

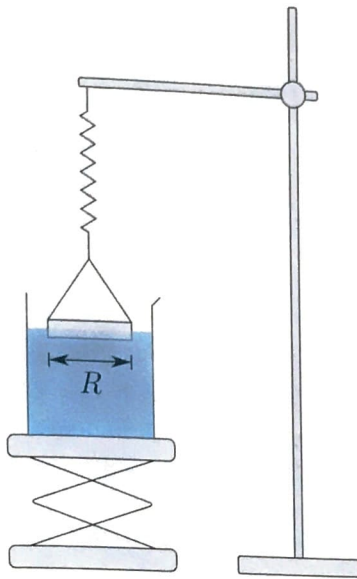


Figure 1 – Mesure de la tension de surface par la méthode de du Noüy. Un b cher contenant le liquide dont on souhaite mesurer la tension de surface est placé sur un support  levateur. Un anneau de du Noüy suspendu à un dynamomètre est plongé dans le liquide. Le support élevateur est alors abaissé progressivement de manière à mesurer la force exercée par la ligne de contact sur l'anneau juste avant l'arrachement du ménisque.



Figure 2 – Angle de contact. L'angle de contact θ à une interface air-liquide-solide. Le liquide est représenté en bleu, le solide en hachuré.

où p est le périmètre de la ligne de contact, γ la tension superficielle du liquide, et θ l'angle de contact (représenté figure 2). Quand on retire l'anneau du bain, la force passe par un maximum, généralement à la limite d'arrachement, qui correspond au moment où la force capillaire est verticale et donc où l'angle de contact apparent θ est nul [92, ch. 2,   6.3].   ce moment, la poussée d'Archimède F_{Ar} n'intervient plus. Ainsi, la force F mesurée au dynamomètre juste avant le détachement du ménisque est

$$F = P + \gamma p. \quad (2)$$

Le périmètre de la ligne de contact sur l'anneau de rayon R étant $p = 2 \times 2\pi R$ car il y a deux lignes de contact liquide-air-anneau (figure 4), la tension de surface s'écrit

$$\gamma = \frac{\Delta F}{4\pi R} \quad (3)$$

où $\Delta F = F - P$ est la différence entre les forces mesurées au dynamomètre à la limite d'arrachement et avec l'anneau hors du fluide, et R le rayon de l'anneau.

La relation (3) n'est en fait pas toujours bien vérifiée [141] (et pour plus de détails, on lira [190]), et la méthode est particulièrement peu efficace pour

les fluides visqueux.

D'une part, si on descend le support élévateur de façon monotone, l'arrachement a en réalité lieu après que la force mesurée a atteint un maximum (atteint au moment où l'angle de contact θ est nul) : le film soulevé ayant une épaisseur finie, les interfaces qui sont verticales à $\theta = 0$ peuvent encore se courber légèrement vers l'intérieur du liquide avant la rupture. C'est bien la force maximale qu'il s'agit de mesurer.

D'autre part, il faut tenir compte du poids du liquide soulevé par l'anneau, qui doit être retiré de la force maximale mesurée. De plus, les angles de contact ne sont a priori pas les mêmes à l'intérieur et à l'extérieur de l'anneau, et la force maximale n'y est donc pas atteinte en même temps. Les tensiomètres de surface commerciaux utilisant cette méthode intègrent un facteur de correction qui dépend de la géométrie de l'anneau. Cela dit, au niveau de précision où l'on travaille, il n'est pas nécessaire de s'en préoccuper.

2 Protocole expérimental

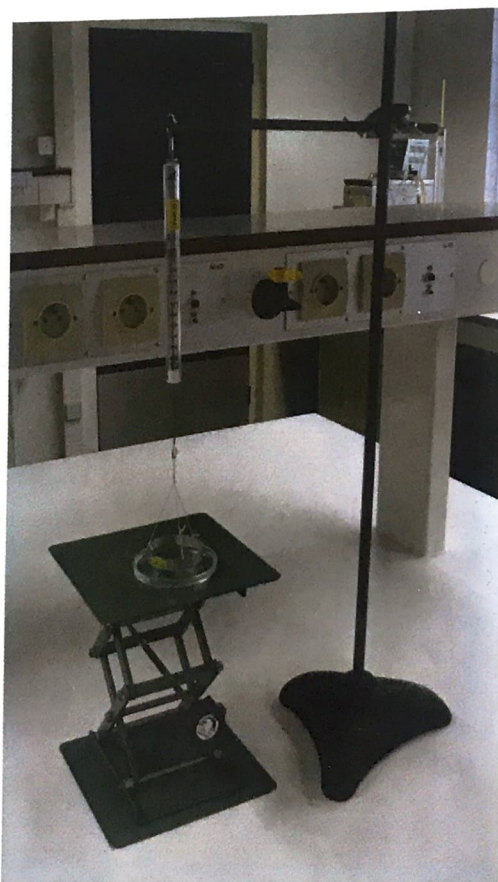


Figure 3 – Photographie du dispositif expérimental. Une boîte de Pétri remplie du liquide à étudier (ici de l'eau distillée) est placée sur un support élévateur, et un anneau de du Noüy est suspendu de manière à plonger dans le bain.

- Étalonner le dynamomètre avec des masses de référence, en connaissant la valeur

du champ de pesanteur g . Cela permet de convertir les longueurs mesurées sur le dynamomètre en forces. Dans la suite, on suppose le dynamomètre calibré et on donne directement les forces.

On commence par mesurer la tension de surface de l'eau.

- Nettoyer l'anneau et un bécher à l'alcool. Rincer, puis remplir le bécher avec de l'eau distillée.

Pour obtenir des résultats proches des valeurs tabulées, il est indispensable de travailler très proprement, en prenant toutes les précautions utiles et en nettoyant aussi souvent que nécessaire le dispositif. En effet, l'eau se « salit » très vite par des poussières, impuretés, etc. qui diminuent nettement sa tension de surface. Ce phénomène, particulièrement net pour l'eau en raison de sa grande tension superficielle, est général et affecte tous les liquides.

- Mesurer la force P due au poids de l'anneau hors de l'eau.
- Immerger l'anneau en remontant le support élévateur.

Quand l'anneau est au contact, on remarque qu'il est tiré vers le bas par l'eau : c'est une manifestation du phénomène de capillarité qu'on tente de quantifier.

- Faire descendre doucement le support élévateur, tout en observant le dynamomètre, jusqu'à ce que le ménisque se détache de l'anneau. Mesurer la force F à la limite d'arrachement.

Pour ne pas fausser la mesure, il faut prendre soin de retirer l'anneau du bain lentement et sans à-coup. Il est facile de constater expérimentalement qu'une action trop rapide conduit à des résultats aberrants, à cause de la contribution dynamique à la force. Le choix d'un support élévateur de bonne qualité est donc nécessaire.

On fait de même avec de l'éthanol.

3 Résultats

On a utilisé un anneau de du Noüy⁽¹⁾ en aluminium de diamètre environ 6 cm (3D Scientific U8412160) et un dynamomètre ayant une précision de 10^{-3} N (3D Scientific U20030). L'anneau est en biseau vers l'extérieur (figure 4), et le diamètre à considérer est donc le diamètre intérieur $2R = 2R_{\text{int}} = 5,98 \pm 0,02$ cm, mesuré au pied à coulisse. La température des liquides est la température ambiante de 22 °C.

Dans le cas où l'anneau est en biseau dans l'autre sens (partie inclinée vers l'intérieur), il faut bien entendu considérer le rayon extérieur. Dans le cas plus canonique où l'anneau est constitué d'un fil de platine cylindrique, il

(1). Un anneau de du Noüy est généralement un fin anneau toroïdal fait de platine, alors que nous travaillons avec un cylindre creux biseauté en aluminium. Le principe général de la mesure n'est pas modifié, mais les détails et corrections le sont évidemment.

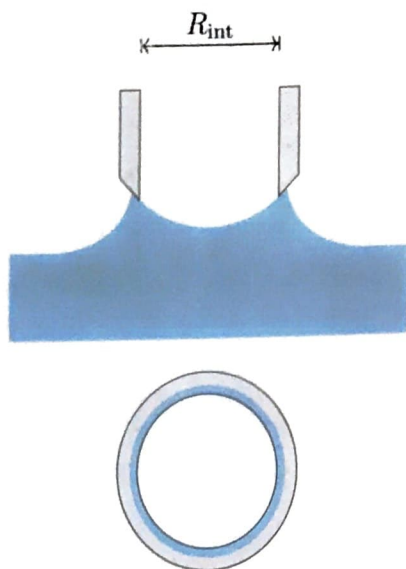


Figure 4 – Détail de l'anneau utilisé.

L'anneau a un profil en biseau de manière à ce que l'arrachement ait lieu de manière régulière et reproductible. De la sorte, le périmètre de la ligne de contact à l'arrachement est le double du périmètre du cercle de rayon R_{int} (parce qu'il y a deux lignes de contact liquide-air-anneau). On a représenté schématiquement le ménisque.



Figure 5 – Photographie du ménisque un peu avant la rupture. On constate que le ménisque est tiré nettement au-dessus de la surface par la présence de l'anneau. Au niveau de la ligne de contact, l'interface s'approche de la verticale.

faut utiliser le rayon moyen $R = (R_{\text{int}} + R_{\text{ext}})/2$. De manière générale, c'est le périmètre limite où se rejoignent les deux lignes de contact à l'arrachement qu'il faut prendre en compte, tant qu'on n'utilise pas des corrections plus précises, mais plus complexes.

Pour l'eau, on mesure $\Delta F = F - P = 27 \pm 1 \text{ mN}$. La tension de surface (donnée par la formule (3)) estimée est donc $\gamma_{\text{exp,eau}} = 72 \pm 3 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, à comparer à la valeur tabulée à 25°C dans le Handbook [144]⁽²⁾, soit $\gamma_{\text{tab,eau}} = 71,99 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$. L'accord est excellent.

Pour l'éthanol, on mesure $\Delta F = F - P = 8,0 \pm 0,5 \text{ mN}$. La tension de surface estimée est donc $\gamma_{\text{exp,EtOH}} = 21 \pm 5 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, à comparer à la valeur tabulée à 25°C , soit $\gamma_{\text{tab,EtOH}} = 21,97 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$. Encore une fois, l'accord est très bon.

Il est nécessaire d'effectuer plusieurs mesures pour s'assurer qu'on n'obtient pas des valeurs aberrantes (la capillarité est un domaine capricieux). Cependant, il n'est pas possible d'avoir une précision arbitrairement grande sur la tension de surface, même en répétant la mesure un grand nombre de fois.

(2). Il est raisonnable d'utiliser la valeur tabulée à 25°C : lire le complément A.

où nous avons supposé que l'interface liquide/gaz n'est pas modifiée lors de l'ascension. La hauteur finale de montée H s'obtient alors en minimisant ce gain d'énergie par rapport à η , soit :

$$H = \frac{2(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})}{\rho g r}. \quad (2)$$

Un peu plus explicitement, le potentiel thermodynamique associé au problème est $\Omega(T, P, \mu, \eta) = U - TS + PV - \mu N + \Delta E(\eta)$, mais la montée n'impliquant qu'une variation de η , minimiser ΔE revient à minimiser le potentiel.

Par ailleurs, il y a un léger flou sur la définition de H . On la définit comme la surélévation du bas du ménisque du fluide dans le capillaire par rapport à la surface libre loin du capillaire. Cela revient à négliger la contribution énergétique du ménisque, ce qui est raisonnable quand l'épaisseur du ménisque est petite devant la hauteur de montée. Dans le cas d'un tube capillaire, c'est-à-dire de rayon inférieur à la longueur capillaire, cette hypothèse est vérifiée.

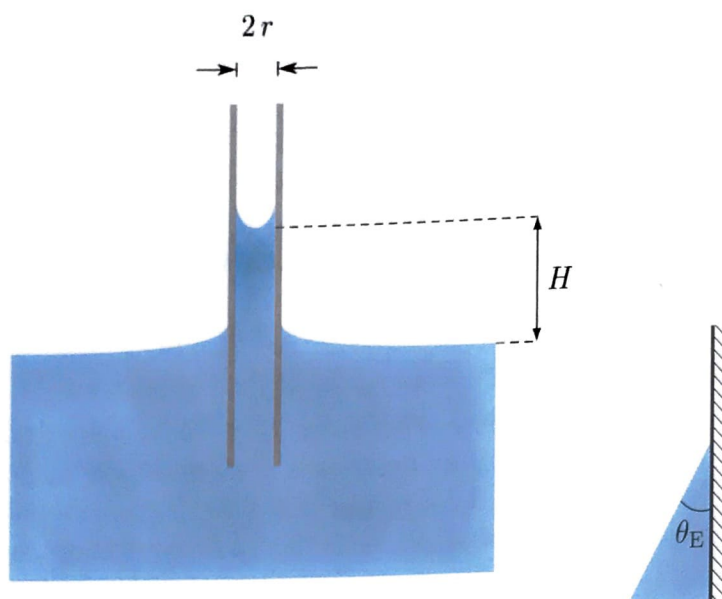
Nous avons supposé que l'aire de contact liquide-gaz n'est pas modifiée, c'est à dire que nous considérons que le ménisque conserve la même forme au cours de l'ascension. Cela suppose que les temps caractéristiques d'équilibre au niveau du ménisque sont courts devant le temps de montée, et que les problèmes d'ancrage de la ligne triple sur les défauts du capillaire sont négligeables (pour plus de détails, on consultera [145]).

En notant θ_E l'angle de contact entre le ménisque et la paroi le long de la ligne triple, inférieur à 90° pour un fluide mouillant, et γ la tension de surface entre l'air et le fluide, la loi de Young-Dupré fournit $\gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma \cos \theta_E$. L'équation (2) devient alors la loi de Jurin

$$H = \frac{2\gamma \cos \theta_E}{\rho g r}. \quad (3)$$

Cette équation peut aussi s'obtenir par un raisonnement en termes de pression, en utilisant la loi de Laplace qui donne la surpression induite par la courbure du ménisque. On le trouvera par exemple dans [92] et [113]. Cependant, ce genre de raisonnement occulte le rôle de la paroi dans la montée capillaire. De plus, l'interprétation de la tension de surface en termes de force linéique fait apparaître une composante normale à la paroi, compensée par une réaction du support qu'il n'est pas simple d'expliquer et peut avoir des conséquences notables.

Nous avons ici considéré un liquide mouillant, c'est à dire dont l'angle de contact θ_E est inférieur à 90° , mais le raisonnement reste valable pour un fluide non mouillant. Dans ce cas, la hauteur H obtenue est négative et traduit un abaissement du niveau du fluide à l'intérieur du tube.



(a) Schéma de l'expérience.

(b) Détail de la ligne triple.

Figure 1 – Montée capillaire. Un tube de diamètre intérieur $2r$ est plongé dans un liquide mouillant, et une colonne de fluide monte dans ce tube jusqu'à une hauteur H par rapport à la surface libre loin du tube. Au niveau de la ligne triple, la surface du fluide fait un angle θ_E avec la paroi du tube.

2 Protocole

On se propose dans ce qui suit de vérifier la relation (3) à l'aide de plusieurs tubes de rayons intérieurs différents et d'une cuve de fluide (figure 2).

- Nettoyer soigneusement les capillaires et la cuve avec le fluide à étudier, puis remplir la cuve.

Pour cette expérience, nous avons utilisé de l'éthanol pour lequel les résultats sont bien meilleurs qu'avec l'eau. Nous supposons en effet dans l'exploitation que $\theta_E \rightarrow 0$, ce qui est raisonnablement vérifié pour l'éthanol mais assez grossier dans le cas de l'eau, moins mouillante sur le verre.

- Plonger les capillaires dans la cuve remplie de fluide.
- Dans chaque capillaire, à l'aide d'une petite poire par exemple, faire monter le fluide dans le tube puis le laisser redescendre.

Les phénomènes de mouillage sont extrêmement sensibles aux propriétés des surfaces employées. Le moindre défaut peut bloquer la ligne triple lors de l'ascension. Au contraire, à la redescente, la gravité aide à la décrocher des aspérités. On parle d'hystérésis de la ligne triple.

- Mesurer la hauteur de montée du fluide dans chaque capillaire.

Le dispositif que nous avons utilisé n'est pas bien adapté à une mesure directe

de la hauteur de montée. On peut projeter l'image des tubes sur un écran à l'aide d'une lentille ou prendre une photographie des tubes. La projection étant malaisée, nous avons utilisé cette seconde possibilité. Dans les deux cas, il faut disposer de l'image d'un objet de taille connue dans le plan des tubes afin de déterminer le grandissement du système optique employé.

L'incertitude sur la hauteur H mesurée correspond à l'épaisseur du ménisque sur l'image.

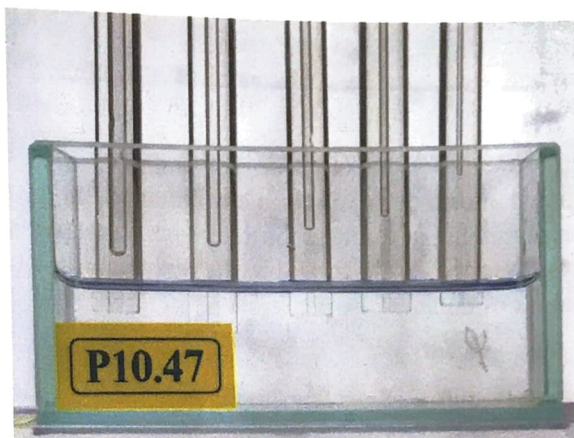


Figure 2 – Photographie du dispositif expérimental. Plusieurs tubes capillaires de diamètres intérieurs différents sont plongés dans un liquide. Une colonne de fluide s'élève dans ces tubes, à une hauteur qui dépend de leur diamètre intérieur.

► Tracer H en fonction de $1/r$.

3 Résultats

Les résultats que nous avons obtenus sont représentés figure 3.

Un ajustement linéaire modélise bien les données expérimentales : la loi de Jurin est donc vérifiée.

Un ajustement affine n'exclut pas une ordonnée à l'origine nulle compte tenu des barres d'erreurs : il est donc légitime d'utiliser un ajustement linéaire. Cependant, l'existence d'une ordonnée à l'origine peut s'expliquer par un problème de référence des hauteurs.

La valeur de la pente obtenue permet alors de mesurer la valeur de la tension de surface de l'éthanol. Pour cela, il est nécessaire de considérer le mouillage comme parfait, c'est-à-dire de supposer que $\theta_E \rightarrow 0$. Cette hypothèse est en accord avec les angles de contact tabulés (ce ne serait pas le cas pour l'eau) et paraît valable si l'on prend garde à s'affranchir de l'hystérèse de la ligne triple. Avec le dispositif employé, il n'est pas possible de mesurer θ_E et nous sommes contraints de faire cette hypothèse.

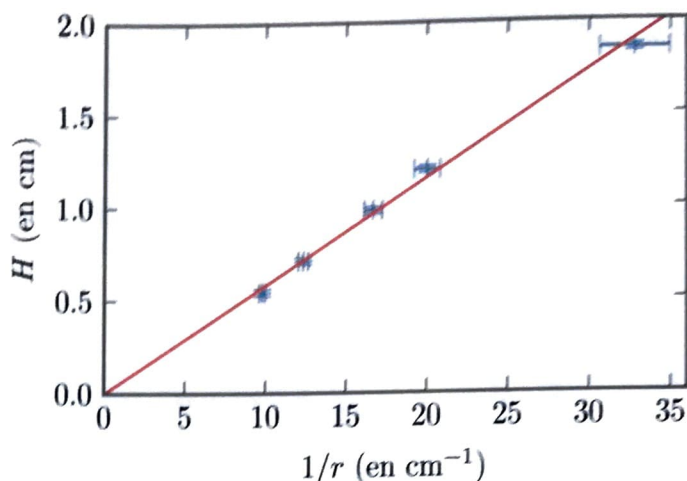


Figure 3 – Hauteur de montée en fonction de l'inverse du rayon du tube. Pour divers capillaires, on représente la surélévation H du ménisque par rapport à la surface libre hors du tube en fonction de l'inverse $1/r$ du rayon. La droite rouge représente un ajustement linéaire des données, de pente $5,8 \pm 0,1 \text{ mm}^2$.

Le cas de mouillage total $\theta_E = 0$ semble incompatible géométriquement avec les conditions considérées. Dans les faits, le fluide monte le long des parois en s'amincissant jusqu'à atteindre des tailles nanoscopiques, pour lesquelles la notion d'angle de mouillage n'est plus pertinente. Pour plus de détails, on consultera [92].

On peut dès lors obtenir une valeur de la tension de surface de l'éthanol à la température $T_{\text{exp}} = 18,9 \pm 0,2^\circ\text{C}$ de l'expérience. En prenant une masse volumique $\rho = 792 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, on trouve $\gamma_{\text{exp}} = 22,4 \pm 0,4 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$. Cette valeur est en bon accord avec la valeur tabulée⁽¹⁾ $\gamma_{\text{tab}} = 22,5 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$.

Références

- [40] Daniel CALECKI et al. *Exercices et problèmes de thermodynamique*. Hermann, sept. 2010. ISBN : 9782705670948.
- [92] Pierre-Gilles de GENNES, Françoise BROCHARD-WYART et David QUÉRÉ. *Gouttes, bulles, perles et ondes*. Belin, 2005. ISBN : 9782701130248.
- [113] Étienne GUYON, Jean-Pierre HULIN et Luc PETIT. *Hydrodynamique physique*. 3^e éd. Savoirs Actuels. EDP Sciences, 2012. ISBN : 9782759808939.
- [144] David R. LIDE. *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th edition*. CRC Press/Taylor et Francis, 2009. ISBN : 9781420090840.
- [145] Pierre LIDON. « Lecture notes on surface tension ». In : *ArXiv e-prints* (sept. 2015). arXiv : 1510.05508.

(1). Les valeurs tabulées de la tension de surface et de la masse volumique de l'éthanol à T_{exp} ont été obtenues par interpolation linéaire des données du Handbook [144], respectivement entre 10°C et 25°C et entre 10°C et 20°C .