



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

PHYSIQUE POUR LES CHIMISTES - CAPILLARITÉ

2022-2023

Bibliographie :

Table des matières

1	Rappels théoriques	3
1.1	Tension de surface	3
1.2	Conséquences	3
2	Expériences qualitatives sur les lames de savon	4
3	Tensiomètre à lame mouillée	4
3.1	Principe de la mesure	4
3.2	Mise en pratique	5
4	Loi de Laplace	7
4.1	Principe	7
4.2	Mise en pratique	7
5	Loi de Jurin	8
5.1	Principe	8
5.2	Mise en pratique	8
6	Mouillage et angle de raccordement	9

1 Rappels théoriques

1.1 Tension de surface

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 lorsque l'aire de l'interface augmente ($\delta S > 0$). 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, comme indiqué sur la figure ci-dessous.

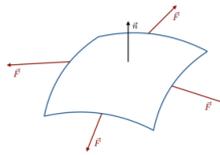


FIGURE 1 – Illustration de la force associée à la tension superficielle

Quelques exemples de valeurs numériques :

- Pour l'interface entre l'eau et l'air à température ambiante, on a $A \approx 70 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$.
- Pour l'interface entre l'eau et l'éthanol dans les mêmes conditions, on a plutôt $A \approx 20 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$.
- Pour l'interface entre l'eau et le mercure, $A \approx 450 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$.

1.2 Conséquences

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 donne la différence de pression en fonction de ces rayons de courbures principaux, et s'écrit :

$$\Delta P = A \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) \quad (1)$$

Dans le cas d'une interface sphérique $R = R'$, on a donc plus simplement

$$\Delta P = \frac{2A}{R} \quad (2)$$

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 (**loi de Jurin**). Par analyse dimensionnelle, montrer que la longueur caractéristique sur laquelle ces deux effets sont du même ordre est la **longueur capillaire**

$$\ell_c = \sqrt{\frac{A}{\rho g}} \quad (3)$$

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 pourrez étudier dans le TP Ondes en série III.



2 Expériences qualitatives sur les lames de savon

On dispose des objets présentés sur la figure 1.

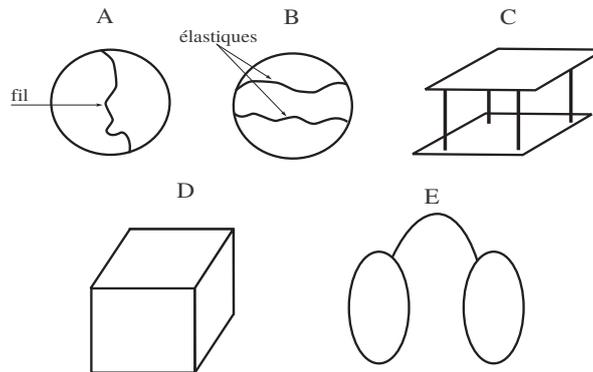


FIGURE 2 – Différents objets à plonger dans de l'eau savonneuse

Expérience : Plonger l'objet A¹ 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.

Expérience : Plonger l'objet B et percer les parties supérieures et inférieures de la lame. Tirer sur la ficelle inférieure et vérifier que cela n'a aucune action sur la forme de la ficelle supérieure. 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 (comme un morceau de ballon de baudruche, par exemple).

Expérience : Avec les objets C et D, on obtient parfois des figures géométriques amusantes, présentant des brisures de symétrie.

Expérience : 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 (douceement !) 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. Cette différence de signe se manifeste par une géométrie en "selle de cheval". Les deux côtés de la lame étant à la pression atmosphérique, la loi de Laplace impose en effet que

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} = 0 \quad (4)$$

de sorte que les deux rayons de courbures doivent avoir des signes opposés. Il est difficile cependant de vérifier quantitativement que $R = -R'$.

Note : on dispose aussi d'objets en forme d'hélices. Essayer les pour obtenir des formes amusantes.

Note : les lames étant de petites dimensions, on pourra rendre l'expérience visible en utilisant une webcam. Il faut prévoir un éclairage adéquat (panneau led par exemple) pour obtenir un résultat optimal.

3 Tensiomètre à lame mouillée

3.1 Principe de la mesure

Cet appareil, appelé aussi balance de tension superficielle, sert à mesurer la tension de surface des liquides en équilibrant, via un contrepois, la force qui s'exerce sur une lame solide lorsqu'elle affleure la surface libre. On

1. Si l'on n'en dispose pas, on peut aussi prendre l'objet B et faire en sorte que l'une des deux ficelles soit hors du cercle métallique.

établit que la lame mince 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. Le facteur 2 vient du fait que la force s'exerce sur le périmètre ($\approx 2L$) de la lame. 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, c'est-à-dire que dans la figure ci-dessous, la partie immergée de la lame est supposée de volume négligeable.

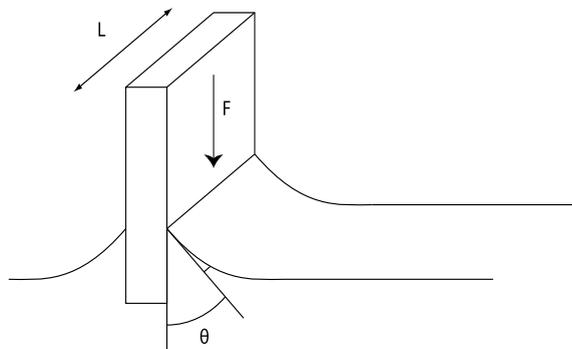


FIGURE 3 – Force de tension de surface exercée sur une lame solide affleurant la surface d'un liquide

3.2 Mise en pratique

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. En effet, 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. Repérer les différentes parties du dispositif (support porte-liquide, contrepoids, chaînette...) comme indiqué sur le schéma ci-dessous. On se reportera également aux photos prises des différents éléments et étapes de la mesure présentées sur la figure ci-après.

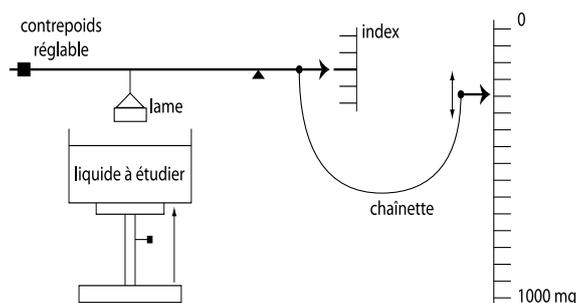


FIGURE 4 – Schéma de la balance

Expérience : Régler au besoin l'horizontalité de la balance, repérée avec le fil à plomb incorporé ou avec un niveau à bulles, grâce aux molettes en dessous du dispositif. Avec le support porte-liquide abaissé au maximum (utiliser la molette située en dessous de ce support), accrocher la lame à la balance (ne pas toucher la lame directement, mais la manipuler au moyen du fil). 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, surélevé avec la ou les cale(s) en bois. Remettre la chaînette sur zéro². Remplir le récipient d'eau distillée, environ une grosse moitié, puis

2. On peut également ne pas toucher à la chaînette et glisser les cales délicatement entre le support et le récipient, en prenant garde de ne pas faire toucher la lame par le liquide si on a déjà rempli le récipient.

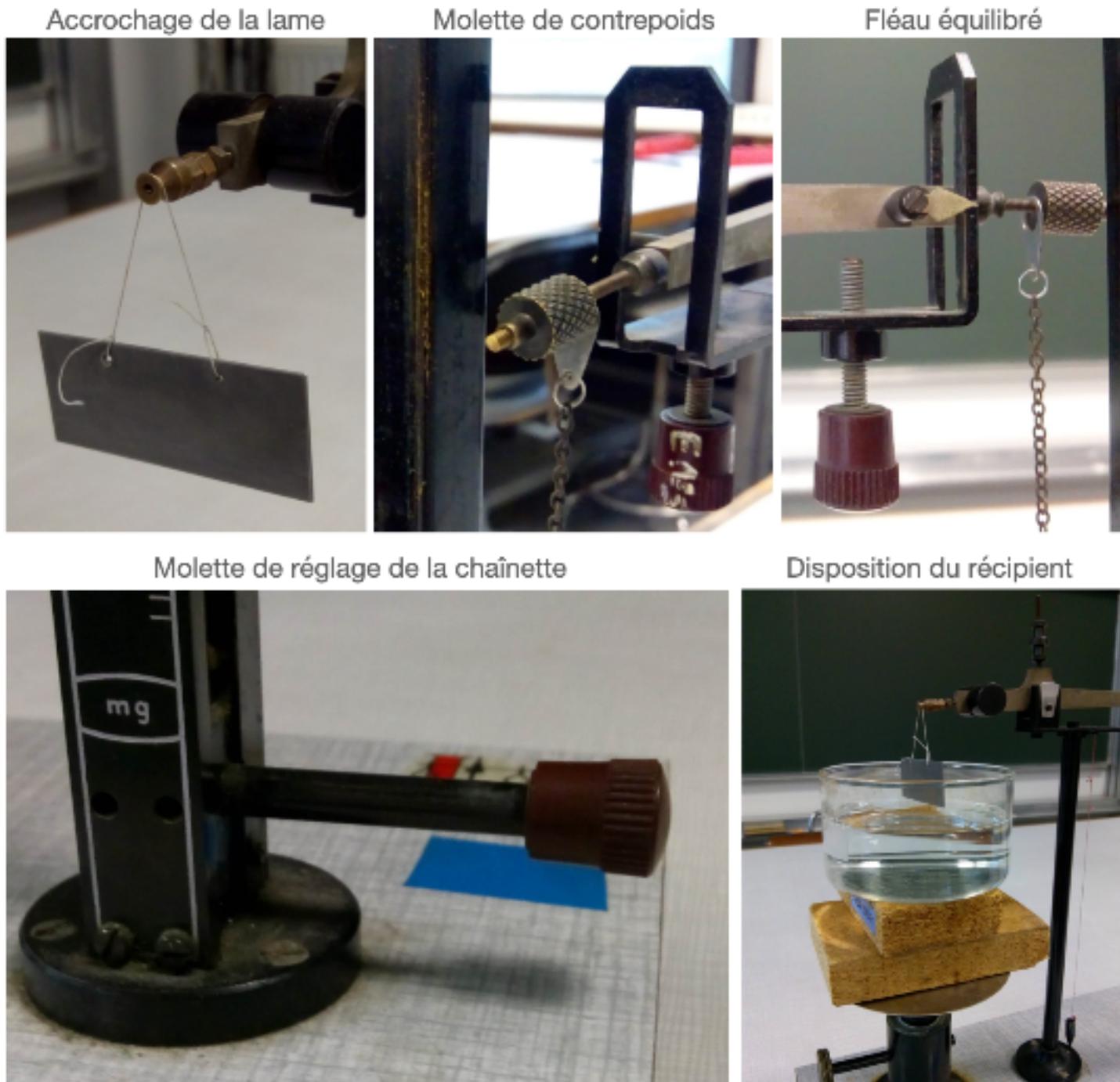


FIGURE 5 – Eléments du dispositif et étapes de la mesure

monter le support jusqu'à ce que le liquide effleure la lame. La lame est attirée vers l'intérieur du liquide, et le bras de la balance est déséquilibré. Contrôler alors que la lame est bien immergée uniformément sur toute sa longueur L et au besoin corriger son horizontalité via le point d'accroche du fil. Ne pas toucher au support porte-liquide, mais rétablir alors l'horizontalité du fléau de la balance au moyen de la chaînette (molette rouge en bas de la colonne). Attention, il faut être particulièrement lent à l'approche de la valeur attendue car les oscillations autour de la valeur d'équilibre pour une position donnée de la chaînette peuvent provoquer l'arrachement de la lame. Lire alors sur l'échelle graduée la valeur de la masse (en milligrammes) qui équilibre la force de tension superficielle. On a : $mg = 2AL$. Or par construction, $L = 4,905$ cm donc $2L/g = 10^{-2}s^2$. La mesure de m en milligrammes divisée par 10 donne directement la valeur de A en mN/m.

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

4 Loi de Laplace

4.1 Principe

On se propose de la vérifier sur des bulles d'eau savonneuse. Elle s'écrit alors :

$$\Delta P = \frac{4A}{R} \quad (5)$$

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 en réalité une bicouche de surface, et il y a donc deux interfaces (air - eau savonneuse puis eau savonneuse - air).

4.2 Mise en pratique

Utiliser le "générateur de bulles" composé d'une poire et de trois robinets (A et B en bas, C en haut, en sortie de la poire).

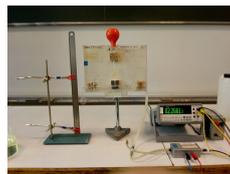


FIGURE 6 – Loi de Laplace

Expérience : On crée une bulle à l'embouchure d'un robinet A de la manière suivante :

- On ouvre le robinet A, ainsi que celui (C) placé à la sortie de la poire, on laisse le troisième (B) fermé.
- On forme un film d'eau savonneuse à l'embouchure du robinet A en approchant un cristalliseur rempli de liquide adéquat.
- On presse la poire lentement, et on ferme le robinet du tuyau A pour stabiliser la bulle.

Expérience : Pour mesurer la pression à l'intérieur de la bulle, il faut laisser le troisième robinet B ouvert, et fermer celui de la poire (C) plutôt que celui du tuyau où s'est formé la bulle (A). On place l'une des entrées du capteur de pression en sortie du second tuyau (B), et l'autre entrée reste à la pression atmosphérique. On mesure ainsi directement la surpression pour différentes valeurs du rayon de la bulle. La mesure du rayon à l'aide d'une règle est relativement délicate, donc 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.



Expérience : Une autre expérience qualitative est la suivante. Former à chaque extrémité (A et B) du "générateur de bulles" des bulles de tailles différentes (attention à la gestion des robinets !). Mettre les deux bulles en communication en ouvrant les deux robinets des tuyaux (A et B). Vérifier que la grosse bulle "mange" la petite. Expliquer ce phénomène.

5 Loi de Jurin

5.1 Principe

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

$$h = \frac{2A \cos \theta}{\rho g r} \quad (6)$$

avec r le rayon du tube et θ l'angle de contact entre le liquide et la paroi du tube, aussi appelé angle de raccordement. On réalisera l'expérience avec de l'éthanol 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 en effet trop de problèmes de mouillage imparfait.

5.2 Mise en pratique

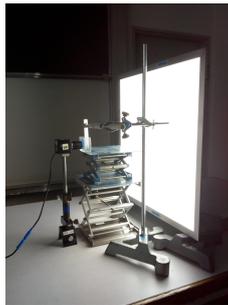


FIGURE 7 – Montage pour la loi de Jurin : panneau LED et caméra



FIGURE 8 – Montage pour la loi de Jurin : projection sur un écran

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. La petite cuve dans laquelle on immerge l'extrémité des tubes est munie d'un quadrillage millimétré afin de mesurer la hauteur du liquide dans les capillaires. Le montage le plus simple consiste à éclairer la cuve et les tubes avec un grand panneau LED pour obtenir un éclairage homogène. On placera alors une caméra rapide type Nova 180 branchée sur un ordinateur afin de visualiser le quadrillage et les ménisques dans les tubes. À défaut de panneau LED et de caméra, on pourra éclairer le système avec une lampe QI, sans condenseur mais munie d'un filtre antithermique et d'un cadre diffusant type papier calque. On projettera alors l'image de la cuve sur un écran à l'aide d'une lentille correctement diaphragmée.

Expérience : Tracer la hauteur h du liquide dans le tube en fonction de l'inverse du rayon du tube $1/r$ (les diamètres en mm sont indiqués sur la tige portant les tubes), et comparer à la prédiction théorique (on pourra essayer d'en



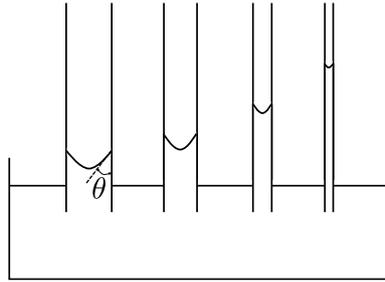


FIGURE 9 –

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 , c'est-à-dire du niveau du ménisque dans la cuve. En effet, cette erreur systématique potentielle se traduit alors uniquement par une ordonnée à l'origine à déterminer par ajustement.

6 Mouillage et angle de raccordement

Il s'agit de comparer l'étalement d'une goutte de divers fluides sur des matériaux différents, plus ou moins mouillables : une plaque en verre et une en téflon (attention, celle en téflon n'est recouverte que d'un côté). On disposera le substrat choisi sur un boy dont on s'assurera de l'horizontalité avec un niveau à bulle, et on l'éclairera de manière homogène avec un grand panneau LED, comme pour la loi de Jurin. On observera à l'aide de la caméra Nova 180. Il faut prendre garde à l'alignement entre la surface du substrat et l'axe de la caméra. On s'en assurera en contrôlant par la vidéo, et en jouant sur le réglage du boy. En effet, il est très important de s'assurer que l'ombre de la plaque ne masque pas la ligne de contact. On peut par exemple poser un réglet métallique mince sur la surface étudiée, orienté dans la direction de la caméra : l'alignement est réalisé lorsque les faces supérieures et inférieures du réglet ne sont plus visibles à l'image (méthode du couteau).

Expérience : Disposer une grosse goutte d'eau distillée (environ 2 cm de diamètre) sur le substrat. S'entraîner avant sur une surface hors expérience, et procéder délicatement. En cas d'éclaboussures intempestives, on peut corriger en aspirant le trop plein d'eau par capillarité avec une feuille de papier absorbant, type sopalin. Mesurer alors l'angle de contact à partir d'une capture d'écran : le logiciel ImageJ dispose d'un outil "angle" permettant cette mesure très simplement.

Expérience : Faire la même mesure sur une goutte d'eau posée sur l'autre substrat et comparer les angles de contact. On illustre ainsi le fait que l'eau mouille bien mieux le verre que 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) :

$$h = \sqrt{\frac{2A(1 - \cos \alpha)}{\rho g}}, \quad (7)$$

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

En principe la mesure de h et α permet une estimation (très grossière) de la tension de surface A .

Expérience : Vérifier expérimentalement, en ajoutant de l'eau à la goutte déjà déposée, que la hauteur et l'angle de contact sont indépendants du diamètre de la goutte.



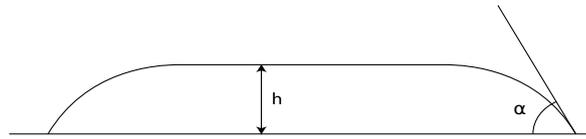


FIGURE 10 –

Expérience : On peut aussi reprendre cette expérience avec la plaque de verre sur laquelle on a disposé préalablement de la poudre de lycopode³. 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, ou bétons super-hydrophobes).

Expérience : Reprendre cette expérience avec un autre fluide, tel que le miel, beaucoup plus visqueux.

3. On dispose dans la collection de lames de verre pour microscope déjà préparées avec de la poudre de lycopode, demander aux enseignants ou aux techniciens.