



Les lentilles liquides

William Ren
Inès Sahnoune
Anaïs Sezgin
Altan Soran

Lycée Condorcet de Montreuil

Table des matières

Résumé	3
Introduction	4
1 Une goutte d'eau comme lentille ?	5
1.1 Phénomène de tension superficielle	5
1.2 Longueur capillaire	6
1.3 Angle d'avancée et angle de recul	9
2 Forme et focale d'une lentille	10
2.1 Mesure sur banc optique	10
2.2 Mesure par détermination du rayon de courbure du dioptre	11
2.3 Commentaire sur le modèle des lentilles minces	12
3 L'électromouillage	13
3.1 Mise en évidence du phénomène	13
3.2 Loi de Lippmann-Young	14
3.3 Application : les lentilles liquides de focale variable	16
Conclusion	19
Bibliographie	20

Résumé

Nous avons choisi d'étudier les lentilles liquides, comme celles qui équipent les appareils photo des téléphones portables les plus récents.

Dans un premier temps, nous nous sommes penchés sur la notion de tension superficielle et avons mis en évidence l'existence d'une longueur capillaire en dessous de laquelle une goutte déposée sur un substrat prend la forme d'une calotte sphérique et peut jouer le rôle de lentille convergente.

L'étude d'une lentille plan-convexe en verre nous a ensuite permis de vérifier le lien entre le rayon de courbure du dioptré sphérique et la focale de la lentille.

Dans un troisième temps, nous avons étudié le phénomène d'électromouillage qui permet, par application d'une tension électrique, de modifier le rayon de courbure d'une goutte et donc de faire varier la focale d'une lentille liquide. Nous avons vérifié la loi de Lippmann-Young qui traduit le lien entre la tension électrique appliquée et l'angle de contact formé par la goutte et le substrat.

Enfin, nous avons essayé de comprendre à l'aide d'expériences simples pourquoi les lentilles liquides vendues dans le commerce utilisent deux liquides non miscibles.

Introduction

Les lentilles ont longtemps été considérées comme des éléments décoratifs ; elles servaient par exemple d'œil pour les statues égyptiennes. La première lentille optique serait celle de Nimrud, façonnée au VIIe siècle avant J-C et découverte en Assyrie, aujourd'hui l'Irak. Son usage n'est toujours pas exactement déterminé. Cependant la fabrication de vraies lentilles en verre remonterait au Moyen Âge. Elles pouvaient alors jouer le rôle de loupes et d'instruments optiques, dans certains cas elles corrigeaient même les défauts de la vision.

Depuis, la technologie n'a cessé d'évoluer. Aujourd'hui, il existe toutes sortes de lentilles, notamment des lentilles liquides qui sont utilisées dans les lecteurs (de code barre, de passeport...) et dans certains objectifs d'appareils (téléphones portables, caméras...).

Nous avons cherché à comprendre comment on pouvait réaliser et utiliser une lentille liquide : quels sont les paramètres qui déterminent sa forme, comment sa focale peut-elle être modifiée ?

Dans ce mémoire, nous étudierons dans un premier temps les phénomènes qui régissent la forme d'une goutte liquide et verrons dans quelles conditions une goutte déposée sur un substrat peut prendre la forme d'une lentille convergente. Nous mettrons ensuite en évidence le lien entre le rayon de courbure du dioptre sphérique d'une lentille plan-convexe et sa distance focale. Nous exploiterons dans un troisième temps le phénomène d'électromouillage qui permet de changer la forme d'une lentille liquide afin de modifier sa focale, et enfin nous nous pencherons sur le fonctionnement d'une lentille liquide du commerce.

Chapitre 1

Une goutte d'eau comme lentille ?

Lorsqu'on dépose une goutte d'eau sur une surface hydrophobe, elle semble former une calotte sphérique qui peut faire penser à une lentille plan-convexe. Ceci constitue le point de départ de notre travail : cette goutte d'eau forme-t-elle réellement une portion de sphère ? Peut-elle jouer le rôle d'une lentille convergente ?

1.1 Phénomène de tension superficielle

À l'interface entre un liquide (ici la goutte d'eau) et un gaz (ici l'air), il existe une tension superficielle appelée aussi tension de surface. Ceci est lié à un excès d'énergie des molécules de surface dû au fait qu'elles ont moins de voisines que celles situées au coeur du liquide et sont donc moins stabilisées par les liaisons attractives inter-moléculaires de type *Van der Waals*.

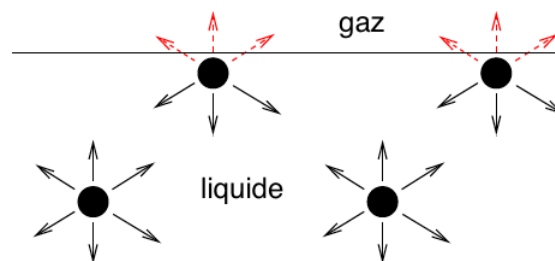


FIGURE 1.1 – Origine de la tension superficielle

Pour mettre en évidence la tension superficielle, nous avons effectué une expérience. Nous avons « fabriqué » un cadre en métal sur lequel nous avons attaché un anneau fait avec du fil. Nous l'avons ensuite plongé dans de l'eau savonneuse (figure 1.2) puis nous avons percé la partie centrale du film liquide (figure 1.3) :



FIGURE 1.2 – État initial



FIGURE 1.3 – Film percé

Sous l'effet des forces de tension superficielle, le fil prend la forme d'un cercle. En effet, les forces de tension superficielle minimisent l'énergie de surface du système et pour cela réduisent au maximum la surface du film à l'extérieur du contour délimité par le fil, ce qui donne à ce contour une forme circulaire car cette forme circulaire est celle qui permet au fil de délimiter la surface la plus grande et donc de réduire au maximum la surface du film à l'extérieur du fil. De la même façon, une goutte d'eau posée sur un substrat prend la forme d'une portion de sphère car c'est la surface la plus petite qui renferme un volume donné. Augmenter la surface externe de la goutte en modifiant sa forme nécessiterait qu'on lui fournisse de l'énergie. La tension superficielle est donc une énergie par unité de surface et se calcule alors en $J.m^{-2}$ (ou en $N.m^{-1}$).

Après avoir mis en évidence ce phénomène, nous allons voir qu'il permet d'expliquer l'existence d'une longueur capillaire.

1.2 Longueur capillaire

Les forces de tension de surface s'exerçant sur une petite goutte tendent à réduire au maximum sa surface externe en lui donnant donc la forme d'une portion de sphère. Cependant, si la goutte devient trop grosse, le poids de celle-ci n'est plus négligeable devant la tension superficielle, ce qui déforme la goutte et l'aplatit. La longueur capillaire κ^{-1} est la longueur caractéristique pour laquelle les effets de la gravité et ceux de la tension superficielle sont comparables. Nous allons ici établir l'expression de cette longueur capillaire.

Au sein d'un liquide placé dans un champ de pesanteur s'exerce une pression dite pression hydrostatique qui augmente lorsque l'on s'enfonce dans le liquide. Pour vérifier l'expression de la pression hydrostatique, nous avons utilisé un baril rempli d'eau et un pressiomètre relié à une cellule manométrique. Nous avons mesuré la pression P' dans l'eau à différentes profondeurs et avons dressé le tableau de mesures suivant :

$P'(hPa)$	$h(m)$
1016	0
1026	0,10
1035	0,20
1045	0,30
1055	0,40
1065	0,50



FIGURE 1.4 – Matériel utilisé

À l'aide du tableur *Regressi*, nous avons alors tracé la courbe représentant $P = P' - P_0$ en Pa en fonction de h en m , P_0 correspondant à la pression atmosphérique et valant ce jour-là 1016 hPa d'après le manomètre que nous avons utilisé. Nous avons alors obtenu une droite de coefficient directeur $(9,7 \pm 0,13) \times 10^3 Pa.m^{-1}$ et passant par l'origine, d'où :

$$P = (9,7 \pm 0,13) \times 10^3 h$$

Ceci constitue une vérification expérimentale de l'expression de la pression hydrostatique P :

$$P = \rho g h$$

En effet $\rho g = 9,8 \times 10^3 Pa.m^{-1}$.

Par ailleurs au sein d'une goutte il règne une pression liée à la tension superficielle et dont la valeur dépend du rayon de courbure R de la goutte. Son expression est donnée par la loi de Laplace :

$$P = \frac{\gamma}{R}$$

La longueur capillaire κ^{-1} s'obtient en égalisant la pression hydrostatique à la profondeur κ^{-1} et la pression de Laplace au centre d'une goutte de rayon κ^{-1} . On a alors :

$$\rho g \kappa^{-1} = \frac{\gamma}{\kappa^{-1}}$$

D'où :

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$$

Si $R < \kappa^{-1}$ alors la goutte forme une portion de sphère.

Si $R > \kappa^{-1}$ la goutte s'aplatit sous l'effet de la gravité.

Sachant que pour des gouttes d'eau dans l'air $\gamma = 72 \text{ mN.m}^{-1}$, que la masse volumique de l'eau vaut $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ et que l'intensité du champ de pesanteur vaut $g = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$, on obtient $\kappa^{-1} = 2,7 \text{ mm}$.

Sur les photos suivantes, on voit que les gouttes dont le rayon est inférieur à la longueur capillaire adoptent la forme d'une portion de sphère (les indications chiffrées de la règle graduée sont en cm) :



FIGURE 1.5 – $R < \kappa^{-1}$



FIGURE 1.6 – $R < \kappa^{-1}$

À l'inverse, les gouttes dont le rayon est supérieur à la longueur capillaire n'adoptent pas la forme d'une portion de sphère :

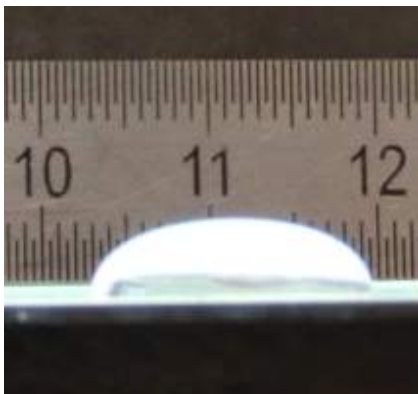


FIGURE 1.7 – $R > \kappa^{-1}$



FIGURE 1.8 – $R > \kappa^{-1}$

La goutte d'eau visible sur la photo suivante a un rayon inférieur à la longueur capillaire et prend donc la forme d'une calotte sphérique :

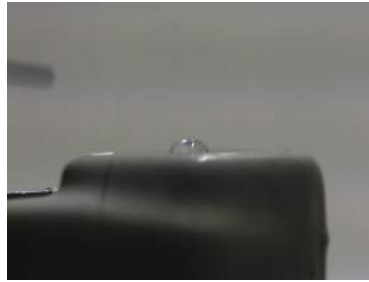


FIGURE 1.9 – Goutte d'eau formant une calotte sphérique

Elle doit donc pouvoir jouer le rôle d'une lentille convergente. C'est ce que nous avons voulu montrer à l'aide du montage suivant, dans lequel cette goutte d'eau placée sur un substrat transparent et horizontal est utilisée comme lentille convergente, permettant d'obtenir sur un écran placé en dessous d'elle une image de l'objet placé au-dessus d'elle :

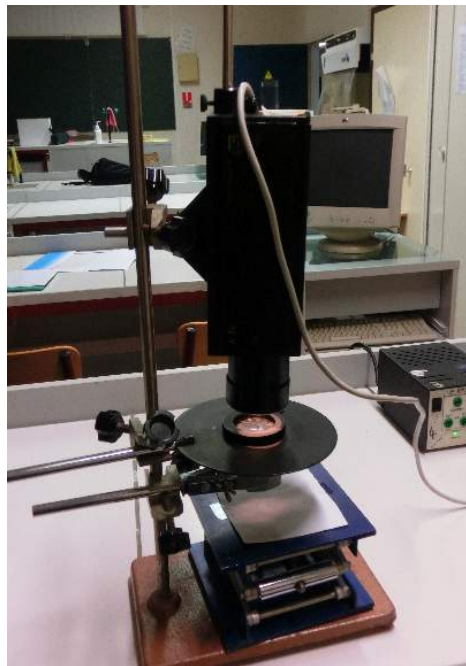


FIGURE 1.10 – Utilisation d'une goutte comme lentille convergente

Ce dispositif permet effectivement de former sur la feuille qui sert d'écran une image de l'objet placé au-dessus de la lentille. Cependant, puisque la longueur capillaire limite fortement la taille de la goutte, nous nous heurtons à deux problèmes : d'une part le faible diamètre de la goutte limite énormément le flux de lumière qui passe à travers et donc la luminosité de l'image formée ; d'autre part la faible valeur du rayon de courbure de la goutte fait qu'elle se comporte comme une lentille très convergente ce qui oblige à former l'image très près de la goutte et conduit à obtenir une image de petite taille.

Toutefois, le problème le plus important est que notre lentille liquide a une focale fixe, or nous avons besoin de faire varier cette focale pour faire la mise au point. Nous montrerons au chapitre suivant quel paramètre influe sur la distance focale de la lentille mais pour le moment il nous reste à étudier un autre aspect du comportement de la goutte, la différence entre angle d'avancée et angle de recul.

1.3 Angle d'avancée et angle de recul

On appelle angle de contact l'angle formé par la surface de la goutte et le substrat solide sur lequel elle est déposée :

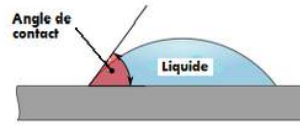


FIGURE 1.11 – Angle de contact

Lorsqu'on injecte du liquide dans la goutte, elle grossit et l'angle de contact appelé alors angle d'avancée et noté θ_a est supérieur à sa valeur au repos θ . A l'inverse, lorsqu'on vide la goutte, son volume diminue et l'angle de contact appelé alors angle de recul et noté θ_r est inférieur à θ . Cette différence entre θ_a et θ_r peut également être mise en évidence si la goutte est déposée sur un plan incliné. Deux gouttes du même liquide sur le même substrat peuvent donc former des angles θ différents alors qu'elles ont le même volume.

Nous avons fait une manipulation pour montrer la différence entre l'angle d'avancée et l'angle de recul. Pour cette manipulation, nous avons eu besoin d'un support plat (ici une plaque en verre), d'un matériau hydrophobe placé sur le support plat (ici un film alimentaire) et d'eau (déposée avec un compte-goutte) :

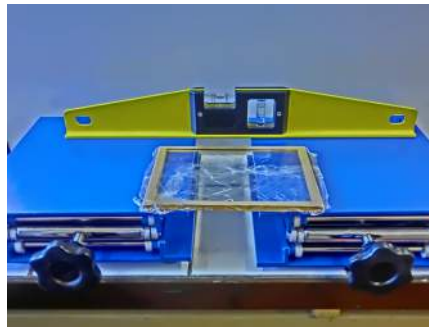


FIGURE 1.12 – Montage utilisé

En inclinant le support, on voit apparaître une différence entre l'angle d'avancée et l'angle de recul :

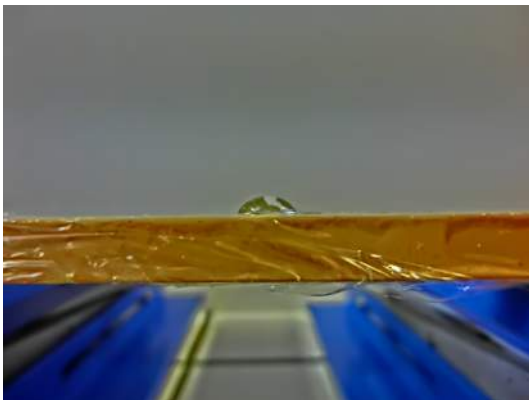


FIGURE 1.13 – Support horizontal

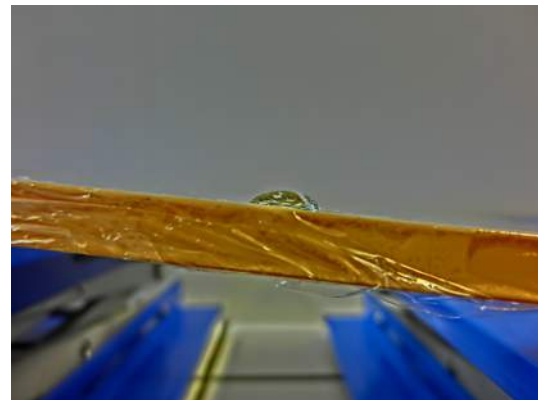


FIGURE 1.14 – Support incliné

L'existence d'une différence entre ces deux angles nous permettra de comprendre le phénomène d'hystérésis qui sera observé lors de l'étude de l'électromouillage.

Chapitre 2

Forme et focale d'une lentille

Nous avons, dès le début du premier chapitre, mentionné le fait qu'une goutte déposée sur un substrat hydrophobe prenait la forme d'une calotte sphérique, forme identique à celle de la lentille plan-convexe en verre ci-dessous :



FIGURE 2.1 – Lentille convergente plan-convexe en verre

La distance focale d'une lentille plan-convexe est liée à la valeur du rayon de courbure du dioptre sphérique. Nous avons cherché à vérifier le lien qui existait entre ces deux grandeurs.

2.1 Mesure sur banc optique

Pour déterminer la distance focale d'une lentille, on utilise la relation de conjugaison :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}}$$

Cette relation peut être écrite de la façon suivante :

$$f' = \frac{\overline{OA} \times \overline{OA'}}{\overline{OA} - \overline{OA'}}$$

Dans ces relations, les notations utilisées sont celles de la figure suivante :

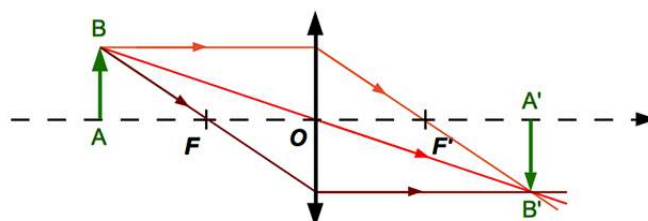


FIGURE 2.2 – Construction de l'image d'un objet par une lentille convergente

Nous avons placé la lentille photographiée sur la figure 2.1 sur un banc optique et nous avons mesuré $\overline{OA} = -1,560\text{ m} \pm 0,001\text{ m}$ et $\overline{OA'} = 0,26\text{ m} \pm 0,01\text{ m}$. L'incertitude sur la valeur de \overline{OA} est liée à la précision du banc optique gradué au millimètre alors que l'incertitude sur la valeur de $\overline{OA'}$ est plus grande car elle tient compte du fait que l'image formée sur l'écran est nette non pas pour une position unique de l'écran mais dans un intervalle situé autour de cette position. Nous évaluons l'incertitude sur cette position à 1 cm environ.

Ensuite, afin de déterminer l'incertitude-type relative sur notre mesure de f' , nous avons utilisé le logiciel *Gum_MC* qui nous a permis de l'estimer à $3,3\%$ et nous a donné l'intervalle de confiance à 95% suivant :

$$f' = 0,22\text{ m} \pm 0,01\text{ m}$$

2.2 Mesure par détermination du rayon de courbure du dioptr

Dans le cas d'une lentille plan-convexe constituée de verre d'indice n et placée dans l'air, si le rayon de courbure du dioptr sphérique est noté R , on a pour la vergence C et la distance focale f' de la lentille :

$$C = \frac{n - 1}{R} \quad \Leftrightarrow \quad f' = \frac{R}{n - 1}$$

Nous avons donc décidé de faire une nouvelle mesure de focale, cette fois-ci à partir du rayon de courbure R du dioptr sphérique. Pour ce faire, nous avons exploité l'image précédente en mesurant le rayon du dioptr à l'aide du logiciel *GeoGebra* (qui sert simplement ici à tracer le cercle coïncidant avec le dioptr et à mesurer des distances en comptant les pixels sur l'image numérique) :

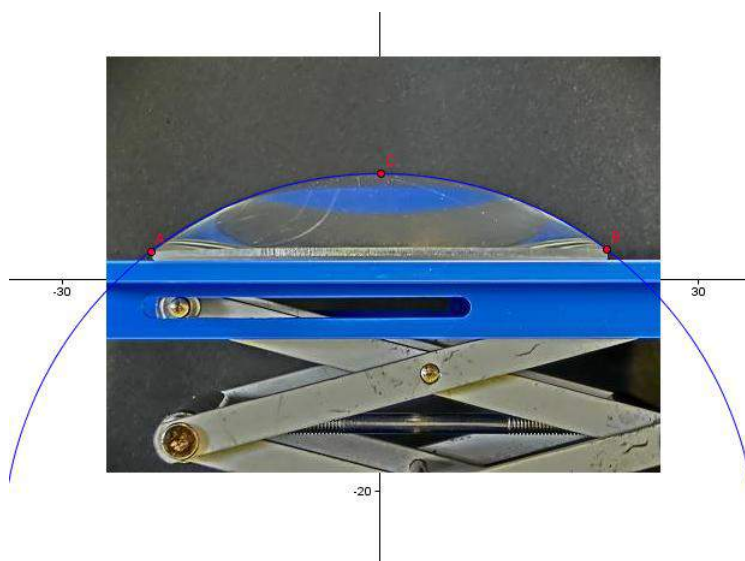


FIGURE 2.3 – Mesure du rayon de courbure R

Pour estimer l'erreur commise lors de la détermination de ce rayon, nous avons réitéré la mesure de façon indépendante. Dans le système d'unité arbitraire u utilisé par le logiciel, nous avons mesuré successivement $R = 36,9\text{ u}$ puis $R = 33,9\text{ u}$ d'où $R = 35,4 \pm 1,5\text{ u}$. Finalement, en tenant compte de l'échelle de la photo, on obtient :

$$R = 0,12\text{ m} \pm 0,005\text{ m}$$

Notre lentille étant fabriquée dans un verre d'indice $n = 1,53$ (donnée du fabricant), on a :

$$f' = 0,23\text{ m} \pm 0,01\text{ m}$$

Ce résultat est donc en bon accord avec celui obtenu par la méthode précédente.

2.3 Commentaire sur le modèle des lentilles minces

Les deux mesures précédentes nous montrent non seulement le lien entre la focale de la lentille et le rayon de courbure du dioptre sphérique, mais elles permettent aussi une discussion sur le modèle des lentilles minces. En effet les relations utilisées (relation de conjugaison et lien entre focale et rayon de courbure du dioptre) ne sont valables que dans le cadre du modèle des lentilles minces, c'est-à-dire des lentilles dont l'épaisseur est faible par rapport aux rayons de courbure des deux faces. Dans le cas de la lentille plan-convexe de la figure 2.1, il n'était pas évident *a priori* que cette condition soit satisfaite, mais les résultats précédents montrent que l'on peut considérer que le modèle des lentilles minces s'applique à cette lentille plan-convexe, et donc également à des lentilles liquides de forme comparable.

Chapitre 3

L'électromouillage

3.1 Mise en évidence du phénomène

Pour mettre en évidence le phénomène d'électromouillage, nous avons cherché à réaliser un montage du type de celui qui est schématisé ci-dessous, en utilisant une goutte d'eau salée déposée sur un film hydrophobe isolant lui même placé sur une plaque métallique servant d'électrode. L'autre électrode est une aiguille plongeant dans la goutte d'eau salée. Le liquide utilisé est de l'eau salée car il doit être conducteur. En effet, c'est toute la goutte qui joue le rôle d'une des deux armatures du condensateur formé, l'autre armature étant l'électrode métallique placée sous le film isolant. Une tension électrique élevée est appliquée entre les deux électrodes :

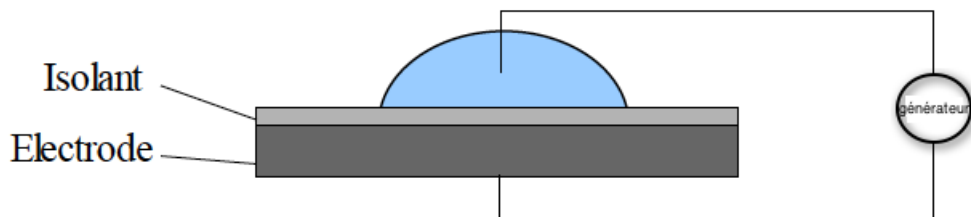


FIGURE 3.1 – Principe du montage utilisé pour l'étude de l'électromouillage

Si ce montage nous a permis une mise en évidence du phénomène d'électromouillage, il s'est avéré insuffisant pour réaliser les mesures permettant de vérifier la loi de Lippmann-Young. Le problème principal rencontré est que nous avons utilisé un générateur capable de délivrer une tension élevée (plusieurs milliers de V) mais affichant cette tension avec seulement deux chiffres significatifs, soit une incertitude sur cette tension de $100 V$. Cette tension étant élevée au carré dans la loi de Lippmann-Young, l'incertitude s'en trouve encore augmentée. D'autre part, nous ne disposions pas d'un objectif photo macro indispensable pour réaliser de bons clichés afin de mesurer l'angle de contact. Finalement, sur le graphique que nous avons construit, nos barres d'erreur étaient si grandes que nous pouvions modéliser la courbe à peu près n'importe comment ! Enfin, notre générateur délivrait une tension continue or il aurait mieux valu un générateur de tension alternative pour éviter les problèmes d'électrolyse.

Nous nous sommes alors tournés vers le Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (LPMMH) de l'ESPCI à Paris. José Bico, maître de conférences, et Hadrien Bence, doctorant, nous ont aidés à y réaliser des expériences probantes et nous les en remercions. Le dispositif était semblable à celui décrit ci-dessus, mais nous avons utilisé dans leur laboratoire un générateur de tension sinusoïdale de fréquence $1 kHz$ amplifiée d'un facteur 2000 dont l'amplitude était connue précisément et un objectif photo macro à focale fixe de $80 mm$ pour les prises de vue.



FIGURE 3.2 – José Bico fait la mise au point de l'appareil photo

La figure suivante montre le comportement d'une goutte d'eau salée sur un film de polyéthylène lorsque la tension appliquée augmente de 0 à 2400 V :

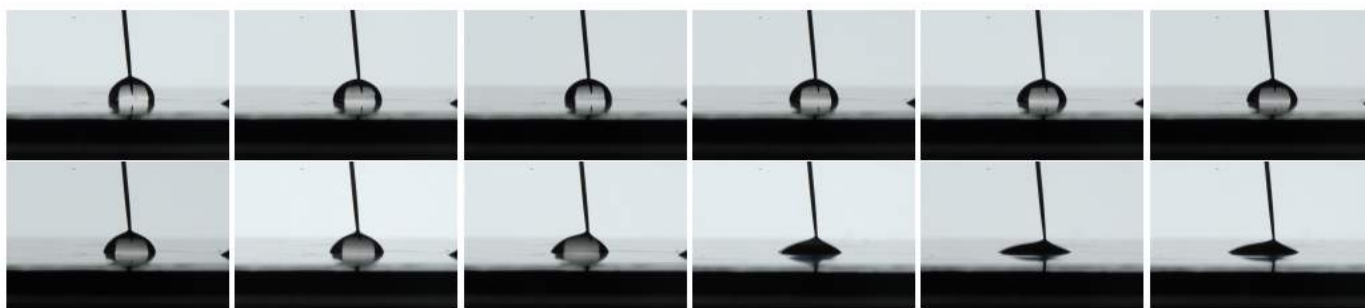


FIGURE 3.3 – Electromouillage d'une goutte d'eau salée sur un film de polyéthylène

3.2 Loi de Lippmann-Young

En l'absence de tension appliquée, la goutte forme une calotte sphérique sous l'effet des forces de tension superficielle. Lorsque l'on applique une tension U , on charge le condensateur constitué par la goutte d'eau salée, le film isolant et l'électrode placée dessous. La capacité C du condensateur est proportionnelle à la surface de contact S entre la goutte et le film isolant. En ne prenant en compte que les termes liés à l'énergie électrique du condensateur et à l'énergie de surface de l'interface liquide/air d'aire S' , l'énergie du système s'écrit de la façon suivante :

$$E = S' \gamma - S \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r U^2}{2e}$$

Il faut remarquer que la contribution électrostatique à l'énergie libre est négative. De ce fait, en présence d'une tension U , le système favorise l'augmentation de la surface S afin de minimiser l'énergie électrique, ce qui se traduit par un aplatissement de la goutte. Mais en même temps la déformation de la goutte entraîne une augmentation de la surface de contact S' entre la goutte et l'air. C'est alors la compétition entre ces deux énergies qui déterminera l'état d'équilibre de la goutte, et donc l'angle de contact, pour une valeur donnée de la tension. Cet équilibre est traduit par la loi de Lippmann-Young :

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r U^2}{2e\gamma}$$

La loi de Lippmann-Young montre que $\cos \theta$ est une fonction affine de U^2 et que par conséquent en fixant la valeur de la tension U entre les deux électrodes, on fixe la valeur de l'angle de contact θ et donc la focale de la lentille liquide. Pour vérifier cette loi, nous avons mesuré pour chaque photo, à l'aide du logiciel *ImageJ*, la valeur de l'angle de contact et nous avons construit les graphiques suivants, représentant le cosinus de cet angle en fonction du carré de la tension appliquée pour deux films isolants différents. Nous voyons que les deux courbes présentent une portion affine conformément à la loi de Lippmann-Young qui est de ce fait vérifiée. Toutefois, pour des valeurs élevées de la tension appliquée, nous observons un phénomène de saturation : la loi de Lippmann-Young ne s'applique plus. La plage de tension sur laquelle la loi de Lippmann-Young est vérifiée n'est pas la même pour les deux courbes, elle dépend du système choisi et ici notamment de la nature du matériau isolant qui sépare les deux armatures du condensateur.

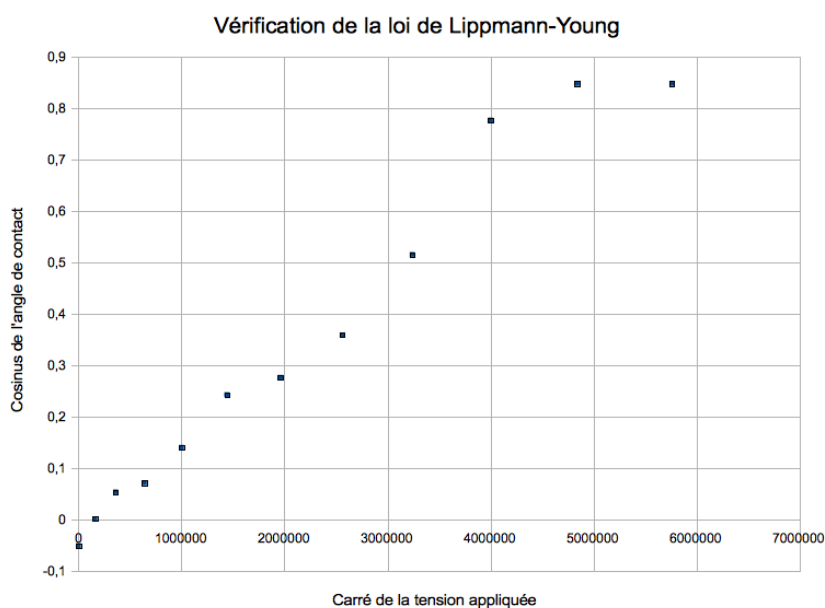


FIGURE 3.4 – Goutte d'eau salée sur film de polyéthylène

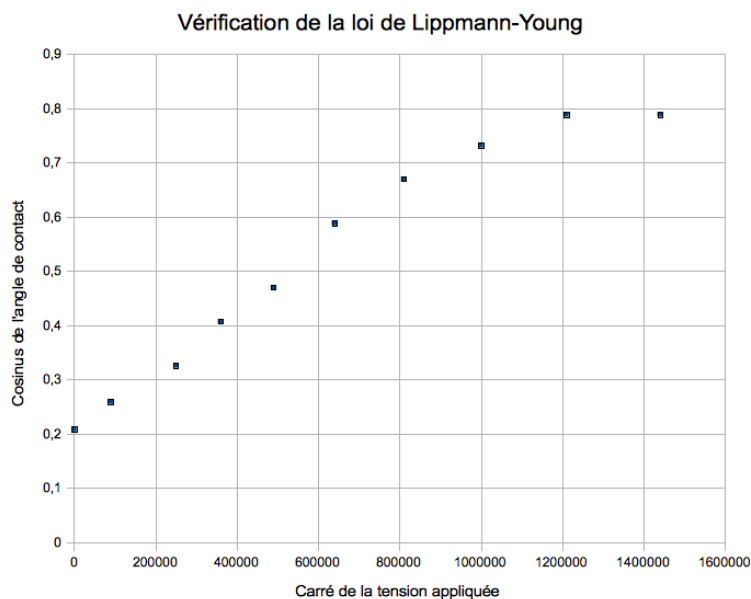


FIGURE 3.5 – Goutte d'eau salée sur film alimentaire

Au cours de ces expériences, nous avons eu l'idée de tester le comportement de la goutte d'eau salée dans le cas où l'on faisait croître puis décroître la tension appliquée. Nous avons donc fait varier la tension appliquée de 0 à 3200 V puis de 3200 V à 0. Le graphique obtenu dans le cas d'un film isolant en polyéthylène est le suivant :

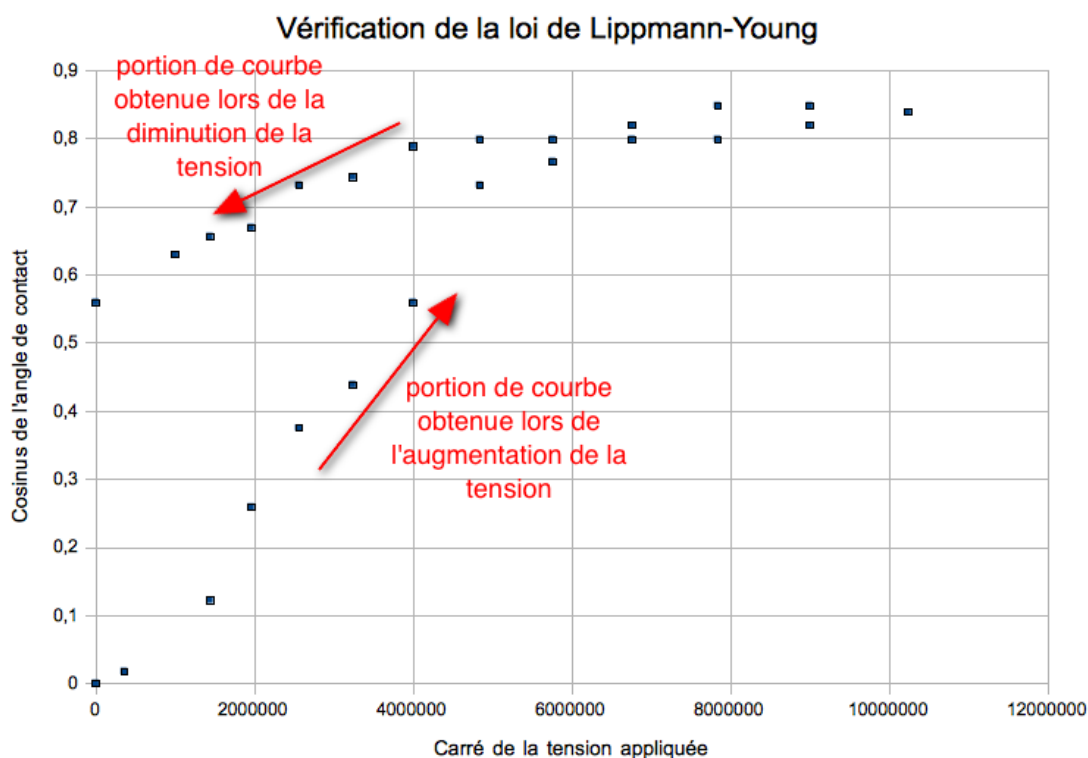


FIGURE 3.6 – Mise en évidence d'un phénomène d'hystérésis

En dehors de la plage de tension où il y a saturation, la variation du cosinus de l'angle de contact en fonction du carré de la tension appliquée est affine à la montée en tension comme à la descente, mais on constate que la valeur du cosinus à la descente ne coïncide pas, pour une même tension, avec celle prise à la montée. Cet hystérésis est lié à la différence observée au chapitre précédent entre l'angle d'avancée et l'angle de recul. Pour un fabricant de lentilles liquides, c'est un problème majeur qu'il faut chercher à contourner.

3.3 Application : les lentilles liquides de focale variable

Les expériences réalisées jusqu'à maintenant nous permettent de comprendre le fonctionnement d'une lentille liquide comme la lentille *Artic 316* de chez *Varioptic* que nous nous sommes procurée :



FIGURE 3.7 – Lentille liquide *Artic 316* de chez *Varioptic*

Le fonctionnement de cette lentille repose bien sûr sur le phénomène d'électromouillage, toutefois ce système présente une différence importante par rapport aux lentilles liquides que nous avons créées en déposant une goutte d'eau salée sur un film isolant recouvrant une contre-électrode. En effet, la lentille *Artic 316* utilise deux liquides non miscibles et le dioptre sphérique est situé à l'interface entre ces deux liquides, comme le montre le schéma suivant :

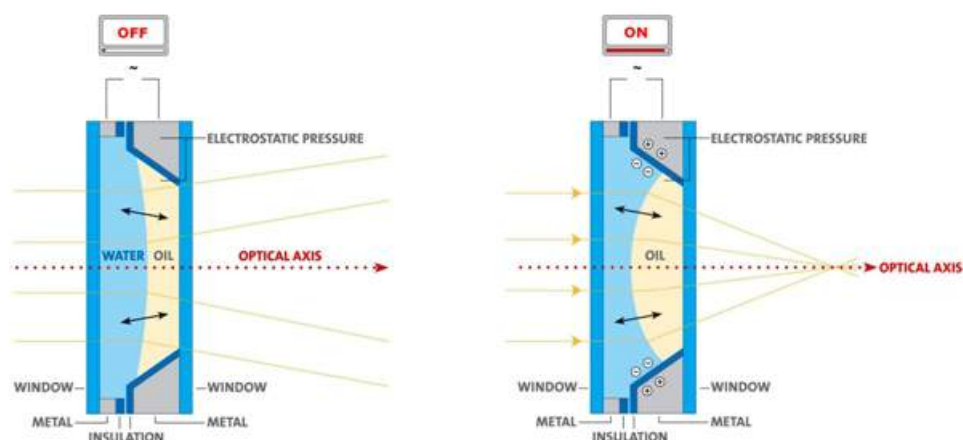


FIGURE 3.8 – Schéma d'une lentille *Varioptic Artic 316*

Le schéma précédent indique que c'est lorsque le système est sous tension que la vergence de la lentille augmente, contrairement au cas des lentilles que nous avons étudiées précédemment. Ceci peut être vérifié sur le graphique ci-dessous, obtenu sur le site de *Varioptic* :

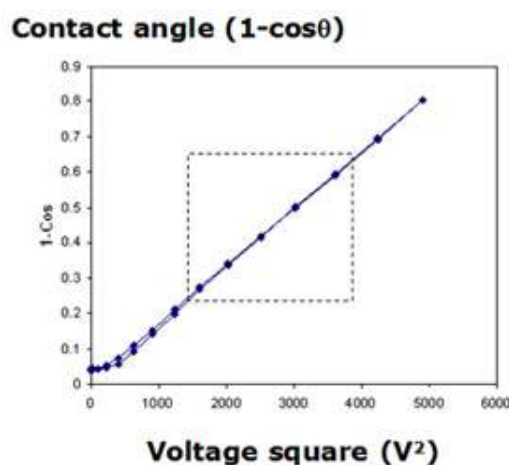


FIGURE 3.9 – Variation de l'angle de contact en fonction de la tension appliquée

On voit que pour obtenir une portion linéaire sur le graphique, on a porté en ordonnée la quantité $1 - \cos \theta$ et non pas $\cos \theta$. Quand U augmente, $1 - \cos \theta$ augmente ce qui signifie que $\cos \theta$ diminue et donc que l'angle de contact θ augmente. La lentille devient alors plus convergente.

Nous avons alors essayé de comprendre l'intérêt d'utiliser deux liquides non miscibles au lieu d'un seul liquide et c'est en réalisant quelques expériences avec des liquides non miscibles que nous avons trouvé des pistes.

Si l'on place une goutte d'huile dans un mélange eau-éthanol de même densité que l'huile, la goutte d'huile semble « flotter » dans le mélange eau-éthanol, comme si elle échappait à la pesanteur. Elle prend alors une forme sphérique et ceci quelle que soit sa taille, puisque cette forme est régie uniquement par les forces de tension superficielle, comme le montrent les deux photos suivantes :



FIGURE 3.10 – Vue de face



FIGURE 3.11 – Vue de dessus

Dans le cas de nos lentilles liquides, nous avons vu que c'est la tension superficielle qui donne à la goutte sa forme sphérique et que la pesanteur tend à l'aplatir. Si on parvient à s'affranchir des effets de la pesanteur, on obtient alors dans tous les cas un dioptre sphérique. Cela revient à dire qu'on augmente la valeur de la longueur capillaire en plaçant la goutte dans un environnement qui a une densité voisine de la sienne. Nous avons vérifié que des gouttes d'eau dans un bain d'huile avaient effectivement une longueur capillaire plus grande que dans l'air :

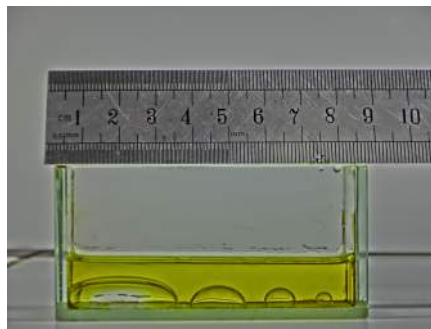


FIGURE 3.12 – Gouttes d'eau dans un bain d'huile

On remarque en particulier que la goutte dont le diamètre vaut environ $1,7\text{ cm}$ conserve malgré cela une forme quasi sphérique, ce qui aurait été impossible dans l'air, comme nous l'avons vu au chapitre 1 :

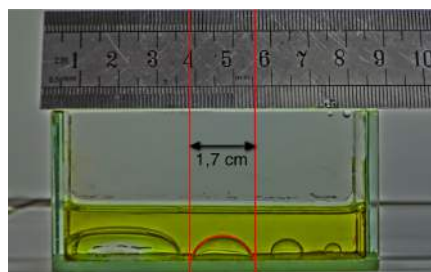


FIGURE 3.13 – Gouttes d'eau dans un bain d'huile

En faisant en sorte que la forme de la lentille soit régie uniquement par les phénomènes de tension superficielle et non plus par la gravité, on s'affranchit en outre de l'influence de la position de la lentille et de son orientation dans le champ de pesanteur, puisque ce champ de pesanteur est sans effet.

Conclusion

Ce projet nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement des lentilles liquides, principe qui repose sur la notion de tension superficielle et sur le phénomène d'électromouillage. On pourrait souhaiter aller plus loin en essayant de mettre au point notre propre lentille liquide, par exemple en concevant et en fabriquant à l'aide d'une imprimante 3D une cellule qui contiendrait les deux liquides non miscibles et serait équipée de petites électrodes permettant de commander l'électromouillage et donc de faire varier la focale de la lentille. Toutefois, quand on sait que certains chercheurs et ingénieurs ont consacré beaucoup de temps et des moyens considérables à la mise au point de ces lentilles, il nous faut rester modestes et nous contenter d'une bonne compréhension des phénomènes. Cette étude fait de nous des utilisateurs éclairés des appareils photo qui équipent nos téléphones portables, c'est déjà ça !

Bibliographie

Ouvrages :

DE GENNES PIERRE-GILLES, BROCHARD-WYART FRANÇOISE, QUÉRÉ DAVID
Gouttes, bulles, perles et ondes, Belin, 2002.

MAUREL AGNÈS
Optique géométrique, Belin, 2002.

Thèses :

BIENIA MARGUERITE
Étude de déformation de goutte et de film mince induite électriquement. Université Joseph-Fourier Grenoble I, 2005.

BADRE CHANTAL
Étude de la réactivité de surface par mesure d'angle de contact : influence de la fonctionnalisation et de la structure. Applications aux films d'oxyde de zinc électrodéposés. Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 2007.

PINEIRUA MENENDEZ MIGUEL
Élasticité et interfaces : des gouttes et des plis. Université Pierre et Marie-Curie Paris VI, 2011

Articles :

BERGE BRUNO, PESEUX JÉRÔME
Variable focal lens controlled by an external voltage : an application of electrowetting. *The European Physical Journal E* 3, 159-163, 2000.

QUILLIET CATHERINE, BERGE BRUNO
Electrowetting : a recent outbreak. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 6, 34-39, 2001.

SIMON ERIC, BERGE BRUNO
Optical design rules of a camera module with a liquid lens and principle of command for AF and OIS functions. *Communication de la société Varioptic*, 2011.

BOURLÈS STÉPHANE, YVEN CÉCILE
Les lentilles liquides pour la photo de demain. *Communiqué de presse, Université de Rennes, CNRS, 14 novembre 2008*.

COURTY JEAN MICHEL, KIERLIK EDOUARD
Du liquide pour faire des lentilles. *Pour la Science* n°382, août 2009, 88-90.