

Transfert thermique local en condensation dans un microcanal de section carrée.

Ahmad ODAYMET, Hasna LOUAHLIA-GUALOUS, Valérie PETRINI

FEMTO ST/FCLAB, CNRS UMR 6174
UTBM, Batiment F, 13 rue Thierry Mieg, 90010 Belfort.

Résumé – Cet article présente les résultats d'études simultanées de visualisation et de mesures expérimentales menées afin d'étudier les différents régimes d'écoulement de condensation de la vapeur d'eau dans un microcanal gravé sur silicium. Différents régimes d'écoulement sont identifiés. Nous avons constaté l'apparition alternative d'écoulements diphasiques formés de bulles et d'écoulement annulaire, dans un cycle répétitif. Nous avons déterminé les vitesses des bulles apparaissant pour différents régimes d'écoulement. La taille et la fréquence des bulles sont déterminées par une procédure de traitement d'images.

1. INTRODUCTION

La condensation en microcanaux a reçu une grande attention en raison de ses larges domaines d'applications, en particulier : les microsystemes de refroidissement pour l'électronique et les échangeurs compacts à microcanaux utilisés dans les systèmes de climatisation, la réfrigération et aussi dans l'automobile. Les performances énergétiques des échangeurs à microcanaux sont fortement liées à la structure de l'écoulement diphasique. De ce fait les températures des fluides et des surfaces des microcanaux dépendent des régimes d'écoulement formés par condensation.

Dans la littérature, plusieurs études sont menées sur la condensation en microcanaux et sur la visualisation des structures des écoulements diphasiques [1-4]. Dans ce papier, nous avons retenu la classification des microcanaux, minicanaux et macrocanaux définie par Cheng et al. [5] en se basant sur le nombre de Bond (noté par Bo_d). Les microcanaux ont un nombre de Bond inférieur à 0,05. Au delà de cette valeur, les minicanaux sont définis pour des nombres de Bond compris entre 0,05 et 3 et les macro-canaux pour Bod supérieur à 3. L'avantage de cette classification est qu'elle prend en considération l'effet de la température, de la pression et des propriétés thermophysiques du fluide caloporteur. Le nombre de Bond mesure la prédominance des forces de flottabilité par rapport à celles de tension superficielle. Il est défini par le rapport du diamètre hydraulique (D_h) et de la longueur capillaire (L_c) :

$$Bo_d = (D_h / L_c)^2 \quad (1)$$

La longueur capillaire est définie en fonction de la tension superficielle (σ), des masses volumiques liquide (ρ_L), vapeur (ρ_v) et de la pesanteur (g) :

$$L_c = \sqrt{\sigma / (\rho_L - \rho_v)g} \quad (2)$$

Dans notre cas, la longueur capillaire est de 2,7mm et pour un diamètre hydraulique de 305 μ m, le nombre de Bond est de 0,012.

Dans cet article, on s'intéresse à l'étude des transferts thermiques de la condensation dans un seul micro-canal de diamètre hydraulique 305 μ m. L'étude de la condensation dans un seul microcanal est avantageuse par rapport à celle dans un réseau de plusieurs microcanaux parallèles car elle permet d'effectuer des essais à débit massique, à température et à une pression d'entrée contrôlés et connus. Aussi, la puissance de refroidissement dissipée uniquement dans le microcanal peut être mesurée. Dans le cadre de ce travail, nous avons effectué des visualisations des régimes d'écoulement avec une caméra rapide et des mesures

de températures et de densités de flux aux moyens de microthermocouples en fils réalisés dans notre laboratoire.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La figure 1 présente le schéma de principe du banc d'essais expérimental qui se compose d'un circuit ouvert constitué d'un générateur de vapeur, de vannes de réglage du débit de vapeur, d'un micro-condenseur expérimental représentant la section d'essais, et d'un second minicondenseur qui permet de condenser la vapeur restante à la sortie de la section d'essais. Une vanne de purge permet de dégazer l'air se trouvant dans le générateur de vapeur et la vanne de réglage sert à régler le débit envoyé dans le circuit et aussi à dégazer l'air qui peut être piégé dans le circuit.

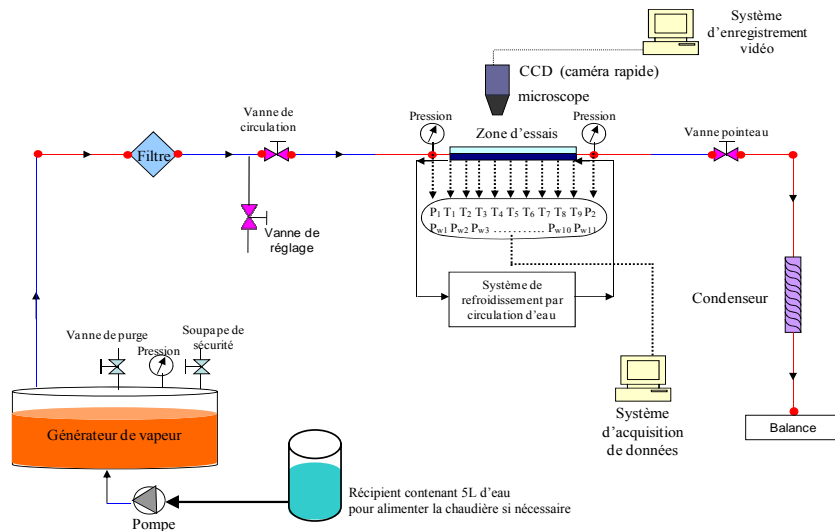


Figure 1 : schéma de principe du banc d'essais expérimental.

Une balance de précision 0,01g est utilisée pour mesurer le débit massique total de la vapeur après condensation. Un capteur de pression à déformation de membrane dont le temps de réponse est inférieur à 1 ms est placé pour mesurer la pression à l'entrée de la section d'essais. La plaque d'essais est composée d'un micro-canal de section carrée et de longueur 50 mm. Ce dispositif est installé sur une plaque en laiton refroidie par un écoulement d'eau comme le montre la figure 2a. La circulation du fluide de refroidissement et de la vapeur dans le microcanal est en contre courant. Les températures d'entrée et de sortie du fluide de refroidissement sont mesurées au moyen de microthermocouples chromel-alumel de taille 75 μm . L'instrumentation du microcanal est faite au moyen de microthermocouples chromel-alumel de 20 μm de diamètre permettant de mesurer la température de surface. Ces thermocouples sont insérés dans des rainures pratiquées dans le silicium et placées perpendiculairement au sens de l'écoulement dans le microcanal à 30 μm de la surface (figure 2b). Ces derniers permettent de déterminer le flux de chaleur local par la loi de Fourier avec une incertitude de 3% estimée en supposant une erreur de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ sur la mesure de températures par μ thermocouple. L'espacement longitudinal de deux microthermocouples, insérés à la même hauteur, est de 8mm (ceux dans les rainures du microcanal et ceux dans l'ailette). Au cours des essais, le microcanal est éclairé par une source de lumière froide, SCHOTT KL 2500 LCD utilisant deux bras en fibre optique. Cette lumière n'affecte pas l'échange thermique qui s'effectue au niveau du microcanal. Une caméra rapide, GIGAVIEW

pouvant détecter jusqu'à 16000 images/secondes est utilisée pour visualiser les différents régimes d'écoulement identifiés.



Figure 2. Section d'essais expérimental : (a) Section d'essais, (b) Instrumentation du microcanal par des microthermocouples.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. STRUCTURE DES ECOULEMENTS OBSERVES

Les deux structures d'écoulements couramment observées sont l'écoulement à bulles allongées avec des bouchons de liquide et l'écoulement annulaire avec production continue de bulles sous une forme sensiblement sphérique. La figure 3 présente deux images montrant ces deux types de structures d'écoulement obtenues dans le microcanal pour des débits de $104 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ (figure 3a) et de $50 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ (figure 3b). Dans les deux images les écoulements de la vapeur et du condensat s'effectuent de la gauche vers la droite. La figure 3a montre que l'écoulement diphasique à l'entrée du microcanal est un écoulement mixte constitué de vapeur et de microgouttelettes. Ensuite, on a formation d'un micro film liquide sur la surface du canal. L'épaisseur de ce microfilm augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entrée du canal à cause de la condensation de la vapeur et des forces de frottement interfaciales à la paroi qui retient le liquide et amortissent l'écoulement. Ces forces entraînent une différence de vitesses à l'interface liquide-vapeur ; ceci favorise la formation de vagues interfaciales. L'augmentation de l'amplitude de ces vagues au cours du temps réduit le diamètre de l'écoulement vapeur occupant la partie centrale du microcanal et provoque son étranglement ainsi que l'éjection d'une bulle de vapeur. Cette dernière est poussée vers la sortie du canal en suivant le sens de l'écoulement de la vapeur et du condensat. Au fur et à mesure que les bulles sont produites, la distance les séparant (occupée par le liquide) est réduite comme le montre la figure 3a. Ceci favorise en effet le phénomène de coalescence des bulles entre elles et la formation de bulles confinées à proximité de la sortie du microcanal.

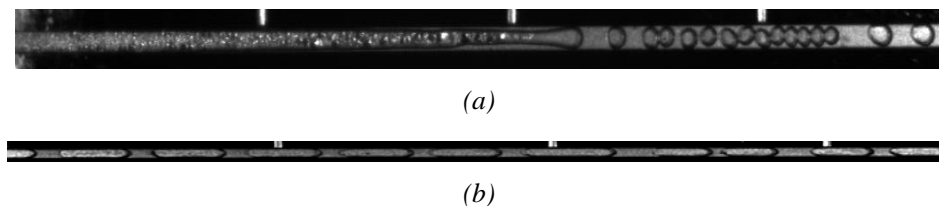


Figure 3 : Structure de l'écoulement en microcanal : (a) écoulement annulaire/bulles, (b) écoulement à bulles et à bouchons.

La figure 3b montre le second régime d'écoulement identifié à faible débit de vapeur à l'entrée du microcanal. L'écoulement est constitué tout au long du microcanal par une

succession de bulles allongées emmagasinant une masse de liquide entre elles. Les bulles se déplacent de la gauche vers la droite où se trouve la sortie du microcanal en entraînant avec elles le liquide résultant de la condensation de la vapeur à l'interface de ces bulles. Le déplacement des bulles dans le microcanal est gouverné par les forces de tension superficielle, de pression et de frottement à la paroi.

3.2. ECOULEMENT A BOUCHONS

La figure 4a présente un exemple d'images vidéo obtenues pour l'écoulement à bouchons pour une température de saturation de 108°C et une pression de la vapeur à l'entrée de 1,4 bars. Par une procédure de traitement d'images développée dans le cadre de cette étude, nous avons représenté sur la figure 4b, le parcours de sept bulles dans le microcanal en fonction du temps. On constate que toutes les bulles ont le même parcours. Sur cette même figure, on remarque un changement de la valeur de la pente du parcours à un instant de temps qui est approximativement de 450ms. Ceci induit forcément à un changement de vitesse des bulles à ce même instant. Aussi, nous pouvons constater à partir des allures des parcours, qu'à chaque instant, toutes les bulles dans le microcanal s'écoulent approximativement à la même vitesse et que la vitesse des bulles varie au cours du temps. Ceci est illustré par la figure 5 dans laquelle on a représenté le parcours et la vitesse de la bulle 7 uniquement pour plus de lisibilité. Les mêmes allures de vitesse et du parcours présentées en figure 5 sont obtenues pour les autres bulles.

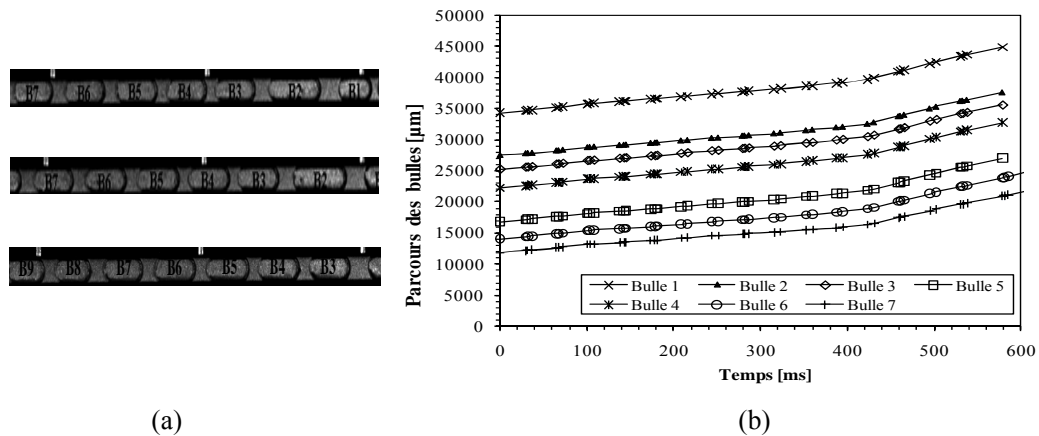


Figure 4 : Ecoulement à bouchons : (a) images de l'écoulement, (b) parcours des bulles.

La vitesse des bulles représente la dérivée de leurs parcours par rapport au temps. Pour chaque instant, la vitesse de chaque bulle est calculée par le rapport de la variation de son déplacement divisée par le pas du temps. La vitesse de la bulle a une allure variable au cours du temps car elle est fortement influencé la fréquence de sortie des bulles et des bouchons. Aussi, nous avons constaté que la diminution de la vitesse de la bulle présentée à la figure 5 est due à la phase de départ d'un bouchon liquide du microcanal qui dure environ 260 ms et qui quitte complètement le microcanal à $t=900$ ms approximativement. En effet, dès que le bouchon liquide débute sa sortie du microcanal, il bouche la sortie du microcanal et augmente une résistance qui s'oppose à l'arrivée d'autres bulles dans le microcanal. Aussitôt que la sortie du microcanal est vide, aussitôt la vitesse des bulles ré-augmente et le cycle recommence. Il est fort possible que la formation des instabilités hydrodynamiques à l'entrée du microcanal contribue à la variation de la vitesse locale des bulles.

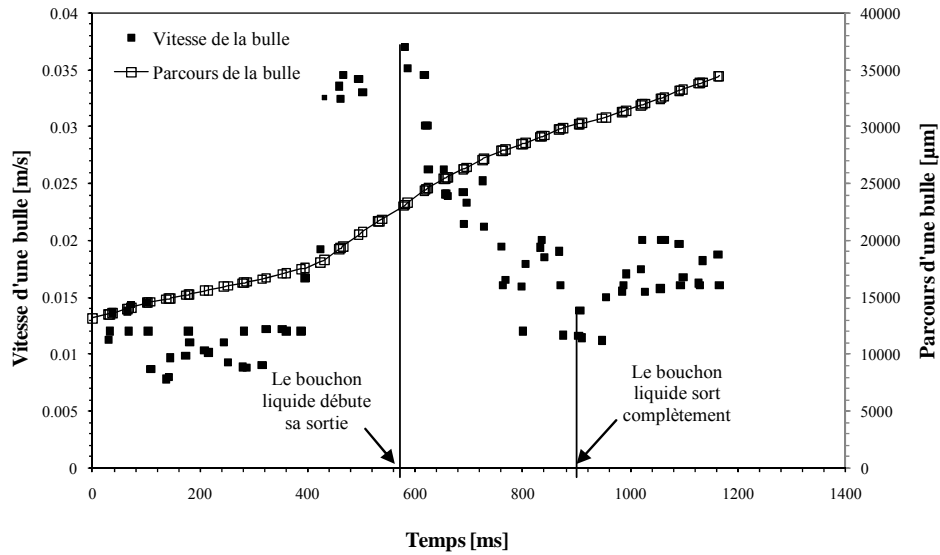


Figure 5 : Ecoulement à bouchons : vitesse et parcours de la bulle 7.

La figure 6a présente l'allure de la température mesurée par les microthermocouples insérés dans les rainures en silicium. L'écoulement en condensation dans le microcanal est à bulles et bouchons liquides. La figure 6b montre la densité de flux thermique dissipée à la surface du microcanal tout au long du microcanal et le coefficient d'échange thermique déduit de cette densité de flux et de l'écart entre les températures de la surface du microcanal et celle de la vapeur à l'entrée du microcanal. L'incertitude sur le coefficient d'échange thermique h est estimé à 5% en supposant une erreur de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ sur la mesure de température par μ thermocouple.

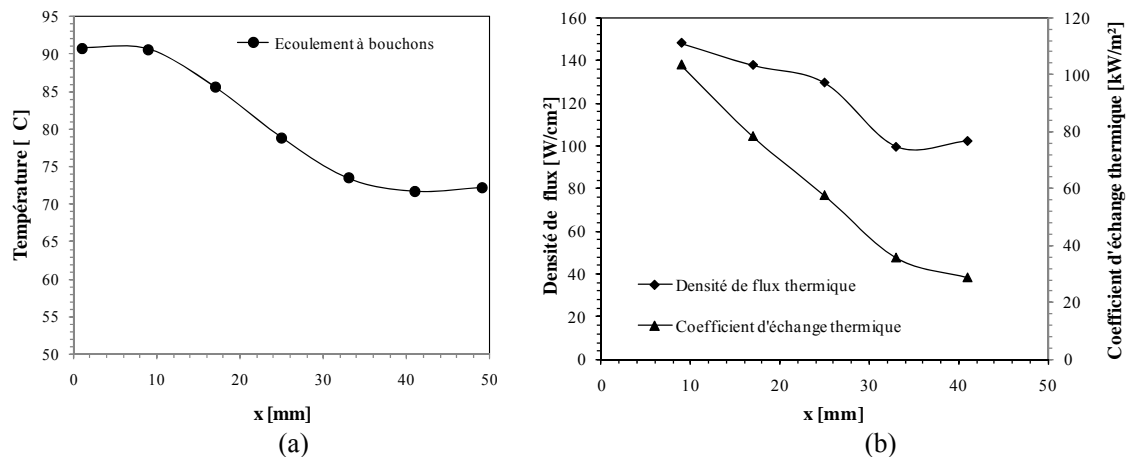


Figure 6 : Ecoulement à bouchons : (a) température locale, (b) densité de flux et coefficient d'échange thermique locaux.

3.3. ECOULEMENT ANNULAIRE ET A BULLES

A fin de mettre en évidence l'effet de la structure de l'écoulement sur les performances thermiques du microcondenseur, nous avons mesuré la température du microcanal tout au long de l'écoulement (figure 7a). On montre que la température varie très faiblement vers l'entrée du microcanal dans une zone de 30 à 35mm occupée par l'écoulement annulaire. Au delà de cette zone ($x > 35\text{mm}$), la température diminue fortement car la structure de

l'écoulement diphasique passe d'une structure annulaire à une structures à bulles séparées par du liquide (figure 2a). Aussi, en suivant la même procédure décrite précédemment, nous avons déterminé les densités de flux thermiques locales et nous en avons déduits les coefficients d'échange thermiques (figure 7b). La densité de flux thermique dissipée est sensiblement uniforme dans la zone où l'écoulement est annulaire et elle diminue fortement dans celle où l'écoulement est à bulles.

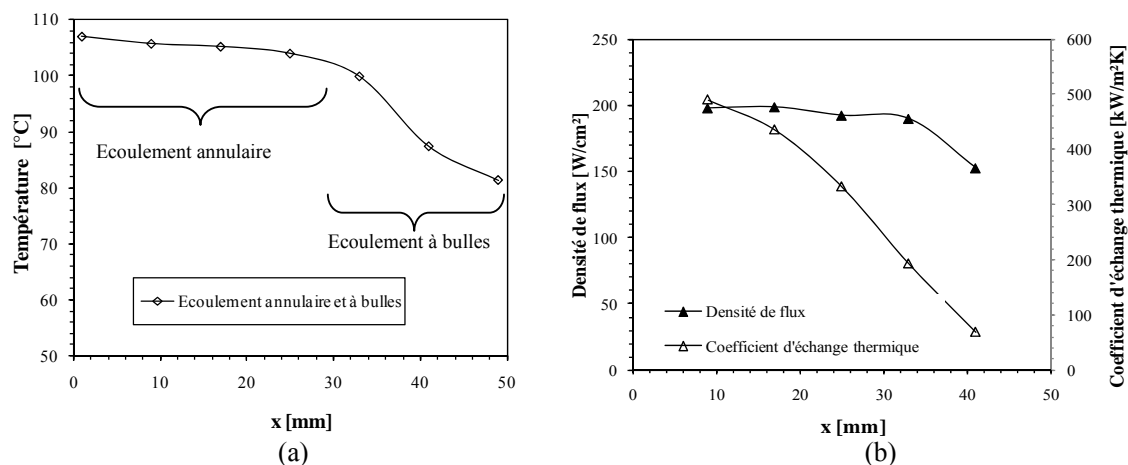


Figure 7 : Ecoulement annulaire et à bulles : (a) température locale, (b) densité de flux thermique et coefficient d'échange thermique locaux.

4. Conclusion

La condensation de la vapeur d'eau dans un microcanal de section carrée est analysée par des procédures simultanées de mesures thermiques et de visualisation des écoulements. On montre qu'au même instant, les vitesses des bulles dans le microcanal sont sensiblement les mêmes pour toutes les bulles occupants le microcanal. L'évolution temporelle de la vitesse de chaque bulle dépend du temps. La température local du microcanal dépend de la structure de l'écoulement diphasique. Elle est plus importante pour l'écoulement annulaire que pour l'écoulement à bulles et à bouchons. La densité de flux thermique dissipée pour l'écoulement annulaire est plus importante que pour l'écoulement à bouchons de liquides empêchant le transfert de chaleur entre la vapeur et le liquide de refroidissement.

Références

- [1] S. Garimella, Condensation flow mechanisms in microchannels: basis for pressure drop and heat transfer models, in: Proc. of the First International Conference on Microchannels and Minichannels, Rochester, New York, USA, April 21–23, 2003, pp.181–192.
- [2] H.Y. Wu, P. Cheng, Condensation flow patterns in silicon micro channels, Int. J. Heat Mass Transfer 48 (2005) 2186–2197.
- [3] W.W.W. Wang, T.D. Radcliff, R.N. Christensen, A condensation heat transfer correlation for millimeter scale tubing with flow regime transition, Exp. Thermal Fluid Sci. 26 (2002) 473–485.
- [4] Y.P. Chen, P. Cheng, Condensation of steam in silicon microchannels, Int. Commun. Heat and Mass Transfer 32 (2005)
- [5] X.J. Quan, P. Cheng, H.Y. Wu, Transition from annular flow to plug/slug flow in coindensation of steam in microchannels, Int. J. Heat Mass Transfer 51 (2008) 707–716.