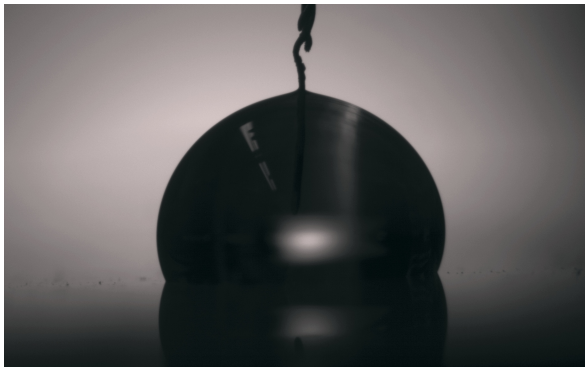
Phénomène d'électromouillage

FERNANDEZ Cyril

ROMAN Vincent



Encadrant :

M. NOBLIN Xavier

Projet de licence au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée

de l'université de Nice Sophia-Antipolis

2009-2010

Sommaire

Introduction 3

I) Capillarité 4

I.1. Tension de surface 4

I.2. Travail de surface 4

I.3. Tension interfaciale 4

II) Mouillage 4

III) Electromouillage 6

III.1. Electrocapillarité 7

III.2. Electromouillage 8

III.3. Résultats expérimentaux 8

IV) Applications 9

IV.1. Pompage 9

IV.2. Lentilles liquides 9

IV.3. Ecran 9

Conclusion 10

Remerciements 10

Bibliographie 10

Introduction

Le sujet du projet est l'étude de l'électromouillage. Cela consiste à modifier de façon réversible l'étalement d'un liquide (légèrement) conducteur sur un solide hydrophobe en lui appliquant un champ électrique[1]. Le phénomène d'électromouillage peut être étudié par analogie avec l'étude d'un condensateur plan. Nous avons, pour toutes nos manipulations, utilisés une goutte d'eau comme liquide conducteur. Celle-ci, lorsqu'elle est de petite taille, forme une calotte sphérique qui se raccorde au substrat avec un angle nommé angle de contact. Cet angle vaut 120° sur du téflon, mais est de l'ordre de 10 ou 20 ° sur du verre. Lorsqu'on applique un champ électrique à la goutte, l'angle de contact diminue et la goutte s'étale plus ou moins. Nous avons mis en place une expérience d'électromouillage (avec et sans plan incliné) ainsi qu'une expérience en dynamique sur des surfaces plus ou moins hydrophobes. Les résultats expérimentaux seront détaillés sur le site internet[2].

Nous présentons dans ce rapport les aspects théoriques du mouillage et de l'électromouillage. Dans un premier temps, nous aborderons la notion de capillarité. Celle-ci étant nécessaire pour appréhender le mouillage. Par la suite, nous établirons les lois définissant le mouillage puis nous nous intéresserons au travail de Lippmann sur l'électromouillage afin de trouver la relation liant l'angle de contact de la goutte avec le substrat et la tension qui lui est appliquée. En fin de rapport, nous évoquerons les différentes applications attachées à ce phénomène.

I) Capillarité

L'étude de la capillarité[3] a débuté au XIXe siècle avec Pierre Simon de Laplace et Thomas Young. Elle consiste à l'étude des interfaces entre deux fluides, celles-ci peuvent se déformer afin de minimiser leur énergie de surface.

Quelque soit l'état, les molécules ont des interactions attractives entre voisines, celles-ci sont à caractère plus fort dans l'état liquide. A l'interface liquide/gaz, elles perdent la moitié de leur interactions. Les liquides vont donc ajuster leur forme pour exposer le minimum de surface (exemple: une goutte d'eau n'est pas carré).

I.1. Tension de surface

La tension de surface s'oppose aux déformations de la goutte, elle mesure le défaut d'énergie par unité de surface. Si E est l'énergie de cohésion par molécule dans le liquide, à l'interface une molécule perd environ la moitié de cette énergie. On peut donc en déduire que la tension de surface $\gamma \sim \frac{E}{2a^2}$, où a^2 est la surface exposée par molécule. γ a pour unité des J.m^{-2}.

I.2. Travail de surface

Déformons le liquide en faisant augmenter sa surface A de dA . Le travail est proportionnel au nombre de molécules en surface, donc à dA , on peut écrire :

$$\delta W = \gamma \, dA \tag{1}$$

La tension de surface contribue au travail en thermodynamique des surfaces.

I.3. Tension interfaciale

La notion de tension de surface peut se généraliser à tout type d'interface liquide/liquide, liquide/gaz, liquide/solide et solide/gaz. On a donc des tensions interfaciales propres à chaque changement de milieu (γ_{SG} , γ_{SL} , γ_{LG} ...).

II) Mouillage

Le mouillage[3] est l'étude de l'étalement d'un liquide déposé sur un solide. On définit le paramètre d'étalement S qui mesure la différence entre l'énergie de surface du substrat sec et mouillé (par unité de surface) :

$$S = \gamma_{SG} - \left(\gamma_{SL} + \gamma_{LG}\right) \tag{2}$$

Où γ_{SG} , γ_{SL} et γ_{LG} sont les tensions superficielles par unité de surface respectivement des interfaces solide/gaz, solide/liquide et liquide/gaz.

Si $S>0$ on parle de mouillage total, le liquide s'étale complètement (l'angle de contact $\theta=0$). Lorsque $S<0$ on est en présence d'un mouillage partiel, la goutte forme une calotte sphérique en faisant un angle de contact $\theta\neq 0$. On va considérer un liquide « plutôt mouillant » lorsque $\theta\leq\frac{\pi}{2}$ et « plutôt non mouillant » si $\theta>\frac{\pi}{2}$. On parle également de surface super-hydrophobe[3] lorsque l'angle de contact de la goutte avec le substrat $\theta>140°$.

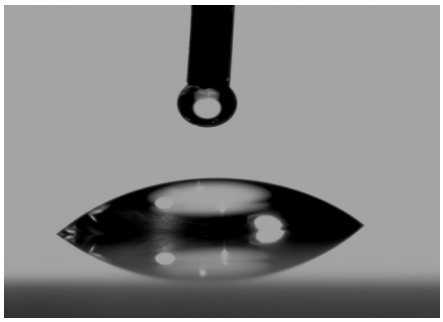


Figure 1. Exemples de surfaces présentes dans la nature. A gauche, une goutte est posée sur une feuille de lotus[4] (surface à caractère super hydrophobe). A droite une goutte est posée sur du verre propre[5] (surface hydrophile).

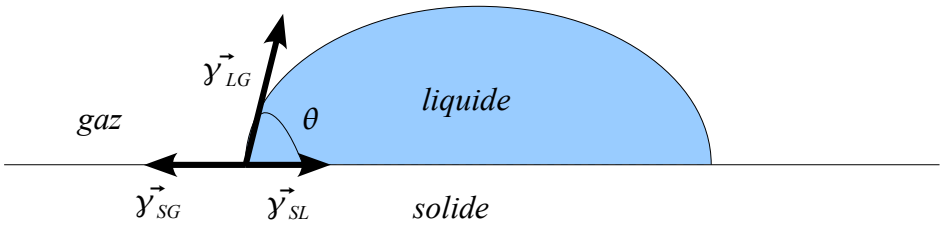


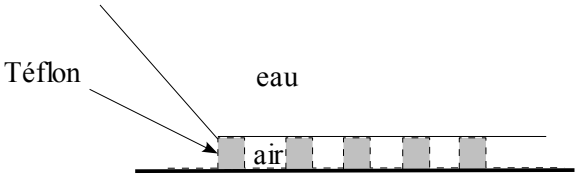
Figure 2. Schéma de mouillage[6].

On écrit l'équilibre des forces capillaires sur la ligne de contact (ligne triple), par unité de surface on trouve :

$$\gamma_{SL}+\gamma_{LG}\cos\theta-\gamma_{SG}=0 \tag{3.1}$$

On en déduit la loi de Young-Dupré[3](1805) :

$$\gamma_{LG}\cos\theta=\gamma_{SG}-\gamma_{SL} \tag{3.2}$$



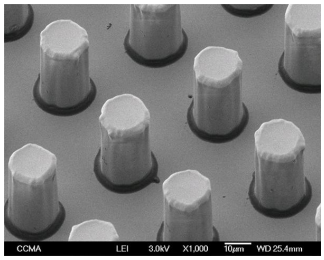
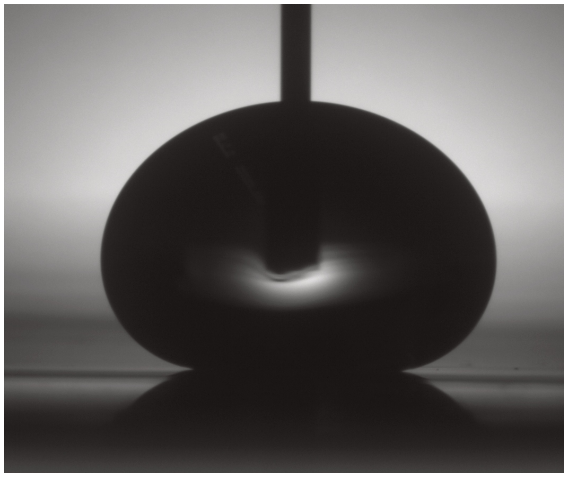
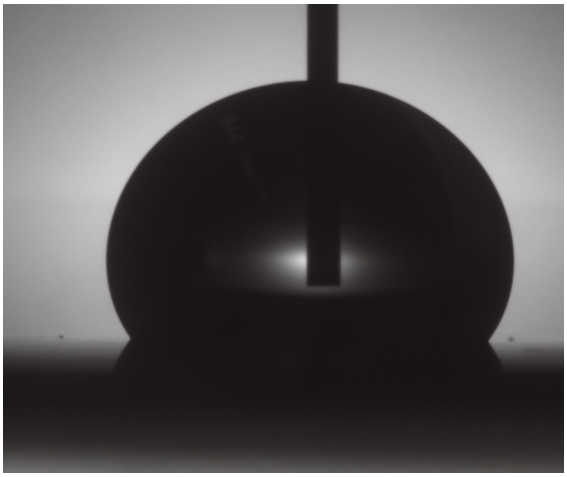


Figure 3. Principe des surfaces super-hydrophobe[3]. Le matériau hydrophobe recouvre un réseau de « plots » de l'ordre du micron. Sur des surfaces de ce type, l'angle de contact d'une goutte avec le substrat peut atteindre des angles proches de 180°.



Super-hydrophobe



Hydrophobe

Figure 4. Gouttes déposées sur des substrats différents.
A gauche sur une surface composée d'un réseau de cylindre recouvert d'une couche de téflon. A droite, sur une surface de téflon.
On remarque que les angles de contact sont différents. Ici, les deux surfaces sont « plutôt non mouillantes ».

III) Electromouillage

Le phénomène d'électromouillage consiste en l'étude des phénomènes de mouillage en présence de champ électrique, notamment l'étude de l'angle de contact d'une goutte posée sur un substrat solide (Téflon dans notre cas) soumise à une tension.

Figure 5. Electromouillage

La goutte chargée par une électrode, le substrat et l'électrode du dessous (« contre-électrode ») forment un condensateur. On peut définir la capacité[1] C de ce condensateur, proportionnelle à la surface de contact solide/liquide S_{SL} :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{e} S_{SL} \tag{4}$$

Où e est l'épaisseur de l'isolant (substrat), ϵ_0 est la permittivité électrique du vide et ϵ_r est la permittivité relative (ou constante diélectrique) propre au matériau utilisé.

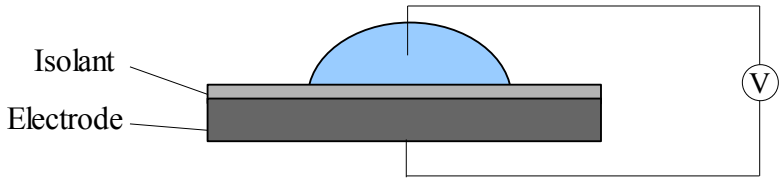


Figure 6. Schéma d'une goutte sur un solide isolant au dessus d'une électrode qui s'étale quand on lui applique une tension[7].

III.1. Electrocapillarité

Lippmann fut le premier en 1875 à s'intéresser à la déformation présente aux interfaces liquide/liquide lorsqu'une tension est appliquée. Cette expérience mit en avant l'électrocapillarité[8].

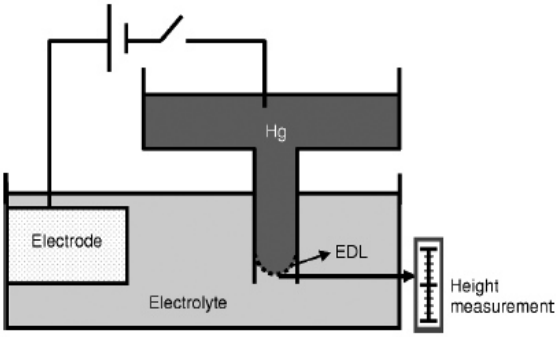


Figure 7. Schéma simplifié de l'expérience de Lippmann.
Le mercure servait d'électrode liquide. La hauteur du ménisque de mercure permettait la mesure de la tension de surface à l'interface. Schéma tiré de [8].

Intéressons nous à l'enthalpie libre (ou énergie de Gibbs) G du système (Figure 8.) dans le cas d'une augmentation infinitésimale de l'aire de base dA .

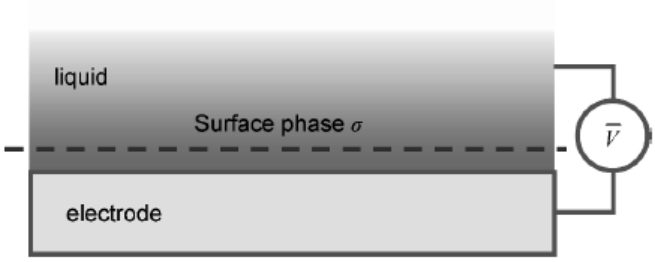


Figure 8. Contact liquide avec une électrode chargée. Schéma tiré de [8].

On peut écrire :

$$dG = -SdT + VdP + w \tag{5}$$

Où w est le travail supplémentaire issu des tensions de surfaces et du potentiel électrique.

$$w = \gamma\, dA + U\, dQ \tag{6}$$

Où U est la tension délivrée par le générateur et Q est la charge totale à l'interface solide liquide.

On travaille à température et pression constante donc :

$$dG = \gamma\, dA + U\, dQ \tag{7}$$

En intégrant, on obtient :

$$G = \gamma\, A + UQ \tag{8}$$

On différencie l'expression (8) pour obtenir une forme de l'équation de Gibbs-Duhem :

$$\begin{gathered} dG = A\ \ d\gamma + \gamma\, dA + QdU + UdQ \\ A\ \ d\gamma + QdU = 0 \end{gathered} \tag{9}$$

On obtient donc :

$$\frac{d\gamma}{dU} = -\frac{Q}{A} = -q = -cU \tag{10}$$

Où q est la densité de charge à l'interface et c la capacité du condensateur / unité de surface.

En intégrant la relation (10), on peut déduire :

$$\gamma(U) - \gamma = -\frac{1}{2} c (U^2 - U_0^2) \tag{11}$$

Où γ est la tension de surface à l'interface solide/liquide lorsque la tension à l'interface vaut zéro ($U_0 = 0$).

III.2. Electromouillage

Dans le cas d'une électrode solide, à l'inverse de l'expérience de Lippmann où le mercure servait d'électrode liquide, on peut écrire $\gamma = \gamma_{SL}$ et ainsi généraliser le résultat de Lippmann à l'électromouillage (Bruno Berge fût le premier à expérimenter cette technique en 1993).

En combinant l'équation de Young-Dupré (3.2) et la relation (11), on obtient l'équation de Lippmann-Young[8] :

$$\begin{gathered} \gamma_{SL}(U) - \gamma_{SL} = \gamma_{SG} - \gamma_{LG} \cos\theta(V) - \gamma_{SG} + \gamma_{LG} \cos\theta_0 = -\frac{1}{2} c U^2 \\ \cos\theta(U) = \cos\theta_0 + \frac{1}{\gamma_{LG}} \frac{1}{2} c U^2 \end{gathered} \tag{12}$$

Où $\theta(U)$ et θ_0 sont les angles de contacts respectivement avec tension et sans tension. γ_{SG} et γ_{LG} sont supposées constantes, indépendantes de la tension appliquée.

III.3. Résultats expérimentaux

Nous avons réalisé un dispositif expérimental permettant de mesurer en fonction d'une tension le cosinus de l'angle de contact avec un substrat constitué d'une couche d'isolant fabriqué au

laboratoire. Nous montrons ici un graphe illustrant nos mesures. Les détails sur les expériences réalisées sont présents sur le site[2].

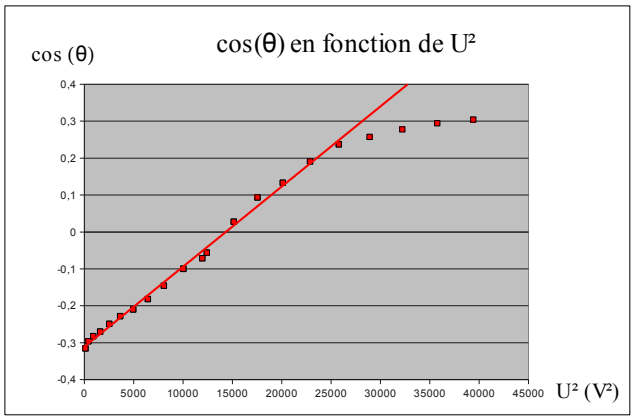


Figure 9. Loi de Lippmann-Young expérimentale. On remarque que la loi de Lippmann-Young est vérifiée pour des tensions faibles jusqu'à une tension critique où un phénomène de saturation apparaît[9].

IV) Applications

Ce phénomène reçoit depuis peu des applications dans l'industrie pour réaliser par exemple des lentilles optiques de focales variables en téléphonie mobile.

IV.1. Pompage

Une goutte d'eau peut être transportée dans un conduit à l'aide d'un dispositif d'électromouillage. La goutte coincée entre deux électrodes peut avancer selon que l'on rende l'interface solide/liquide « plutôt mouillante » ou « non mouillante »[8].

IV.2. Lentilles liquides

Le phénomène est utilisé dans le cas de lentille liquide. On fait varier la convergence d'une lentille en appliquant une tension au liquide à l'intérieur. Cette application est utilisé pour l'autofocus des lentilles d'appareil photo[10] ou la stabilisation d'image.

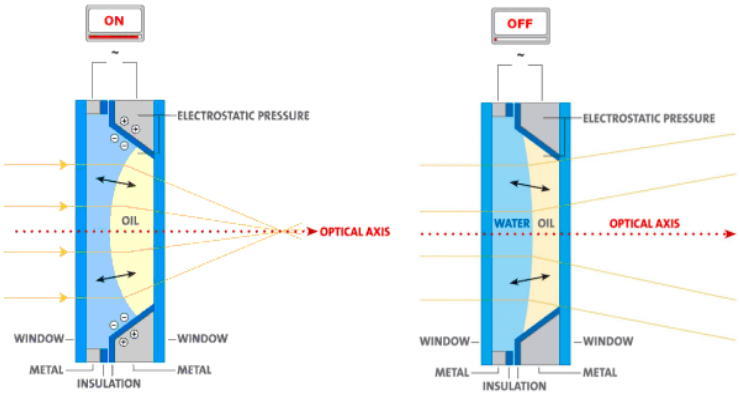


Figure 10. Schéma du principe des lentilles liquides. Ici, l'air est remplacé par de l'huile. On peut régler la convergence de la lentille selon le potentiel appliqué. Image tiré de [10].

IV.3. Ecran

L'électromouillage peut être utilisé pour fabriquer des écrans pour téléphone, appareil photo, lecteur audio ou vidéo portable[11]. Ces écrans sont deux fois plus lumineux que les écrans LCD traditionnels et sont donc visibles même en plein ensoleillement.

Conclusion

Ce projet nous a permis d'établir que l'électromouillage permet d'abaisser l'angle de contact entre un liquide conducteur et un solide isolant par application d'un champ électrique entre ce liquide et une contre-électrode. Comme l'interface liquide/solide augmente, la goutte s'étale et prend un angle dont le cosinus varie comme le carré du potentiel U appliqué. L'emploi de cette méthode est tout récent puisque les applications basées sur ce phénomène ont moins d'une vingtaine d'années. Néanmoins, l'électromouillage se heurte à un phénomène limitant dont les mécanismes ne sont que partiellement connus : la saturation d'angle de contact[9].

Ce stage nous a également permis de découvrir le monde de la recherche et d'avancer sur un sujet par nous-même en mettant en application nos connaissances.

Remerciements

Nous tenons à remercier notre encadrant, Mr. Noblin pour ses conseils avisés tout au long du stage (de la description de la partie théorique en passant par le prêt de son matériel jusqu'aux vérifications expérimentales).

Références

[1] M. Vallet, B. Berge et L. Vovelle, Electrowetting of water and aqueous solutions on poly(ethylene terephtalate) insulating films, *Polymer,* **37**, 2465-2470 (1996)

[2] Site : *http://www.unice.fr/DeptPhys/sem6/2009-2010/PagesWeb/Accueil.html*

[3] Pierre-Gilles de Gennes, Françoise Brochard-Wyart et David Quéré, Chapitre 1 Capillarité : interfaces mobiles, Chapitre 9 Interfaces spéciaux, *Gouttes, bulles, perles et ondes* Belin (2002)

[4] Site : *http://www.flickr.com/photos/hs_yin/33785463/*

[5] Site : *http://en.wikipedia.org/wiki/Contact_angle*

[6] Marguerite Bienia, *Thèse: Etude de déformation de goutte et de film mince induite électriquement,* Jury : Bruno Berge et al. (2005)

[7] Catherine Quilliet et Bruno Berge, Electrowetting : a recent outbreak*, Current Opinion in Colloid & Interface Science,* **6**, 34-39 (2001)

[8] Hyejin Moon et Chang-Jin « CJ » Kim, Chapter 5 Electrowetting: Thermodynamic Foundation and Application to Microdevices, *Microfluidic Technologies for Miniaturized Analysis Systems,* Springer,US (2007)

[9] Frieder Mugele et Jean-Christophe Baret, Electrowetting: from basics to applications, *Journal of Physics: Condensed Matter,* **17**, R705-R774 (2005)

[10] Site de Variotpic : *http://www.varioptic.com/*

[11] Site de Liquavista : *http://www.liquavista.com/*