

Identification et analyse des régimes d'écoulements lors de la condensation dans un capillaire.

Tahar. GUERMIT¹, Hasna. LOUAHLIA-GUALOUS¹, Bachir. BOUCHEKIMA²

¹FEMTO ST, MN2S, CNRS-UMR 6174, FCLAB, 13 rue Thiery Mieg, 90000 Belfort, France.

²Laboratoire de l'énergétique, Université de Ouargla BP 511,30000 (Algérie).

Résumé – Cet article présente une analyse expérimentale en régime transitoire d'un écoulement de vapeur d'eau en condensation dans un seul microcanal. Différents régimes d'écoulement sont identifiés. On a abordé cette étude expérimentale par une visualisation des différents régimes d'écoulement lors de la condensation de la vapeur d'eau dans un capillaire de 280 μm de diamètre intérieur. L'objectif est d'effectuer une caractérisation basée sur le traitement d'images des différents régimes d'écoulement se produisant en condensation. Une analyse des cycles de condensation pour des écoulements cycliques est effectuée.

1. Introduction

Les écoulements avec changement de phase vapeur-liquide en milieu micrométrique constituent à l'heure actuelle une problématique régulièrement abordée. L'utilisation des micro-canaux a l'avantage de contribuer à une augmentation significative de la compacité des échangeurs de chaleur et à une amélioration non négligeable des performances énergétiques des systèmes [1][2]. Dans la littérature, un des problèmes majeurs rencontrés sur les régimes d'écoulements réside dans les différentes terminologies employées pour la description de ces régimes. Coleman et Garimella [3] ont choisi de regrouper ces différentes structures en quatre principaux régimes : régime stratifié, régime intermittent, régime annulaire et le régime dispersé. Ces quatre principaux régimes d'écoulement sont ensuite divisés en différents sous-groupes, tout d'abord, le régime stratifié est décomposé en un écoulement stratifié lisse et un écoulement stratifié à vagues. Puis, le régime intermittent qui englobe les écoulements à bouchons de liquide ou poches de vapeur; le régime annulaire est décomposé en écoulement lisse et à vagues. Le régime d'écoulement dispersé comprend les différents écoulements à bulles. Cette classification descriptive présente l'avantage de prendre en compte toutes les structures d'écoulement rencontrées en condensation convective [4][5].

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude de la condensation de la vapeur d'eau dans un seul microcanal transparent de section circulaire. L'objectif est la visualisation ainsi que l'analyse des structures des écoulements identifiés.

2. Dispositif expérimental

La figure 1a présente une photo du banc d'essais expérimental qui est composé d'une chaudière permettant la production de la vapeur d'eau à débit et à pression réglables. La pression et la température de la vapeur générée par la chaudière sont mesurées et contrôlées avec un pressostat et une vanne pointeau. La vapeur générée par la chaudière traverse la section d'essais (Figure 1b) avant d'être dirigée vers le condenseur secondaire pour condenser la vapeur d'eau restante. Le débit massique total dans le circuit est mesuré après condensation total de la vapeur. Des vannes de réglage de débit de vapeur sont placées dans le circuit. Une

balance de précision 0,1 g est utilisée pour mesurer le débit massique condensé. Deux capteurs de pression à déformation de membranes sont installés à l'entrée et à la sortie de la section d'essais. Cette dernière est constituée d'un capillaire transparent de diamètre 280 μm et de longueur 66 mm. Ce capillaire présente à l'entrée un convergent de diamètre 3 mm et de longueur 9 mm (Figure 1c). 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 capillaire. Les températures d'entrée et de sortie du fluide de refroidissement sont mesurées par des microthermocouples. Le débit d'eau de refroidissement est mesuré à l'aide d'un débitmètre à flotteur. La puissance de refroidissement est déduite à partir du débit et des températures d'eau mesurés. Un système d'acquisition de données relié à un ordinateur est utilisé pour enregistrer toutes les mesures temporelles de températures et des pressions dans le circuit.

La visualisation des régimes d'écoulement est faite à l'aide d'une caméra rapide d'une cadence de 10000 images par seconde. L'éclairage est effectué par une source de lumière froide. Les expériences sont conduites en circuit ouvert et à une pression de sortie du condensat égale à la pression atmosphérique.

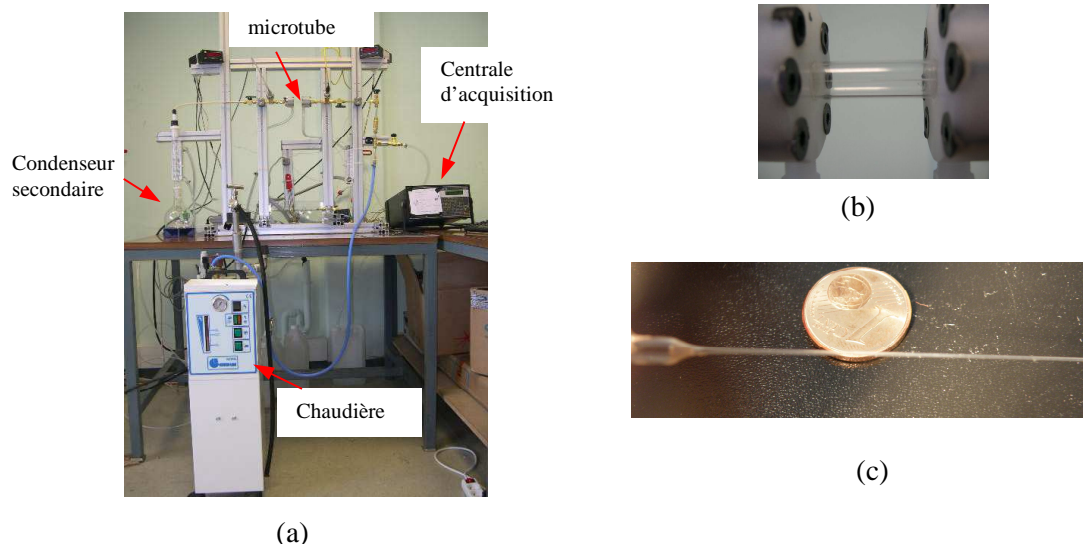


Figure 1 : Dispositif expérimental : (a) banc d'essais, (b) section d'essais, (c) microtube.

3. Résultats expérimentaux et discussions

3. 1 Présentation et description des différents régimes d'écoulement

Les expériences sont menées en suivant une procédure expérimentale bien définie. En effet, avant chaque essai, on met la chaudière en marche jusqu'à ce que la vapeur atteigne la pression désirée. Ensuite, on procède par une purge afin d'évacuer la quantité d'air emprisonnée dans la chaudière. A l'aide d'une vanne pointeau placée en amont du microcondenseur, on effectue un réglage du débit de la vapeur d'eau dans le capillaire. Le débit d'eau de refroidissement est contrôlé au moyen d'une vanne placée à l'entrée de la section d'essais. Un réglage de la vitesse de la caméra et du système d'éclairage doit être effectué pour avoir une meilleure visualisation des différents régimes d'écoulements diphasiques se produisant dans le capillaire. Une procédure est ensuite mise au point pour effectuer un traitement d'images des écoulements en utilisant le logiciel Matrox 8. Pour

chaque essai, les conditions de fonctionnement sont maintenues constantes, afin d'assurer la meilleure reproductibilité des résultats.

Durant chaque essai, on mesure les températures ainsi que les pressions à l'entrée et à la sortie du capillaire. La figure 2a : montre l'évolution de la température d'entrée et de sortie de la vapeur dans le capillaire. A l'entrée du capillaire la température de la vapeur générée par la chaudière est de l'ordre de 100°C. A la sortie du capillaire, la température du condensat présente des fluctuations temporaires dues à la structure de l'écoulement diphasique. La température de sortie est comprise entre 40°C et 60°C. La figure 2b présente les pressions d'entrée et de sortie du capillaire. On constate que seule la pression d'entrée est influencée par la structure de l'écoulement diphasique. La pression de sortie demeure constante et égale à la pression atmosphérique car le circuit fonctionne en boucle ouverte.

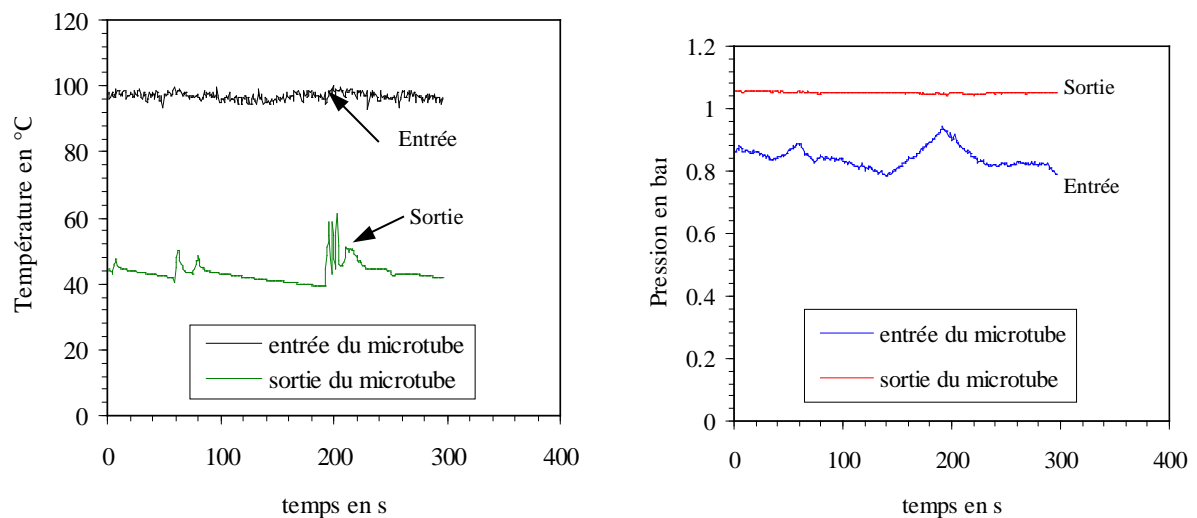
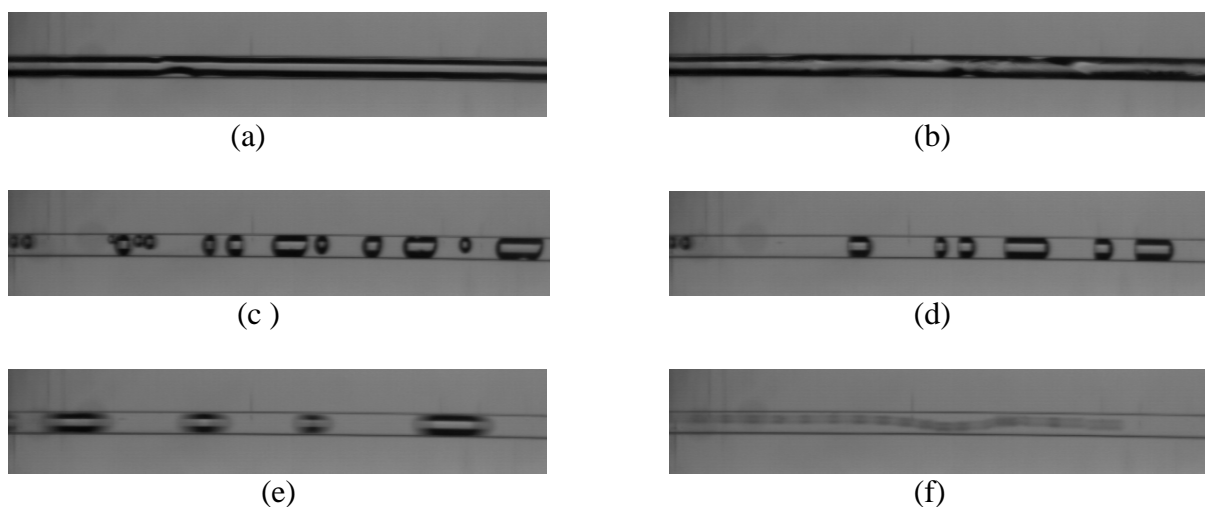


Figure 2 : Mesures : (a) températures du fluide à l'entrée et la sortie du capillaire, (b) pression du fluide à l'entrée et la sortie du capillaire.

Les expériences que nous avons menées sur la condensation dans le capillaire ont montré la présence de différents régimes d'écoulement diphasique. La figure 3 présente des photos de différentes structures des phases liquide et vapeur présentes dans le capillaire. La zone de visualisation est d'une longueur d'environ 26 mm. L'arrivée de la vapeur s'effectue de la gauche vers la droite pour toutes les images présentées sur cette figure.



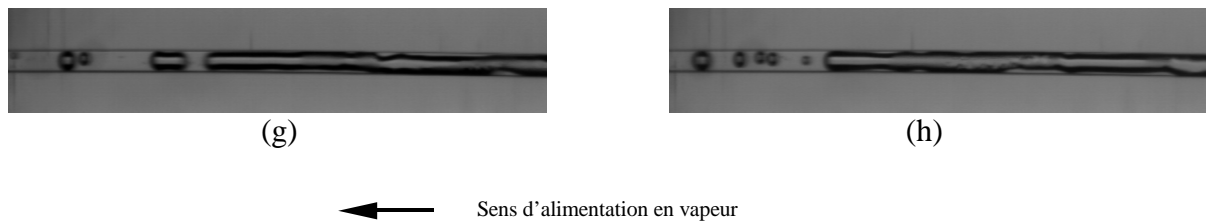


Figure 3 : Photos de différents régimes d'écoulements observés

A partir des essais, nous avons observé le régime d'écoulement annulaire caractérisé par une surface du film liquide lisse et continue ainsi qu'une séparation complète des deux phases liquide et vapeur. La phase liquide se trouve en contact avec la paroi sous forme d'un micro film liquide. La phase vapeur est sous une forme cylindrique occupant la partie centrale du tube (Figure 3a). Le liquide mouille la surface interne du capillaire sous l'effet des forces de frottement interfaciales engendrées par la vitesse de la vapeur. Dans certaines configurations d'écoulement annulaire [6], on a une formation de vagues interfaciales déformant ainsi l'interface liquide-vapeur. En augmentant davantage la vitesse de la vapeur, l'interface devient ondulée en raison de la différence de vitesse entre les deux phases ; c'est l'instabilité de Kelvin Helmholtz [5].

Au cours des expériences, nous avons identifié un régime d'écoulement diphasique dans lequel la phase vapeur s'écoule en suivant un mouvement oscillatoire (Figure 3b). On a remarqué que cet écoulement se situe généralement entre un écoulement annulaire à l'aval et un écoulement à bulles discrètes dispersées dans le liquide situé en amont et qui remplit le capillaire (Figure 4). En effet, la coalescence de ces bulles augmente la fraction de liquide contenue dans l'écoulement et accélère l'écoulement des deux phases. Par conséquent, dans la zone centrale, la vapeur à très grande vitesse entraîne le microfilm liquide. L'écoulement diphasique suit un sens oscillatoire suivant la longueur du capillaire qui tend vers une concentration totale de la vapeur au centre du canal sous une forme cylindrique : c'est l'écoulement annulaire (Figure 4).

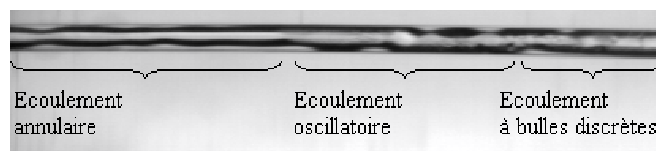


Figure 4 : Ecoulement oscillatoire en microcanal

Les figures 3c et 3d présentent des photos des régimes d'écoulement à bulles allongées séparées par des bouchons de liquide. Cet écoulement est caractérisé par une discontinuité des tailles des bulles qui sont en mouvement tout au long du capillaire. Certaines bouchons de liquide contiennent des microbulles de vapeur discrètes, de forme sphérique et qui peuvent disparaître en se coalescent avec des bulles allongées. Ceci contribue à la formation de bulles de vapeur de plus en plus longues qui apparaissent de temps à autre et qui possèdent quasiment la même vitesse que le liquide. Ces longues bulles ont un mouvement rectiligne suivant l'axe du capillaire et ne sont pas en contact uniquement avec la surface supérieure du tube. La forme demie sphérique du ménisque est due à la pression capillaire. Sur la figure 3c les bulles suivent le sens de l'écoulement de la vapeur et du liquide. La figure 3d présente une photo de l'écoulement des bulles qui reprend un sens inverse à celui de la vapeur débitante. Cet écoulement est survenu suite à une phase où toute la longueur du capillaire est occupée par des bulles de différentes tailles séparées par des bouchons de liquide à vitesse stagnante

malgré que la vapeur soit débitée par la chaudière. Il est probable que durant cette phase, le capillaire présente un bouchon de liquide à la sortie qui bloque l'évacuation des bulles et augmente la pression de la vapeur. L'inversion de l'écoulement des bulles présentée en figure 3d (les bulles se dirigent vers l'entrée du capillaire) est survenue probablement au moment où la pression à la sortie du capillaire a dépassé la pression d'entrée. En conséquence, un effet de pompage est observé à la fin de cette phase. Cet effet entraîne une aspiration des bulles qui tend à équilibrer les pressions d'entrée et de sortie du capillaire. Après évacuation de certaines bulles vers l'entrée du capillaire, l'écoulement de la vapeur reprends son sens initial (de l'entrée du capillaire vers sa sortie). La figure 3 e présente la forme du ménisque des bulles durant cette phase d'inversion du sens de l'écoulement. En effet, le ménisque présente une forme demie sphérique dans les deux extrémités de chaque bulle contrairement aux cas présentés par la figure 3c et 3d. Durant cette phase d'inversions de l'écoulement, les bulles, le liquide et la vapeur ont eu un mouvement oscillatoire. A la fin de cette phase, l'écoulement dans le capillaire a eu une structure présentée par la figure 3f dans laquelle des bulles sphériques de taille $100\mu\text{m}$ approximativement sont formées et sont entraînées par le liquide vers la sortie du canal.

Les figures 3g et 3h présentent des photos des écoulements capillaires avec une production continue de bulles de différentes tailles. La surface du film liquide présente une succession de vagues liquides formées en contact avec la paroi. La figure 3g obtenue pour une vitesse axiale de la vapeur de $0,47\text{ m/s}$ montre la production de bulles allongées de diamètres horizontal et vertical égaux à $420\mu\text{m}$ et $210\mu\text{m}$ respectivement. Les bulles produites (figure 3h) sont sphériques et ont un diamètre environ égal à $120\mu\text{m}$; ceci pour une vitesse axiale de la vapeur égale à $0,2\text{ m/s}$. La production de chaque bulle résulte d'une disparition de vague interfaciale qui au cours du temps atteint une amplitude critique par condensation de la vapeur. L'arrachement de chaque bulle est contrôlé par les forces de pression, de tension superficielle et de frottement interfacial.

3. 2 Vitesse de déplacement des bulles

Chaque bulle crée se déplace tout au long du canal. Si la bulle ne coalesce pas avec d'autres bulles voisines, sa taille diminue progressivement à cause de la condensation. La vitesse de déplacement des bulles et de l'écoulement annulaire dépend de la structure de l'écoulement en aval.

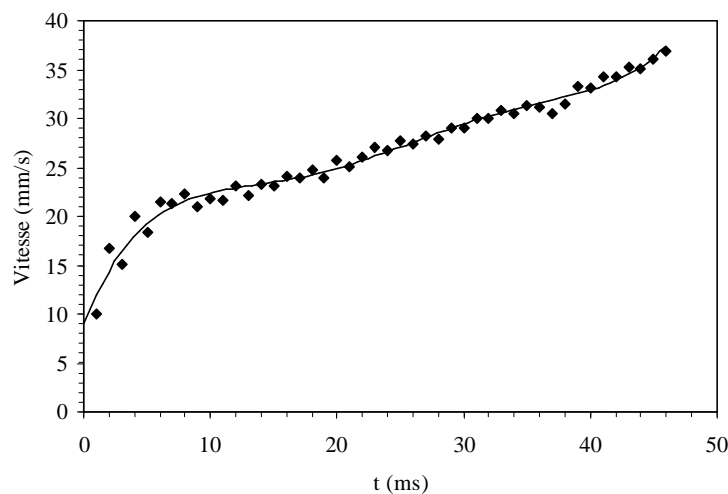


Figure 5 : Vitesse de déplacement de bulle

Sur la figure 5, nous présentons la vitesse de déplacement d'une bulle allongée de taille $420\mu\text{m}$ et qui se déplace dans le capillaire en se dirigeant vers la sortie. La vitesse est déterminée à partir de la variation du déplacement de la bulle dans le capillaire. Ceci est défini par procédure de traitement d'images. La figure 5 montre une accélération du déplacement de la bulle dans le capillaire. Après son détachement de l'écoulement annulaire (à $t=0\text{s}$), la vitesse de la bulle est de 10mm/s et augmente pour atteindre 35mm/s dans un parcours de 20mm .

Dans le cas d'un écoulement annulaire avec production de bulles, on a remarqué une décélération du déplacement des bulles à cause de la formation des instabilités sur la surface de l'écoulement vapeur. Ceci entraîne une concentration de bulles vers la sortie du capillaire qui sont freinées à leur tour par l'inertie du liquide en aval. Cette décélération favorise la formation de nouvelles vagues interfaciales. La vitesse d'avancement de l'interface diminue au cours du temps et peut devenir insuffisante pour maintenir l'avancement de l'écoulement annulaire ; ce qui cause des problèmes de bouchons.

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 capillaire de diamètre $280\mu\text{m}$. A partir des résultats d'analyse, on montre la présence de différents régimes d'écoulement diphasique dans le capillaire. Les causes d'inversion du sens de l'écoulement diphasique sont mises en évidence. On a identifié un écoulement oscillatoire qui se situe généralement entre un écoulement annulaire à l'aval et un écoulement à bulles discrètes dispersées dans le liquide situé en amont du capillaire.

Références

- [1] Cavallini A, Censi G, Del Col D, Doretti L, Longo GA, Rosseto L., Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube. *Int. J Refrigeration*, 24 (2001), 73-87.
- [2] S.G.kandlikar, W.J.Grande, Evolution of microchannel flow passages—thermohydraulic performances and fabrication technology, *proce.IMECE* (2002), 1-13
- [3] J.W.Coleman, S.Garimella. Characterisation of two phase flow patterns in small diameter and rectangular tubes, *Int .Heat Mass Transfer*, 42 (1999), 2869-2881.
- [4] H.Louahlia-Gualous, M. Asbik, Numerical modeling of annular film condensation inside a miniature tube, vol. 52, *Numerical Heat Transfer*, 3 (2007), 1-273
- [5] H. Louahlia-Gualous, B. Micheri, Unsteady steam condensation flow patterns inside a miniature tube, *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007), 1225-1235.
- [6] A. Odaymet, B. Micheri, H. Louahlia-Gualous, H. El Khatib, Etude d'un cycle d'écoulement lors de la condensation de vapeur d'eau dans un micro-canal. Congrès de la Société Française de Thermique à l'Ile des Embiez, TOME 1, (2007), 83 - 88.