

Etude expérimentale des instabilités et de l'écoulement diphasique lors de l'ébullition convective en microcanaux.

Jacqueline BARBER^{1,2*}, David BRUTIN², Lounes TADRIST², Khellil SEFIANE¹

¹Institute of Materials and Processes, University of Edinburgh, Scotland, EH9 3JL

²Département de Mécanique Energétique, Polytech' Marseille, France, 13453

* (auteur correspondant : J.Barber@ed.ac.uk)

Résumé - Nous présenterons les résultats obtenus lors d'expériences d'ébullition convective en microcanaux. Les diamètres hydrauliques étudiés varient entre 200 et 700 μm pour différentes géométries. Des instabilités hydrodynamiques se manifestent périodiquement par l'évacuation du mélange diphasique. Le chauffage des microcanaux en verre est effectué en utilisant un dépôt métallique résistif transparent. L'analyse de l'écoulement qui sera présentée est effectuée en utilisant une caméra rapide alors que le diagnostic thermique est réalisé par une caméra infrarouge.

1. Introduction

Les transferts de chaleur par ébullition peuvent être aussi bien utilisés comme échangeur de chaleur ou bien comme transfert d'énergie. Dans les microcanaux, que ce soit pour des écoulements monophasique ou diphasique, d'importants coefficients de transfert de masse et de chaleurs sont atteints.

Ceci rend les microcanaux très intéressants en électronique [1] (systèmes de refroidissement), dans l'élaboration de mini échangeurs ou évaporateurs [2, 3] ou bien encore pour les imprimantes à jet d'encre. En effet les écoulements en ébullition sont très efficaces : ils améliorent l'écoulement, avec moins de puissance de pompage ils peuvent extraire autant de chaleur qu'avec un écoulement monophasique, enfin dissipation de chaleur.

Comme les transferts de chaleur ainsi que l'hydrodynamique relatifs aux microcanaux sont nettement différents des écoulements macroscopiques [3-6], une partie seulement de la physique utilisée aux échelles macroscopiques s'applique aux niveaux microscopiques. Actuellement trop peu d'études ont été réalisées afin de bien comprendre l'ensemble des mécanismes impliqués lors des écoulements en ébullition dans les mini et microcanaux [7]. Les premières recherches suggèrent que l'évaporation était contrôlée par l'ébullition nucléée [8]. Cependant de nouvelles études montrent que les transferts de chaleur seraient plutôt contrôlés par l'évaporation du film mince entourant les bulles [9-12].

Différents modèles relatifs aux régions du film liquide ainsi qu'au ménisque (ou se situent les écoulements capillaires) ont été élaborés [13-16]. Par contre les mécanismes concernant la formation et l'évolution du film liquide-vapeur le long du microcanal sont toujours incertains. Suite à l'observation expérimentale de phénomènes tels que l'emprisonnement des bulles ou bien l'évaporation du film mince, plusieurs explications ont été avancées : pour les petites échelles, les forces telles que la tension superficielle, les forces capillaires ou l'effet de paroi sont dominants. Une des différences notables entre les micro et macro canaux est la croissance des bulles. Dans le cas des microcanaux la taille de la bulle peut atteindre rapidement celle du diamètre du canal, elle est confinée. Sa croissance ne peut plus se faire qu'en s'étirant le long du canal. Ce phénomène est inexistant dans les conduites plus larges ou parfois même plusieurs bulles coexistent.

1.1 Ecoulement instables dans les microcanaux

A la suite de précédents travaux [17-19], plusieurs instabilités ont été mise au jour : de fortes fluctuations de températures, « flow excursions », crise d'ébullition, « channel dry-out » et des écoulements inverses (probablement du au « vapour recoil »). Il est donc fondamental de bien les comprendre. Pour cela il est primordial de bien analyser les phénomènes interfaciaux et l'apparition des instabilités.

1.1.1 Ecoulement inverse et « Vapour Recoil »

Plusieurs études se sont portées sur les écoulements inverses [17, 20]. Brutin et al. ont visualisées ces écoulements à l'aide d'une caméra ultra rapide [17]. Le liquide pénètre dans le canal et la nucléation démarre. La surchauffe à travers la paroi permet aux bulles de croître rapidement, fusionner et de former ainsi un bouchon de vapeur. Ce bouchon est parfois considéré comme une bulle étirée [16]. Comme la croissance de la bulle est plus importante que la possibilité du canal à l'évacuer, la vapeur s'accumule. La surpression ainsi produite ralentie le courant entrant, et les bulles qui se forment en amont du bouchon sont alors ralentis, rapidement le canal entier n'est rempli que de vapeur. Aux extrémités du bouchon, les deux interfaces liquide-vapeur progressent sur le liquide, en amont le liquide est poussé contre le courant, on a un écoulement inverse. Brutin et al. [17] ont aussi remarqué que l'expansion était accompagnée d'une fluctuation de la pression.

Des augmentations de températures sont attendues à des périodes régulières lorsque le canal est rempli par la vapeur, voir Figure 1. Comme le flux de chaleur provenant de la paroi porte à ébullition le liquide, la température de la paroi au niveau de la phase gazeuse va croître fortement. On pense aussi que la température sera haute au niveau de la ligne triple. L'écoulement inverse est accompagné d'une fluctuation de la chute de pression, avec une accélération de l'écoulement pour remplacer la vapeur. Une fois que le canal est vide et que la chute de pression le long du canal a été rétablie, l'écoulement recommence. Suite à la forte augmentation de la température de paroi, des bulles vont de nouveau rapidement se formées et le phénomène se répété. Les paramètres tels que le débit, la chute pression ou bien la variation de température seront essentiels pour compréhension et prédiction des instabilités. De multiples études [21] montrent que pour de fortes évaporations et des températures élevées des instabilités de « vapour recoil » peuvent se développer. Leurs importances ne sont toujours pas bien comprises.

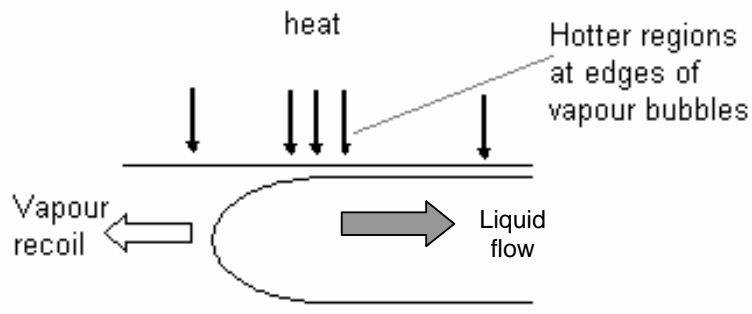


Figure 1: Schéma représentant un écoulement inverse instable. La vapeur générée induit une surpression qui pousse le fluide en amont.

2. Dispositif expérimental et procédure

2.1 Dispositif

Le dispositif expérimental illustré sur les Figures 2 et 3 est composé d'un système d'injection, d'un condenseur, d'un microcanal et de ses capteurs de pression et de température, d'un système de visualisation de l'écoulement et d'acquisition de données. Ils sont tous installés dans une caisse (1 m³) régulé en température. Le fluide utilisé est du n-pentane, il a été choisi pour sa basse température de saturation ($T_{\text{sat}} = 36 \text{ °C}$), ainsi un faible chauffage de la boîte permet d'amener sa température proche du point d'ébullition. La section expérimentale a été construite afin de visualiser une seule interface liquide-vapeur lorsque le fluide est en ébullition et de permettre ainsi l'enregistrement et le suivi de son évolution dans le microcanal.

Le système d'injection est composé d'une seringue en verre avec une connexion « luerlock » qui permet de contrôler précisément le débit du fluide dans le système. Le dispositif expérimental nous permet de changer aisément le microcanal. Ceci nous autorise à étudier l'influence de la géométrie et des dimensions sur l'écoulement et le transfert de chaleur. La géométrie rectangulaire à paroi parfaitement parallèle supprime les distorsions optiques. A partir d'un système d'acquisition (National Instruments) la pression et la température à l'entrée et à la sortie du canal sont connus et enregistrer, Fig. 3.

Pour porter le fluide à ébullition, une couche ultra mince d'un métal est déposée à l'extérieur du canal. En appliquant un courant, la chaleur dissipée chauffe le fluide. Cette méthode innovante est très intéressante car elle permet simultanément de chauffer et de visualiser l'écoulement. Le métal choisi est du Tantale (Ta), il est pulvérisé uniquement sur quelques nanomètres. La résistance des dépôts varie entre 3-10 k Ω . L'alimentation se fait à travers deux fils très fins collés avec un époxy conducteur.

Une lumière froide est utilisée pour l'acquisition vidéo (camera rapide). Une caméra infra rouge a aussi été utilisée pour mesurer le profil de température à l'extérieur du microcanal au cours des écoulements en ébullition.

2.2 Procédures expérimentales

Le liquide expérimental, n-pentane, est degasé avant de pénétrer le microcanal. Pendant une expérience est maintenu constant grâce à la pompe seringue. Il est possible de faire varier le flux de chaleur sur le microcanal en jouant avec l'alimentation. La nucléation des bulles dans le microcanal sont visualisées avec le camera rapide. Il est possible de ne suivre et enregistrer qu'une bulle (un interface liquide-vapeur), cela permet d'étudier la progression de l'évaporation du film fin du liquide.

La comparaison des mesures de pressions et de températures à l'entrée et à la sortie du microcanal avec les images de l'écoulement, montre la présence d'un écoulement inverse et la possibilité d'un mécanisme de « vapeur recoil ». Des élaborations de graphes sur la chute de pression en fonction du débit ont été établies afin de deviner le commencement des instabilités.

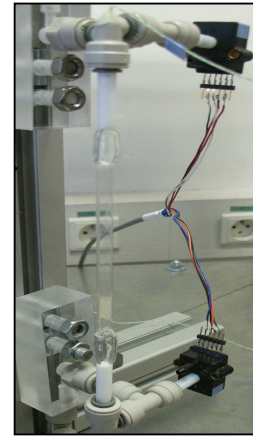
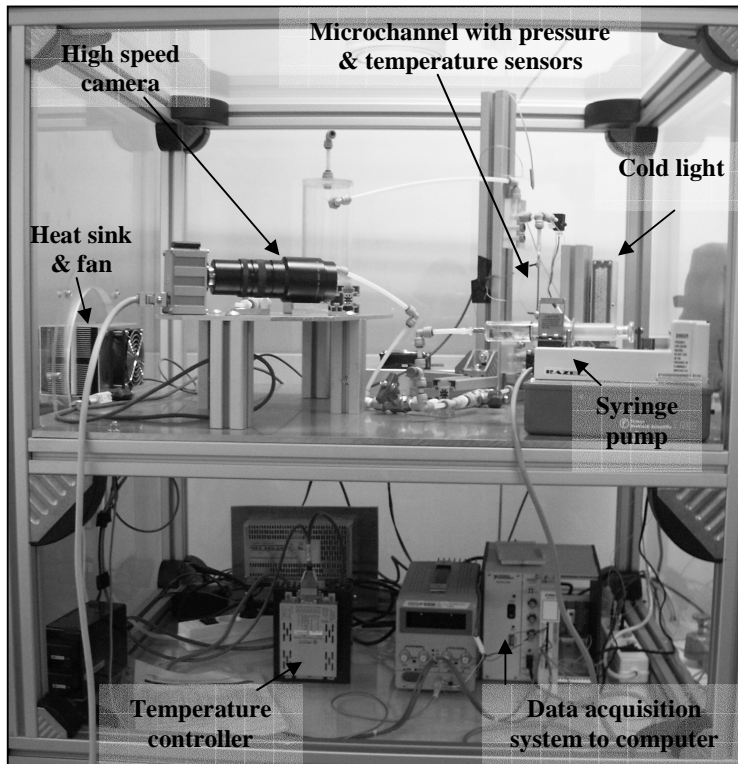


Figure 3: Mesures de la température et de la pression sur le microcanal.

Figure 2: Le dispositif expérimental.

3. Résultats

3.1 Modes d'écoulement observés

Uniquement en changeant le flux de chaleur appliqué au liquide, plusieurs modes d'écoulement en ébullition ont été observés : « bubbly », « slug », « plug » et « churn flow » (unstable, turbulent two-phase flow). Des clichés, pris à l'aide d'un appareil photo ultra rapide, sont représentés sur la Figure 4. Pour d'importants flux de chaleur, l'écoulement est très instables, on pense que cela est du à la présence de « vapeur recoil ».

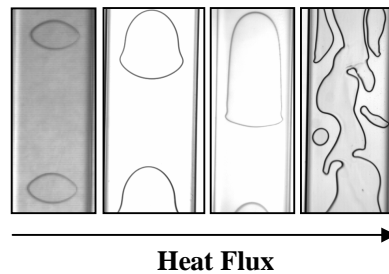


Figure 4: Clichés d'écoulement pour différents flux de chaleur ($1-5 \text{ kW/m}^2$). Microcanal rectangulaire ayant un diamètre hydraulique égal à $752 \mu\text{m}$, débit : $8 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$.

3.2 Fluctuations des chutes de pression

Les mesures de pressions réalisées lors de la présence d'instabilités affichent la présence de pics, voir Figure 5. Leurs fréquences sont de l'ordre de 0.1 à 0.5 Hz. Dans l'exemple ci-dessous, des fluctuations aux alentours de 3 kPa ont été relevées, ce qui est bien plus important que la valeur moyenne des chutes de pressions, 1 kPa. Ces écoulements inverses n'apparaissent que pour de très courtes périodes, environ 50 ms.

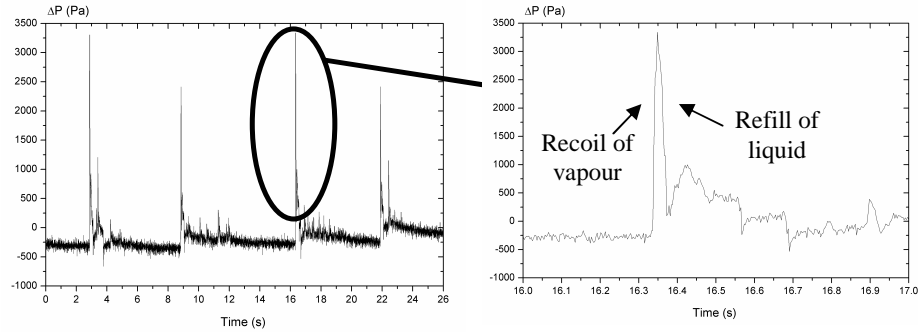


Figure 5: Fluctuations des chutes de pression pour des écoulements instables. Flux de chaleur: 4.6 kW/m², débit: 8.18 x 10⁻⁵ kg/s, fréquence d'acquisition: 333 Hz.

3.3 « Vapour Recoil »

Lors des écoulements instables dans le microcanal, des écoulements inverses apparaissent. Les images nous montrent que cela correspond à une instabilité de l'interface liquide-vapeur. La vitesse de l'interface a atteint des valeurs tels que 4.4 m/s pour un débit de seulement 0.016 m/s, Figure 6.

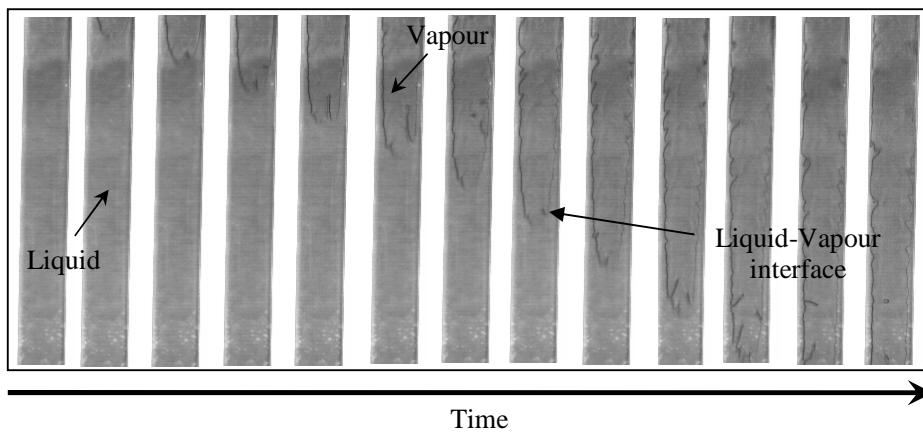


Figure 6: Observations des écoulements inverses. Flux de chaleur: 4.6 kW/m², débit: 8.18 x 10⁻⁵ kg/s, fréquence d'acquisition: 4000 Hz.

3.4 Thermographies

Les fluctuations de températures sur la paroi extérieure du microcanal sont enregistrées à l'aide de la caméra infra rouge et corrélées au passage des bulles de vapeur. La température la plus haute semble être au niveau de la ligne triple. Lorsqu'une bulle traverse le canal, une élévation de température aussi haute que 7 °C est relevée.

4. Conclusion

La compréhension des écoulements diphasique en ébullition est d'une importance fondamentale pour une multitude d'applications. Plusieurs zones d'ombres sont toujours présentes et sont l'intérêt d'innombrables recherches, en particulier les instabilités.

L'étude expérimentale des microcanaux de géométrie rectangulaire ($d_h = 752 \mu\text{m}$) montre la présence de différents types d'écoulements inverses et d'instabilités. On pense que les phénomènes de « vapour recoil » sont à l'origine des écoulements inverses et des fortes fluctuations de températures et de pression.

Références

- [1] Tuckerman, D.B. and R.F.W. Pease, *High-performance heat sinking for VLSI*. 1981. **ED-2**(5): p. 126-129.
- [2] Carey, V.P., *Liquid-Vapour Phase-change Phenomena*. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1992.
- [3] Kew, P.A. and K. Cornwell, *Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels*. Applied Thermal Engineering, 1997. **17**(8-10): p. 705-715.
- [4] Peng, X.F. and B.-X. Wang, *Forced convection and flow boiling heat transfer for liquid flowing through microchannels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993. **36**(14): p. 3421-3427.
- [5] Kandlikar, S.G., *Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002. **26**(2-4): p. 389-407.
- [6] Wambsganss, M.W., et al., *Boiling heat transfer in a horizontal small-diameter tube*. Journal of Heat Transfer, Transactions ASME, 1993. **115**(4): p. 963-972.
- [7] Hetsroni, G., et al., *Fluid flow in micro-channels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005. **48**(10): p. 1982-1998.
- [8] Tran, T.N., M.W. Wambsganss, and D.M. France, *Small circular- and rectangular-channel boiling with two refrigerants*. International Journal of Multiphase Flow, 1996. **22**(3): p. 485-498.
- [9] Jacobi, A.M. and J.R. Thome, *Heat transfer model for evaporation of elongated bubble flows in microchannels*. Journal of Heat Transfer, 2002. **124**(6): p. 1131-1136.
- [10] Thome, J.R., *Boiling in microchannels: A review of experiment and theory*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004. **25**(2): p. 128-139.
- [11] Kandlikar, S.G. and W.J. Grande, *Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology*. Heat Transfer Engineering, 2003. **24**(1): p. 3-17.
- [12] Bergles, A.E., et al., *Boiling and evaporation in small diameter channels*. Heat Transfer Engineering
Microchannels-Short History and Bright Future, 2003. **24**(1): p. 18-40.
- [13] Moosman, S. and G.M. Homsy, *Evaporating menisci of wetting fluids*. Journal of Colloid and Interface Science, 1980. **73**(1): p. 212-223.
- [14] Dussan V. , E.B. *Moving contact line*. in *Waves on Fluid Interfaces, Proceedings of a Symposium*. 1983. Madison, WI, USA: Academic Press Inc, New York, NY, USA.
- [15] Renk, F., P.C.J. Wayner, and G.M. Homsy, *On the transition between a wetting film and a capillary meniscus*. Journal of Colloid and Interface Science, 1978. **67**(3): p. 408-414.
- [16] Ajaev, V.S., G.M. Homsy, and S.J.S. Morris, *Dynamic response of geometrically constrained vapor bubbles*. Journal of Colloid and Interface Science, 2002. **254**(2): p. 346-354.
- [17] Brutin, D., F. Topin, and L. Tadrist, *Experimental study of unsteady convective boiling in heated minichannels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. **46**(16): p. 2957-2965.
- [18] Hetsroni, G., L.P. Yarin, and E. Pogrebnyak, *Onset of flow instability in a heated capillary tube*. International Journal of Multiphase Flow, 2004. **30**(12): p. 1421-1449.
- [19] Ledinegg, M., *Instability flow during natural forced circulation*. Warme, 1938. **61**(8): p. 891-898.
- [20] Kandlikar, S.G., et al. *High-speed photographic observation of flow boiling of water in parallel mini-channels. in 2001 National Heat Transfer Conference (NHTC2001), Jun 10-12 2001*. 2001. Anaheim, CA, United States: American Society of Mechanical Engineers.
- [21] Palmer, H.J., *The hydrodynamic stability of rapidly evaporating liquids at reduced pressure*. Journal of Fluid Mechanics, 1976. **75**: p. 487-511.