame à la balance. La chaînette étant sur zéro, régler le contrepoids pour rétablir l'horizontalité du bras de la balance. On peut ensuite abaisser légèrement la chaînette – sans bien entendu toucher au contrepoids – de manière à faire remonter la lame pour pouvoir disposer le récipient sur le support porte-liquide. Remettre la chaînette sur zéro. Remplir le récipient d'eau distillée, puis monter le support jusqu'à ce que le liquide effleure la lame. 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. Attention, l'arrachement de la lame hors du liquide intervient pour une force plus grande à cause de la poussée d'Archimède.

On a : $mg = 2AL$. 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 A en mN/m .

Sans changer l'équilibre de la balance, ajouter une goutte de savon. Interpréter l'effet puis mesurer la nouvelle valeur de A . Rajouter du savon et vérifier que A ne varie plus. Interpréter.

III) Loi de Laplace

On se propose de la vérifier sur des bulles de savon. Elle s'écrit alors : $\Delta P = \frac{4A}{R}$ où R est le rayon de la bulle et ΔP la surpression à l'intérieur de la bulle. Il y a un facteur 2 par rapport à la formule donnée dans les rappels car pour des raisons d'hydrophilie il se forme une bicouche de surface, il y a donc deux interfaces (air – eau savonneuse puis eau savonneuse – air).

Utiliser le "générateur de bulles" composé d'une poire et de trois robinets. On crée une bulle en ouvrant le robinet supérieur et celui d'un des deux tuyaux, en pressant sur la poire, puis en refermant le robinet du tuyau. En utilisant le capteur de pression avec une de ses entrées à la pression atmosphérique, mesurer la surpression pour différentes valeurs du rayon de la bulle (la mesure du rayon à l'aide d'une règle est relativement délicate). 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 ΔP en fonction de la courbure de l'interface (inverse du rayon) et en déduire la valeur de A pour l'eau savonneuse.

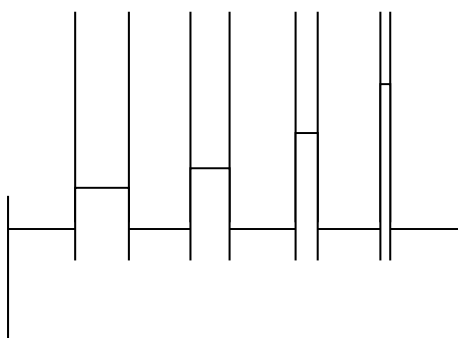
Une autre expérience qualitative est la suivante. Former à chaque extrémité du "générateur de bulles" des bulles de tailles différentes (attention à la gestion des robinets). Les mettre en communication en ouvrant les deux robinets des tuyaux. Vérifier que la grosse "mange" la petite. Expliquer ce phénomène.

IV) Loi de Jurin

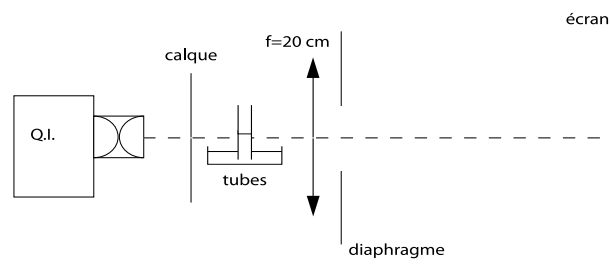
Pour rendre visibles les deux expériences suivantes on propose de projeter leur image sur un écran à l'aide d'une lentille, vous pouvez aussi essayer d'utiliser une webcam.

Il s'agit de vérifier expérimentalement la loi de Jurin qui prévoit l'ascension des liquides dans les tubes capillaires, selon la formule $h = \frac{2A \cos \theta}{\rho g r}$ avec r le rayon du tube et θ est l'angle de contact entre le liquide et la paroi du tube, aussi appelé angle de raccordement.

Réaliser l'expérience avec de l'alcool pur qui possède de bonnes propriétés de mouillage de telle sorte que l'on supposera alors que $\cos \theta \approx 1$ dans la formule ci-dessus (l'eau pose trop de problèmes de mouillage imparfait). On dispose de 4 tubes de différents diamètres. Avant de les immerger dans l'alcool, chasser tout liquide résiduel pour éviter la formation de bulles.

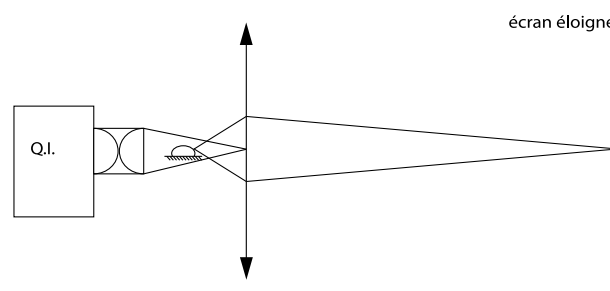


Faire l'image des tubes avec une lentille comme indiqué ci-dessus (attention, les images sont inversées sur l'écran). Tracer l'ascension h du liquide dans le tube en fonction de l'inverse du rayon du tube, $1/r$ et comparer à la prédiction théorique (on pourra essayer d'en déduire A). Notez qu'en traçant la courbe en fonction de $1/r$ au lieu de r on s'affranchit du problème de la mesure absolue de h , qui se traduit uniquement par une ordonnée à l'origine à déterminer par ajustement.



V) Mouillage, angle de raccordement

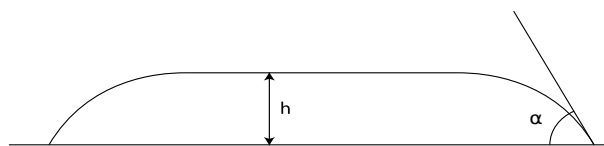
Il s'agit de comparer l'étalement d'une goutte d'eau sur des matériaux différents (une plaque en verre et une en téflon), plus ou moins mouillables. Disposer une grosse goutte d'eau distillée (environ 2 cm de diamètre) sur le substrat choisi, et l'observer par le côté. On peut éventuellement faire l'image de la goutte sur un écran avec une lentille comme indiqué ci-dessous. Attention, le réglage de l'alignement est assez délicat, et il est très important de s'assurer que l'ombre de la plaque ne masque pas la ligne de contact.



Comparer les angles de contact. On illustre ainsi le fait que l'eau mouille le verre alors qu'elle ne mouille pas le téflon. Les vêtements en Gore-tex sont une application directe de ce phénomène : il s'agit d'un tissu de téflon percé de très petits trous (diamètre $\approx 0.2 \mu\text{m}$) qui laisse passer la vapeur d'eau dégagée par le corps humain mais pas l'eau liquide de la pluie. Cet effet peut se comprendre par analogie avec l'expérience de la loi de Jurin, étant donné que pour un liquide ne mouillant pas la surface on a $\cos \theta \approx -1$. La formule donnant la hauteur de la goutte, valable pour une goutte suffisamment large pour qu'on puisse la considérer comme plane dans sa partie supérieure, est (cf. Bruhat de mécanique page 474) :

$$h = \sqrt{\frac{2A(1 - \cos \alpha)}{\rho g}},$$

avec h la hauteur de la goutte et α son angle de raccordement, comme précisé sur la figure suivante.



En principe la mesure de h et α permet une estimation (très approchée) de la tension de surface A . Noter, et vérifier expérimentalement, que la hauteur et l'angle de contact sont indépendants du diamètre de la goutte.

On peut aussi reprendre cette expérience avec la plaque de verre sur laquelle on a disposé préalablement de la poudre de lycopode. L'angle de contact est alors proche de π , l'eau ne mouille quasiment plus la surface et la goutte peut se mettre à rouler si l'on incline la plaque.

Les substrats hydrophobes sont particulièrement intéressants (vitres auto-nettoyantes par exemple). Vous disposez de plusieurs blocs de béton : l'un normal, le deuxième hydrofugé en surface et le dernier hydrofugé en masse. Quel est l'intérêt d'utiliser un béton super hydrophobe ?

Une utilisation pratique de la poussée d'Archimède et de la tension de surface air-liquide est le niveau à bulle.