

TP 4

Mesure d'un coefficient de tension superficielle

Travail préliminaire.

Commencer par lire le TP entier en diagonal, en prenant en note les informations qui vous paraissent importantes. Appliquer la méthode par couche (d'abord le plan du TP, puis les définitions et les relations).

Vous rédigez un compte-rendu pour ce TP. **Consignes :**

- 1 page recto maximum ;
- un titre, une ou deux lignes d'introduction et d'objectif ;
- un schéma légendé ;
- une présentation de vos résultats expérimentaux bruts ;
- une exploitation de vos résultats expérimentaux (traitement statistique) ;
- une ligne de conclusion.

1 Phénomènes de capillarité

Les phénomènes de tension de surface (appelés aussi capillarité) résultent de l'existence d'une énergie associée aux interfaces (principalement une interface eau/air dans ce TP)

$$E_{\text{inter}} = \gamma S$$

avec S la surface de l'interface et γ le coefficient de tension superficielle. γ est ainsi une énergie par unité de surface, il se mesure donc en $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$, ou aussi en $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$.

Qualitativement, un liquide dans l'air (par exemple) va chercher à minimiser son énergie (équilibre stable), et donc a priori son énergie de surface : par conséquent il va chercher à minimiser la surface de son interface avec l'air. Inversement, augmenter la surface d'une interface coûte de l'énergie.

Quelques exemples :

- les gouttes d'eau sphériques (à volume donné, c'est la sphère qui minimise la surface emprisonnant le volume) ;
 - les bulles d'eau savonneuse sphériques (il y a deux interfaces eau/air, à l'extérieur et à l'intérieur de la bulle) ;
 - le rétrécissement d'un film de savon ;
 - les interfaces solide/liquide/air (la forme traduit le compromis minimal entre les énergies des interfaces solide/liquide, liquide/air et air/solide, en plus des autres forces comme le poids).
- Regarder <http://phymain.unisciel.fr/tension-superficielle/>
 ► Regarder <http://phymain.unisciel.fr/forme-dune-goutte-deau/>

Aspect microscopique : l'énergie liée à l'interface provient des interactions de Van der Waals à l'échelle microscopique. Les molécules du liquide s'attirent entre elles, assurant ainsi la cohésion du liquide. Par symétrie la résultante des forces est nulle sur une molécule donnée. Néanmoins les molécules à la surface ont « moitié moins » de voisins que les molécules dans le volume, et par conséquent elles sont attirées vers l'intérieur du liquide. En termes énergétiques, elles réalisent moins d'interactions stabilisantes. Il en résulte une énergie excédentaire pour ces molécules en surface, traduite macroscopiquement par γ .

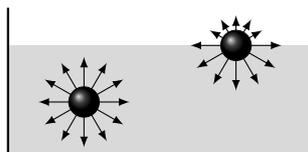


Figure : la molécule en surface réalise des interactions à courte portée (van der Waals) moins fortes avec les molécules d'air qu'avec les molécules du liquide. À l'échelle macroscopique, cela se traduit par une élasticité de la surface libre : elle a tendance à résister lorsqu'on la déforme.

2 Méthode de l'arrachement

2.1 Présentation de la méthode

On utilise le matériel suivant : un dynamomètre de précision 1 mN, une boîte de Pétri, un anneau de du Noüy, un support élévateur et un ensemble potence/noix/pince.

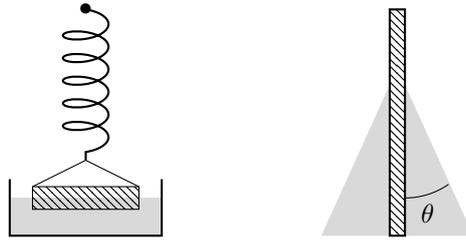


Figure : (à gauche) Dispositif de la méthode d'arrachement, avec l'anneau de du Noüy attaché à un dynamomètre. La boîte de Pétri est placée sur un support élévateur. (à droite) Angle de contact du liquide sur le bord de l'anneau (en coupe).

Le dispositif schématisé ci-dessous permet de mesurer la force subie par un anneau (dit de du Noüy) plongé dans un liquide. Lorsque l'anneau n'est pas plongé dans le liquide, le dynamomètre (schématisé par un ressort) permet la lecture de son poids P . Lorsqu'au contraire l'anneau est plongé (à mi hauteur disons), se rajoute la poussée d'Archimède et la force de tension de surface. Ces forces s'expriment par

$$F = p \gamma \cos \theta + F_{Ar}$$

où p est le périmètre de la ligne de contact, égal à $2 \times 2 \pi R$ avec R le rayon de l'anneau (le facteur 2 rend compte des deux interfaces à l'intérieur et à l'extérieur de l'anneau).

En abaissant le support élévateur, on diminue l'angle de contact. À la limite d'arrachement, l'anneau est complètement hors du liquide, l'angle de contact est nul et la poussée d'Archimède aussi. Si on continue d'abaisser le support, le ménisque se détache de l'anneau.

► Faites un schéma (qualitatif) de cette situation, pour visualiser pourquoi il n'y a plus de poussée d'Archimède et pourquoi $\theta = 0$. Faites un deuxième schéma plus propre où vous représenterez les forces en jeu.

À l'équilibre à la limite d'arrachement, le théorème du centre de masse projeté sur l'axe z ascendant conduit à

$$F_{dyn} - P - p \gamma = 0$$

La force de tension de surface est vers le bas car le liquide tend à minimiser sa surface.

On obtient donc la tension de surface γ par

$$\gamma = \frac{F_{dyn} - P}{4 \pi R}$$

2.2 Mesure de la tension superficielle eau/air

► Comment mesurer P ? Comment mesurer R ? Élaborer et mettre en oeuvre un protocole pour mesurer $\gamma_{eau/air}$.

► Mesurer $\gamma_{eau/air}$ en veillant à bien mettre l'anneau à l'horizontal.

En pratique, les phénomènes liés à la capillarité sont très sensibles aux impuretés (poussières qui se déposent sur le liquide). Ces impuretés sont difficilement contrôlables. C'est pourquoi on souhaite mettre en oeuvre une **étude statistique** de γ .

► Nettoyer la boîte de Pétri et l'anneau à l'eau du robinet, à l'éthanol puis à l'eau distillée avant de les (ré)-utiliser.

► Mesurer une douzaine de fois $\gamma_{eau/air}$ par la méthode de l'arrachement, en changeant régulièrement (par exemple quatre fois) l'eau utilisée, car elle se salit très vite. Utiliser de l'**eau distillée** (la composition de l'eau affecte la tension de surface).

► Sous quelle forme pouvez-vous présenter vos mesures sur le compte-rendu ?

2.3 Effet de la température

► Mesurer trois ou quatre fois $\gamma_{eau/air}$ avec de l'eau chauffée à l'aide d'une bouilloire (ne pas aller jusqu'à l'ébullition). Mesurer sa température lors des mesures. La température a-t-elle un effet ? Si oui, comment varie la tension superficielle avec la température ?

2.4 Mesure de la tension superficielle éthanol/air

► Mesurer une douzaine de fois $\gamma_{\text{éthanol/air}}$ par la méthode de l'arrachement, en changeant régulièrement (par exemple quatre fois) l'éthanol utilisé.

3 Traitement statistique des résultats

La mesure d'un coefficient de tension superficielle est délicate puisqu'elle dépend énormément des propriétés de surface, à commencer par la présence d'impuretés (poussières,...). C'est pourquoi on propose de réaliser une étude statistique.

► À partir de votre tableau de N mesures, déduire la tension superficielle de l'eau selon

$$\gamma_{\text{exp}} = \bar{\gamma} \pm \Delta\gamma$$

où $\bar{\gamma}$ est la moyenne des mesures

$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \dots + \gamma_N}{N}$$

et $\Delta\gamma$ est l'incertitude statistique (type A)

$$\Delta\gamma = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \left((\gamma_1 - \bar{\gamma})^2 + (\gamma_2 - \bar{\gamma})^2 + (\gamma_3 - \bar{\gamma})^2 + \dots + (\gamma_N - \bar{\gamma})^2 \right)}$$

► Soyez attentifs aux nombres de chiffres significatifs. Conventionnellement, on ne garde qu'un chiffre significatif (majoré) pour l'incertitude.

Intervalles de confiance : on peut aussi rencontrer la formule sous la forme (complètement équivalente)

$$\gamma_{\text{exp}} = \bar{\gamma} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad \text{avec} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left((\gamma_1 - \bar{\gamma})^2 + (\gamma_2 - \bar{\gamma})^2 + (\gamma_3 - \bar{\gamma})^2 + \dots + (\gamma_N - \bar{\gamma})^2 \right)}$$

qui fait explicitement apparaître l'**écart-type** σ , qui correspond à un intervalle de confiance à 68 %. Pour un intervalle de confiance élargi à 95%, on écrira plutôt

$$\gamma_{\text{exp}} = \bar{\gamma} \pm \frac{2\sigma}{\sqrt{N}}$$

► Retenez qu'une incertitude statistique est associée à un intervalle de confiance, qui doit être précisé lors de l'écriture du résultat.

Données : Les tensions superficielles tabulées à 25°C sont

$$\gamma_{\text{eau/air}} = 72,0 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1} \quad \text{et} \quad \gamma_{\text{éthanol/air}} = 21,8 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Avez-vous compris ?

Vous pouvez tester votre assimilation du TP en répondant aux questions suivantes.

- Savez-vous définir la tension superficielle ? Connaissez-vous son unité ?
- Savez-vous expliquer la phénoménologie liée à la tension superficielle ?
- Savez-vous interpréter la phénoménologie à partir d'arguments microscopiques ?

- Savez-vous expliquer la méthode d'arrachement ?
- Savez-vous retrouver la formule pour γ , connaissant la force de tension de surface $p \gamma \cos \theta$?
- Savez-vous expliquer pourquoi on écrit $p = 4 \pi R$ et non $p = 2 \pi R$?

- Savez-vous justifier la nécessité d'une étude statistique pour la mesure de γ ?
- Savez-vous présenter un résultat expérimental avec le bon nombre de chiffres significatifs ?
- Savez-vous qu'une incertitude statistique est liée à un intervalle de confiance ?

Annexe - Démonstration de la force de capillarité

On cherche à démontrer $F = p\gamma$ à la limite d'arrachement par un raisonnement énergétique. On considère pour cela qu'on est juste avant l'arrachement ($\theta = 0$ et pas de poussée d'Archimède). En montant l'anneau de $d\ell$, on rallonge le film d'eau (de masse négligeable car d'épaisseur très fine) sur le bord de l'anneau d'une hauteur $d\ell$. L'anneau subit le travail du poids

$$\delta W_P = -P d\ell$$

Il subit aussi le travail du dynamomètre

$$\delta W_{\text{dyn}} = F_{\text{dyn}} d\ell$$

Et il reçoit le travail des forces de capillarité, qui s'obtient par l'opposé de la variation de l'énergie de surface du film

$$\delta W_{\text{cap}} = -dE_{\text{cap}} = -\gamma dS = -F_{\text{cap}} d\ell$$

avec dS la variation de surface du film, soit $dS = 4\pi R d\ell$. On compte l'opposé car l'énergie gagnée par le liquide est perdue par l'anneau. La force de capillarité est donc

$$F_{\text{cap}} = 4\pi\gamma R$$

à la limite d'arrachement.

Finalement, le théorème de l'énergie cinétique appliqué à l'anneau, sachant que sa vitesse est nulle au début et à la fin de ce déplacement infinitésimal, donne

$$0 = F_{\text{dyn}} d\ell - P d\ell + \gamma 4\pi R d\ell$$

qui correspond bien à la formule du TP.