

Caractérisation des transferts de chaleur au sein de microcanaux soumis à des conditions d'ébullition convective lors de vols paraboliques: analyse des coefficients de transferts locaux.

Sébastien LUCIANI*, David BRUTIN, Ouamar RAHLI, Christophe LE NILIOT, Lounès TADRIST

Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille - Laboratoire IUSTI
 Technopôle de Château-Gombert - 5 rue Enrico Fermi - 13453 Marseille – France
 * sebastien.luciani@polytech.univ-mrs.fr

Résumé - L'ébullition convective en minicanaux est un phénomène complexe qui fait l'objet de nombreuses études. Des campagnes de vols paraboliques ont été effectuées à bord de l'A300 Zero-G afin de pouvoir évaluer et quantifier l'influence de la gravité sur ces écoulements. L'approche inverse est ici indispensable car dans notre configuration, une approche directe risquerait de perturber l'écoulement d'où la nécessité d'appliquer une méthode non intrusive. Le problème inverse traite de l'estimation de conditions limites inconnues et repose sur la méthode des éléments de frontières - BEM. Il consiste dans notre configuration à inverser des mesures expérimentales (thermocouples) afin d'estimer la densité de flux surfacique et la température de surface dans un microcanal.

Nomenclature

h	coefficient convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
DH	diamètre hydraulique, m	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
Q_m	débit massique, $g.s$	ϕ	densité de flux, $W.m^{-2}$
e	épaisseur minicanal, μm	χ	titre vapeur
g	niveau de gravité ($1g = 9,81 m.s^{-2}$)	<i>Indices</i>	
Re	nombre de Reynolds	<i>in</i>	entrée du minicanal
P	pression, Pa	<i>out</i>	sortie du minicanal
T	température, $^{\circ}C$	<i>sat</i>	saturante
U	vitesse débitante, $m.s^{-1}$	<i>wall</i>	surface

1. Introduction

L'ébullition est un mode de transfert de chaleur très efficace et présente un grand intérêt notamment dans le domaine spatial : les échanges thermiques et les coefficients d'échange associés sont élevés. De plus, la nécessité d'accroître les performances des équipements et parfois de les miniaturiser, afin de mieux comprendre et maîtriser les phénomènes physiques en cause explique le nombre très important de travaux et d'ouvrages publiés à ce jour. La plupart de ceux-ci ont pour but d'établir des corrélations entre les paramètres physiques de l'expérience et les coefficients d'échange, mais il s'agit de configurations particulières, si bien que les résultats ne sont valables que pour le cas considéré et concernent en quasi-totalité les transferts en gravité normale ([1-4]). Bien que cela constitue un point de départ pour les applications spatiales, il est nécessaire de quantifier les différences produites par les changements de gravité sur les transferts avec transition de phase liquide-vapeur. Cette approche permettra d'obtenir de nouveaux modèles et corrélations valides, et nous conduira à une meilleure compréhension des mécanismes physiques gouvernant les transferts. En 1995,

Zhao et Rezkallah [5] présentent des données expérimentales obtenues à bord de l'appareil de la NASA KC-135, les pertes de charge par frottement dans les écoulements diphasiques en convection forcée sont du même ordre de grandeur que celles mesurées sur Terre. Ils obtiennent un accord raisonnable avec différents modèles empiriques (homogène, Martinelli-Lockhart, Friedel). Cependant, il n'existe que relativement peu d'études dédiées à l'analyse de ce type de problème dans le cas des écoulements diphasiques avec changement de phase en microgravité. Les effets de gravité semblent principalement se traduire par des modifications de structure (topologie) des écoulements plutôt que par des modifications de comportement hydraulique de structures similaires. Néanmoins, de nouvelles données expérimentales sont nécessaires pour clarifier ces points. Les sections des minicanaux étudiées sont constituées de diamètres hydrauliques D_H variant de 0,7 à 1,4 mm pour explorer l'effet de l'épaisseur de confinement (variant de 254 μm à 654 μm) sur les transferts. Nous avons mis en oeuvre un dispositif expérimental permettant d'observer les structures d'écoulement engendrées dans des minicanaux en relation avec les paramètres de contrôle liés à l'écoulement et la génération des bulles. Les activités expérimentales couvrent les principales problématiques liées à cette thématique : flux critique, interface liquide-vapeur, transferts de chaleur et sont réalisées dans le cadre du projet MAP Boiling fondé par l'ESA. Les résultats scientifiques obtenus concernent la formation de bulles pendant l'ébullition convective dans un minicanal en régime de microgravité et l'étude des coefficients de transferts associés. Des études précédentes ont montré l'influence de la gravité sur les structures de ces écoulements au sein de minicanaux (taille des bulles, régime du fluide) [6]. L'analyse de ces résultats a conduit à la définition d'un coefficient convectif global plus important en microgravité. Comme les transferts de chaleur ainsi que l'hydrodynamique relatifs aux microcanaux sont nettement différents des écoulements macroscopiques [7-10], 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 microcanaux [11]. Nous présenterons dans cette communication une analyse des coefficients d'échange de chaleur expérimentaux obtenus en fonction des paramètres suivants : gravité, nombre de Reynolds et titre massique.

2. Principe de fonctionnement

2.1. Présentation de l'expérience

Le principe retenu est un canal chauffé par la face arrière, traversé par un fluide en écoulement. Le dispositif est composé de plusieurs parties : les canaux instrumentés (Figure 1), un condenseur à effet Peltier et un pousse seringue médical. Ainsi élaboré, ce dispositif permet de contrôler les paramètres relatifs au chauffage et au fluide (température d'entrée dans le canal, flux de chaleur en face arrière, débit volumique en entrée de canal). On relève les paramètres du fluide en écoulement à différents niveaux du canal. Les μ -thermocouples sont positionnés sous la surface et permettent de remonter à la température et au flux de chaleur pariétal. La visualisation est réalisée au travers de la face avant transparente avec une caméra rapide. Parallèlement aux mesures de pressions et de températures, l'acquisition vidéo rapide à 1000 images de l'écoulement est réalisée aussi bien à 1,8g qu'en microgravité. Cette procédure est répétée pour chaque débit d'entrée du canal. Un post-traitement est réalisé sur les données acquises après avoir identifié la plage stationnaire de chaque condition opératoire (débit fluide, puissance de chauffe). Plusieurs expériences dans lesquelles les principaux paramètres conditionnant les écoulements et les transferts de chaleur en ébullition convective sont modifiés : débit de liquide injecté, puissance de chauffage, confinement pariétal et

gravité. Cette méthode nous permet ainsi de calculer le coefficient d'ébullition local h associé connaissant la température de saturation du fluide.

2.2. Description des minicanaux

Le dispositif expérimental est modélisé par un barreau rectangulaire composé de trois matériaux; une couche de polycarbonate ($\lambda=0,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) qui sert d'isolant, une semelle de ciment ($\lambda=0,83 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) instrumenté par 21 μ -thermocouples et au milieu une plaque d'inconel® ($\lambda=10,8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) dans lequel est gravé le minicanal. L'acquisition des pressions et des températures s'effectue simultanément à différents niveaux du canal où s'écoule le fluide. Le minicanal (Figure 1) est gravé sur une plaque d'inconel centré sur la face supérieure. Au dessus du canal, nous disposons d'une série de capteurs de températures et de pression et à l'intérieur du barreau en ciment, 5 fils chauffants fournissent une puissance de 33 W.m⁻¹. Les thermocouples (de type Chromel-Alumel, diamètre 140 μm) sont situés à une hauteur de 9 mm et nous permettent de connaître la température en différentes positions (x, y, z). La position exacte des capteurs a été obtenue par rayons X (tomographie effectuée dans le cyclotron de l'ESRF à Grenoble) avec une résolution de l'ordre de 200 μm . Les expériences qui font l'objet de cet article sont menées avec du HFE-7100 du fait qu'il est transparent, inodore, ininflammable, non explosif, et qu'il présente une basse température d'ébullition (54°C à 835 mbar). La pression est maintenue constante à 835 mbar.

2.3. Expérience embarquée lors de vols paraboliques

Les expériences sont réalisées deux fois pour des conditions identiques (débit de liquide et flux de chaleur) afin de faire l'acquisition de la vidéo rapide en hypergravité (1,8g) et en microgravité (0,05g). Nous présentons dans les sections suivantes, des évolutions typiques obtenues pour un minicanal de 0,254x6x50 mm³ de diamètre hydraulique 0,844 mm, une vitesse massique du liquide de 69 kg.s⁻¹.m⁻², un flux de chaleur de 3 W.cm⁻². Une campagne se compose de 3 journées de vol. 31 paraboles sont effectuées par journée ce qui permet d'effectuer au maximum 93 expériences par jour. Une parabole se déroule toujours en 3 phases : ressource – injection – ressource. La première ressource permet d'acquérir l'angle de 47 degré nécessaire à l'injection. La deuxième ressource permet de revenir en vol stationnaire. La première phase d'hypergravité et la phase de microgravité sont étudiées.

3. Résultats

3.1. Analyse

Les mesures ont été traitées à l'aide d'une méthode inverse qui repose sur la méthode des éléments de frontières (*BEM*, Boundary Element Method). Cette méthode à résidus pondérés nous permet une formulation de contour avec une relation directe entre les inconnues de surface et les mesures internes. On résout ici un problème 3D stationnaire afin de décrire le comportement de l'ébullition convective pour trois niveaux de gravité (μg , 1g et 1,8g). En ce qui concerne les profils de température (Figure 2), on remarque que la température dans le minicanal augmente suivant x et ce phénomène traduit bien un échauffement à l'origine de l'ébullition convective (formation des bulles). De plus en ce qui concerne les régimes d'écoulement, on s'aperçoit d'après la théorie sur les mécanismes d'écoulements ascendant dans les tubes verticaux (Figure 3) qu'en microgravité, on visualise des gouttelettes et un écoulement annulaire (Figure 4) avec en sortie de la vapeur sèche alors qu'en gravité terrestre,

on a un écoulement à bulles avec des bouchons de vapeur. Ces bouchons ont pour effet d'augmenter la température de paroi au bord ($T_{sat} = 54^{\circ}\text{C}$).

3.2. Paramètres agissant sur les transferts thermiques de l'écoulement

3.2.1. Influence du titre massique

Récemment Kandlikar a proposé une corrélation (Eq. 1), reliant le coefficient convectif au titre massique:

$$h = h_1 \left[C_1 C_o^{C_2} (25 Fr_{le})^{C_5} + C_3 Bo^{C_4} F_K \right] \quad (1)$$

avec $C_o = \left(\frac{1-\chi}{\chi} \right)^{0.8} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5}$ et $Fr_{le} = \frac{G^2}{\rho_l^2 g D}$

Où les constantes de C_1 à C_5 sont données dans des tables [12] et où F_K est un paramètre dépendant du fluide. On s'aperçoit que le coefficient convectif pour les régimes de gravité terrestre et l'hypergravité sont semblables (Figure 5) et correspondent avec la théorie (Figure 6). Par contre, en microgravité, la théorie et l'expérience ne correspondent pas (ordre de grandeur plus grand du coefficient convectif global). Ce résultat s'explique par le fait que la relation de Kandlikar n'est valable qu'en gravité terrestre. Afin d'établir de nouveaux modèle propre à l'ébullition convective en microgravité, il est nécessaire de quantifier les échanges de chaleur correspondant.

3.2.2. Influence du nombre de Reynolds

Le coefficient convectif est croissant lorsque le nombre de Reynolds augmente. On remarque que les profils sont similaires en hypergravité et gravité terrestre et en microgravité le coefficient convectif global est 30 % plus important (Figure 7). De manière générale, il est plus haut à l'entrée du minicanal – phénomène qui est indépendant du niveau de pesanteur (de l'ordre de $6000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ en microgravité et $4000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ en hyper et gravité terrestre).

3.2.3. Influence de la gravité

Au regard des profils de coefficient convectif en fonction de la gravité (Figure 8), il est clair que la gravité a une influence sur l'écoulement. Premier point, les résultats en gravité terrestre et en hypergravité sont analogues (coefficient convectif en moyenne égal à $3500 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Deuxièmement, pendant la phase de microgravité le coefficient est plus élevé avec une valeur de l'ordre de $5500 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ en moyenne. Troisième point, quelque soit le niveau de gravité, dès que la vapeur remplit le canal, le coefficient d'échange chute fortement pour atteindre un niveau qui caractérise un transfert thermique avec seulement une phase vapeur.

4. Conclusions et perspectives

L'influence du niveau de gravité sur l'ébullition convective en minicanaux a été étudiée lors de campagnes de vols paraboliques. Nous avons mis en évidence l'influence de la gravité sur l'ébullition convective au sein de minicanaux. Les transferts thermiques sont en effet plus importants pendant cette phase. De plus, elle engendre des structures à poches de vapeur qui remplissent la largeur du minicanal alors que dans le cas de l'hypergravité, on observe une

structure à bulle classique. Cependant, plus d'expériences sont nécessaires avec d'autres points de fonctionnement pour confirmer ces premiers résultats.

Références

- [1] R. Siegel, *Effects of reduced gravity on heat transfer*, *Advances in Heat Transfer*, vol. 4, p 143-227 (1968).
- [2] J. Thome, *Enhanced boiling heat transfer*, Hemisphere Pub. Corp. (1989).
- [3] P. Whalley, *Boiling, condensation and gas-liquid flow*, Oxford sci. Pub., (1987).
- [4] R. Shah, *Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries*, Begell house Inc., (1999).
- [5] L. Zhao, K.S. Rezkallah. *Pressure drop in gas-liquid flow in microgravity*, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 21, 5, (1995), p. 837-849.
- [6] Brutin D., *Ecoulements liquides en microtubes et ébullition convective en minicanaux : étude expérimentale et modélisation*, Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille I, France, 2003.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Hetsroni, G., et al., *Fluid flow in micro-channels*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005. 48(10): p. 1982-1998.
- [12] Van P. Carey, *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena*, Mechanical engineering, 1992 p. 521

Remerciements

Nous remercions le CNES et l'ESA (MAP Boiling) pour leurs soutiens financiers. Nos remerciements vont également à Novespace pour leur aide technique lors de la réalisation de l'expérience et lors des campagnes de vols PF52/CNES et PF53/ESA et à l'équipe de l'ESRF de Grenoble pour nous avoir permis d'effectuer les tomographies des barreaux.

5. Présentation des figures

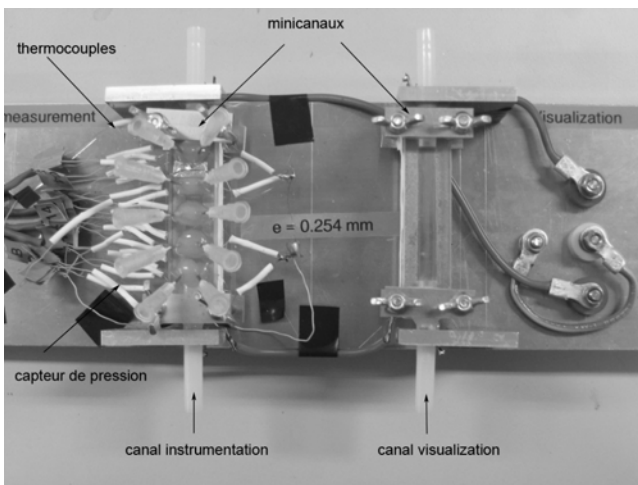


Figure 1 : Couplage des deux barreaux (à gauche pour les mesures, à droite pour la visualisation)

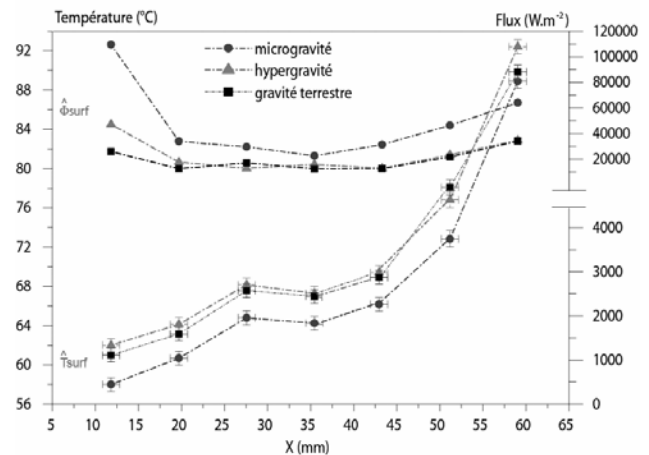


Figure 2 : Température (T_{wall}) et flux (ϕ_{wall}) surfacique le long du minicanal ($e=254 \mu m$)

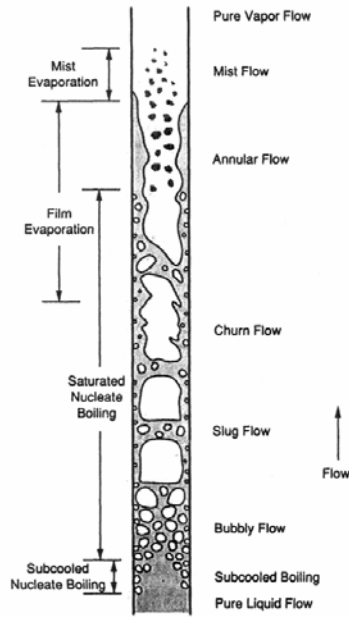


Figure 3 : Régimes d'écoulement et mécanismes d'ébullition convective caractéristiques dans un tube orienté verticalement



Figure 4 : Structure d'écoulement pour $D_H=0,84$ mm en gravité terrestre (à gauche) et microgravité (à droite) ($Q_m=95$ kg.s⁻¹)

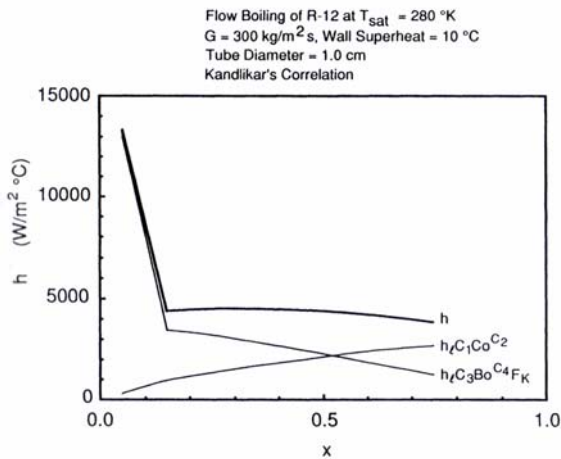


Figure 5 : Coefficient d'échange en fonction du titre vapeur avec la corrélation de Kandlikar

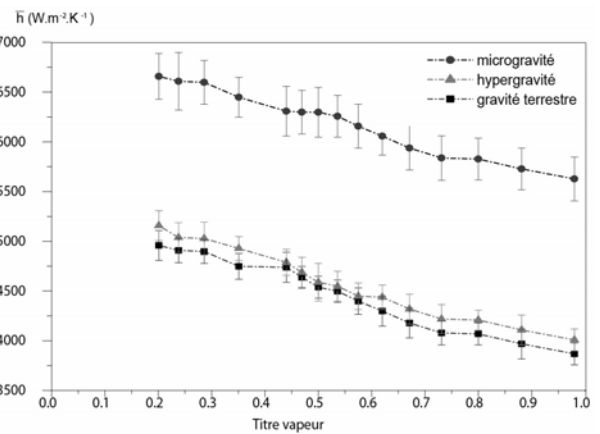


Figure 6 : Evolution du coefficient d'échange moyen en fonction du titre vapeur

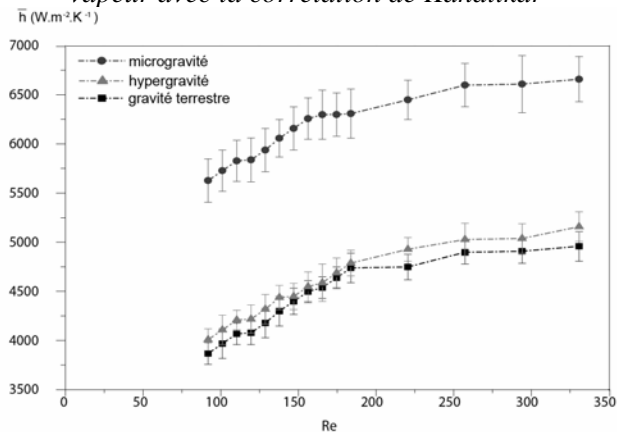


Figure 7 : Evolution du coefficient d'échange moyen fonction du nombre de Reynolds

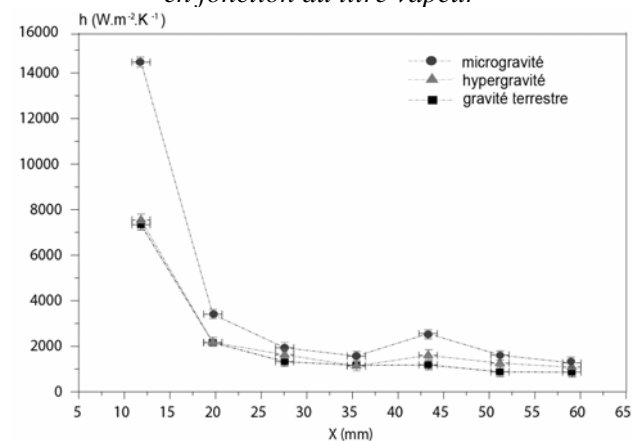


Figure 8 : Evolution du coefficient convectif local fonction de la longueur du minicanal ($e=254$ μm)