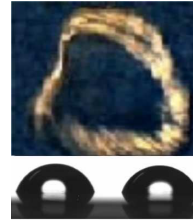




Université de Liège
Faculté des Sciences



Etude du piégeage de la ligne de contact lors de l'évaporation de gouttelettes

Dissertation présentée par
Léonard Kabeya Mukeba
en vue de l'obtention du
grade de Docteur en Sciences
2007

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Gouttelettes	1
1.2	Problématique	2
1.3	Moyens	2
1.4	Stratégie et plan de la thèse	3
2	Etat de l'art	5
2.1	Gouttes	5
2.1.1	Mécanisme d'adhésion	5
2.1.2	Forme géométrique de goutte	7
2.1.3	Gouttes en Action	8
2.2	Capillarité	12
2.2.1	Illustration	12
2.2.2	Interfaces	12
2.2.3	Energie libre superficielle : Concept de Gibbs et Guggenheim	13
2.2.4	Tension superficielle	17
2.2.5	Longueur capillaire	18
2.2.6	Surfaces de substrats Solides	19
2.3	Mouillage et dé mouillage	21
2.3.1	Coefficient de mouillage k_w et étalement	22
2.3.2	Echelles et Sortes de mouillage	24
2.3.3	Hystérésis de surfaces et angle de Young	25
2.3.4	Ligne de contact	27
2.4	Evaporation de gouttelettes	30
2.4.1	Equation de Maxwell	30
2.4.2	Historique	34
2.4.3	Sortes d'évaporation	36
2.4.4	Evaporation naturelle	42
2.5	Conclusion partielle	46

3	Expériences	49
3.1	Problématique	49
3.2	Techniques expérimentales	49
3.2.1	Appareillage	49
3.2.2	Calibration	50
3.2.3	Echantillons solides.	50
3.2.4	Liquides utilisés	51
3.2.5	Angle de Contact	53
3.3	Evaporation de gouttes	61
3.3.1	Diagrammes d'évaporation	63
3.3.2	Angle de contact dynamique en évaporation θ_d^e	76
3.3.3	Comportement de $\theta = \theta(V)$	79
3.3.4	Comportement de $\theta = \theta(R)$	81
3.4	Effet mémoire du piégeage à la création de gouttes	86
3.4.1	Création de gouttes déposées par pont capillaire	87
3.4.2	Technique de création de gouttelettes par gonflage	89
3.4.3	Impact de piégeage à la création de gouttes en évaporation	91
3.5	Discussion et conclusion partielle	93
3.5.1	Discussion sur le piégeage et dépiégeage	93
3.5.2	Conclusion partielle	94
4	Modèle	97
4.1	Modélisation numérique	97
4.1.1	Modèle physique idéalisé	97
4.1.2	Formalisme analytique	98
4.2	Simulation numérique	100
4.2.1	Modèle numérique de θ en fonction de V	100
4.2.2	Modèle numérique de θ en fonction de R	101
4.3	Energie de piégeage λ	102
4.4	Avantages et limites du modèle	103
4.4.1	Avantages	103
4.4.2	Limites et perspective du modèle	104
4.5	Résumé et discussion	105
5	Conclusions et perspectives	107
5.1	Conclusion	108
5.2	Perspectives	110
5.3	Recommandations	112

Résumé

Ce travail présente une étude du piégeage d'une "goutte-sessile" en évaporation. Deux cas sont considérés : une goutte sur une surface hydrophile et sur une surfaces hydrophobe. Dans ces deux cas, l'ancrage de la ligne (piégeage) se fait entre l'angle de contact d'avancée et celui de reculée. La constance du rayon de la gouttelette est observée. Cette phase met en évidence trois régimes d'évaporation : étalement, piégeage de la ligne triple et amorçage de la rétraction.

Les paramètres suivants ont été étudiés par une technique d'imagerie avec résolution de $10\mu m/\text{pixel}$ (protocole expérimental d'"Optical Contact Angle Meter" CAM 200 de "KSV Ltd") : le volume, le rayon et l'angle de contact, leurs évolutions temporelles et les comportements du profil géométrique des gouttelettes. Deux diagrammes caractéristiques sont présentés : (i) l'angle de contact en fonction du volume et (ii) l'angle de contact en fonction du rayon. Ce dernier graphique met en évidence le piégeage de la ligne. Les grandeurs fondamentales de la dynamique d'évaporation, qui caractérisent la richesse d'une goutte sur substrat solide à surface horizontale, ont été quantifiées : 0,4 à $1,33\mu m/s$ pour la vitesse de rétraction de la ligne de contact, 640 à $937\ \mu rad/s$ pour le taux de décroissance de l'angle de contact sur substrats hydrophiles, 1 à $2,5\ nl/s$ pour le taux d'évaporation, et 0,71 à $1,09\ nrad/s^2$ pour le taux de décélération pour les gouttes évaporées sur les substrats hydrophobes. Le comportement de l'angle de contact en fonction du temps est linéaire aux temps courts dans le cas des surfaces hydrophiles et aux temps larges pour les hydrophobes. La longueur de la constance du rayon est équivalente à la signature d'hystérésis. Les substrats solides homogènes utilisés sont : (i) surface fakir et téflon pour les hydrophobes et (ii) porcelaine et nylon pour les hydrophiles en raison de la signature d'hystérésis de $\pm 5^\circ$. L'énergie de piégeage est évaluée à $\sim 25\mu J/m$ pour les hydrophobes et à $\sim 30\mu J/m$ pour les hydrophiles. Le comportement de la goutte en évaporation dépend de manière dont on la pose "gonflée - posée". Le comportement de la ligne triple est observé. Un tel comportement n'est pas trivial.

Des modèles numériques sont mis au point afin d'illustrer ce processus physique d'apparence simple et de comprendre le piégeage. Ces modèles reproduisent de manière très réaliste la dynamique de l'évaporation d'une goutte allant des conditions initiales jusqu'au séchage complet. La cohérence entre ces modèles numériques et nos résultats expérimentaux avec effet mémoire dans les conditions naturelles valide un critère justifié jusqu'ici par un formalisme analytique.

Abstract

This thesis concerns the pinning of the contact line during the evaporation of droplets. Two cases are considered : a droplet on an hydrophilic surface and on an hydrophobic one. In both cases, the anchoring of the line (pinning) is localised between the advancing contact angle and the receding one. The constancy of the droplet radius is observed. This phase identifies the evolution of three modes in evaporation : spreading , pinning of the triple line and starting of the retraction line.

The physical parameters were measured by imagery technique ("Optical Contact Meter Angle" (CAM 200) of "KSV Ltd"), with resolution $10\mu m/\text{pixel}$: the volume, the radius and the contact angle, their temporal evolutions, and the behaviors of the geometrical profile of droplets. Two characteristic diagrams are depicted : (i) contact angle as a function of volume and (ii) contact angle as a function radius. The latter graphic enhances the pinning of the line. Fundamental quantities plot characterize the dynamics of evaporation were measured : $0,4 - 1,33\mu m/s$ the retraction speed of the contact line, 640 to $937\mu m/s$ for the decreasing rate of line for hydrophilics, 1 to $2,5\text{ nl/s}$, onto hydrophilic solid surfaces for evaporation rate, and $0,71$ to $1,09\text{ nrad/s}^2$ for the deceleration nonlinear deceleration rate for droplets evaporated on hydrophobic substrats. The behavior of the contact angle according to the time is linear for short times, in the case of hydrophilic surfaces and for long times in the case of hydrophobic one. The length of the constancy of the radius is equivalent to the signature of hysteresis. The homogeneous solid substrates used here are : (i) fakir surface and Teflon for the hydrophobic surfaces and (ii) porcelain and nylon for the hydrophilic ones, because the signature of hysteresis of $\pm 5^\circ$. The pinning energy is evaluated with $\sim 25\mu J/m$ for the hydrophobic solid surfaces and at $\sim 30\mu J/m$ for absorbent solids surfaces. The behavior of the droplet in evaporation depends on the way one poses it : "inflated or posed". The behavior of the triple line is observed. Such a behavior is not trivial.

Numerical models are developed in order to simulate this physical process and to understand the pinning. These models reproduce in a realistic way the evaporation dynamic from initial conditions to complete drying. The agreement of these numerical models with our experimental results with memory effect under natural conditions validates a criterium also justified by an analytical formalism.