

## IDENTIFICATION ET ANALYSE DES REGIMES D'ÉCOULEMENTS LORS DE LA CONDENSATION DANS UN CAPILLAIRE

T. GUERMIT<sup>1</sup>, H. LOUAHLIA-GUALOUS<sup>1</sup>, M. BOUMAZA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FEMTO ST, MN2S,  
CNRS-UMR 6174, FCLAB Belfort - France

<sup>2</sup>Département de Génie, Climatique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Université Mentouri Constantine - Algérie

Reçu le 10/05/2010 – Accepté le 09/12/2012

### 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 la visualisation des différents régimes d'écoulement lors de la condensation de la vapeur d'eau dans un mini-canal de 280 µm de diamètre. 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 identifiés d'une manière répétitive est effectuée.

**Mots clés :** condensation ; écoulements ; microcanaux ; visualisation

### Abstract

This paper presents an experimental analysis of a transitional flow of water vapor condensation in a single mini channel. Different flow regimes are identified. We approached this study by experimental visualization of the different flow regimes during condensation of water vapor in a mini-channel of 280 µm in diameter. The objective is to perform a characterization based on image processing of different flow regimes occurring in condensation. An analysis of condensation cycles for flows identified a repetitive manner is made.

**Keywords :** Condensation, flows, microchannels, visualization.

### ملخص

في هذه الدراسة التجريبية التحليلية تناولنا النظام الانتقالي لتدفق بخار الماء المكثف داخل ميكرو قناة قطرها 280 ميكرومتر كما تعرفنا على أنظمة مختلفة لتدفق.

وخلال هذه الدراسة التجريبية قمنا بتصوير مختلف أنظمة التدفق أثناء تكثف بخار الماء داخل الميكرو قناة بهدف تحديد خصائص هذه الأنظمة من خلال معالجة الصور، وتحليل دورات تكثف بخار الماء

**الكلمات المفتاحية :** التكثيف - تدفقات - القنوات الجزئية والتفسير البصري

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 écoulement stratifié lisse et écoulement stratifié à vagues. Puis, le régime intermittent englobe les écoulements à poches de liquide ou 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].

Plusieurs études ont été effectuées dans le domaine de la micro fluidique mais surtout dans le cas de l'ébullition [3], H.Gualous et B.Mecheri [5] ont étudié les écoulements identifiés pendant la condensation de la vapeur d'eau dans un canal de  $800\mu\text{m}$  de diamètre.

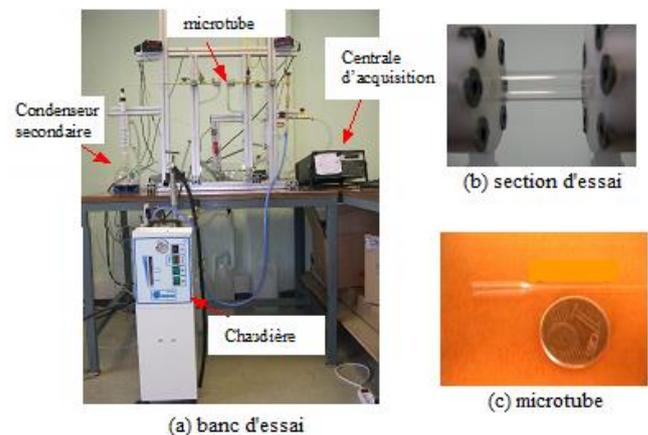
Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude de la condensation de la vapeur d'eau dans un seul microcanal transparent de section circulaire de diamètre  $280\mu\text{m}$ , on a choisi un diamètre du tube inférieure à celui qui existe dans la littérature dans le cas des études expérimentales à écoulement diphasique. L'objectif est la visualisation ainsi que l'analyse des structures des écoulements identifiés.

## 1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

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 sortant de 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  $0,1\text{ g}$  est utilisée pour mesurer le débit massique condensé. Deux capteurs de pression à déformation de membranes HBM de  $0,8\%$  de précision sont installés à l'entrée et à la sortie de la section d'essais. Cette dernière est constituée d'un capillaire transparent de diamètre  $280\mu\text{m}$  et de longueur  $66\text{ mm}$ . Ce capillaire présente à l'entrée un convergent de diamètre  $3\text{ mm}$  et de longueur  $9\text{ mm}$  (Figure 1c). Il est inséré dans un

tube transparent de diamètre  $10\text{ mm}$  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 micro-thermocouples de type K de  $0,1$  de précision. 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 (SAM 70) 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 (GIGAVIEW) 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, les images sont traitées par le logiciel MATROX 8.



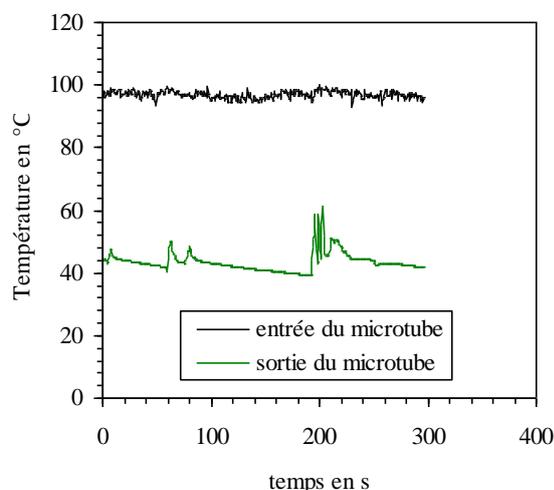
**Figure 1** : Dispositif expérimental

## 2. RESULTATS EXPERIMENTAUX - DISCUSSIONS

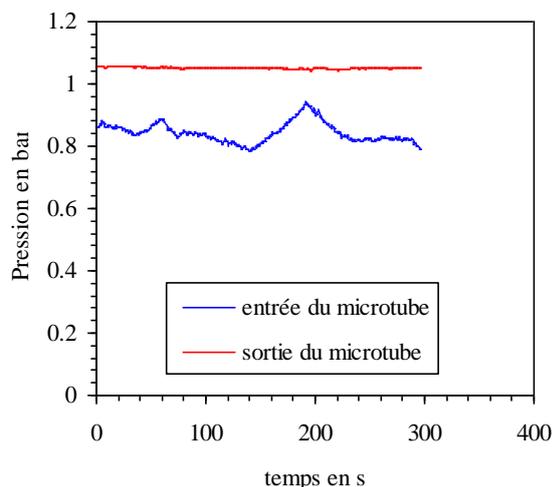
### 2. 1. Présentation et description des différents régimes d'écoulement

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 canal. 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 sortie de la vapeur dans le capillaire. A l'entrée du canal 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. La pression est supérieure à la pression d'entrée et cela est dû à la pression capillaire comme le montre la figure 2 (b)



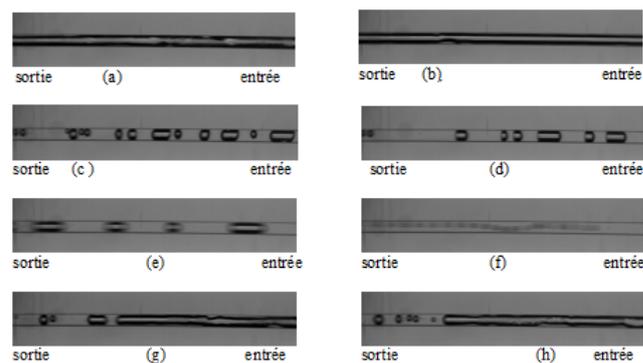
(a) température de la vapeur



(b) pression de la vapeur

**Figure 2 :** Mesures

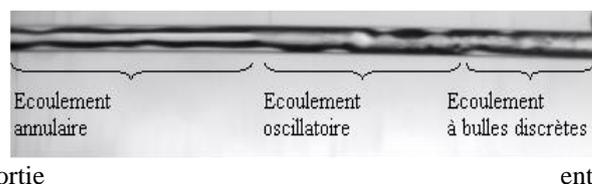
Les expériences que nous avons menées sur la condensation dans le capillaire ont montré la présence de différents régimes d'écoulement diphasique. La figure 3 présente des photos de différentes structures des phases liquide et vapeur présentes dans le capillaire, la zone observé est 46 mm.



**Figure 3 :** Photos des différents régimes d'écoulements observés

A partir des essais, nous avons observé le régime d'écoulement annulaire caractérisé par une surface de 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 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] [7].

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 :** Écoulement oscillatoire en microcanal

Les figures 3c et 3d présentent des photos des régimes d'écoulement à bulles allongées séparées par des poches de liquide. Cet écoulement est caractérisé par une discontinuité des tailles des bulles qui sont en mouvement tout au long du capillaire.

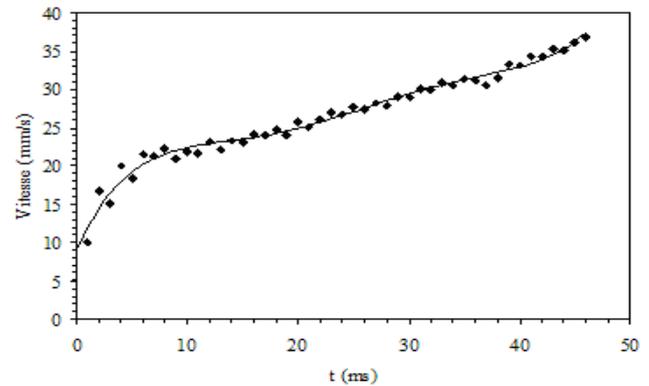
Certaines poches de liquide contiennent des microbulles de vapeur discrètes, de forme sphérique et qui peuvent disparaître en se coalescent avec des bulles allongées. Ceci contribue à la formation de bulles de vapeur de plus en plus longues qui apparaissent de temps à autre et qui possèdent quasiment 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 (de la droite vers la gauche). 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 poches 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 3e 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 éjection 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 l'éjection des bulles allongées de diamètres horizontal et vertical égaux à  $420\mu\text{m}$  et  $210\mu\text{m}$  respectivement. Les bulles éjectées (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.

## 2. 2 Vitesse de déplacement des bulles

Chaque bulle créée 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 éjection de la bulle (à  $t=0\text{s}$ ), la vitesse de la bulle est de  $10\text{mm/s}$  et augmente pour atteindre  $35\text{mm/s}$  dans un parcours de  $20\text{mm}$ .

Dans le cas d'un écoulement annulaire avec éjection 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 les problèmes de bouchons.

## 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*, Vol. 24, pp.73-87.
- [2] S.G.kandlikar, W.J.Grande, Evolution of microchannel flow passages—thermohydraulic performances and fabrication technology, *proce.IMECE* (2002), pp.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 (15) pp .2869-881 (1999)
- [4] Condensation flow mechanisms in micro-channels: basis for pressure drop and heat transfer models. *Heat Transfer Engineering*, vol. 25 (3), pp. 104-116 (2004).
- [5] H.Louahlia-Gualous, M. Asbik, Numerical modeling of annular film condensation inside a miniature tube, vol. 52, *Numerical Heat Transfer*, 3 (2007) ,pp. 1-273
- [6] H. Louahlia-Gualous, B. Micheri, Unsteady steam condensation flow patterns inside a miniature tube, *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, pp. 1225-1235.
- [7] B.Mederic, Etude de la condensation convective en mini tube: analyse des instabilités, Thèse de Docteur de l'université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2004.
- [8] Chu K.J., Dukler A. E ,Statistical characteristics of thin wavy films Part II: Studies of the substrate and wave structure. *AIChE J.*, Vol. 20, pp. 695-706