

Ebullition nucléée sur site isolé : Etude des paramètres morphologiques d'une bulle de vapeur en croissance.

Damien SERRET*, **Stéphan GUIGNARD**, **Lounès TADRIST**

Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels
5 rue Enrico Fermi – 13453 Marseille

*(Auteur correspondant : damien.serret@polytech.univ-mrs.fr)

Résumé - La prédiction du transfert de chaleur durant le changement de phase n'est toujours pas résolu. Une étude de base sur une bulle de vapeur est présentée dans ce manuscrit. De récents travaux ont montré le rôle important de la région de la ligne de contact pour les transferts de chaleur et de masse durant la nucléation d'une bulle de vapeur. Nous présentons nos travaux réalisés dans une cellule de Hele-Shaw permettant l'observation du déplacement de la ligne de contact ainsi que l'évolution de l'angle de contact de la bulle durant sa croissance.

1. Introduction

La compréhension du changement de phase se traduisant par l'ébullition est actuellement aujourd'hui un enjeu dans le but de mieux maîtriser ce type de transfert de chaleur. Pour cela il est nécessaire de changer l'approche, en focalisant les investigations au niveau de la zone de contact de la bulle de vapeur. Dans cette zone se concentre une part très importante des échanges de chaleur et de masse lors de l'ébullition d'un liquide. Dans cette optique de travail, différentes configurations permettant d'étudier plus finement l'ébullition ont été mises en place. L'étude du champ de température au voisinage de la zone de micro région a été réalisée de différentes manières suivant certains auteurs. Henry et al. [1] ont inséré un réseau de micro thermistance sur la paroi chauffante tandis que Stephan [2] a utilisé des cristaux liquide. Golobic et al. [3] mesurent la température de la paroi par caméra infra rouge. Toutes ces méthodes ont pour point commun de mesurer l'impact de la présence de la bulle sur la paroi dans le cas de l'ébullition en vase dans une géométrie tridimensionnelle.

Barthès [4] ainsi que Kenning [5] ont mis en évidence la difficulté d'obtenir des résultats fiables à partir de mesures déduites de vidéos. L'observation de la bulle sur site isolé est en effet perturbée par la déviation des rayons lumineux incidents parallèles à la paroi chauffée. La forme de la bulle est modifiée et une zone d'ombre masque la microrégion. Pour éviter inconvénient, nous avons mis en place un dispositif basé sur le principe de la cellule de Hele-Shaw. Ce type de cellule a permis l'étude de différents phénomènes comme l'effet Marangoni [6], le mélange de deux liquides miscibles [7], ou encore les instabilités de Kelvin Helmholtz [8]. Nous reprenons la configuration de la bulle orientée vers le bas, déjà utilisée au laboratoire, adaptée à une cellule de Hele-Shaw. Dans ce cas la longueur du chemin optique et donc la déviation des rayons lumineux sont réduites. Dans ces conditions, la croissance de la bulle de vapeur sera ainsi maîtrisée du fait de l'orientation de la bulle tout en permettant une observation détaillée de la zone de microrégion.

Nous présentons dans cette communication le dispositif expérimental mis en œuvre. Les résultats obtenus sont ensuite présentés et discutés. Ils concernent l'évolution du volume d'une bulle de vapeur durant sa croissance pour différents niveaux de sous refroidissement. Cette nouvelle configuration nous permet aussi de mettre en évidence le comportement des angles de contact durant un cycle complet de croissance.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental mis en place est composé de différentes parties. Un schéma détaillé de la cellule de test dans laquelle est créée la bulle unique est représenté sur la figure 1.

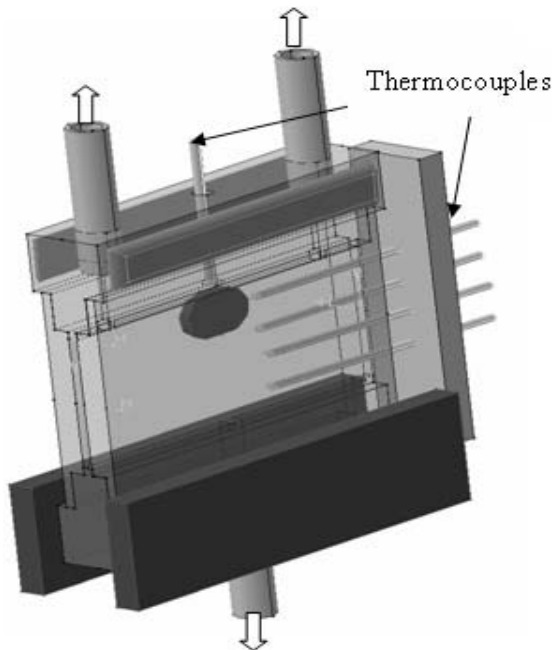


Figure 1 : Schéma de la cellule test

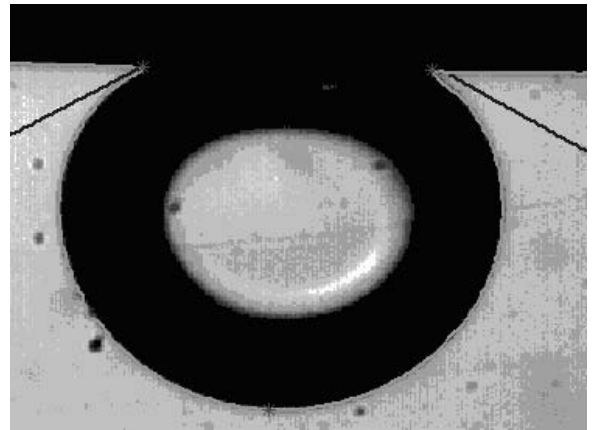


Figure 2 : Exemple d'image traitée

Elle est composée de deux supports d'aluminium. Des résistances chauffantes sont collées sur les deux parois verticales du bloc supérieur pour assurer l'apport de chaleur au fluide. un module à effet Peltier est disposé sur l'élément inférieur dans le but de contrôler la température de la cellule (surchauffe de la paroi et sous refroidissement du liquide). Les grandes parois latérales de la cellule (20 mm de hauteur et 40 mm de largeur), en plexiglas, sont maintenues avec un écart constant de 1mm. La bulle de vapeur est générée sur un site de nucléation au niveau de la paroi inférieure de l'élément chauffant. Ce site de nucléation artificiel est réalisé à l'aide d'un micro foret, sur la paroi préalablement polie miroir. Le diamètre et la profondeur de ce site sont respectivement de 150 μm et 300 μm .

La température est mesurée à l'aide de thermocouple de type T disposés à l'aplomb du site dans la cellule de test afin de connaître le profil de température dans le liquide entre la zone chauffante (partie supérieure) et la partie refroidie (support inférieur). Un thermocouple est placé derrière le site de nucléation dans un trou non débouchant (aucun contact avec le liquide).

La pression est maintenue constante dans la cellule grâce à un vase d'expansion relié en trois points à la cellule de test. Un capteur de pression est placé à chaque orifice de la cellule afin de connaître à tout temps la pression dans la cellule. Les travaux présentés ici ont tous été réalisés à la pression atmosphérique.

Le fluide utilisé est du FC-72 de la société 3M. Lors de chaque campagne de mesure, la cellule est vidée et le liquide est préalablement passé dans un distillateur dont la zone de condensation est ouverte vers l'extérieur afin de permettre l'évacuation des gaz incondensables dissous dans le liquide. Durant l'ensemble des expériences, le thermocouple placé derrière le site de nucléation permet de vérifier les conditions de nucléation de la vapeur.

L'ensemble des acquisitions de température et de pression est faite à l'aide d'une centrale National Instrument (Modèle SCX-1000). Les enregistrements vidéo sont réalisés par une caméra rapide (modèle Photron Fastcam Ultimate 1024). Elle est utilisée à faible fréquence d'acquisition afin d'avoir de longues périodes d'enregistrements (10 secondes) tout en conservant une haute définition. Un algorithme de traitement d'image a été spécialement développé pour cette configuration expérimentale. Le gradient local de chaque image est calculé. Un filtre permet de sélectionner uniquement les pixels à proximité de l'interface. Puis un algorithme de reconstruction linéaire par morceaux permet de reconstruire l'interface de la bulle et de la paroi. Ce traitement permet de localiser précisément la position de la ligne de contact et de calculer le volume de la bulle au cours du temps. Un exemple d'image traitée est présenté sur la figure 2. Les tangentes au point de contact de la bulle ainsi que le contour de la bulle reconstruit sont superposés à l'image d'origine.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Mesure de l'effet mirage

Comme cela a été souligné dans la première partie, les configurations traditionnelles d'étude de l'ébullition nucléée sont sujettes à des déformations d'images dues à la présence d'un gradient d'indice du liquide plus ou moins fort à proximité de la paroi. Dans le cas des configurations inversées, l'effet mirage est le principal inconvénient du fait de l'absence de convection naturelle permettant habituellement d'évacuer une part importante du flux de chaleur (évitant ainsi une surchauffe du liquide à proximité de la paroi).

Proposant ici une nouvelle configuration expérimentale évitant ce désagrément, nous devons vérifier l'absence d'effet mirage. Un élément en plastique dont la forme est parfaitement connue est placé dans la cellule à la place de la bulle. Il s'agit d'un cylindre très fin dont un arc de cercle a été retiré afin d'avoir un angle de contact avec la paroi de 22° . Supposant que le profil de température est linéaire entre le thermocouple le plus proche de la paroi et celui situé derrière le site de nucléation (cela correspond à une minimisation du gradient), on calcule de gradient thermique local à proximité de la paroi. Différents gradients thermiques sont étudiés sur une gamme allant de l'état isotherme à un gradient de 450 K/m. La figure 3 présente l'ensemble des résultats obtenus. Aucune variation significative de l'angle de contact n'est observée compte tenu de l'incertitude de plus ou moins 3° . Dans le cas d'une configuration tridimensionnelle, la variation peut atteindre plusieurs dizaines de degré [4]

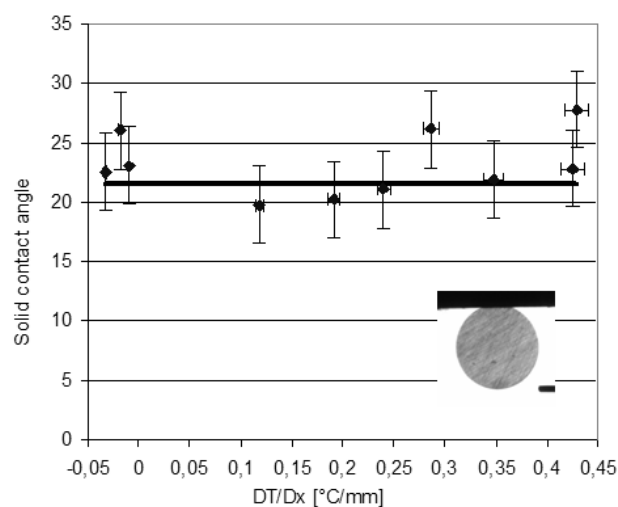


Figure 3 : Influence non quantifiable du gradient thermique sur la mesure de l'angle de contact

3.2. Mesure des grandeurs géométriques

3.2.1. Evolution temporelle de la croissance d'une bulle

Durant l'étude d'une bulle, son volume est calculé sur chaque image. Pour cela, nous utilisons la reconstruction linéaire par morceaux de l'interface associée au théorème d'Ostrogradsky. Durant les premiers pas de temps (tant que la bulle n'a pas atteint les parois latérales), la bulle est tridimensionnelle (révolution axiale autour du site de nucléation). Puis la bulle croît suivant les deux directions libres de la cellule. Pour tenir compte de la troisième direction, nous retirons au calcul du volume la partie liquide de la courbure (de dimension connue) dans la direction de la profondeur de la cellule. Nous ne tiendrons pas compte du film de liquide présent sur les parois latérales transparentes, l'épaisseur de celui-ci étant bien en dessous de l'ordre du micromètre. Ce calcul réalisé en plusieurs étapes permet d'obtenir le volume de la bulle à tout instant. La figure 4 illustre une croissance complète d'une bulle.

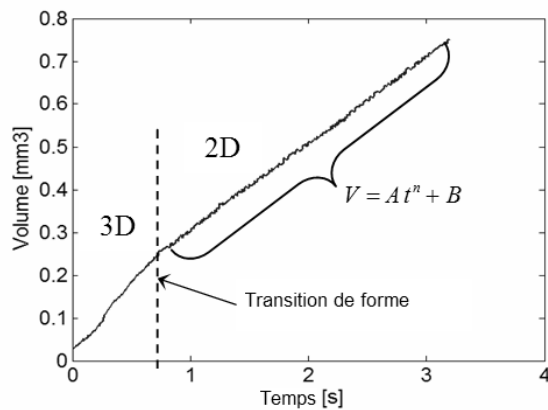


Figure 4 : Exemple d'évolution du volume en fonction du temps

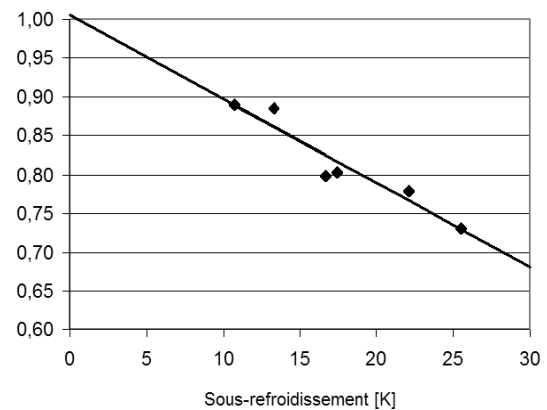


Figure 5 : Influence du sous refroidissement sur l'exposant

Plusieurs conditions expérimentales ont été testées en modifiant le niveau de sous refroidissement. Ce paramètre, plusieurs fois étudié dans une configuration tridimensionnelle, a été choisi dans le but de valider le comportement de la cellule (rôle des parois latérales sur la croissance des bulles). Pour cela, chaque courbe de croissance a été approximée par une fonction puissance du temps. La figure 5 présente les valeurs de l'exposant pour différents niveaux de sous refroidissement.

Il est à noter qu'une régression linéaire passe par une ordonnée à l'origine proche de 1. Or cette valeur correspond au cas d'une croissance purement diffusif dans le cas d'une bulle dans un liquide surchauffé.

3.2.2. Evolution temporelle de l'angle de contact

La figure 3 montrant l'absence d'effet mirage donc de différence entre l'angle observé et l'angle réel, il est à présent intéressant d'étudier l'évolution temporelle de l'angle de contact de la bulle de vapeur durant sa croissance et parallèlement à cela, le comportement des autres caractéristiques morphologiques de la bulle (sa hauteur, sa base). L'angle dit macroscopique dans la littérature est calculé en utilisant la tangente de l'interface de la bulle, au point de contact. Les différentes valeurs des angles à gauche et à droite de la bulle prises au court du temps sont reportées sur la figure 6. Sur la même figure est reportée l'évolution temporelle de la base et de la hauteur de la bulle.

La croissance de la bulle peut être décrite en trois phases. Il y a tout d'abord une phase très courte durant laquelle la bulle sort du site de nucléation. L'angle décroît donc très rapidement alors que la base de la bulle reste quasi-constante et la hauteur augmente aussi rapidement. Cette phase a lieu jusqu'à ce que l'angle de contact atteigne un seuil situé à 45° durant laquelle la bulle continue à croître uniquement vers le haut. Puis il y a une transition entre ce seuil et une valeur limite de l'angle de contact qui s'accompagne d'un détachement du point de contact du site de nucléation. Durant cette dernière phase, la vitesse de la ligne de contact est constante. Il est à noter que cette valeur d'angle limite est indépendante du sous refroidissement.

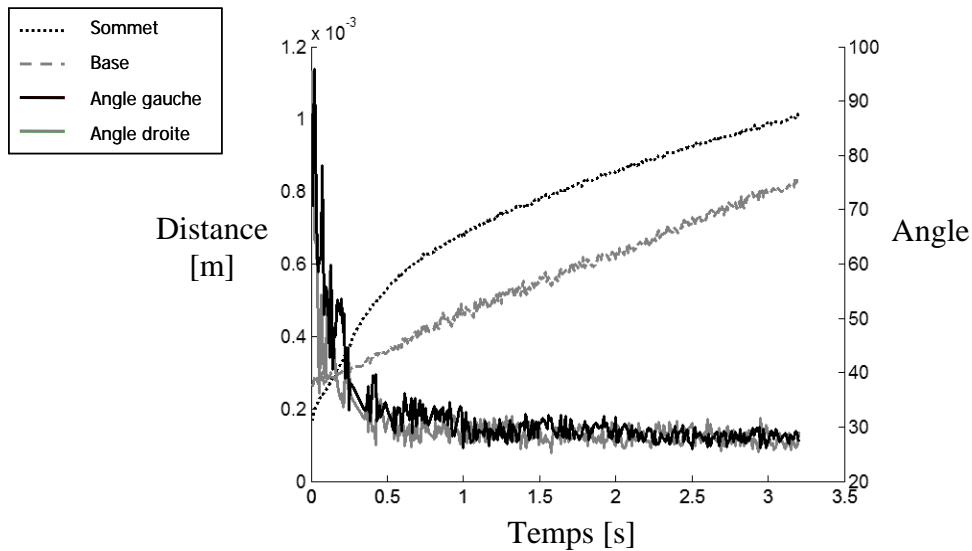


Figure 6 : Evolution temporelle des différentes grandeurs morphologiques d'une bulle

4. Conclusion

Nous avons présenté les premiers résultats d'une étude expérimentale portant sur une bulle de vapeur créée sur un support chauffant muni d'un site de nucléation unique dans une cellule de Hele-Shaw. Cette nouvelle configuration expérimentale nous a permis de réaliser la première mesure dynamique d'un angle de contact d'une bulle. La méthode utilisée a été validée au préalable afin de mesurer avec certitude l'angle de contact. Une amélioration de la méthode est toutefois en cours afin de limiter le bruit sur la mesure de l'angle. Nous entreprenons actuellement des mesures par interférométrie afin de mesurer le champ de température dans le liquide autour de la bulle durant sa croissance.

Références

1. C.D. Henry. and J. Kim, A study of the effects of heater size, subcooling, and gravity level on pool boiling heat transfer. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2004. **25**(2): p. 262-273.
2. P. Stephan and J. Kern, Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2004. **25**.
3. I. Golobic et al., Experimental determination of transient wall temperature distributions close to growing vapor bubbles. *Heat and Mass Transfer*, 2007.
4. M. Barthès, *Ebullition sur site isolé : étude expérimentale de la croissance d'une bulle et des transferts associés*, in *Transfert de chaleur et de masse*. 2006, IUSTI: Marseille.
5. D.B.R Kenning, Optical studies of boiling heat transfer: insights and limitations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2004. **25**(2): p. 209-222.
6. P. Arlabosse, *Etude des transferts de chaleur et de masse par effet Marangoni: application à la compréhension du mécanisme de l'ébullition en apesanteur*, in *IUSTI*. 1997, Université de Provence: Marseille.
7. J. Mainhagu et al., Measurement by Laser Induced Fluorescence on miscible density driven flows in a Hele-Shaw cell: settings and preliminary results. *Comptes Rendus Mécanique*, 2007. **335**(2): p. 105-112.
8. L. Meignin et al., Subcritical Kelvin-Helmholtz Instability in a Hele-Shaw Cell. *Physical Review Letters*, 2003. **90**(23): p. 234502.

Remerciements :

Les auteurs remercient l'Agence Spatiale Européenne et le Centre National d'étude Spatial pour leur soutien financier.