



HAL
open science

Etude d'un écoulement cyclique à bouchon lors de la condensation dans un microcanal

Ahmad Odaymet, Hasna Louahlia-Gualous, Valérie Petrini, Jean-Claude Jeannot,
Michel de Labachellerie

► **To cite this version:**

Ahmad Odaymet, Hasna Louahlia-Gualous, Valérie Petrini, Jean-Claude Jeannot, Michel de Labachellerie. Etude d'un écoulement cyclique à bouchon lors de la condensation dans un microcanal. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. <hal-03390776>

HAL Id: hal-03390776

<https://hal.science/hal-03390776v1>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Etude d'un écoulement cyclique à bouchons lors de la condensation dans un microcanal

A. K. Odaymet, H. Louahlia-Gualous, V. Petrini, J.C. Jeannot, M. De Labachellerie

Institut FEMTO ST, département MN2S, CNRS UMR 6174
Institut FCLAB, UTBM, Batiment F, rue Thiery Mieg, 90010 Belfort.

Résumé :

Dans ce papier, on présente les résultats d'une étude d'analyse d'un écoulement à bouchon visualisé lors de la condensation de la vapeur d'eau dans un microcanal. Le microcanal est de section rectangulaire et gravé dans un wafer en silicium. On présente la fréquence de production des bulles durant le cycle de l'écoulement. La vitesse et la taille de deux bulles présentes en amont et en aval d'un bouchon liquide sont analysées.

Abstract :

This paper presents the experimental results of slug flow that was visualized during condensation of water vapor inside a silicon microchannel. The section of the microchannel is rectangular. The bubble production frequency for repeated slug pattern is presented. The measurements of bubbles velocities, their sizes were analyzed for two elongated bubbles.

Mots clefs : condensation, microcanal, écoulement à bouchon, fréquence, bulles.

1 Introduction

La condensation en microcanaux a reçu une grande attention en raison de ses larges domaines d'application, en particulier : les micro-échangeurs de chaleur et les piles à combustible. Cependant, les performances énergétiques des systèmes sont considérablement réduites à cause des problèmes liés aux phénomènes d'instabilités hydrodynamiques et de présence de bouchons. L'étude de ces phénomènes nécessite une analyse physique des différents régimes d'écoulement en condensation en microcanaux.

La classification des microcanaux, minicanaux et macrocanaux est définie en fonction du nombre de Bond [1] : (i) les micro-canaux : $Bo \leq 0,05$, (ii) les mini-canaux : $0,05 < Bo \leq 3$ et les macro-canaux si le nombre de Bond dépasse 3. Le nombre de Bond prend en considération l'effet de la température, la pression et les propriétés thermophysiques du fluide caloporteur. Il est défini par le carré du rapport du diamètre hydraulique et de la longueur capillaire (L_c). Cette dernière est définie par l'équation suivante :

$$L_c = \left(\frac{\sigma}{(\rho_L - \rho_v)g} \right)^{1/2}$$

Le nombre de Bond mesure la prédominance des forces de flottabilité sur celles de tension superficielle. Dans notre cas, le nombre de Bond est égal à 0,033.

On relève dans la littérature l'étude expérimentale de Coleman et Garimella [2] sur le mécanisme des écoulements en condensation dans des capillaires de différentes sections de passage. Quatre différents types d'écoulement ont été identifiés tels que l'écoulement intermittent, l'écoulement stratifié, l'écoulement annulaire et l'écoulement dispersé. Kalman [3,4] a visualisé la diminution de la taille des bulles en condensation dans des liquides miscibles et des liquides non miscibles. Louahlia-Gualous et Mécheri [5] ont étudié expérimentalement la condensation de vapeur d'eau dans un capillaire transparent. En faisant varier la pression d'entrée et le taux de refroidissement, l'écoulement annulaire, l'écoulement stratifié, l'écoulement à bulles allongées et à bulles sphériques ont été observés. Toutes ces études concernent principalement des écoulements en condensation dans des micro-canaux en verre ou en métal.

Les micro-condenseurs fabriqués avec la technologie des MEMS sont compatibles avec les systèmes électroniques. Ainsi, les condenseurs à base de silicium attirent de nombreux scientifiques et plusieurs travaux de recherche sont faits dans le domaine. Wu et Cheng [6] ont étudié les régimes d'écoulement en

condensation dans des micro-canaux en silicium de section trapézoïdale. La vapeur d'eau est utilisée comme fluide de travail. Différents régimes d'écoulement ont été observés tels que le régime à gouttelettes-annulaire-injection-bouchon, le régime annulaire-injection-bouchon, un écoulement de vapeur avec des gouttelettes ou des bouchons liquides. Hu et Chao [7] ont identifié cinq régimes d'écoulement lors de la condensation de la vapeur d'eau dans des micro-canaux en silicium dont le diamètre hydraulique est variable de 73 à 237 μm . Le régime d'écoulement stratifié avec formation de bulles s'est avéré être le régime d'écoulement dominant. Dans la majorité des études publiées dans la littérature, la condensation est étudiée dans plusieurs micro-canaux parallèles et de même diamètre hydraulique. Dans ce cas, seul le débit total est mesuré et le débit de vapeur et celui du condensat dans chaque microcanal n'est ni contrôlé, ni mesuré précisément. Ceci fut l'une des raisons qui a motivée notre étude sur la condensation dans un seul microcanal en silicium.

Dans cet article, on présente les résultats d'une étude expérimentale sur la condensation dans un seul microcanal de section rectangulaire et de diamètre hydraulique 410,5 μm . La longueur d'étude du microcanal est de 50 mm. Nous avons effectué des visualisations des régimes d'écoulement avec une caméra rapide, des mesures de températures aux moyens de micro-thermocouples et aussi des traitements d'images d'écoulements.

1.1 Dispositif expérimental

La figure 1 présente le schéma de principe du banc d'essais expérimental qui se compose d'un circuit ouvert comportant un générateur de vapeur, des vannes de réglage de débit de la vapeur, d'un micro-condenseur expérimental représentant la section d'essais, et d'un second minicondenseur. Ce dernier permet de condenser la vapeur restante à la sortie de la section d'essais. Ceci nous permet de mesurer le débit massique total à l'entrée du microcanal. Une balance de précision 0,01g est utilisée pour mesurer le débit massique total de la vapeur après condensation. La perte de charge dans le microcanal est mesurée par deux capteurs de pression à déformation de membrane dont le temps de réponse est inférieur à 1 ms.

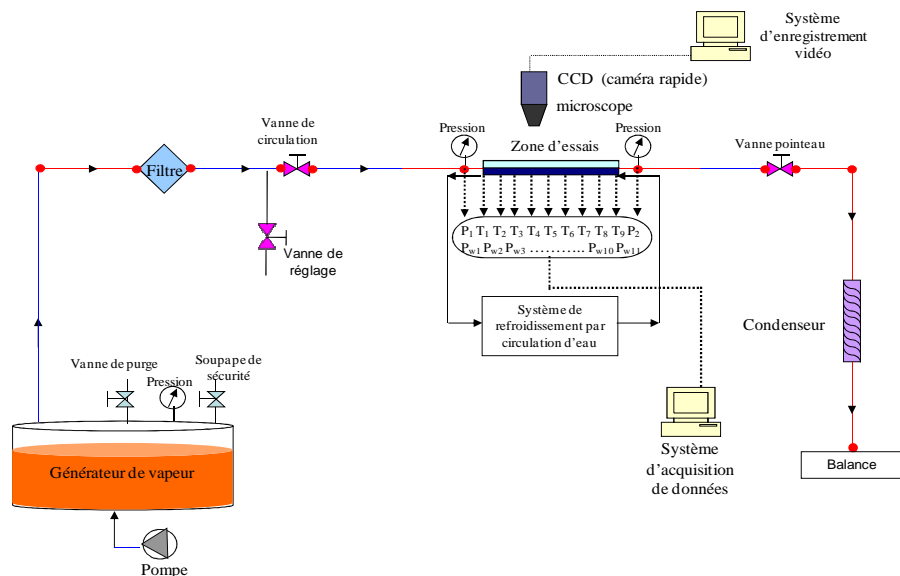


FIG. 1 : Schéma de principe du banc d'essais expérimental.

La section d'essais est composée d'un micro-canal de section rectangulaire, de largeur 600 μm , de profondeur 312 μm et de longueur 50 mm (figure 2a). Ce microcanal est disposé en contact direct avec une ailette en laiton de largeur 2 mm et refroidie par un écoulement d'eau (figures 2b et 2c). La circulation du fluide de refroidissement et celle de la vapeur dans le microcanal sont à contre courant. Les températures d'entrée et de sortie du fluide de refroidissement sont mesurées au moyen de microthermocouples chromel-alumel de taille 50 μm . L'instrumentation du microcanal est faite au moyen de microthermocouples type K de taille 20 μm . Ces microthermocouples sont placés dans des microrainures disposées perpendiculairement à l'axe du microcanal. Ils sont insérés à proximité du microcanal entre le silicium et le pyrex. La figure 2d présente la disposition des microthermocouples suivant la longueur du microcanal. Au cours des essais, le micro-canal est éclairé par une source de lumière froide 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 10000 images/seconde, est utilisée pour filmer les différents régimes d'écoulement identifiés.

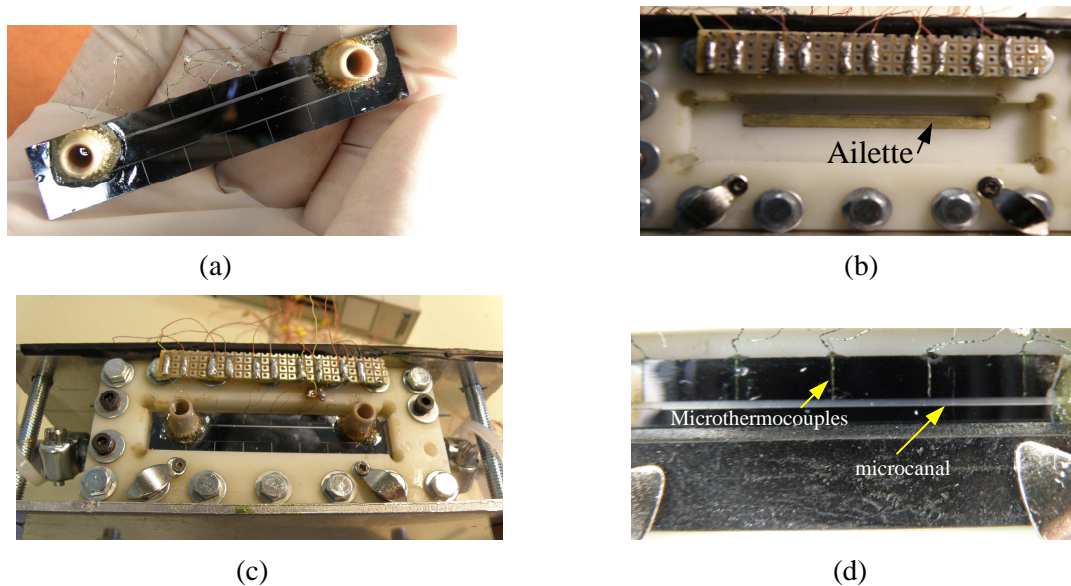


FIG. 2 : Section d'essais : (a) microcanal en silicium, (b) ailette de refroidissement, (c) système assemblé : microcanal et refroidisseur, (d) locations des microthermocouples.

2 Résultats et discussions

Avant de commencer les essais, le générateur de vapeur est mis sous tension. Dès que la pression du système atteint une valeur supérieure à la pression atmosphérique, on effectue une purge du système afin d'évacuer la quantité d'air présente dans le générateur. On dispose d'un pressostat pour régler la pression et d'une vanne de réglage du débit de la vapeur à la sortie du générateur.

2.1 Structure et fréquence d'écoulement cyclique

Nous avons effectué une première série d'essais sur la condensation en microcanal. Différents régimes d'écoulement sont observés et dépendent essentiellement de la puissance de refroidissement qui contrôle le taux de condensation, de la pression d'admission, ainsi que du débit massique de la vapeur à l'entrée du microcanal qui définit la vitesse de la phase vapeur. Nous avons relevé dans un premier temps les évolutions des températures de surface du microcanal pour un écoulement à bouchons (figure 3b). Ceci est obtenu à l'aide des microthermocouples placés à proximité de la surface du microcanal. La figure 3a montre les différentes locations des microthermocouples suivant la longueur du microcanal. Les résultats des températures pariétales obtenus ont mis en évidence l'effet de la structure de l'écoulement sur la variation de la température de la surface et aussi la présence d'écoulements diphasiques à caractères cycliques.

Nous avons ensuite effectué d'autres série d'essais en utilisant une caméra rapide pour visualiser et enregistrer le régime d'écoulement et vérifier sa périodicité. La figure 4a présente un exemple de régime d'écoulement observé pour une température d'entrée de la vapeur d'eau de 102°C et une pression d'entrée de 1,007 bar. La pression de sortie du microcanal étant maintenue constante est égale à la pression atmosphérique. L'écoulement de la vapeur s'effectue de la gauche vers la droite. Le flux massique total de la vapeur mesuré après condensation totale est de 21,37 kg/m².s. La température de sortie du condensat est de 38°C. L'écoulement diphasique est un écoulement cyclique à bulles allongées qui peut être généralement obtenu pour des écoulements de faible débit de vapeur d'eau. Le cycle d'écoulement débute par un écoulement annulaire sans production de bulles. Après environ 50 à 70ms, cet écoulement annulaire se transforme en écoulement à bulles allongées. Les premières bulles allongées sont produites à une fréquence comprise entre 14 Hz et 18 Hz. Ensuite, la fréquence diminue brusquement à partir de la formation de la cinquième bulle qui a une fréquence comprise entre 1,4 Hz et 5,6 Hz. On a remarqué que la fréquence de

production de bulles diminue à chaque fois que 2 à 3 bulles allongées sont produites. La fréquence de production de la dernière bulle allongée, avant la fin du cycle, est souvent supérieure à la fréquence de formation de la bulle d'avant. La durée de chaque cycle est en moyenne d'environ 8900ms. Ceci à cause des bouchons liquides qui amortissent l'écoulement diphasique.

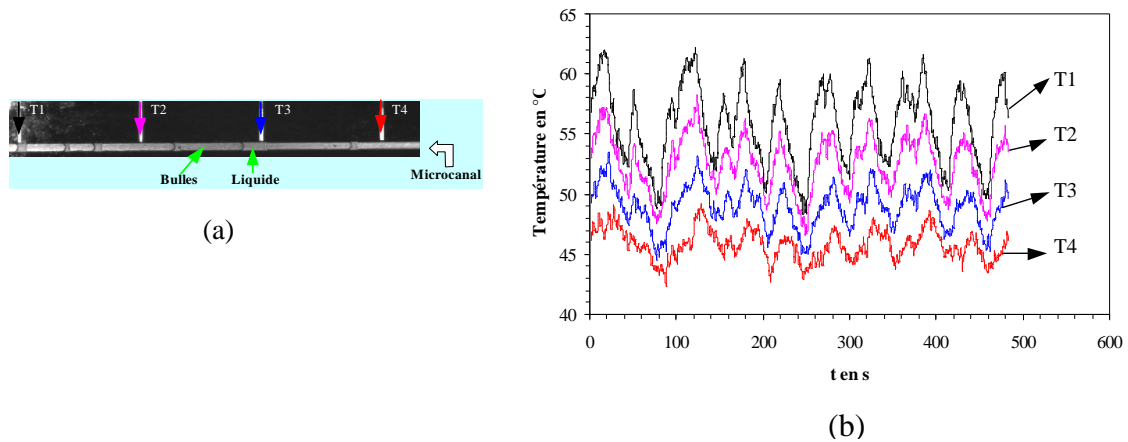


FIG. 3 : (a) Locations des microthermocouples dans la microcanal, (b) Températures de surface du microcanal.

Nous avons déterminé la fréquence d'apparition de chaque bulle à l'entrée du microcanal. Ceci est fait à partir d'un logiciel de traitement d'images qui nous a permis d'avoir le temps (t_b) que met chaque bulle allongée pour apparaître dans sa totalité à l'entrée du microcanal. Ce temps est défini à partir de l'instant où le ménisque de la bulle apparaît dans le microcanal jusqu'à l'instant d'apparition de l'interface arrière de la bulle. La fréquence spécifique à chaque bulle est définie par :

$$f_b = \frac{1}{t_b} \text{ en Hz}$$

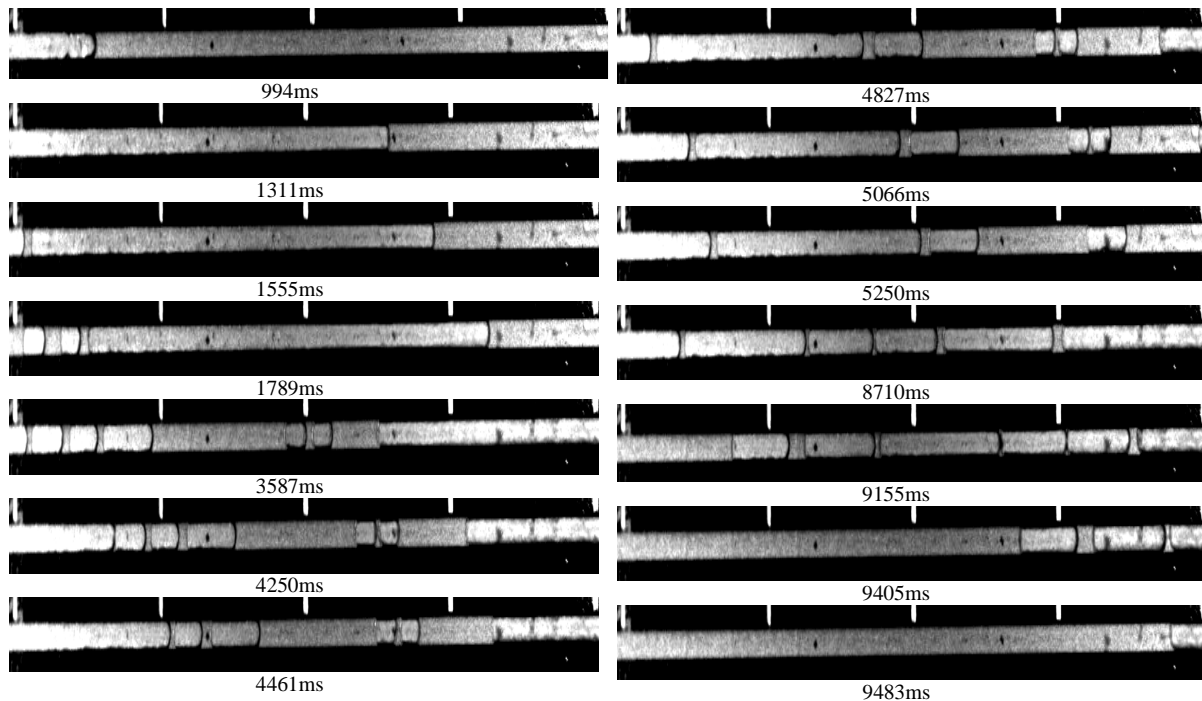


FIG. 4a : Exemple d'un cycle d'écoulement à bulles allongées.

La figure 4b montre l'allure de la fréquence f_b de chaque bulle au cours du temps pour 2 cycles d'écoulements enregistrés dans leur totalité. La durée de chaque cycle est d'environ 10s. Le début et la fin de chaque cycle sont marqués par une fréquence de bulles qui est maximale. Ceci est dû au fait qu'à cet instant, toute la longueur du canal ne contient aucune bulle. L'écoulement dans le canal étant monophasique dans

sa totalité. Dans ce cas, les bulles produites au début de chaque cycle ont des longueurs maximales en les comparant aux autres bulles qui les succèdent.

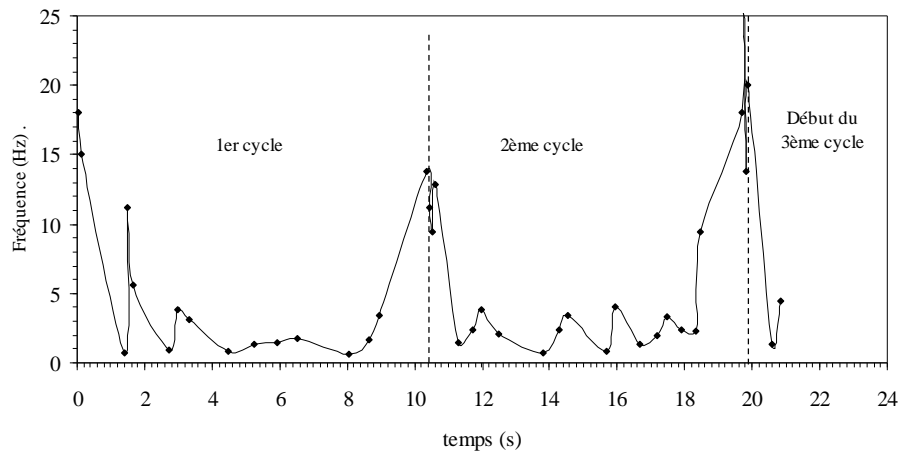


FIG. 4b : Fréquence d'apparition des bulles dans le microcanal.

2.2 Vitesse de déplacement des bulles et du liquide

La figure 5 présente une photo extraite des essais représentant un écoulement à bouchons liquides. Nous avons choisi de suivre le parcours d'un seul bouchon liquide et de deux bulles qui se trouvent en amont et en aval de ce bouchon. Nous avons déterminé, par traitement d'images, la taille des deux bulles et du bouchon durant leur parcours dans le microcanal.

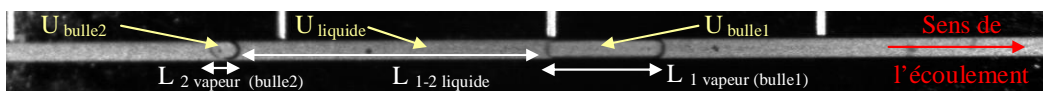


FIG. 5 : Ecoulement à bouchons.

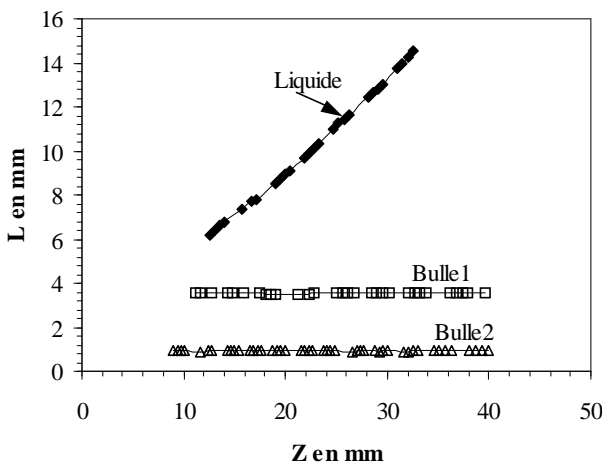


FIG. 6 : Taille des bulles et du bouchon liquide.

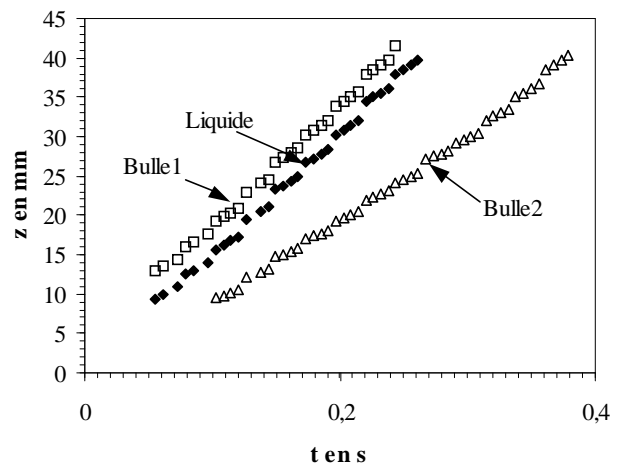


FIG. 7 : Parcours des bulles et du bouchon liquide.

La figure 6 présente l'évolution de la longueur L de chaque bulle et du bouchon durant leurs déplacements dans le microcanal. Cette longueur représente la taille des bulles et du bouchon. Elle est déterminée au niveau de l'axe du microcanal et définie par la distance séparant les deux extrémités amont et aval de chaque bulle (voir Fig. 5). On montre que pour l'exemple traité la taille des bulles demeure sensiblement constante mais celle du bouchon liquide augmente d'une manière pratiquement linéaire. Nous supposons que cette augmentation de la masse du liquide peut être due à l'un des deux phénomènes suivants : le premier concerne la condensation de la vapeur au niveau de l'interface liquide-vapeur qui entraîne une diminution de la taille des bulles dans le microcanal et le second phénomène concerne le déplacement du liquide dans le sens opposé à celui du parcours de la bulle.

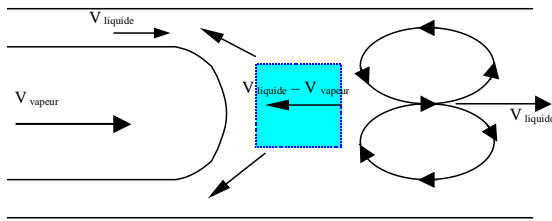


FIG. 8 : *Entraînement de liquide dans un microcanal : cas d'un écoulement à bouchon.*

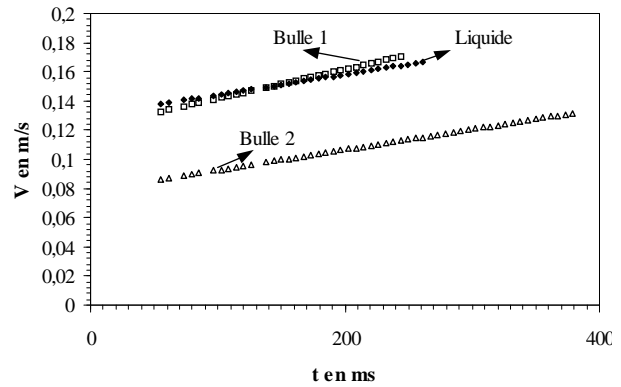


FIG. 9 : *Vitesse des bulles et du bouchon liquide.*

Dans notre cas, la taille des bulles restent pratiquement inchangeables. Cependant, le déplacement des bulles dans le microcanal entraîne un déplacement de liquide dans un sens opposé à celui de leur parcours. En effet, quand une bulle traverse le condensat dans le microcanal, elle a une vitesse supérieure à celle du liquide ; ce qui lui permet de créer un mouvement tourbillonnaire du liquide et par conséquent une certaine quantité de liquide d'eau sera entraînée vers les parois du microcanal (Fig. 8). La figure 7 présente le parcours suivi par les deux bulles et le bouchon dans le microcanal en fonction du temps. Les courbes obtenues sont sensiblement linéaires. Nous avons dans ce cas calculé les vitesses de déplacement des bulles et du bouchon dans le microcanal. Ces vitesses sont déduites de la variation du déplacement des bulles et du bouchon liquide par rapport au temps. La figure 9 présente les vitesses calculées en fonction du temps de parcours. La figure 9 confirme l'hypothèse émise précédemment à savoir que la bulle 1 est à une vitesse plus importante que la bulle 2 et entraîne une masse liquide vers l'arrière. Ceci explique l'augmentation de la taille du bouchon liquide et le fait que la bulle 2 avance à une vitesse plus faible que celle de la bulle 1.

3 Conclusion

Dans cet article, on présente uniquement les résultats d'analyse d'un écoulement à bouchons liquides obtenu lors de la condensation de la vapeur d'eau dans un microcanal. L'écoulement à bouchon identifié dans cette étude est cyclique. La fréquence de production des bulles dans le microcanal dépend du temps de parcours. A partir de l'analyse du parcours d'un bouchon liquide et de deux bulles allongées, on montre que la vitesse des bulles à l'amont et à l'aval du bouchon est affectée par la taille du bouchon. Cette dernière augmente très probablement à cause de la condensation de vapeur et de l'avancement des bulles qui entraînent une masse liquide en sens opposé à son déplacement.

Références

- [1] Quan X.J., P. Cheng, H.Y. Wu, Transition from annular flow to plug/slug flow in cocondensation of steam in microchannels, *Int. J. Heat Mass Transfer* 51, 707–716, 2008.
- [2] Coleman, J.W., Garimella, S. Two-phase flow regimes in round, square, rectangular tubes during condensation of refrigerant R14a. *Int. J. Refrig.* 26, 117–128, 2002.
- [3] Kalman, H. Condensation of bubbles in miscible liquids. *Int. J. Heat Mass Transf.* 46, 2451–2463, 2003.
- [4] Kalman, H. Condensation of a bubble train in immiscible liquids. *Int. J. Heat Mass Transf.* 49, 2391–2395, 2006.
- [5] Louahlia-Gualous, H., Mecheri, B. Unsteady steam condensation flow pattern inside a miniature tube. *Appl. Therm. Eng.* 27, 1225–1235, 2007.
- [6] Wu, H.Y., Cheng, P. Condensation flow patterns in silicon microchannels. *Int. J. Heat Mass Transf.* 48, 2186–2197, 2005.
- [7] Hu, S.J., Chao, C.H.Y. A experimental study of the fluid flow and heat transfer characteristics in microcondensers with slug-bubbly flow. *Int. J. Refrig.* 30, 1309–1318, 2007.

Remerciements : Ce travail est soutenu par le programme interdisciplinaire énergie du CNRS