



Les lentilles liquides

William Ren
Inès Sahnoune
Anaïs Sezgin
Altan Soran

Lycée Condorcet de Montreuil

Table des matières

Introduction	4
1 Les lentilles	5
1.1 Vergence et forme d'une lentille	5
1.2 Mesure de la vergence d'une lentille	5
1.2.1 Mesure sur banc optique	6
1.2.2 Mesure par détermination du rayon de courbure du dioptré	6
2 Les lentilles liquides	7
2.1 Phénomène de tension superficielle	7
2.2 Longueur capillaire	8
2.3 Angle d'avancée et angle de recul	11
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

Remerciements

Nous tenons à remercier José Bico, maître de conférences, et Hadrien Bense, doctorant, qui nous ont accueillis une après-midi du mois de mai 2015 au Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (LPMMH) de l'ESPCI à Paris pour y réaliser des expériences que nous ne pouvions pas effectuer au lycée.

Par ailleurs, nous remercions la Société *Parrot – Varioptic* d'avoir mis à notre disposition une lentille liquide *Artic 316* dans des conditions financières avantageuses.

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'avancer. 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 peut réaliser et utiliser une lentille liquide : quels sont les paramètres qui déterminent sa forme, comment cette forme peut être modifiée.

Dans ce mémoire, nous examinerons tout d'abord les caractéristiques des lentilles d'une façon générale, puis nous étudierons les lentilles liquides, et notamment les phénomènes qui régissent la forme d'une goutte liquide. Nous exploiterons ensuite 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 cas d'une lentille *Varioptic*.

Chapitre 1

Les lentilles

1.1 Vergence et forme d'une lentille

Les lentilles sont le coeur de notre projet, c'est pourquoi nous allons les étudier. Ce sont des objets transparents constitués de verre ou de matière plastique. Elles comportent au moins une surface courbe; certaines lentilles sont plus épaisses au centre que sur les bords, ce sont les lentilles convergentes qui dévient les rayons lumineux en les faisant converger vers l'axe optique :

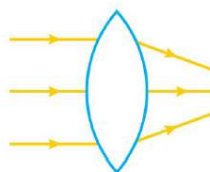


FIGURE 1.1 – Lentille convergente

Dans la suite, nous nous intéresserons en particulier aux lentilles convergentes plan-convexes :

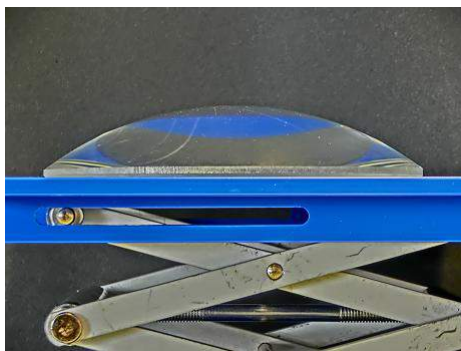


FIGURE 1.2 – Lentille convergente plan-convexe en verre

1.2 Mesure de la vergence d'une lentille

La vergence d'une lentille plan-convexe est liée à la valeur du rayon de courbure du dioptré sphérique. Nous avons dans un premier temps cherché à vérifier le lien qui existait entre ces deux grandeurs.

1.2.1 Mesure sur banc optique

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

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

Relation que nous pouvons écrire de la manière suivante :

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

Nous avons placé la lentille photographiée sur la figure 1.2 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 :

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

1.2.2 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 :

$$C = \frac{n - 1}{R}$$

Nous avons donc décidé de faire une nouvelle mesure de focale, cette fois-ci à partir du rayon de courbure R de la lentille.

Pour ce faire, nous nous sommes aidés du logiciel *GeoGebra*, et nous avons trouvé un rayon de courbure $R = 0,12 \text{ m}$.

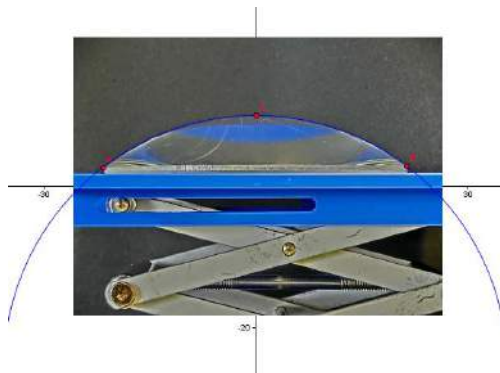


FIGURE 1.3 – Calcul du rayon de courbure R

Ce résultat donne alors pour notre lentille fabriquée dans un verre d'indice $n = 1,53$:

$$C = 4,4 \delta \quad \Longleftrightarrow \quad f' = 0,23 \text{ m}$$

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

Chapitre 2

Les lentilles liquides

2.1 Phénomène de tension superficielle

A l'interface entre un milieu dense (ici la goutte d'eau qui nous sert de lentille liquide) et un gaz (ici l'air), il existe une tension superficielle appelée aussi tension de surface. Les lentilles liquides subissent cette tension superficielle. 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 inter-moléculaires.

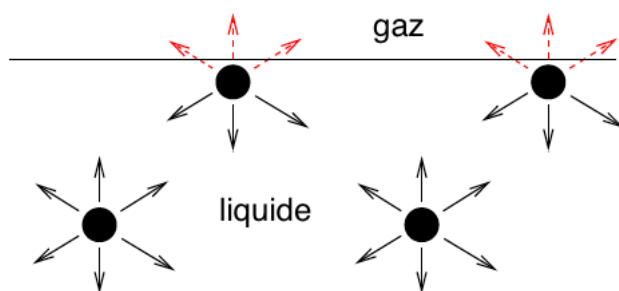


FIGURE 2.1 – Origine de la tension superficielle

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 puis nous avons percé la partie centrale du film liquide :



FIGURE 2.2 – Film liquide dans son état initial



FIGURE 2.3 – Film liquide percé au centre

Sous l'effet des forces de tension superficielle, le fil prend la forme d'un cercle. Cette forme circulaire est celle qui permet de délimiter avec le fil la surface la plus grande, et donc de réduire au maximum la surface du film à l'extérieur. De la même façon, une goutte d'eau 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 peut donc être vue comme 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.

2.2 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, un pressiomètre et une cellule manométrique :



FIGURE 2.4 – Matériel utilisé

Nous avons mesuré la pression P dans l'eau à différentes profondeurs et avons dressé le tableau de mesures suivant :

$P(Pa)$	$h(m)$
101600	0
102600	0,10
103500	0,20
104500	0,30
105500	0,40
106500	0,50

A l'aide du tableur *Regressi*, nous avons alors tracé la courbe représentant $dP = P - P_0$ en fonction de h , P_0 correspondant à la pression atmosphérique et valant ce jour-là 101600 Pa . Nous avons obtenu une droite de coefficient directeur $(9,7 \pm 0,13) \times 10^3 Pa.m^{-1}$ et passant par l'origine, d'où :

$$dP = (9,70 \pm 0,13) \times 10^3 h$$

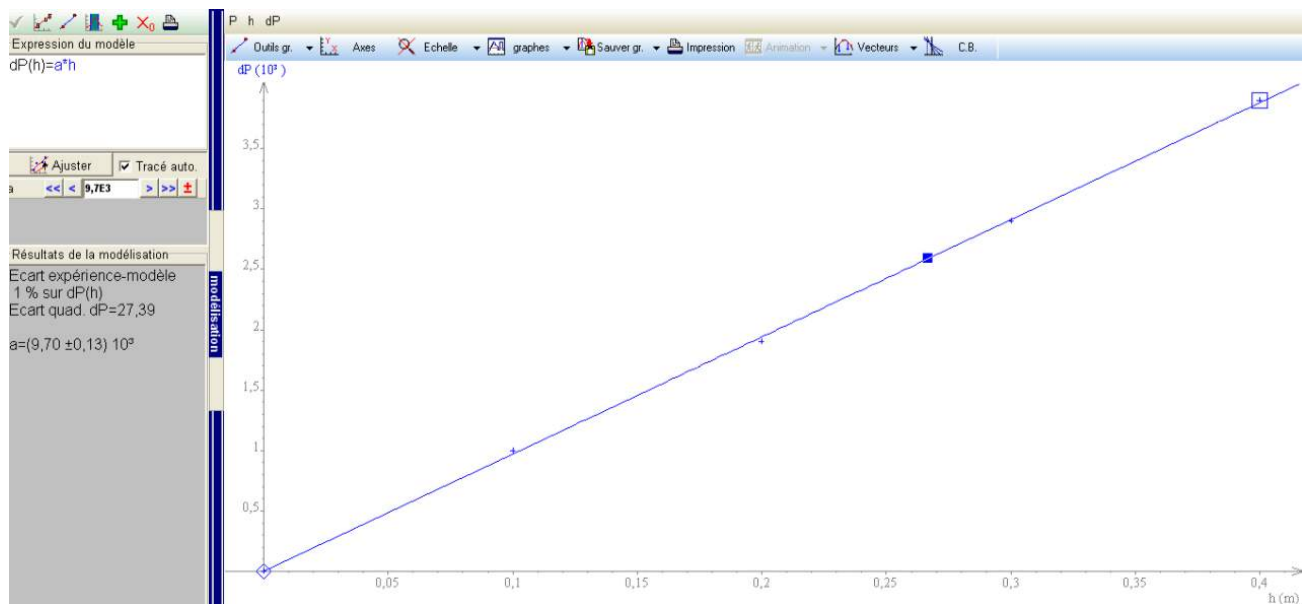


FIGURE 2.5 – Courbe obtenue sur *Regressi*

Ceci constitue une vérification expérimentale de l'expression de la pression hydrostatique (notée ici P et non pas dP) :

$$P = \rho g h$$

En effet $\rho g = 9810 Pa.m^{-1}$.

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 gouttelette forme une portion de sphère.

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

Sachant que pour l'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 2.6 – $R < \kappa^{-1}$



FIGURE 2.7 – $R < \kappa^{-1}$

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

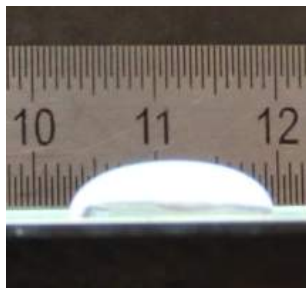


FIGURE 2.8 – $R > \kappa^{-1}$

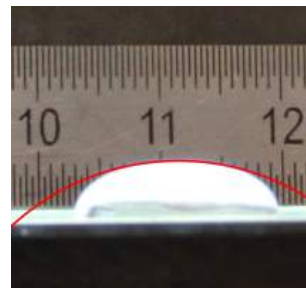


FIGURE 2.9 – $R > \kappa^{-1}$

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 2.10 – 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 dispositif 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 :

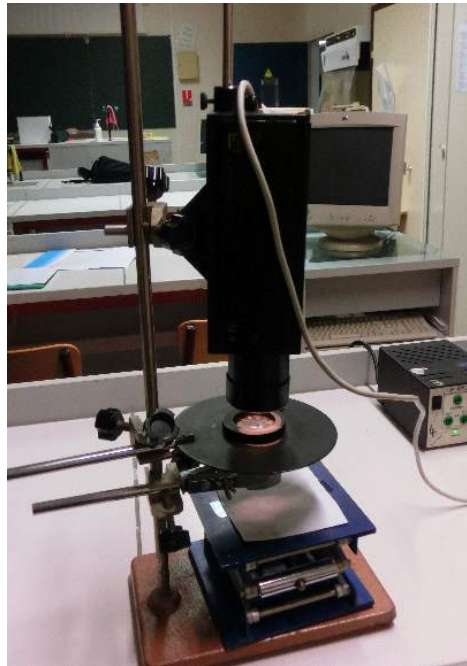


FIGURE 2.11 – Utilisation d'une goutte comme lentille convergente

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. Il faut donc modifier la forme de la lentille. Pour cela, on va faire appel au phénomène d'électromouillage qui sera présenté au chapitre suivant.

2.3 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 :

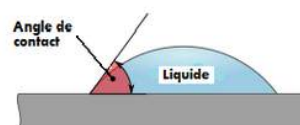


FIGURE 2.12 – Angle de contact

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) :

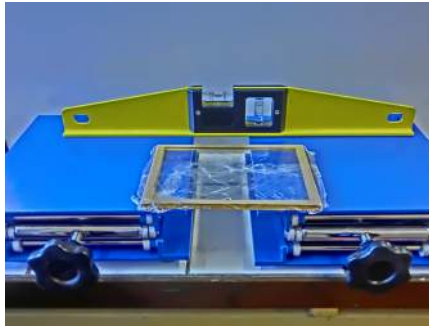


FIGURE 2.13 – Montage utilisé

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

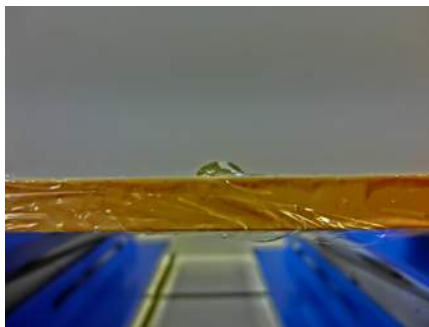


FIGURE 2.14 – Support horizontal

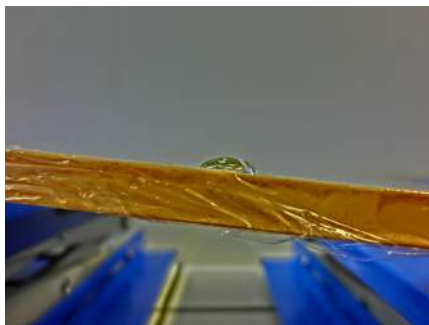


FIGURE 2.15 – Support incliné

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 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 était une aiguille plongeant dans la goutte d'eau salée. Une tension électrique élevée était appliquée entre les deux électrodes :

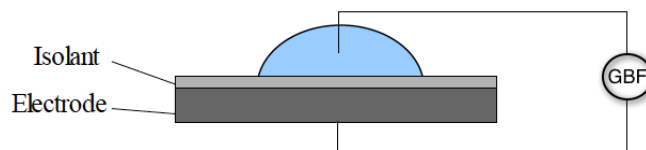


FIGURE 3.1 – Principe du montage utilisé pour l'étude de l'électromouillage

N'ayant pas obtenu de résultats satisfaisants, nous nous sommes 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 réaliser des expériences probantes. 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, et un objectif photo macro à focale fixe de 80 mm pour les prises de vues :

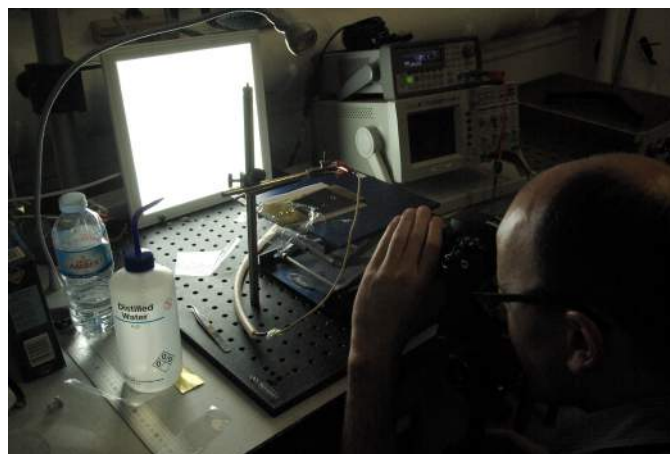


FIGURE 3.2 – José Bico fait la mise au point de l'appareil photo

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 :

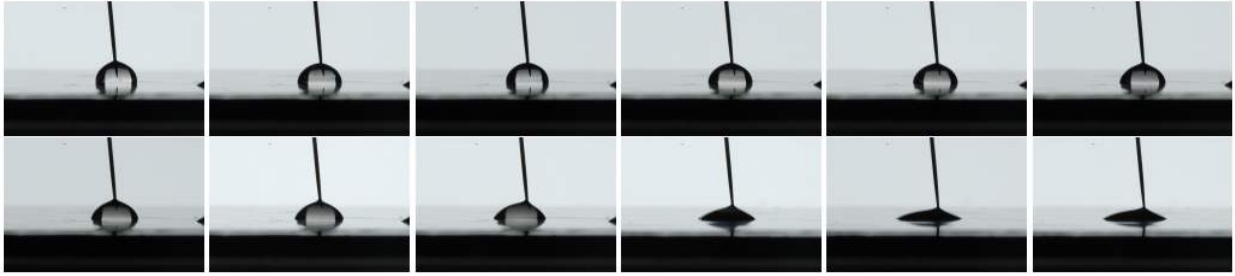


FIGURE 3.3 – Electromouillage d'une goutte d'eau salée sur un film de polyéthylène

3.2 Loi de Lippmann-Young

La variation de l'angle de contact en fonction de la tension appliquée est régie par la loi de Lippmann-Young :

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{1}{2} \frac{C U^2}{\gamma S}$$

avec θ_0 l'angle de contact en l'absence de tension et :

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{e} S$$

la capacité du condensateur formé par la goutte chargée et la contre électrode.

$\frac{1}{2} C U^2$ est l'expression de l'énergie électrique stockée dans le condensateur et γS correspond à l'énergie liée à la tension superficielle s'exerçant à la surface de la goutte.

L'équation de Lippmann-Young peut être réécrite de la façon suivante :

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r U^2}{e \gamma}$$

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 vergence 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 la goutte de la contre-électrode.

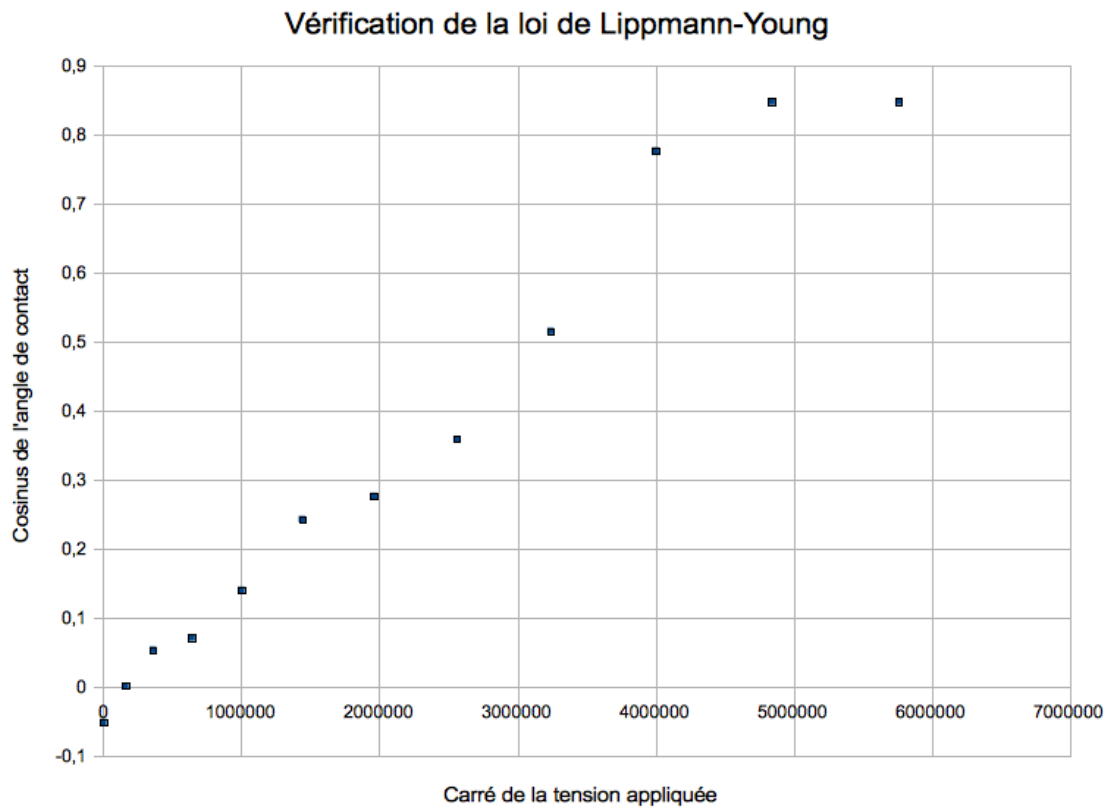


FIGURE 3.4 – Goutte d'eau salée sur film de polyéthylène

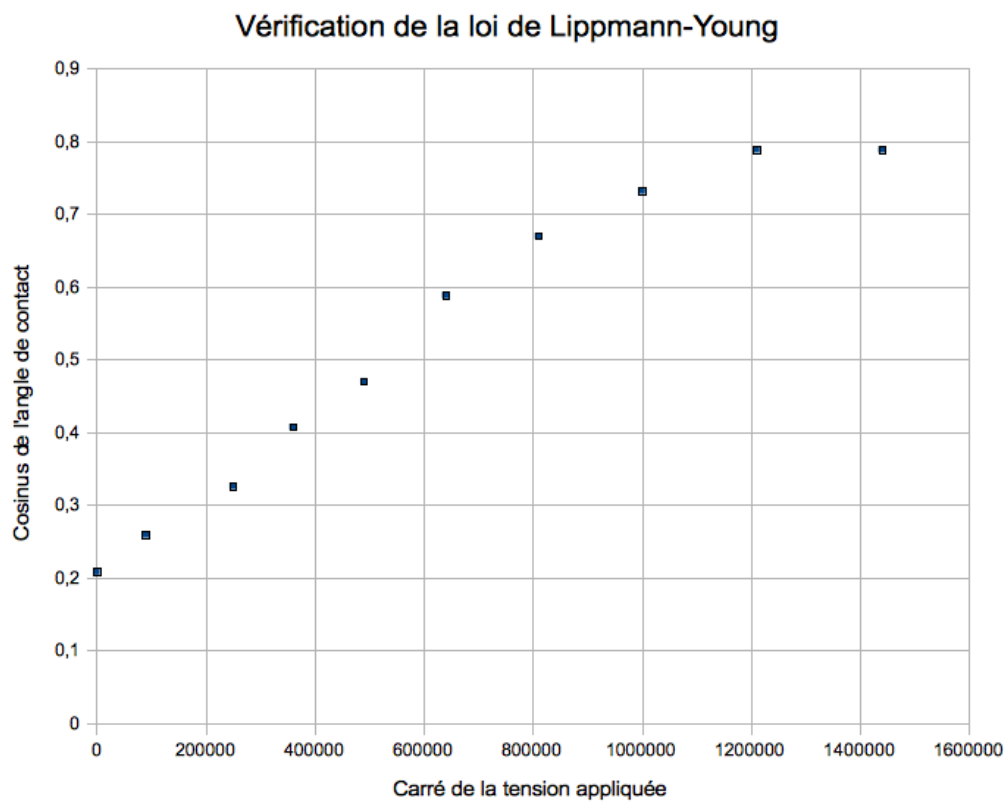


FIGURE 3.5 – Goutte d'eau salée sur film alimentaire

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 :

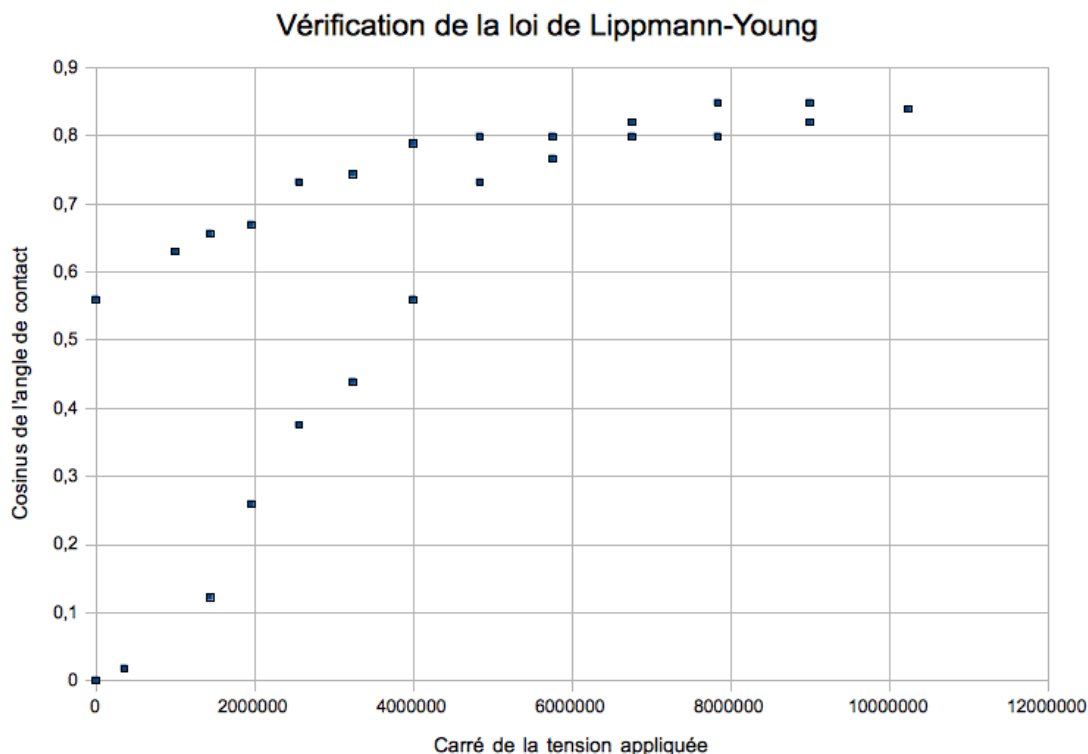


FIGURE 3.6 – Mise en évidence d'un phénomène d'hystérésis

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. Cette différence, et l'hystérésis qui en découle, est liée 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 procurés :



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 :

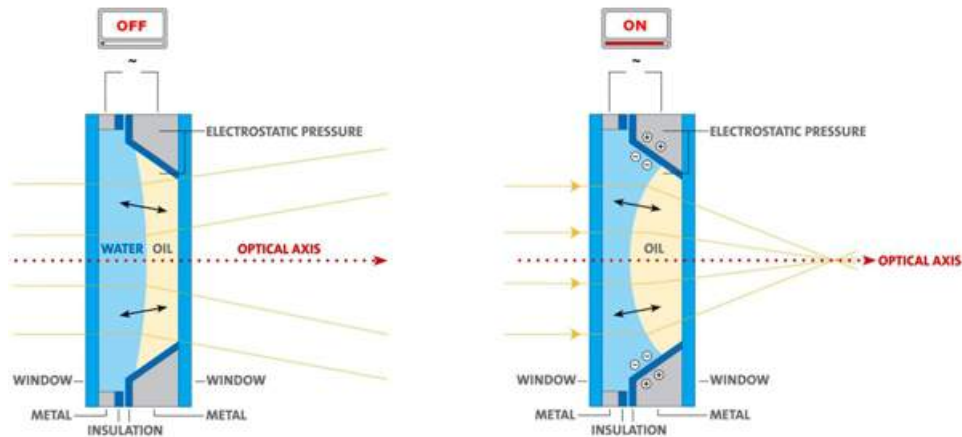


FIGURE 3.8 – Schéma d'une lentille *Varioptic Artic 316*

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* :

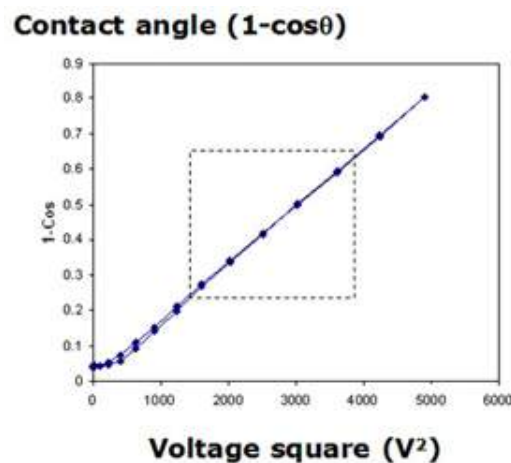


FIGURE 3.9 – Variation de l'angle de contact en fonction de la tension appliquée

On voit que quand la tension appliquée augmente, c'est la quantité $1 - \cos \theta$ qui 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 préparé de façon à avoir la 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 :



FIGURE 3.10 – Goutte d'huile dans un mélange eau-éthanol de même densité

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 :

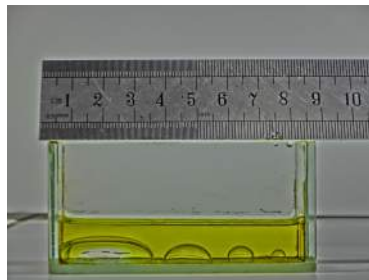


FIGURE 3.11 – Gouttes d'eau dans un bain d'huile

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 2 :

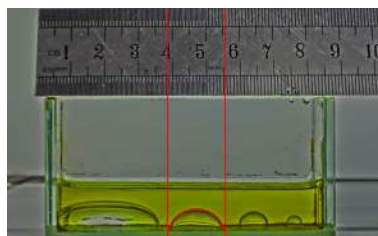


FIGURE 3.12 – Gouttes d'eau dans un bain d'huile

Enfin, on peut penser que le choix des liquides a été fait de façon à réduire au maximum le phénomène d'hystérésis. On peut en effet observer sur la figure 3.9 que dans l'intervalle des tensions utilisées, l'hystérésis est à peu près inexistant.

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 tout leur 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 photos 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, 255 pages.

Ouvrage de référence notamment sur les phénomènes de mouillage.

MAUREL AGNÈS

Optique géométrique, Belin, 2002, 207 pages.

Pour la relation entre le rayon de courbure et la vergence d'une lentille.

Thèses :

BIENIA MARGUERITE

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

Pour les rappels sur le mouillage et l'électromouillage.

BADRE CHANTAL

Etude 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.

Pour la question de l'hystérésis et des angles d'avancée et de recul.

PINEIRUA MENENDEZ MIGUEL

Elasticité et interfaces : des gouttes et des plis. Université Pierre et Marie-Curie Paris VI, 2011

Pour l'interprétation de la loi de Lippmann-Young.

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.

Pour la description des lentilles liquides Varioptic.

QUILLIET CATHERINE, BERGE BRUNO

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

Pour une approche théorique de l'électromouillage.

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.

Pour une description de l'application des lentilles Varioptic aux systèmes autofocus.

BOURLÈS STÉPHANE, YVEN CÉCILE

Les lentilles liquides pour la photo de demain. Communiqué de presse, Université de Rennes, CNRS, 14 novembre 2008.

Même sujet que l'article précédent, mais dans une version très grand public.

COURTY JEAN MICHEL, KIERLIK EDOUARD

Du liquide pour faire des lentilles. Pour la Science n°382, août 2009, 88-90.

Une présentation générale des lentilles liquides.