

Condensation de vapeur d'eau dans un microcanal. Applications : pile à combustible et refroidisseurs miniatures.

A. ODAYMET¹, B. MECHERI¹, H. LOUAHLIA-GUALOUS¹, H. EL KHATIB²

¹FEMTO ST /LPMO/ CNRS-UMR 6174, UTBM, FC LAB, 13 rue Thierry Mieg, 90010 Belfort, France.

²Centre Universitaire de Technologie, B.P. 722, Tripoli, Liban.

Résumé - Cette étude porte sur les différents régimes d'écoulement lors de la condensation dans un tube miniature. Le but visé est d'analyser un cycle de condensation de la vapeur d'eau et de caractériser les vitesses de déplacement des ménisques et des différentes bulles. Ceci permet de repérer les zones d'apparition des instabilités hydrodynamiques et les vagues interfaciales qui sont les principales causes de bouchon dans les échangeurs compacts et les piles à combustible. Les évolutions locales de l'épaisseur du condensat sont déterminées et analysées.

Nomenclature

D_h diamètre hydraulique, m

L longueur occupée par la vapeur de l'écoulement annulaire, m

t temps de déplacement en s

V vitesse, $m.s^{-1}$

Z position axiale, m

Symboles grecs

δ épaisseur du film, m

Indices et exposants

c capillaire

b bulle

m ménisque

1. Introduction

La condensation dans des micro-canaux est utilisée dans différentes applications, en particulier, le refroidissement des composants électroniques et le conditionnement d'air dans l'automobile. Des études ont été entreprises pour établir des cartes d'écoulement diphasique et analyser le transfert thermique dans des mini/micro-canaux [1-5]. Plusieurs études sont menées dans le cas des écoulements diphasiques avec changement de phase dans des macro-canaux. La plupart de ces études sont particulièrement concentrées sur les différents régimes d'écoulement et leurs transitions ainsi que les lois de transfert thermique et les pertes de pression. Des cartes des différents modes d'écoulement diphasique obtenues en fonction des vitesses superficielles de chaque phase, sont publiées [6-8]. Dans le cas des canaux miniatures ($D_h < 1$ mm), le modèle d'écoulement et les lignes de transition ainsi que les lois de transfert sont modifiées.

Dans cet article, on présente une analyse locale de la condensation de vapeur d'eau dans un microcanal. Le régime d'écoulement est cyclique. L'analyse temporelle des longueurs de condensation et du phénomène de coalescence est effectuée en utilisant une procédure de traitement d'images.

2. Dispositif et procédure expérimentale

Le banc d'essais expérimental (Figure 1a) se compose d'un circuit ouvert constitué d'une source de vapeur, des vannes de réglage de débit de vapeur, d'un minicondenseur expérimental représentant la section d'essais (Figure 1b), et d'un second minicondenseur. Ce dernier permet de condenser la vapeur restante à la sortie de la section d'essais. Une balance de précision 0,01g est utilisée pour mesurer le débit massique condensé. La pression de la

vapeur à l'entrée de la section d'essais est mesurée par un capteur de pression à déformation de membrane. La section d'essais présentée sur la figure 2 est composée d'un mini-tube transparent de diamètre 780 μm et de longueur 66 mm. Le minitube présente à l'entrée un convergent de diamètre 3 mm et de longueur 9 mm. Il est inséré dans un tube transparent de diamètre 10 mm dans lequel circule de l'eau de refroidissement en contre courant par rapport à l'écoulement de la vapeur d'eau dans le minitube. Les températures d'entrée et de sortie du fluide de refroidissement sont mesurées par des microthermocouples afin d'évaluer la puissance de refroidissement. Le débit de l'eau de refroidissement est mesuré à l'aide d'un débitmètre. Un système d'acquisition de données Labview est utilisé pour enregistrer toutes les mesures de la température pour chaque expérience.

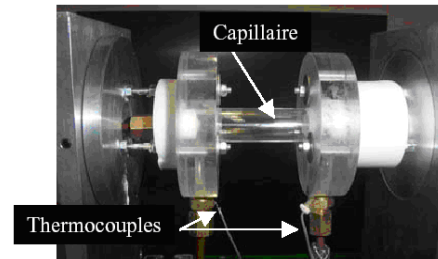
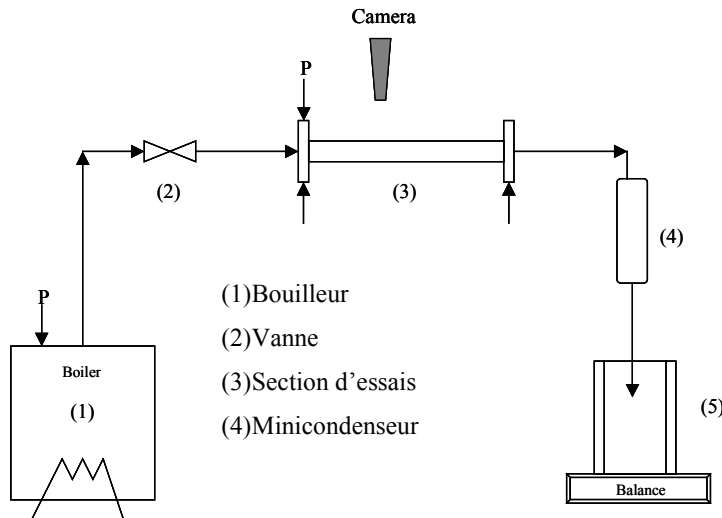


Figure 1a. Banc d'essais expérimental

Figure 1b. Section d'essais

La puissance de refroidissement, la température de saturation et la pression de la vapeur à l'entrée du canal sont imposées pour chaque expérience. Une caméra rapide CCD avec une résolution de 512x480 pixels permet d'enregistrer les images de l'écoulement diphasique dans le capillaire. L'écoulement du condensat à la sortie de la section d'essais est à la pression atmosphérique. On a observé différents modes d'écoulements diphasiques à l'intérieur du minitube transparent en changeant soit la puissance de refroidissement, soit le débit massique total de la vapeur.

Avant chaque expérience, le bouilleur est déchargé afin d'évacuer les gaz non condensables. Tous les résultats ont été obtenus en utilisant de la vapeur pure d'eau distillée. Pendant les expériences, différentes structures d'écoulement diphasique sont identifiées pour différentes conditions expérimentales. La pression et la température de vapeur, le débit massique total sont commandés à l'admission du canal, et la pression d'entrée de la vapeur diminue en réduisant le débit de la vapeur. La puissance de refroidissement est imposée pendant les expériences en ajustant le débit d'eau et la température d'admission de l'eau.

3. Résultats et discussions

3.1. Visualisation des structures d'écoulement

Les principaux facteurs influençant les différents régimes d'écoulement proviennent essentiellement de la puissance de refroidissement, du débit de la vapeur imposé à l'entrée du

canal et de la pression d'entrée de la vapeur. Grâce à une caméra rapide CCD, réglée à une vitesse d'acquisition de 125 images/seconde, nous avons filmé et visualisé différents modes d'écoulement. Ces écoulements sont instationnaires, périodiques et sont principalement composés d'un écoulement annulaire à l'entrée du canal suivi d'un écoulement à bulles. La figure 4 montre un exemple d'images filmées et traitées pour extraire le contour du film liquide. Cet écoulement est obtenu pour une pression d'admission de 82,6 kPa, une température de la vapeur de 99,2°C et une puissance de refroidissement de 23,51W. Le débit total de la vapeur mesuré après condensation est de 0,028g/s correspondant à une vitesse moyenne de la vapeur de 9,4 m/s.

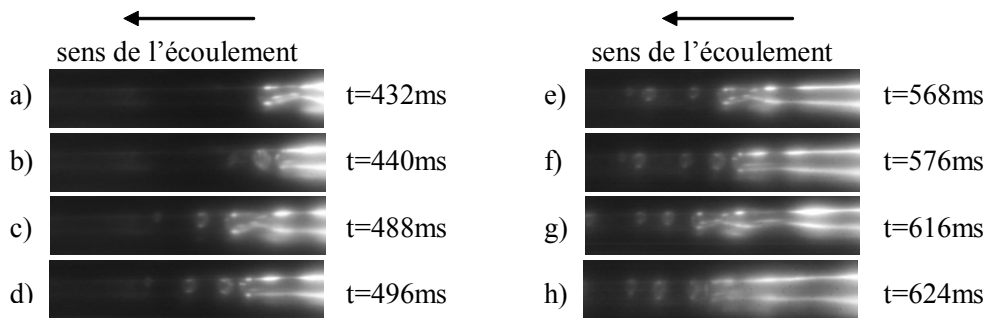


Figure 2 – Exemple d'images filmées.

A l'entrée du canal, l'écoulement diphasique est annulaire (figure 2). La vapeur au centre occupe la quasi-totalité du tube avec un microfilm de condensat s'écoulant le long de la circonférence interne du minitube. L'écoulement annulaire est caractérisé par une vitesse de la vapeur prépondérante par rapport à celle du film liquide. A la fin de cet écoulement annulaire, on visualise une production de bulles dues aux phénomènes d'instabilités hydrodynamiques. Ces bulles apparaissent d'une manière successive et ensuite s'évacuent vers la sortie du canal en se condensant. La longueur de l'écoulement annulaire augmente au cours du temps à cause de l'arrivée de la vapeur. A chaque détachement de bulle, la longueur occupée par la vapeur de l'écoulement annulaire diminue. La longueur de détachement augmente avec le temps. Dans certains cas, la succession de plusieurs bulles entraîne une variation de la pression entre l'entrée et la sortie du canal qui fait varier la vitesse du ménisque et celles des bulles au cours du temps.

Le détachement des bulles se produit suite à la formation des vagues à l'interface liquide-vapeur dont l'amplitude augmente au cours du temps à cause de l'accumulation du condensat. Dans ce cas, le régime d'écoulement est stratifié ondulé. Ce régime apparaît en général à des vitesses élevées, pour lesquelles des composantes turbulentes de la vitesse qui pouvaient entraîner la naissance des vagues interfaciales bidimensionnelles ou tridimensionnelles. La fin de la longueur de la zone diphasique est clairement délimitée par un ménisque dont la forme est quasiment sphérique.

3.2. Cycle de l'écoulement diphasique

La figure 3 montre un exemple de traitement d'une image où on extrait le cycle de l'écoulement de la vapeur en condensation. Ce cycle représente le parcours temporel du ménisque de l'écoulement annulaire (noté par Z_m) et de celui de chaque bulle produite. Ce parcours est défini par la longueur de déplacement mesurée à partir de l'entrée du canal. La courbe présentée en figure 3 montre trois périodes de l'écoulement. Chaque période est caractérisée par une production d'un nombre de bulles sphériques numéroté dans chaque

cycle. Le parcours de chaque bulle suivant l'axe du tube est représenté dans la figure 3. Durant le deuxième cycle, on a remarqué le phénomène de coalescence des bulles 5 et 6. A la fin de chaque cycle, une brusque diminution des longueurs de l'écoulement annulaire représentant un mouvement de retour partiel de la vapeur injectée vers l'entrée du capillaire.

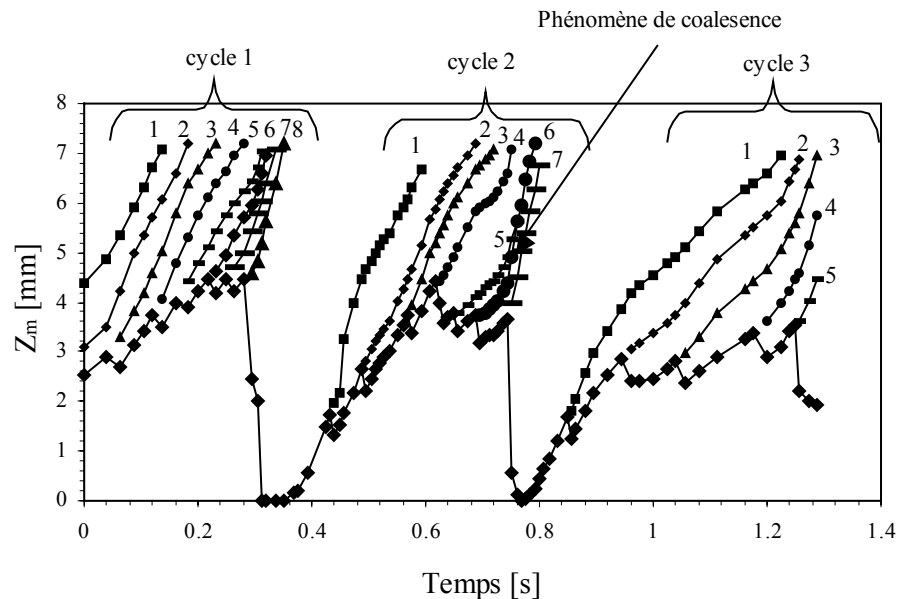


Figure 3 : Cycle de l'écoulement diphasique.

3.2.1 Vitesse de déplacement du ménisque et phénomène de coalescence de bulles

La vitesse de déplacement du ménisque est définie par la variation de l'abscisse du ménisque Z_m par rapport au temps ($V=dZ_m/dt$). Elle est déduite des résultats présentés sur la figure 3. Dans le cas de l'écoulement annulaire (Figure 4a), la vitesse axiale de déplacement du ménisque varie au cours du temps. Elle atteint des valeurs maximales au moment du détachement de la dernière bulle de chaque cycle qui est suivie d'un mouvement de retour de la vapeur vers l'entrée du canal. La vitesse de déplacement du ménisque de l'écoulement annulaire est en moyenne égale à 30 mm/s.

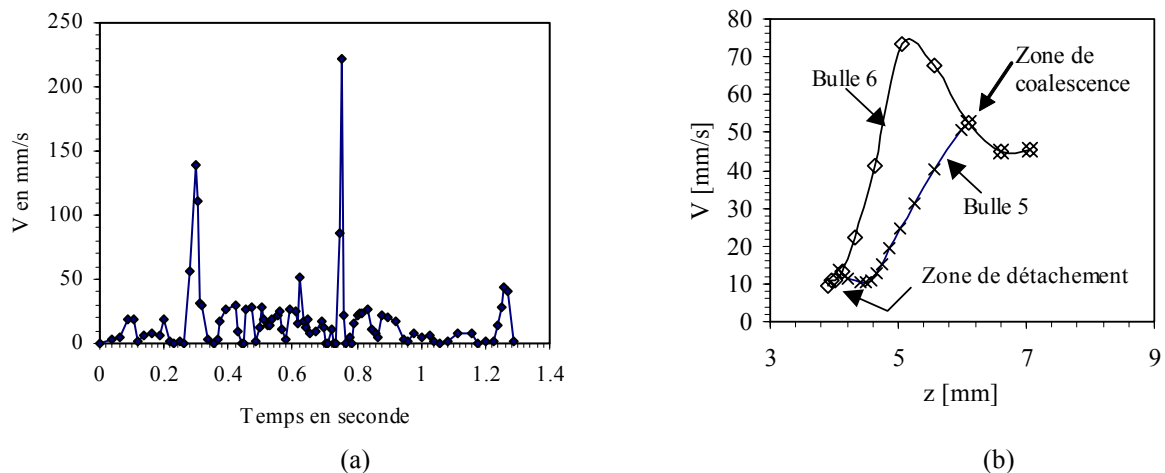


Figure 4 : Vitesse du ménisque : (a) bulles, (b) écoulement annulaire.

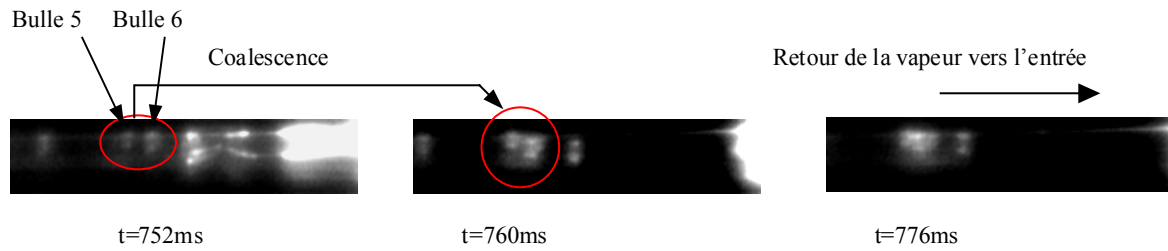


Figure 5 – Phénomène de coalescence entre deux bulles

La vitesse de déplacement des bulles est déterminée en suivant la même procédure. Dans ce travail, on s'est intéressé à la détermination de la vitesse de déplacement de deux bulles avant et après leur coalescence (figure 4b). En effet, la coalescence est un phénomène dans lequel deux bulles de vapeur fusionnent pour donner naissance à une seule bulle. Ce phénomène est observé au cours de notre étude entre deux bulles parcourant le canal (images présentées en figure 5). Dans notre cas, ce phénomène est favorisé par le mouvement de retour de l'écoulement annulaire vers l'entrée du canal et par un ralentissement de la vitesse d'avancement des bulles se déplaçant vers la sortie du canal (figure 4b). Cette figure montre que les deux bulles se détachent à la même vitesse. La bulle 5 se déplace dans le canal à une vitesse inférieure à celle de la bulle 6 car sa taille est plus petite que celle de la bulle 6 à cause de la condensation de la vapeur. Ensuite, la bulle 6 subit un ralentissement dû à la formation d'une vague au niveau de l'écoulement annulaire ; donnant naissance à une autre bulle à $t = 760$ ms. En effet, ce ralentissement a rapproché les bulles et a favorisé leur coalescence.

3.2.2 Epaisseur du condensat

En condensation, le paramètre local le plus intéressant à mesurer est l'épaisseur du film liquide car c'est un paramètre principal nécessaire à l'explication et à la prédiction locale des coefficients d'échange thermique locaux. La figure 6 montre l'évolution de l'épaisseur de condensat déterminée par traitement d'image filmée à $t = 456$ ms où l'écoulement est annulaire avec présence de bulles. On remarque que l'écoulement diphasique n'est pas axisymétrique. Dans le cas de l'écoulement annulaire, on a présence du phénomène de stratification car l'épaisseur du film liquide est plus importante sur la partie inférieure du canal que sur la partie supérieure. En général, ce phénomène apparaît dans le cas de la condensation à l'intérieur d'un canal horizontal, quand l'effet des forces de gravité devient non négligeable par rapport à celui des forces de frottement interfaciales. En régime d'écoulement stratifié, le condensat formé sur la partie supérieure du canal, ruisselle autour de la surface d'échange sous l'effet des forces de gravité et s'accumule sur la partie inférieure du canal. Dans le cas où les forces de frottement à l'interface liquide-vapeur ne suffiraient pas pour évacuer axialement le condensat, ce dernier peut s'accumuler dans la partie inférieure et former des bouchons.

Dans la zone annulaire, on remarque une déformation de la surface du film (\approx vague interfaciale) qui est due à une augmentation des forces de cisaillement entre les deux phases. L'amplitude de ces vagues augmente au cours du temps et conduit à une diminution de la vitesse interfaciale liquide dans le sens de l'écoulement de la vapeur. Ceci entraîne une instabilité hydrodynamique menant à la formation et au détachement de bulles sphériques. Ces bulles se déplacent dans le canal à proximité de la partie supérieure du canal à cause des forces de flottabilité. Ce phénomène est mis en évidence par la figure 6 qui montre que l'épaisseur de condensat est beaucoup plus importante dans la partie inférieure du canal que dans la partie supérieure.

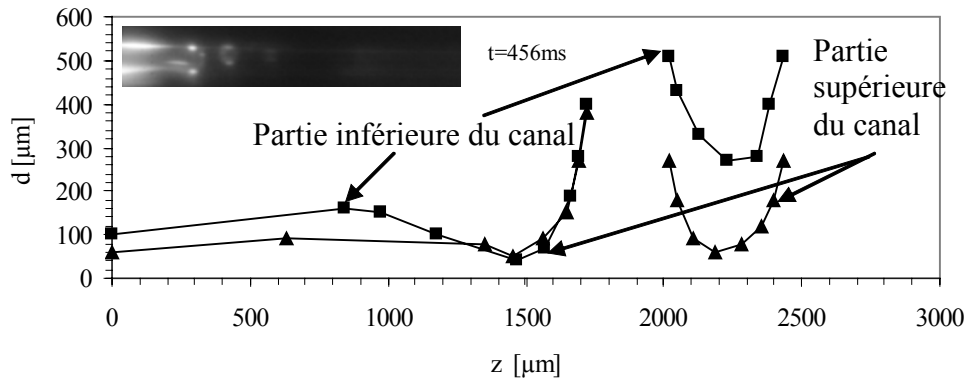


Figure 6 : Comparaison des épaisseurs de film : écoulement annulaire / bulles sphériques.

4. Conclusion

L'étude de la condensation dans des micro-canaux est une préoccupation majeure de plusieurs chercheurs. Dans cette communication, on a présenté des exemples de résultats d'analyse d'écoulement de vapeur d'eau en condensation dans un microcanal. On montre que le taux de condensation affecte la vitesse de déplacement du ménisque de l'écoulement annulaire ainsi que le nombre de bulles détachées, leurs tailles, leurs fréquences, etc. A partir des résultats d'analyse, on montre la présence du phénomène de stratification dans le cas de la condensation dans un microcanal. Le phénomène de coalescence entre deux bulles est mis en évidence par une analyse des vitesses de déplacement des bulles.

Références

- [1] B. Médéric, M. Miscovic, V. Platel, P. Lavielle, J.-L. Joly, Experimental study of flow characteristics during condensation in narrow channels: the influence of the diameter channel on structure patterns. *ELSEVIER, Superlattices and Microstructures* 35 (2004) 573–586.
- [2] B. Médéric, H. Louahli-Gualous, P. Lavielle, M. Miscovic, Modélisation des transferts de chaleur et de masse lors de la condensation en régime capillaire, Congrès Français de Thermique, SFT 2006, Tome 1, pp 75-80 Île de Ré, 2006.
- [3] Garimella S., Condensation flow mechanisms in micro-channels: basis for pressure drop and heat transfer models. *Heat Transfer Engineering*, vol. 25 (3), pp. 104-116 (2004).
- [4] H. Louahli-Gualous, B. Micherie, Unsteady steam condensation flow patterns inside a miniature tube, *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, pp. 1225-1235.
- [5] M. Kawaji, P.M.-Y. Chung, Unique characteristics of adiabatic gas-liquid flow in microchannels: diameter and shape effects on flow patterns, void fraction and pressure drop, in: S.G. Kandlikar, G.P. Celata, S. Nishio, P. Stephan, B. Thonon (Eds.), *Proceedings of the First International Conference on Mini and Microchannels*, American Society of Mechanical Engineers, Rochester, NY, 2003, pp. 115-127.
- [6] Begg E, Khrustalev D, Faghri A., Complete condensation of forced convection two-phase flow in a miniature tube. *J. of Heat Transfer, ASME*. 123, pp. 904-915, 1999.
- [7] El Hajal J., Thome J.R. Cavallini A., Condensation in horizontal tubes, part 1 : two-phase flow pattern map, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 3349-3363, 2003.
- [8] J. W. Coleman and S. Garimella, Characterization of Two-phase Flow Patterns in Small Diameter Round and Rectangular Tubes," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 42 (15): 2869-2881, 1999.
- [9] Y. Taitel, A.E. Dukler, A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, *AIChE* 22 (1) (1976) 47-55.