

Etude expérimentale de la forme d'une interface au voisinage d'une ligne triple dynamique au cours de l'évaporation d'un film liquide

Loïc TACHON*, Stephan GUIGNARD, Lounès TADRIST

AIX MARSEILLE UNIVERSITE (U1,U2)-POLYTECH MARSEILLE-Laboratoire IUSTI CNRS UMR 6595.

*(auteur correspondant : loic.tachon@polytech.univ-mrs.fr)

Résumé

Le but de ce document est de présenter une nouvelle méthode permettant de reconstituer la forme de l'interface liquide gaz au voisinage d'une ligne triple. L'expérience consiste à évaporer un volume contrôlé de liquide volatil à la température ambiante (HFE7100) dans un puits cylindrique vertical de taille millimétrique. Au cours de l'évaporation, l'interface gaz liquide prend une forme toroïdale délimitant un film axisymétrique entre le fond du puits et le côté. Au début, l'évaporation se fait au niveau d'un film liquide qui se rompt avec l'apparition d'une ligne triple qui apparaît au milieu du film. La forme du ménisque et la position de la ligne triple sont mesurées simultanément par un sondage laser suivi d'une inversion numérique après post-traitement. Cette technique analyse les variations d'intensité lumineuses des nappes lasers dues à leurs réfractions en traversant les interfaces consécutives (solide-liquide-gaz). L'intensité lumineuse de l'image des nappes lasers sur un écran perpendiculaire est inversée. Le résultat de cette inversion est la forme de l'interface et la position de la ligne triple au cours du processus d'évaporation.

1. Introduction

1.1. Idées générales

Beaucoup d'études théoriques montrent l'influence de la vitesse de ligne triple, de l'angle de contact et de l'épaisseur de film sur les transferts de chaleur et de masse au voisinage de la ligne triple. Il existe de nombreuses techniques permettant de mesurer dynamiquement la forme d'une interface gaz-liquide d'une goutte ou d'un film sur une surface plate. Récemment, un résumé des différentes techniques existantes pour les gouttes a été publié [1]. Les techniques nécessitant une vue directe du profil de la goutte sont limitées aux angles de contact supérieurs à 20°. En considérant des petits volumes de liquides, (film minces, gouttes très mouillantes ou ménisques) de très bons résultats sont obtenus par interférométrie [2] et [3]. Cependant cette méthode fonctionne uniquement pour des petits angles de contact. Une méthode optique indirecte consistant à observer une grille projetée qui se déforme avec la courbure de l'interface gaz-liquide a été développée [4]. Cette technique calcule le profil de l'interface du film et l'angle de contact apparent.

D'autres méthodes indirectes ont été développées utilisant les phénomènes de réflexion et de réfraction d'un laser. Une méthode qui consiste en l'illumination d'une goutte avec une incidence normale au solide par un large rayon laser a été proposée [5]. Le rayon est réfléchi par la goutte en un cône de lumière dont l'angle est une fonction de l'angle de contact moyen autour du périmètre de la goutte. Depuis, plusieurs méthodes utilisant des lasers existent et permettent de calculer la forme de l'interface et l'angle de contact. Des techniques utilisant l'absorption de la lumière ont été utilisées [6]. Un système permettant de calculer la hauteur d'un fil en mesurant la fluorescence de celui-ci dans le cas d'une surface libre a été présenté [7]. Dans une autre méthode, [8], appliquée pour l'assèchement d'un film axisymétrique, un rayon laser est réfracté par l'interface et sa déviation est suivie au cours du temps. Une technique similaire utilisant une nappe laser a été développée [9]. Cette méthode exploite la

déflexion de la nappe laser après sa réfraction en traversant l'interface liquide gaz et calcule ainsi l'angle de contact au niveau de la ligne triple de la partie sèche.

La méthode présentée ici est également basée sur la réfraction lumineuse au travers d'une interface liquide-gaz. Nous montrons la capacité de notre méthode à calculer instantanément l'angle de contact et la forme de l'interface d'un film axisymétrique en évaporation.

1.2. Problème axisymétrique d'évaporation

Afin d'illustrer notre méthode, nous l'appliquons ici à l'étude de l'évaporation d'un fluide dans un puits cylindrique dans une configuration axisymétrique. Un volume contrôlé de liquide volatil (HFE7100) est déposé dans un puits cylindrique axisymétrique. Durant le processus d'évaporation, l'interface prend une forme toroïdale délimitant un film axisymétrique avec le bas du puits et le côté. Au début, le phénomène d'évaporation se passe sans ligne triple, puis une ligne triple apparaît par le centre du puits délimitant ainsi la partie sèche.

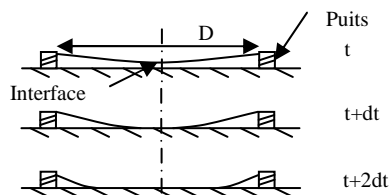


Figure 1 : Problème d'évaporation d'un film axisymétrique

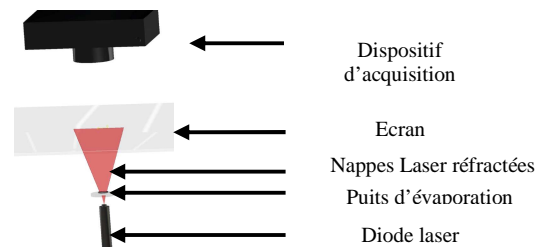


Figure 2 : Protocole expérimental

2. Matériel et méthode

2.1. Protocole expérimental

Un puits (Téflon ou inox) de 7mm de diamètre et de 1mm de profondeur est déposé sur une lame de microscope de 1mm d'épaisseur. Le puits est précisément rempli avec un fluide à faible température d'évaporation. Une diode laser ($\lambda=635$ nm) génère des nappes laser triangulaires avec un angle d'ouverture d'environ 30° . Ces nappes laser illuminent la lame de microscope par dessous et après réfraction au travers de l'interface, elles impactent un écran situé environ 15cm au dessus de la lame de microscope. Une camera CCD de haute résolution (2848x4288) est utilisée pour l'acquisition de l'image.

2.2. Visualisation sur l'écran et interprétation

La Figure (3) montre l'image sur l'écran des raies laser produites par leur impact sur l'écran. Dans un premier temps, on observe une dilatation le long de l'abscisse "x" des raies et une courbure des raies latérales. Cela est dû à l'augmentation de la concavité de l'interface. Dans ce cas, le volume de liquide s'apparente à une lentille plan-concave. Quand la ligne triple apparaît, laissant une zone sèche au milieu du puits, les raies non déformées apparaissent au centre du puits. Elles sont l'empreinte de la zone sèche sur l'écran. En regardant en détail sur l'écran, la limite entre la zone déformée et non déformée est une ombre circulaire ("C" sur la Figure (3)). Deux interprétations de cette observation sont détaillées dans la section 2.3. Dans les deux cas, ce cercle est l'empreinte de la discontinuité: l'image de la ligne triple sur l'écran. Une fois que tout le liquide s'est évaporé, on obtient des raies non

déformées sur l'écran. L'intensité lumineuse est ensuite évaluée à l'aide de l'acquisition numérique de l'écran en niveau de gris. Pour ce faire, on somme les valeurs de niveau de gris de la matrice CCD sur la largeur de la raie centrale afin d'évaluer les variations lumineuses du signal. Cela permet de quantifier l'intensité lumineuse et ainsi de calculer la vitesse de la ligne triple, l'angle de contact et la forme de l'interface ou l'épaisseur de film.

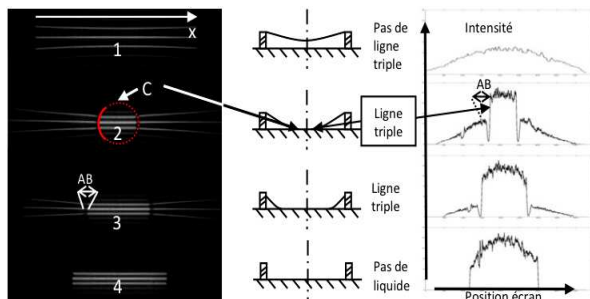


Figure 3 : Différentes configurations des nappes laser sur l'écran et profil d'intensité

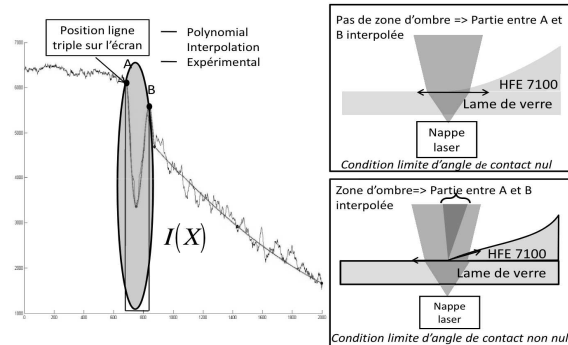


Figure 4 : Interpolation du signal d'intensité lumineuse

Comme nous pouvons le voir sur la Figure (3), la position de la ligne triple et la longueur "AB" peuvent être automatiquement détectées sur le signal. Après quelques transformations géométriques, on peut calculer la position réelle de la ligne triple au sein du puits et la valeur de l'angle de contact. Pour calculer la forme de l'interface, une interpolation polynomiale du signal est faite puis inversée par la méthode présentée dans la section 2.4.

2.3. Méthode de reconstruction de l'interface

Le principe de cette méthode pour la reconstruction de l'interface est basé sur une inversion directe du profil d'intensité de la raie centrale que l'on peut observer sur la Figure (3). Le point clef est de comprendre comment l'intensité est corrélée aux caractéristiques géométriques de l'interface.

La première étape (décrite dans la section 2.3.1), pour évaluer cette corrélation, est d'obtenir une fonction du signal. Pour ce faire, une interpolation polynomiale de la sommation des valeurs du signal (signal représenté sur la Figure (3)) sur toute la largeur de la raie centrale de la matrice CCD est faite. Dans une seconde étape (section 2.3.2) une première intégration numérique est faite en considérant une loi de conservation de l'énergie lumineuse et une description géométrique Figure (5). Cela mène à la valeur de l'angle de chaque rayon que constitue la raie laser avec la verticale le long de la raie laser au niveau de l'abscisse "X" de l'écran. Dans la troisième étape (section 2.3.3), on utilise la loi de Snell Descartes ainsi que les lois de la géométrie classique sur cet angle afin de calculer la tangente à l'interface le long du diamètre du puits. Après le calcul de cette tangente, une seconde intégration numérique est faite pour obtenir l'épaisseur de film et la forme de l'interface.

Comme on peut le voir sur la Figure (3), l'intensité décroît brutalement. Cela est dû à la présence de la ligne triple. Afin d'expliquer la décroissance puis la croissance soudaine de l'intensité lumineuse, deux configurations différentes vont être explorées. La première va considérer que la condition limite d'angle de contact est nulle et qu'il n'y aura donc pas de discontinuité géométrique entre la lame de microscope et l'interface liquide vapeur. Dans ce cas, cette chute brutale de l'intensité est due à une forte variation de la courbure dans la micro région au niveau de la ligne triple. La partie du signal ("AB" sur la Figure (3)) va être intégrée pour la reconstruction de l'interface. Dans la seconde configuration, l'angle de contact est

considéré comme non nul et donc une discontinuité de la normale du dioptre (verre-vapeur et liquide-vapeur) apparaît au niveau de la ligne triple ce qui provoque une forte divergence des rayons lumineux de part et d'autre de la ligne triple (Figure (4)). Cette divergence engendre le cercle sombre sur l'écran (C sur la Figure (3)) Dans ce cas, la partie du signal "AB" n'est pas prise en compte pour la reconstitution de l'interface mais la distance AB est utilisée pour le calcul de l'angle de contact (utilisée pour le calcul d'une des constantes d'intégration)

2.3.1. Interpolation du signal d'intensité lumineuse

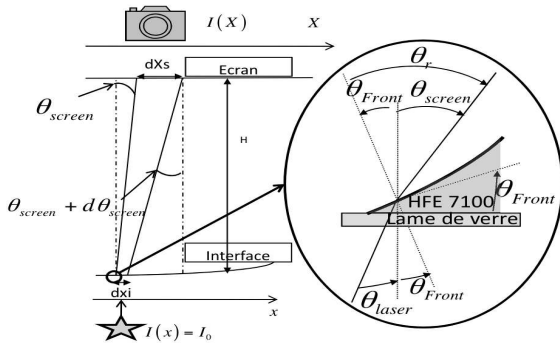


Figure 5 : Conservation de l'énergie lumineuse et chemin d'un rayon lumineux

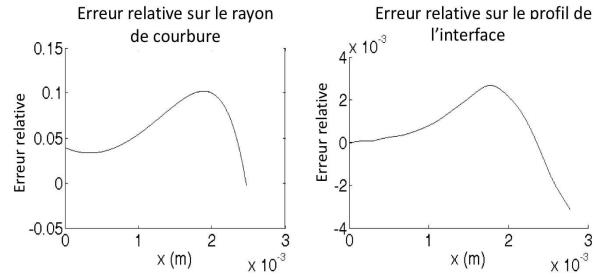


Figure 6 : Erreur relative sur le rayon de courbure et la forme de l'interface

Le problème étant axisymétrique on se contente de l'étude de la moitié du signal représenté sur la Figure (3). Cette étape consiste premièrement à détecter la position des points A et B sur la Figure (4). Ensuite, l'interpolation polynomiale dépend du type de théorie que l'on considère pour l'angle de contact. Si l'on suppose un angle de contact nul, un polynôme d'ordre élevé va être utilisé pour bien suivre le signal et sa variation entre A et B et commencera à partir du point A. Si l'on suppose que l'angle de contact est non nul, un polynôme d'ordre deux est suffisant pour décrire correctement l'évolution du signal. Dans ce cas, celui-ci commencera au point B.

2.3.2. Intégration du signal d'intensité lumineuse

Le but de cette étape est de calculer l'angle incident des rayons constituant la raie laser centrale avec la verticale lorsque ceux-ci impactent l'écran. Pour calculer l'angle noté θ_{screen} sur la Figure (5), une loi de conservation d'énergie est utilisée. Donc la formulation suivante est correcte si toute l'énergie électromagnétique venant de la diode laser impacte l'écran. Dans ce cas, on considère que la transmittivité du fluide est proche de l'unité. La perte d'énergie due aux multi réflexions est aussi considérée comme négligeable. Comme cela est représenté sur la Figure (5), une loi de conservation de l'énergie est définie par la formule suivante:

$$I_0 dx = I(X) dX \quad (1)$$

Cela veut dire que toute l'énergie électromagnétique traversant l'interface à travers l'élément noté "dx_i" sur la Figure (5) impacte l'écran à travers l'élément "dX_s" sur la Figure (5). Une description géométrique nous donne la relation liant la position sur l'écran "X" et la position sur le rayon du puits "x", ainsi que la relation liant "dX", "dx" et " θ_{screen} " (notation Figure (5)). Ce qui nous permet d'arriver à la formule suivante:

$$\frac{d(\tan \theta_{screen})}{d\theta_{screen}} \theta_{screen} = \frac{1}{H} \left(1 - \frac{I(X)}{I_0} \right) dX \quad (2)$$

Le membre de gauche peut être analytiquement intégré. La partie de droite est numériquement intégrée entre la position de la ligne triple notée “X₀” et la fin du signal d’intensité lumineuse sur l’écran. Donc l’équation (2) devient:

$$\tan \theta_{screen} - \tan \theta_0 = \frac{1}{H} \int_{X_0}^{\check{X}} \left(1 - \frac{I(u)}{I_0}\right) du \quad (3)$$

Après l’intégration du terme de gauche de (2), une constante $\tan \theta_0$ apparaît. C’est l’angle que constitue le premier rayon lumineux de la raie laser qui voit le fluide au niveau de la ligne triple avec la verticale après sa réfraction à travers l’interface. Il s’en suit que la valeur de cette constante va dépendre de l’hypothèse retenue pour l’angle de contact (nul ou non nul) et détaillée au paragraphe 2.3. Les conséquences sont illustrées dans la partie 3.

2.3.3. Calcul de la forme de l’interface

Avec les notations de la Figure (5), on peut arriver à l’expression suivante :

$$\tan \theta_{Front} = \frac{n_{HFE\ 7100} \sin \theta_{laser} - \sin \theta_{screen}}{\cos \theta_{screen} - n_{HFE\ 7100} \cos \theta_{laser}} \quad (3)$$

Avec l’intégration de cette formule, on obtient l’expression de la forme de l’interface:

$$z(x) = \int_{x_{LT}}^{\check{X}} \tan \theta_{Front} du \quad (3)$$

Dans le cas où l’angle de contact est considéré différent de zéro, sa valeur est donnée par :

$$\theta_{contact} = \frac{\overline{AB}}{H(n_{HFE\ 7100} - 1)} \quad (3)$$

2.4. Validation de la méthode

Afin de valider cette méthode, nous l’avons appliquée sur une lentille plan-concave avec une géométrie et un indice de réfraction connu. Cela peut s’apparenter à un film mince solide. Nous avons appliqué la méthode présentée afin de calculer la forme de l’interface de la lentille à partir de l’image lumineuse sur l’écran de la raie centrale. Nous avons alors, comparé le profil calculé avec le profil réel de la lentille ainsi que le rayon de courbure. L’erreur relative sur le rayon de courbure est inférieure à 15% ce qui implique une erreur sur la forme de l’interface inférieure à 1% (Figure (6)).

3. Résultats et discussion

Avec les raies laser utilisées ici, le profil d’interface calculé ne donne pas la forme de l’interface de la seconde ligne triple, celle située sur les parois verticales du puits. Afin de résoudre ce problème, des raies laser en lumière parallèles peuvent être utilisées mais en proche ligne triple, le profil ne sera pas obtenu. Dans les résultats suivants, afin de calculer la forme de l’interface jusqu’à la paroi du puits, le profil déterminé avec la méthode présentée a été étendu par un cercle de même rayon que le rayon de courbure moyen de la fin du profil déterminé. Cette partie de l’interface s’étend sur 1mm en partant de l’extrémité du puits. L’équation de Laplace peut aussi être utilisée pour déterminer la forme de cette partie. Cependant, en aucun cas on ne peut avoir l’angle de contact de la ligne triple situé sur la paroi du puits. Sur la Figure (7), on représente la forme de l’interface à différent moment du processus d’évaporation pour les deux théories de l’angle de contact. Quatre secondes séparent chaque courbe. La conclusion est que le volume de liquide n’est pas le même selon

la théorie. Dans le cas où l'angle de contact n'est pas nul, le volume de liquide est plus important.

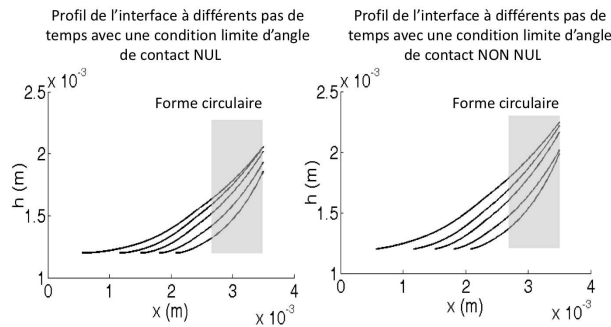


Figure 7 : Evolution de l'interface au cours de l'évaporation

4. Conclusion

Dans cet article, nous présentons une nouvelle méthode permettant de calculer instantanément la forme de l'interface au voisinage de la ligne de contact. La validation de cette méthode sur la forme d'une lentille optique à géométrie connue a donné des résultats très encourageants avec une erreur très faible. Cette méthode calcule aussi l'angle de contact apparent avec une très bonne précision, même pour des angles de contact inférieurs à 20° .

Afin de discriminer une des deux théories sur l'angle de contact, cette technique va être testée sur un film à géométrie connue avec un angle de contact non nul.

Références

- [1] Chau, T. A review of techniques for measurement of contact angles and their applicability on mineral surfaces *Minerals Engineering*.(2008).
- [2] Wayner, P. C. Nucleation, growth and surface movement of a condensing sessile droplet. *Colloids and Surfaces* (2002) A 206 , 157-165
- [3] Panchamgam, S. Comprehensive experimental and theoretical study of fluid flow and heat transfer in a microscopic evaporating meniscus in a miniature heat exchanger *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2008), 5368-5379
- [4] Hegseth J, Wetting film dynamics during evaporation under weightlessness in a near-critical fluid. *Physical review* (2005) E 72
- [5] Allain, C. A new method for contact-angle measurements of sessile drops. *J. Colloid Interface* (1985) *Sci.* 107
- [6] Goodwin, R. An Investigation of a viscous Coating *Ph D, thesis Stanford University* (1991)
- [7] Johnson M.F.G, Fluorescent imaging system for global measurement of liquid film thickness and dynamic contact angle in free surface flows (1997). *Sci. Instrum* 68 , 4097-4102
- [8] Buguin, A. Shocks in Inertial Dewetting *Physical Review Letter* (1999). 83 , 1183
- [9] Rio, E. Probing with a laser sheet the contact angle distribution along a contact line. *Journal of Colloid and Interface Science* (2004) 269 , 164-170

Remerciements

Les auteurs remercient le support de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et le projet ANR-06-BLAN-0119-01 "INTENSIFILM".