

# Fiche TP Mécanique Physique - Capillarité

Manon Carrière<sup>1</sup>, Elie Wandersmann<sup>1</sup>, and Shoichi Yip<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Jean Perrin / Sorbonne Université

Mars 2026

## 1 Capillarité et tension de surface

La **capillarité** est le phénomène physique que l'on observe lorsqu'on met en contact deux milieux non miscibles (liquide–gaz, liquide–liquide, liquide–solide).

Le terme capillarité provient du fait que ce phénomène est particulièrement visible dans des tubes de la taille d'un cheveu (du Latin *capillaris*), pourtant il concerne une gamme beaucoup plus vaste de systèmes physiques.

Une expérience qui permet de le mettre en évidence est illustrée en Figure 1. Un film d'eau savonneuse est formé dans un cadre rigide, et une corde fine déformable à l'intérieur du cadre. Lorsqu'on perce la partie de film à l'intérieur de la corde, elle change de forme et s'étire jusqu'à atteindre une forme presque circulaire. Cette différence de forme entre les deux configurations implique une force à l'interface entre eau savonneuse et air, qui a une direction tangentielle et qui vise à minimiser la taille de l'interface. La création de cette interface d'aire  $d\mathcal{A}$  nécessite donc que l'on exerce un travail

$$dW = \gamma d\mathcal{A} \quad (1)$$

où on appelle la variable conjuguée de  $\mathcal{A}$  **tension de surface**  $\gamma$  ou une tension superficielle, en dimension

$$[\gamma] = \text{J/m}^2 = \text{N m}^{-1} = \text{Pa m}. \quad (2)$$

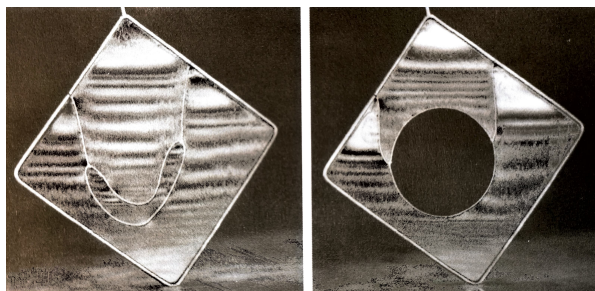


FIGURE 1 – Expérience de rupture d'un film d'eau savonneuse.

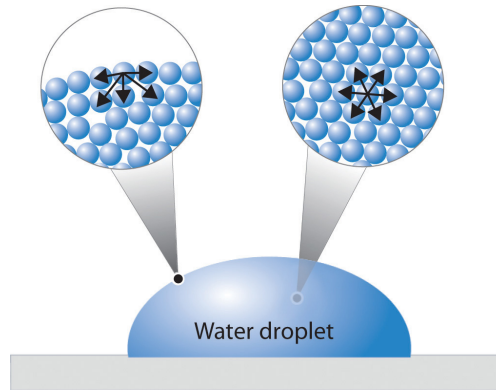


FIGURE 2 – Comparaison de quantité d’interactions cohésives entre une molécule au sein du liquide et une molécule à l’interface avec l’air.

La quantité  $\gamma$  est donc l’énergie à fournir pour augmenter la surface d’une unité [?].

Pour mieux comprendre l’origine microscopique de la tension de surface, on peut imaginer le liquide comme composé de nombreuses molécules denses mais désordonnées. Le milieu étant cohésif, les molécules à l’intérieur bénéficient d’interactions attractives avec leurs voisines. En revanche, à la surface les molécules perdent la moitié des interactions cohésives et sont donc dans un état énergétique défavorable [?].

Pour mesurer la tension de surface il existe de nombreuses méthodes. Dans cette séance de TP nous allons aborder trois méthodes en particulier pour trouver la tension de surface :

- en mesurant directement la force capillaire maximale que l’eau exerce sur un anneau lorsqu’on le détache du liquide ;
- en analysant la forme d’une goutte pendante, qui résulte d’un équilibre entre tension de surface (qui tend à rendre la goutte sphérique) et gravité (qui tend à déformer la goutte) ;
- en mesurant la force due à la pression de Laplace dans une bulle de savon.

## 1.1 Cadre théorique

### Tension de surface

À l’intérieur du liquide, les interactions moléculaires se compensent en moyenne. À l’interface en revanche, les molécules subissent un déséquilibre d’interactions, ce qui place ces molécules dans un état énergétique plus élevé que dans le volume. L’existence d’une interface correspond ainsi à une énergie supplémentaire, appelée énergie interfaciale, proportionnelle à l’aire de cette interface.

Si l’on considère un système comportant une interface d’aire  $A$ , la variation de l’énergie interne s’écrit

$$dU = T dS - P dV + \mu dN + \gamma dA,$$

où  $U$  est l'énergie interne du système,  $T$  la température,  $S$  l'entropie,  $P$  la pression,  $V$  le volume,  $N$  la quantité de matière et  $\mu$  le potentiel chimique. Le terme supplémentaire  $\gamma dA$  correspond au travail nécessaire pour modifier l'aire de l'interface.

La tension de surface  $\gamma$  apparaît ainsi comme la grandeur thermodynamique conjuguée à l'aire interfaciale. Elle peut donc être définie comme

$$\gamma = \left( \frac{\partial U}{\partial A} \right)_{S,V,N}.$$

Autrement dit, la tension de surface représente la variation de l'énergie interne associée à une augmentation infinitésimale de l'aire interfaciale, à entropie, volume et quantité de matière constants.

En pratique, les expériences sont généralement réalisées à température et pression fixées. Il est alors plus commode d'introduire l'enthalpie libre de Gibbs

$$G = U + PV - TS.$$

En différentiant cette relation, on obtient

$$dG = -S dT + V dP + \mu dN + \gamma dA.$$

À température, pression et quantité de matière constantes, cette relation se réduit à

$$dG = \gamma dA,$$

ce qui conduit à la définition équivalente

$$\gamma = \left( \frac{\partial G}{\partial A} \right)_{T,P,N}.$$

La tension de surface peut alors être interprétée de deux manières équivalentes :

- comme une énergie par unité de surface, exprimée en  $\text{J m}^{-2}$  ;
- comme une force par unité de longueur exercée tangentiellement à l'interface, exprimée en  $\text{N m}^{-1}$ .

Le système tend spontanément vers la configuration de plus basse énergie ; il cherche donc à minimiser son aire interfaciale. En l'absence d'autre force, une goutte isolée adopte ainsi une forme sphérique, qui minimise l'aire pour un volume donné.

On parle de *tension interfaciale* entre deux milieux condensés et plus couramment de *tension de surface* lorsqu'il s'agit d'une interface liquide-gaz.

## Loi de Young–Laplace

Lorsqu’une interface est courbe, la tension de surface engendre un déséquilibre des forces normales de part et d’autre de l’interface, ce qui se traduit par l’apparition d’un saut de pression entre les deux milieux. Cette relation est décrite par la loi de Young–Laplace.

Considérons une interface séparant deux fluides et localement caractérisée par deux rayons de courbure principaux  $R_1$  et  $R_2$ . L’équilibre mécanique de l’interface conduit alors à la relation

$$\Delta P = P_{\text{int}} - P_{\text{ext}} = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

où  $P_{\text{int}}$  et  $P_{\text{ext}}$  sont les pressions de part et d’autre de l’interface et  $\gamma$  la tension de surface.

La quantité

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

correspond à la courbure moyenne de l’interface. La loi de Young–Laplace montre ainsi que le saut de pression est directement proportionnel à la courbure de l’interface.

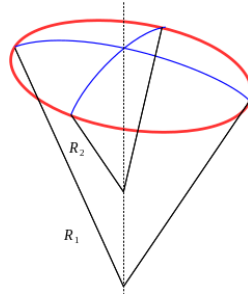


FIGURE 3 – Courbure d’une surface en un point

Dans le cas d’une interface plane ( $R_1, R_2 \rightarrow \infty$ ), la courbure est nulle et aucun saut de pression n’apparaît. À l’inverse, une interface courbe engendre une surpression du côté convexe.

Dans le cas particulier d’une interface sphérique de rayon  $R$ , on a  $R_1 = R_2 = R$  et la relation se simplifie en

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R}.$$

## Couplage avec la pression hydrostatique

Dans un champ de pesanteur, la pression au sein d’un liquide varie avec l’altitude selon

$$P(z) = P_0 - \rho g z,$$

où  $\rho$  est la masse volumique du liquide et  $g$  l'accélération de la pesanteur. L'axe vertical  $z$  est orienté vers le haut. La quantité  $P_0$  correspond à la pression au niveau de référence  $z = 0$ .

L'équilibre d'une interface liquide-gaz résulte donc de la compétition entre :

- la pression capillaire décrite par la loi de Young-Laplace ;
- la pression hydrostatique liée à la gravité.

Les différentes méthodes expérimentales étudiées dans ce TP reposent toutes sur la loi de Young-Laplace, qui relie la tension de surface à des grandeurs mécaniques mesurables.

Selon le dispositif expérimental, cette relation peut être mise en évidence en mesurant :

- une force (méthode de l'anneau),
- une pression (méthode de la bulle),
- ou une forme d'interface sous gravité (goutte pendante).

L'objectif du TP est ainsi de déterminer la tension de surface d'un liquide à partir de ces trois approches expérimentales et de comparer les résultats obtenus.

#### Objectifs du TP

- Déterminer la tension de surface d'un liquide par différentes méthodes expérimentales.
- Mettre en évidence la loi de Young-Laplace reliant tension de surface, courbure d'interface et pression capillaire.
- Étudier l'influence d'un tensioactif sur la tension de surface et déterminer la concentration micellaire critique (CMC).

#### Objectifs pédagogiques

- Comprendre l'origine physique de la tension de surface et son rôle dans l'équilibre des interfaces fluides.
- Utiliser la loi de Young-Laplace pour relier tension de surface, courbure d'interface et différence de pression.
- Découvrir différentes approches expérimentales permettant de mesurer une tension de surface (force capillaire, surpression, forme d'interface).
- S'initier à l'analyse d'images scientifiques et à l'ajustement d'un modèle physique à des données expérimentales.
- Utiliser un outil numérique pour résoudre une équation décrivant la forme d'une interface et en extraire une grandeur physique.

## 1.2 Méthode de l'anneau de Du Noüy – Mesure par une force

La méthode de l'anneau de Du Noüy permet de mesurer la tension de surface en déterminant la force nécessaire pour arracher un anneau métallique d'une interface liquide-gaz. Le dispositif expérimental est constitué d'un anneau fin suspendu à un tensiomètre mécanique permettant de mesurer directement la force appliquée.

L'anneau est d'abord immergé dans le liquide puis la cuve contenant la solution est abaissée progressivement. Le film liquide attaché à l'anneau (également appelé lamelle) s'étire alors jusqu'à sa rupture. Au moment où l'anneau se détache de l'interface, la force mesurée par le tensiomètre atteint un maximum.

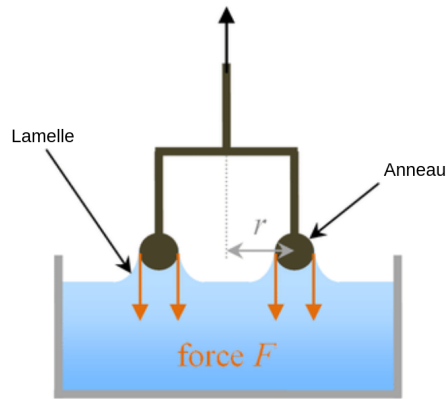


FIGURE 4 – Illustration du principe d'utilisation de l'anneau de Du Noüy vu en coupe adapté de [1]. L'anneau est placé à la surface du liquide puis tiré verticalement vers le haut à l'aide d'un tensiomètre. La tension de surface exerce sur l'anneau une force capillaire  $F$  dirigée vers le bas (flèches orange). Le tensiomètre applique une force opposée vers le haut (flèche noire) afin de compenser cette force jusqu'au détachement du film liquide. La force maximale mesurée permet de déterminer la tension de surface.

Cette force correspond à la force capillaire exercée par la tension de surface le long de la ligne de contact entre le liquide et l'anneau. Dans l'approximation d'un anneau mince de rayon  $R$ , la force capillaire est proportionnelle à la longueur totale de la ligne de contact. Comme l'anneau possède deux circonférences en contact avec le liquide (interne et externe), on obtient

$$F = 4\pi r \gamma.$$

La tension de surface peut alors être déduite de la force maximale mesurée :

$$\gamma = \frac{F}{4\pi r}.$$

## Influence des tensioactifs et Concentration Micellaire Critique (CMC)

Dans ce TP, la tension de surface est mesurée pour différentes concentrations d'un tensioactif : le dodécylsulfate de sodium (SDS).

Les tensioactifs sont des molécules amphiphiles constituées de deux parties distinctes : une tête hydrophile ayant une affinité pour l'eau et une chaîne hydrophobe qui tend à éviter le contact avec le solvant aqueux. Lorsqu'ils sont dissous dans l'eau, ces molécules migrent spontanément vers les interfaces liquide-gaz ou liquide-liquide. À l'interface air-eau, elles s'orientent généralement de manière à placer leur tête hydrophile dans l'eau et leur chaîne hydrophobe vers l'air.

Cette adsorption modifie les interactions moléculaires à l'interface et conduit à une diminution de la tension de surface. Plus la concentration en tensioactif augmente, plus l'interface se couvre progressivement de molécules amphiphiles, ce qui réduit l'énergie interfaciale du système.

Lorsque la concentration devient suffisamment élevée, l'interface finit par être saturée. Les molécules supplémentaires ne peuvent plus s'y adsorber et s'agrègent dans le volume de la solution pour former des structures appelées *micelles*. La concentration à laquelle apparaît ce phénomène est appelée *concentration micellaire critique* (CMC).

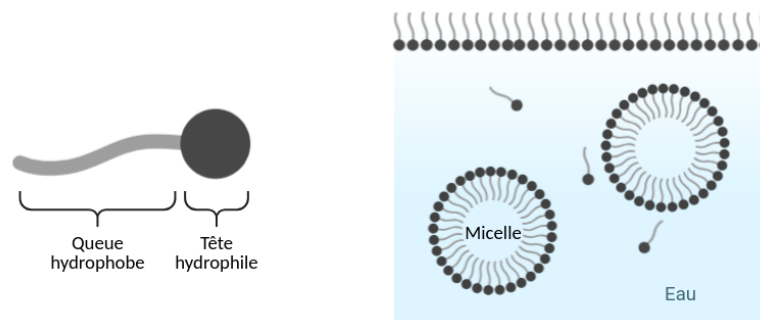


FIGURE 5 – Schéma du comportement des tensioactifs et formation de micelles.

L'évolution de la tension de surface en fonction de la concentration présente alors deux régimes distincts :

- pour des concentrations inférieures à la CMC, l'augmentation de la concentration en tensioactif entraîne une diminution marquée de la tension de surface ;
- au-delà de la CMC, la tension de surface varie très peu avec la concentration, les molécules supplémentaires formant principalement des micelles dans le volume.

La détermination expérimentale de la CMC constitue ainsi une application classique des mesures de tension de surface. Dans ce TP, elle sera obtenue en étudiant l'évolution de  $\gamma$  en fonction de la concentration de SDS mesurée à l'aide de la méthode de l'anneau de Du Noüy.

## Protocole expérimental

1. Réaliser les dilutions de sept solutions de SDS à partir de la solution mère à 10 mM : 0, 2, 4, 6, 7.5, 8.5 et 10 mM. Les dilutions sont effectuées avec de l'eau distillée dans des falcons.
2. Mettre le tensiomètre à niveau en ajustant les vis de réglage situées à la base de l'appareil, de manière à ce que la bulle du niveau soit centrée dans le cercle noir.
3. Suspendre l'anneau métallique au tensiomètre.
4. Ajuster la position de la barre métallique supportant l'anneau à l'aide de la vis située à l'arrière de l'appareil (réglage de la tension du fil métallique), de sorte que la barre soit centrée entre les deux repères noirs du dispositif.
5. **Les mesures sont réalisées en commençant par les solutions les moins concentrées afin de limiter toute contamination par les solutions plus concentrées.**
6. Pour chaque solution :
  - (a) Placer la cuve contenant la solution à étudier sur le disque mobile du tensiomètre. Monter le disque afin d'amener la surface du liquide au contact de l'anneau, de sorte que celui-ci pénètre légèrement dans le liquide.
  - (b) Abaisser progressivement la cuve à l'aide de la vis située sous le disque. Simultanément, équilibrer la force exercée sur l'anneau en ajustant lentement le système de réglage du tensiomètre à l'aide du bouton circulaire blanc.
  - (c) Identifier la rupture du film liquide, qui correspond à la force maximale exercée sur l'anneau.
7. Répéter la mesure deux à trois fois pour chaque solution afin d'améliorer la précision expérimentale. **Entre deux concentrations différentes, rincer soigneusement l'anneau et la cuve à l'éthanol puis les sécher afin d'éviter toute contamination entre les solutions.**

## Analyse des résultats

Tracer la tension de surface  $\gamma$  en fonction du logarithme de la concentration en SDS.

1. Décrire qualitativement la forme de la courbe obtenue. Que remarquez-vous lorsque la concentration en SDS augmente ?
2. Peut-on distinguer différents régimes d'évolution de la tension de surface ? Si oui, décrire ces régimes et indiquer approximativement la zone de concentration où le comportement change.
3. Proposer une méthode graphique permettant d'estimer la concentration correspondant à ce changement de régime.
4. À quelle concentration correspond ce point ? À quel phénomène physico-chimique cette concentration est-elle associée ?
5. Comparer la valeur obtenue à la valeur attendue pour le SDS dans l'eau et discuter les éventuels écarts.

### 1.3 Méthode de la goutte pendante – Mesure par la gravité

La méthode de la goutte pendante permet de déterminer la tension de surface d'un liquide à partir de la forme d'une goutte suspendue. La géométrie de la goutte résulte de l'équilibre entre la tension de surface, qui tend à minimiser l'aire de l'interface, et la gravité, qui tend à allonger la goutte.

#### Principe physique

La forme d'une goutte pendante est gouvernée par l'équilibre entre la pression capillaire et la pression hydrostatique. La pression capillaire est décrite par la loi de Young–Laplace introduite dans le cadre théorique, tandis que la pression dans le liquide varie avec l'altitude selon la loi hydrostatique.

La combinaison de ces deux effets détermine la courbure locale de l'interface et donc la forme globale de la goutte. Pour une goutte axisymétrique, la forme de l'interface peut être décrite à l'aide de la longueur d'arc  $s$ , de la coordonnée radiale  $r(s)$ , de la coordonnée verticale  $z(s)$  et de l'angle  $\psi(s)$  entre la tangente à l'interface et l'horizontale.

La combinaison de la loi de Young–Laplace et de la loi hydrostatique conduit alors au système différentiel

$$\frac{dr}{ds} = \cos \psi, \quad \frac{dz}{ds} = \sin \psi, \quad \frac{d\psi}{ds} = \frac{\Delta p_0}{\gamma} - \frac{\sin \psi}{r} - \frac{\Delta \rho g}{\gamma} z.$$

Ce système relie la géométrie de la goutte à la tension de surface  $\gamma$  et à la différence de densité  $\Delta\rho$  entre le liquide et le milieu extérieur. En pratique, la tension de surface est déterminée en ajustant numériquement la solution de cette équation au contour expérimental de la goutte.

En pratique, la tension de surface est obtenue en ajustant numériquement la solution de l'équation de Young–Laplace au profil expérimental de la goutte.

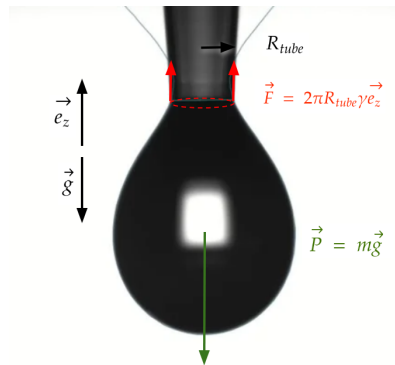


FIGURE 6 – Forces appliquées à la goutte pendante : le poids  $P$ , dirigé vers le bas, et la résultante de la force capillaire liée à la tension de surface, dirigée vers le haut au niveau de l'attache de la goutte.

## Principe expérimental

Une goutte de solution est formée à l'extrémité d'un tube relié à une seringue montée sur un pousse-seringue. Le pousse-seringue permet de contrôler précisément le débit et donc le volume de liquide injecté. Le liquide est injecté lentement afin de former une goutte pendante stable, la plus grande possible sans qu'elle ne se détache.

Un écran lumineux est placé derrière la goutte afin d'obtenir un fort contraste entre la goutte et l'arrière-plan. La silhouette de la goutte apparaît alors sombre sur un fond lumineux. L'image de la goutte est enregistrée à l'aide d'une caméra placée face à la goutte et reliée à un ordinateur permettant l'acquisition des images.

Des images de gouttes sont acquises pour différentes concentrations de SDS afin d'étudier l'évolution de la tension de surface avec la concentration.

## Mise en place de l'expérience

1. Remplir une seringue avec la solution à étudier, puis la fixer sur le pousse-seringue. Relier la sortie de la seringue au tube servant à former la goutte et placer ce tube verticalement afin que la goutte puisse se former à son extrémité.
2. Allumer l'écran lumineux derrière la goutte afin d'obtenir un fond uniforme et contrasté. Positionner la caméra face à la goutte, régler la mise au point afin d'obtenir un contour net, puis ouvrir le logiciel d'acquisition sur l'ordinateur et vérifier que l'image est correctement visible.

## Acquisition des images

1. Injecter lentement la solution à l'aide du pousse-seringue afin de faire croître une goutte à l'extrémité du tube. Le volume est augmenté progressivement jusqu'à obtenir une goutte pendante bien développée, la plus grande possible sans qu'elle ne se détache.
2. Ajuster si nécessaire l'éclairage et la mise au point afin d'obtenir un contour bien défini, puis enregistrer plusieurs images de la goutte à l'aide de la caméra.
3. Répéter l'acquisition pour les différentes concentrations de SDS.

## Analyse des images

L'analyse des images est réalisée de deux manières.

Dans une première partie, les images sont analysées à l'aide du plugin **PendantDrop** du logiciel Fiji. Ce plugin permet d'ajuster un modèle théorique de goutte pendante au contour observé et de déterminer directement la tension de surface.

Dans une seconde partie, les étudiants réalisent eux-mêmes l'extraction du contour de la goutte à partir des images.

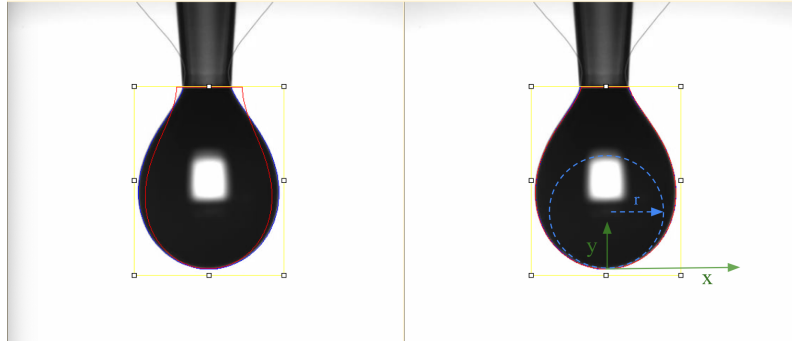


FIGURE 7 – Ajustement du profil d’une goutte avec le plugin *PendentDrop*. Le contour détecté de la goutte est représenté en rouge. À droite, les axes du repère  $(x,y)$  sont indiqués en vert et le rayon de courbure de la pointe de la goutte  $r$  est représenté en bleu.

**Détermination de la tension de surface avec le plugin *Pendent Drop*** Fiji permet également d’estimer directement la tension de surface d’un liquide à partir du profil d’une goutte pendante grâce au plugin *Pendent Drop* [2], qui ajuste la forme de la goutte à l’équation de Young–Laplace.

- Ouvrir Fiji et charger l’image de la goutte pendante (*File* → *Open*). Convertir l’image en niveaux de gris pour améliorer la détection du contour (*Image* → *Type* → *8-bit*).
- Calibrer l’échelle spatiale : tracer une ligne le long de la largeur du capillaire visible sur l’image, puis utiliser la commande *Analyze* → *Set Scale...* et entrer la largeur réelle du capillaire en millimètres (mm).
- Dessiner un rectangle autour de la goutte pour définir la zone d’analyse. Lancer l’outil d’analyse de goutte pendante via le plugin (*Plugins* → *Drop analysis* → *Pendent Drop*).
- Régler les paramètres physiques selon votre estimation. Ensuite, dans les options de réglage, décocher uniquement les cases *tip x coordinate* et *tip y coordinate*, puis cliquer sur *fit parameters checked below*, puis valider par *OK*. Le plugin ajuste alors la forme de la goutte à la solution de l’équation de Young–Laplace.
- Une boîte de dialogue apparaît alors, affichant plusieurs informations dont la tension de surface  $\gamma$ .
- Relever la valeur de la tension de surface  $\gamma$  affichée dans les résultats.

### Extraction du contour de la goutte sous Fiji et résolution de l’équation de Young-Laplace

Dans cette seconde approche, la tension de surface est déterminée à partir du profil expérimental de la goutte. Les images sont d’abord traitées afin d’extraire le contour

de la goutte, puis les coordonnées obtenues sont utilisées dans un script Python pour ajuster numériquement la solution de l'équation de Young-Laplace.

- Ouvrir Fiji et charger l'image de la goutte (*File* → *Open*).
- Convertir l'image en niveaux de gris afin de simplifier le traitement (*Image* → *Type* → *8-bit*).
- Appliquer un léger flou gaussien afin de réduire le bruit et lisser le contour de la goutte (*Process* → *Filters* → *Gaussian Blur...*), avec un écart-type typique de  $\sigma = 1$  à 2 pixels.
- Isoler la goutte par seuillage (*Image* → *Adjust* → *Threshold...*). Décocher l'option *Dark background*. Ajuster les curseurs afin que toute la goutte soit rouge, puis cliquer sur *Apply* pour obtenir une image binaire.
- Si des zones internes apparaissent à cause de reflets, remplir les éventuels trous dans la silhouette (*Process* → *Binary* → *Fill Holes*).
- Convertir la silhouette binaire en sélection suivant automatiquement le contour de la goutte (*Edit* → *Selection* → *Create Selection*).
- Lisser légèrement le contour afin d'obtenir une courbe plus régulière (*Edit* → *Selection* → *Fit Spline*).
- Exporter les coordonnées du contour complet de la goutte (*File* → *Save As* → *XY Coordinates...*).

Le fichier texte obtenu (par exemple `pendent.txt`) contient deux colonnes correspondant aux coordonnées  $(x, y)$  des points du contour de la goutte.

Dans un script Python fourni, ces données sont utilisées pour mesurer quelques caractéristiques géométriques de la goutte, notamment le rayon de courbure au sommet et le diamètre maximal. Les étudiants résolvent ensuite l'équation de Young-Laplace adimensionnée pour différentes valeurs du paramètre  $\beta$ , puis comparent les profils théoriques aux mesures expérimentales afin d'en déduire une estimation simplifiée de la tension de surface.

## 1.4 Méthode de la bulle - Mesure par une pression

La Loi de Young-Laplace décrit la surpression  $\Delta P$  que l'on observe lorsqu'on traverse une interface entre deux fluides et est égal à

$$\Delta P = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (3)$$

ou le terme en parenthèse est la courbure  $C$  de l'interface. Dans le cas sphérique  $R_1 = R_2$ , donc

$$\Delta P_{\text{sphère}} = \frac{2\gamma}{R}. \quad (4)$$

Dans le cas de la bulle d'eau savonneuse il y a deux interfaces eau/air (Figure 8), donc la surpression est le double d'une simple goutte sphérique

$$\Delta P_{\text{bulle}} = \frac{4\gamma}{R}. \quad (5)$$

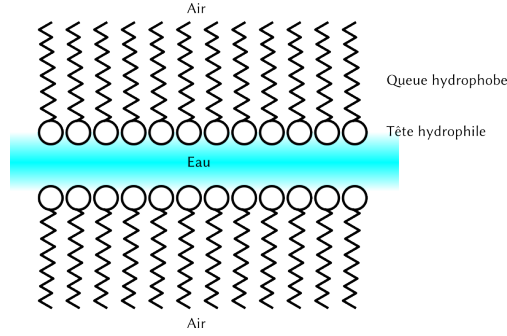


FIGURE 8 – Dans le cas d’une bulle d’eau savonneuse le film est composé par deux couches, avec les têtes hydrophiles en contact.

L’objectif de l’expérience est de mesurer donc la surpression de Laplace  $\Delta P$  pour en déduire la tension de surface d’une bulle d’eau savonneuse. Cette surpression sera transmise, par un système de tubes, à un entonnoir immergé dans du liquide, dans un contenant déposé sur une balance. Lorsqu’on ouvre la valve qui transmet la surpression de la bulle à l’entonnoir, le système atteint un nouveau équilibre et on mesure une masse finie  $m$  sur la balance. Cette masse  $m$  sera lié à la surpression  $\Delta P$  comme

$$\Delta P_{\text{bulle}} = \frac{F}{S_i} = \frac{mg}{S_i} \quad (6)$$

où  $g = 9.81 \text{ m s}^{-1}$  est l’accélération gravitationnelle sur Terre et  $S_i$  est la surface interne de l’entonnoir en contact avec l’eau.

L’avantage d’utiliser ce dispositif expérimental est d’augmenter la résolution dans la mesure des surpression par rapport à des capteurs de pression différentiels. La résolution typique d’un capteur industriel<sup>1</sup> est d’environ 0.1 Pa. En revanche, avec une résolution de 0.01 g, on peut atteindre une résolution en terme de pression de

$$\delta P = \frac{\delta m g}{S_i} = \frac{0.01 \text{ g} \times 9.81 \text{ m/s}^2}{\pi \times 4 \text{ cm}^2} \approx 0.08 \text{ Pa}. \quad (7)$$

Dans cette expérience on va donc vérifier la relation entre  $m$ , la masse mesurée sur la balance, et  $R$ , le rayon de la bulle

$$m = \frac{4\gamma S_i}{g} \frac{1}{R}. \quad (8)$$

L’ajustement des données nous permettra d’en déduire la tension de surface  $\gamma$ .

Vous pouvez trouver des références pour cet expérience dans le papier [3].

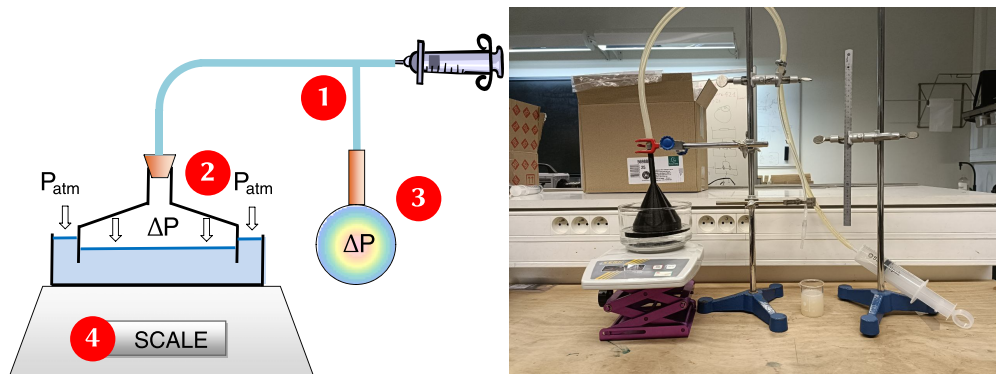


FIGURE 9 – Schéma de l'expérience et mise en place de l'expérience avec l'entonnoir, le connecteur et les tubes, puis la balance pour mesurer le poids et le règle pour mesurer le rayon de la bulle.

#### 1.4.1 Mise en place de l'expérience

Vous pouvez observer un schéma de l'expérience en figure 9. Un connecteur en T avec des tubes en caoutchouc (1) est lié d'un côté à une seringue et d'un autre côté à un entonnoir (2). Cet entonnoir, qui a une bordure cylindrique à rayon constant, a la partie droite immergé dans de l'eau contenue dans un récipient. Du côté libre du tube on peut former un film de savon, qui devient une bulle en poussant l'air de la seringue (3). La surpression  $\Delta P$  qui se crée lors de la formation de la bulle est transmise à l'entonnoir, et celui là est exactement ce qui fait qu'on mesure sur la balance la masse  $m$  (4).

Pour faire ça, ouvrez la seringue et trempez le bout du tube pour former le film, tout en faisant attention qu'il y ait pas de dépôt d'eau dans la bulle. L'entonnoir immergé dans l'eau, tarez la balance et poussez le piston. Une fois à l'équilibre, prenez en photo la bulle. Notez la masse affichée sur la balance. Percez la bulle et contrôlez que la balance retourne à 0 g. Répétez pour plusieurs valeurs de volume.

#### 1.4.2 Analyse des données

Trouver la valeur de la **surpression** en fonction du **rayon** de la bulle. Tracer la fonction  $\Delta P = f(\frac{1}{R})$ , ajuster la fonction et extraire la valeur de  $\gamma$ .

Quelle est la gamme de valeurs observées de rayon de la bulle ? Commenter. Tracer ensuite l'allure de de la surpression en fonction du volume de la bulle  $\Delta P = f(V)$ .

1. <https://sensirion.com/products/catalog/differential-pressure-sensors>

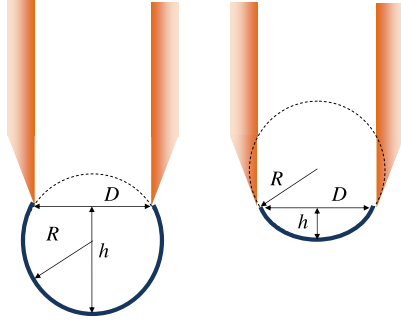


FIGURE 10 – Forme de la goutte à des valeurs de pressions toutes petites. [3]

## Références

- [1] D. Kawale, *Influence of Dynamic Surface Tension on Foams : Application in Gas Well Deliquification*, PhD thesis, University of Regina, 2012. DOI : 10.3140/RG.2.1.1539.2241.
- [2] A. Daerr and A. Mogne, *Pendent\_Drop : An ImageJ Plugin to Measure the Surface Tension from an Image of a Pendent Drop*, Journal of Open Research Software, 4 : e3 (2016), DOI : 10.5334/jors.97.
- [3] T. López-Arias, L.M. Gratton and S. Oss, *High precision pressure measurement with a funnel*, European journal of physics, 29, 6, p. 1235–1241, 2008.