

Mise en évidence d'un débit massique d'évaporation linéique au niveau d'une ligne triple circulaire

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 - Un liquide volatil est injecté à l'intérieur d'un puits cylindrique. Au cours du processus d'évaporation, l'interface gaz liquide se creuse jusqu'à l'apparition d'une tache sèche au centre du puits délimitée par une ligne triple circulaire en mouvement excentrique. Ce problème illustre la naissance d'une ligne de contact et permet la mise en évidence des effets thermiques de ligne triple. En effet, au cours du processus d'évaporation, ceux-ci augmentent tandis que les effets d'interfaces diminuent. Une expérience de pesée dynamique dans laquelle la masse de fluide est mesurée au cours du temps corrélée avec une technique optique de reconstitution d'interface permet de calculer le flux surfacique d'évaporation au cours du temps. Cette expérience a mis en évidence l'effet de la ligne triple sur le processus d'évaporation. Celui-ci, défini comme étant un débit massique linéique de changement d'état au niveau de la ligne triple, est quantifié.

Nomenclature

M	masse g	$theo$	théorique
S	surface m^2	z	direction verticale
R_{LT}	rayon tache sèche, m	$t0$	instant initial s
\dot{m}_{im}	débit linéique $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	α	densité surfacique d'évaporation $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
exp	expérimentale		

1. Introduction

Afin d'améliorer la miniaturisation des systèmes thermiques et d'augmenter leurs capacités à dissiper la chaleur, les écoulements diphasiques avec évaporation sont de plus en plus utilisés grâce à leur capacité à extraire une quantité importante d'énergie à température constante. Ces systèmes sont caractérisés par la présence d'une ligne en contact avec trois phases, liquide solide et gaz, au voisinage de laquelle se trouve un film mince, appelé micro-région, où se concentre un fort flux de chaleur engendrant un taux d'évaporation plus important que dans la macro-région, zone macroscopique de raccord avec l'interface. La compréhension du phénomène de changement de phase au niveau de cette ligne de contact s'impose dans une logique d'optimisation de système de refroidissement [1]

Expérimentalement, l'évaporation en microrégion a également été étudiée par [2], [3]. Le profil géométrique de la microrégion est déterminé par interférométrie ce qui leur a permis de valider les prédictions des modèles théoriques associés. Expérimentalement, la mesure des flux de chaleur et des taux d'évaporation de la microrégion soulèvent quelques difficultés à cause de l'aspect microscopique de cette zone. Toutefois, des techniques basées sur la dépendance en température des cristaux liquides (TLC: Thermochromic Liquid Crystals) ont été mises au point [1]. Celles-ci permettent la mesure de la température de façon non intrusive au voisinage de la ligne de contact. La résolution spatiale de cette technique est de $1 \mu m$, taille caractéristique de la microrégion. Cependant cette technique est limitée à des variations en température très faible.

La thermographie infrarouge s'avère être un outil très intéressant pour la mesure du profil de température d'un solide à proximité de la microrégion. Cet outil a été utilisé par [4] afin de mesurer le profil de température en proche ligne triple d'un solide. Ce profil est alors utilisé pour le calcul du flux de chaleur de la microrégion. Dans cette expérience, il est montré que la densité de flux de chaleur est 5 à 6 fois plus importante au niveau de la microrégion qu'au niveau de la région macroscopique.

Les modèles de ligne triple couplant dynamique et changement de phase commencent à voir le jour, toutefois, ceux-ci se basent souvent sur des hypothèses fortes et des paramètres que seule l'expérience peut fournir. Les dimensions microscopiques de la zone d'étude compliquent la tâche de l'expérimentateur et nécessitent du matériel de haute technologie.

2. Protocole expérimental

Afin d'étudier le comportement de la ligne triple sur le problème axisymétrique de film en évaporation présenté dans [5], [6] sur différents substrats, l'expérience suivante a été mise en place (figure 1).

L'expérience consiste à filmer en vue de dessus le processus d'évaporation à l'aide d'une caméra. Une fois créée, la zone sèche apparaît clairement comme un disque qui croît au cours du temps. La ligne triple est donc le périmètre de ce disque. Le rayon de ce disque au cours du temps représente ainsi, la position de la ligne triple au cours du temps. Un algorithme de traitement d'image permet de le détecter afin de traiter automatiquement les séquences d'images.

Le puits d'évaporation est une paille alimentaire de 6 mm de diamètre et de 1 mm de profondeur, considéré comme infiniment fin et très peu capacitif. Celui-ci est déposé sur un substrat en verre.

Le fluide utilisé est du HFE7100. Le volume initial est 25 μl . L'expérience est éclairée par dessus à l'aide d'un écran lumineux monochromatique. La déflexion des rayons lumineux étant différente selon que l'on soit sur le substrat ou sur le film, la tache sèche est clairement mise en évidence. Une caméra noir et blanc de résolution 1280x1024 permet de faire l'acquisition. Parallèlement, une balance METLER Toledo XS 205 Dual Range dont la précision est de 10^{-4} g quantifie en temps réel la masse de fluide restante.

Au cours de l'évaporation l'interface se creuse jusqu'à l'apparition de la zone sèche. C'est le périmètre de ce cercle que nous suivons au cours du temps ainsi que la masse liquide associée.

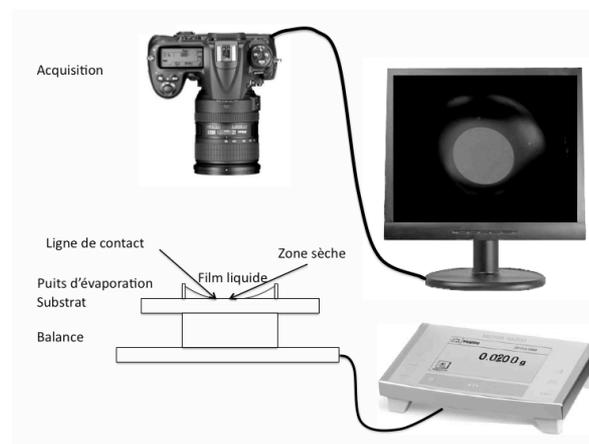


Figure 1 Protocole expérimental

3. Influence de la ligne de contact

Afin d'essayer de mettre en évidence l'influence de la ligne triple sur le processus d'évaporation, nous allons raisonner par l'absurde. Pour ce faire, dans un premier temps, supposons que le débit d'évaporation ne dépend que de la surface de l'interface liquide-gaz. Cela revient à supposer que les phénomènes physiques singuliers de la ligne de contact délimitant la tache sèche n'influencent pas le processus d'évaporation. Nous considérons que la ligne triple située au niveau de la paroi du puits d'évaporation n'a aucun effet sur le processus. En effet, l'énergie mise en jeu pour évaporer la quantité de fluide est de 4,5 joules (chaleur de vaporisation du HFE7100: 125 kJ.kg⁻¹) pour 25 µl (équivalent à 0,38 g). Or la capacité du puits d'évaporation, défini comme étant le produit de la masse du puits et de sa chaleur massique, n'est que de 1e⁻³ J/K. Ainsi, la densité de flux d'évaporation serait constante sur toute la surface de l'interface. Par conséquent, à chaque instant, l'intégrale temporelle et spatiale de cette densité de flux d'évaporation, serait proportionnelle à l'intégrale temporelle de la surface (équation 1). Il nous a semblé plus judicieux de travailler sur la masse plutôt que sur le débit massique car la masse est directement la valeur que l'on mesure.

$$\frac{dM(t)}{dt} = \alpha S(t) \Leftrightarrow M_{theo}(t) = \int_{t_0}^t \frac{dM(u)}{du} du + M(t_0) = \alpha \int_{t_0}^t S(u) du + M(t_0) \quad (1)$$

t_0 : instant initial

L'équation 1 nous permet de calculer une masse théorique appelée par la suite M_{theo} qui correspondrait à la masse instantanée du liquide dans la mesure où la ligne triple n'aurait aucune influence sur l'évaporation. Afin de calculer cette masse, nous allons utiliser une méthode d'inversion optique, décrite dans [6], nous permettant de déterminer la surface de l'interface liquide-gaz à partir de la forme du profil de l'interface. La surface est calculée de façon axisymétrique par l'intégrale suivante :

$$S = \int_0^{2\pi} \int_{R_0}^{R_{max}} r dr d\theta \quad (2)$$

L'algorithme d'inversion [6] nous donne un ensemble de points représentant la valeur du rayon et la hauteur de film associée. Ainsi de manière discrète, le calcul de l'interface se fait par la formule suivante :

$$S = 2\pi \sum_{i=0}^N dS_i \quad \text{avec} \quad dS_i = r_i \sqrt{dz_i^2 + dr_i^2} \quad (3)$$

Ainsi, nous connaissons la surface au cours du temps. Afin d'appliquer l'équation 1, il nous faut déterminer le coefficient de proportionnalité α de cette formule. Pour ce faire, nous faisons une interpolation linéaire de la courbe de masse mesurée avant l'apparition de la ligne triple (figure 2). En effet, avant l'apparition de la zone sèche, la ligne triple centrale n'existe pas. Par conséquent, l'équation 1 semble parfaitement appropriée dans ce cas là. L'interpolation linéaire nous donne le coefficient directeur de la courbe de masse mesurée avant l'apparition de la ligne triple (coefficients directeurs de la droite de la figure 2). Ce coefficient directeur est égal à αS_0 . La connaissance de la surface, S_0 avant la ligne triple nous permet de déterminer α . Les variations de la surface avant l'apparition de la ligne triple sont négligeables.

Une fois que la ligne triple apparaît et donne naissance à une zone sèche, la surface de l'interface, calculée à l'aide de la méthode optique de reconstruction d'interface, décroît. Cette décroissance varie de façon quasiment quadratique par rapport au rayon de la zone sèche. La

décroissance de la surface de l'interface devrait se traduire par une variation de la pente sur la courbe de l'évolution de masse si les effets relatifs à la ligne n'influent pas sur le processus d'évaporation. Désormais, α étant connu, nous pouvons appliquer l'équation 1 à partir des temps correspondant à l'apparition de la ligne triple.

Nous pouvons, dès lors, comparer l'évolution de la masse théorique calculée avec l'équation 1 considérant que l'influence de la ligne triple sur le processus d'évaporation dans cette configuration est négligeable, avec la masse mesurée expérimentalement avec la balance METLER Toledo décrite dans le protocole expérimental.

Cette analyse a été faite pour des substrats de différentes épaisseurs. Un substrat en verre de 3 mm d'épaisseur que l'on qualifiera de substrat épais et un substrat 0,1 mm que l'on appellera substrat mince.

3.1. Substrat épais

La figure 2 illustre la comparaison entre la masse mesurée M_{exp} et la masse théorique M_{theo} décrite précédemment.

Ce graphe montre une différence croissante entre la courbe de masse théorique M_{theo} et la courbe de masse mesurée M_{exp} . Le fait d'obtenir une différence montre que les hypothèses supposant que les effets de lignes triple n'avaient aucune influence sur le processus d'évaporation et que le débit d'évaporation était uniquement proportionnel à la surface de l'interface sont fausses car dans le cas contraire, les courbes devraient se superposer. De plus, le fait que cette différence augmente peut convenablement s'expliquer par l'influence croissante des effets de ligne triple dus à l'augmentation du périmètre de la zone sèche.

Dans la suite, nous allons quantifier la différence qu'il y a entre les deux courbes. Pour ce faire, nous allons créer une nouvelle fonction résultant de la différence entre les points constituant la masse théorique M_{theo} et les points constituant la masse mesurée M_{exp} . Cette fonction appelée ΔM , représente l'évolution de la perte de masse due aux effets de ligne triple. Cette fonction est représentée sur le graphe figure 3 (axe de droite) en fonction de la position de la ligne triple le long du rayon du puits d'évaporation. La dérivée temporelle de cette fonction représente l'évolution du débit de masse due aux effets de ligne triple intégrés sur tout le périmètre de celle-ci. Afin d'obtenir le débit de masse linéique \dot{m}_{lin} dû aux effets de ligne triple, on divise ce débit de masse dû aux effets de ligne triple par le périmètre de celle-ci

$$\dot{m}_{lin}(t) = \frac{d\Delta M(t)}{2\pi R_{LT}(t)} \quad (4)$$

La courbe d'évolution du débit linéique du aux effets de ligne triple \dot{m}_{lin} est représentée sur la figure 3 (axe de gauche) en fonction du rayon de ligne triple.

A présent, nous allons reprendre l'équation 1. Dans cette équation, nous allons ajouter un terme dépendant du périmètre de la ligne triple sur le débit massique d'évaporation. Ce terme est le débit massique linéique moyen \dot{m}_{lin} calculé par l'équation 5 en prenant la valeur numérique moyenne des termes calculés à partir de l'équation 4 multipliée par le périmètre de la ligne triple $R_{LT}(t)$ évoluant au cours du temps. Dans cette équation, N est le nombre de points de mesure de la valeur du rayon de la ligne triple.

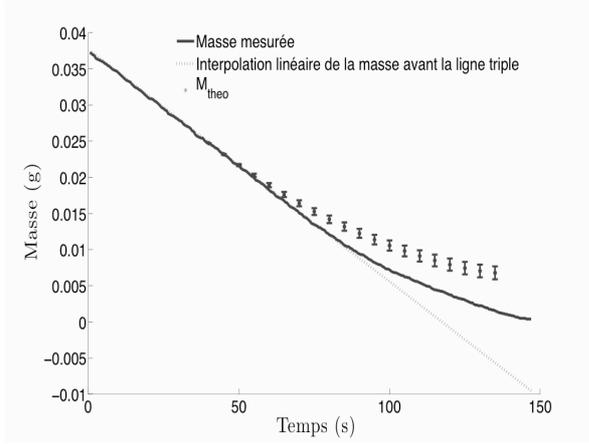


Figure 2 Comparaison masse théorique masse mesurée sans prise en compte d'un flux massique linéique au niveau de la ligne triple

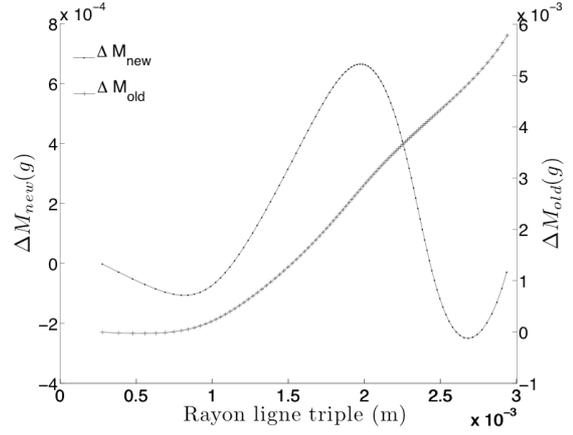


Figure 3 Différence entre la masse théorique et la masse mesurée sans prise en compte des effets de ligne triple (ΔM_{old}) et avec les effets de lignes triples (ΔM_{new})

$$\overline{\dot{m}_{lin}} = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{m}[i]_{lin}}{N} = 5e^{-3} (g.s^{-1}.m^{-1}) \quad (5)$$

Ainsi, l'équation 1 devient :

$$\frac{dM(t)}{dt} = \alpha S(t) + \overline{\dot{m}_{lin}} 2\pi R_{LT}(t) \quad (6)$$

$$M_{theo}(t) = \int_{t_0}^t \frac{dM(u)}{du} du + M(t_0) = \alpha \int_{t_0}^t S(u) du + \overline{\dot{m}_{lin}} 2\pi \int_{t_0}^t R_{LT}(u) du + M(t_0) \quad (7)$$

L'évolution de cette courbe de masse théorique au cours du temps M_{theo} est représentée sur le graphe de la figure 4 avec la courbe de masse mesurée. Cette courbe se superpose très bien à la masse mesurée expérimentalement. Par conséquent, avec un tel substrat, le débit d'évaporation, modélisé comme un terme linéairement dépendant de la surface de l'interface et un autre terme linéairement dépendant du périmètre de la ligne triple, est une bonne approximation.

3.2. Substrat Mince

La même analyse a été faite avec un substrat mince de 0,1 mm d'épaisseur. La figure 4 illustre les résultats. Le substrat mince étant beaucoup moins capacitif, la masse théorique calculée sans prise en compte des effets de ligne triple se superpose nettement mieux. De plus en prenant comme valeur de flux linéique d'évaporation la valeur déterminée dans le cadre de l'expérience avec un substrat épais, la courbe théorique obtenue est fautive.

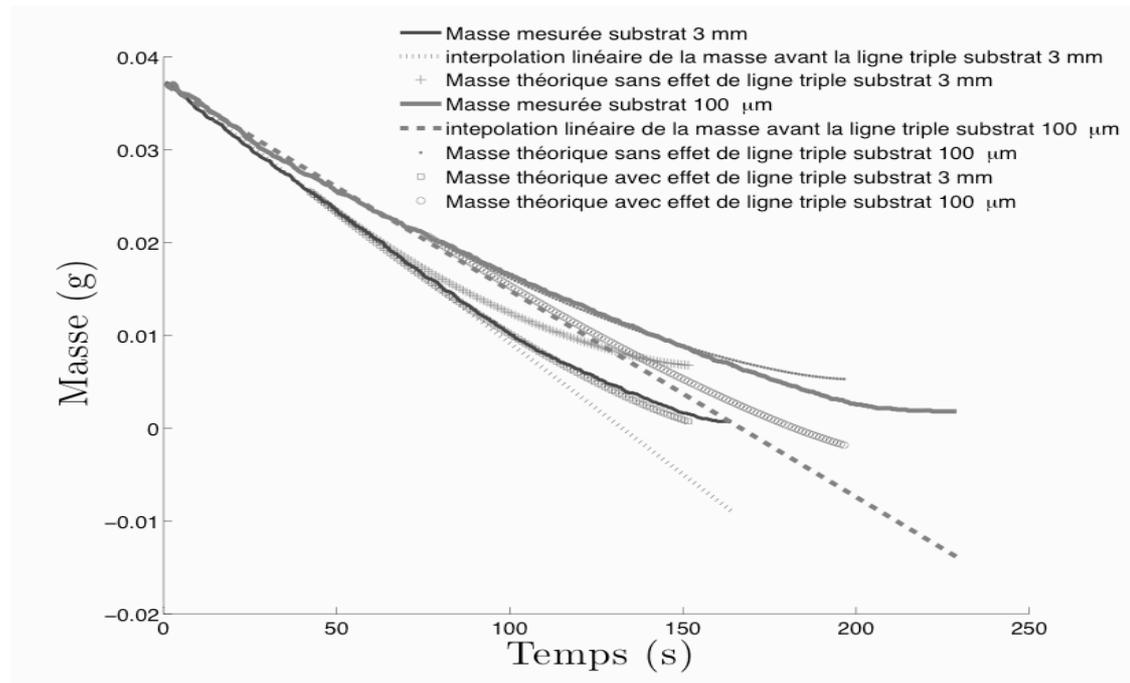


Figure 4 Evolution des masses de fluide au cours du processus d'évaporation pour un substrat de 3 mm et un substrat de 0,1mm

4. Conclusion

Nous avons mis en évidence, dans le cadre de l'évaporation d'un film liquide la contribution de la ligne de contact au processus d'évaporation. Celle-ci est de $5 \text{ mg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ce qui correspond à un flux de chaleur linéique de $0,6 \text{ (W.m}^{-1}\text{)}$. A partir d'un rayon de la zone sèche de 1 mm, cela représente déjà plus de 10% du flux total. Cette proportion croit avec l'évolution de la zone sèche. Toutefois, l'épaisseur du substrat peut jouer un rôle limitant sur le processus d'évaporation et sur la contribution de la ligne triple.

Références

- [1] Höhmann, C. a. (2002). Microscale temperature measurement at an evaporating liquid meniscus}. *Experimental Thermal and Fluid Science* , 157--162..
- [2] Renk, F. a. (1979). An Evaporating Ethanol Meniscus—Part I: Experimental Studies. *Journal of Heat Transfer* , 55.
- [3] Panchamgam, S. a. (2008). 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* , 5368—5379.
- [4] Stephan, K. I.-R. (2010). Experimental investigation of evaporative heat transfer characteristics at the 3-phase contact line. *Experimental Thermal and Fluid Science* , 1036 – 1041.
- [5] S. Guignard, L. L. (2010). An investigation of the transfer at the triple line trough numerical modeling and original experimental measurement. *Proc. 14 Th International Heat Transfer Conference*. Washington DC. USA.
- [6] Tachon L., G. S. (2010). Étude expérimentale de la forme d'une interface au voisinage d'une ligne triple dynamique au cours de l'évaporation d'un film liquide. *Congrès SFT 2010*. Le Touquet.