

Influence de l'hyper et de la microgravité sur l'ébullition convective en minicanaux

David BRUTIN*, Sébastien LUCIANI, Ouamar RAHLI, Christophe LENILIOT, Lounès TADRIST

Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille - Laboratoire IUSTI
Technopôle de Château-Gombert - 5 rue Enrico Fermi - 13453 Marseille - France

*(auteur correspondant : david.brutin@polytech.univ-mrs.fr)

Résumé - Nous présenterons ici les premiers résultats issus de campagnes de vols paraboliques. L'objectif du dispositif à long terme est l'accès au coefficient de transfert local lors de l'ébullition convective en minicanaux. Les diamètres hydrauliques varient de 1.2 mm à 0.5 mm. L'influence de la gravité (1.8g et μ g) sur les structures d'écoulement, les pertes de charge est ici présentée. L'analyse des transferts thermiques est présentée dans une autre communication de ce congrès par S. Luciani.

Nomenclature

T	Température, °C	Δ	Différence entre l'entrée et la sortie
J_z	Niveau de gravité, g ($1g = 9.81 \text{ m/s}^2$)	ρ	Masse volumique, kg/m^3
P	Pression, Pa	<i>Indices et exposants</i>	
S	Vitesse de glissement, -	V	Vapeur
L	Longueur, m	L	Liquide à l'entrée du canal
U	Vitesse débitante, m/s	out	A la sortie du canal
Q_w	Densité de flux de chaleur, W/m^2	I	Inertiel
Q_m	Débit massique, g/s	T	Total
<i>Symboles grecs</i>		G	Gravitationnel
α	Taux de vide, -	F	Frottement
χ	Titre vapeur, -		

1. Introduction

L'ébullition est un mode de transfert de chaleur très efficace. La nécessité d'accroître les performances des équipements et parfois de les miniaturiser, et pour cela, 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 (cf. [1-4] par exemple). 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 dans le domaine spatial, 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). Il n'existe que relativement peu d'études dédiées à l'analyse de ce type de problème dans le cas des écoulements

diphases 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 d'écoulement de structures similaires. Néanmoins de nouvelles données expérimentales sont nécessaires pour clarifier ces points. Les expériences qui font l'objet de cet article sont menées sur le fluide 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) ainsi qu'une faible enthalpie de changement de phase (20 fois moins que l'eau). La pression cabine est maintenue constante à 835 mbar, la pression dans la boucle est autour de 835 mbar grâce à une seringue d'autorégulation. Les sections de minicanaux étudiées seront constituées de diamètres hydrauliques variant de 0,7 à 1,4 mm pour explorer l'effet de l'épaisseur de confinement sur les transferts (variant de 0,254 mm à 0,654 mm). Nous avons mis en œuvre 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.

2. Principe 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, un condenseur à effet Peltier, 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). Les cellules d'essai sont rectangulaires de différentes dimensions. Les canaux sont gravés dans des plaques d'inconel® qui sont ensuite recouvertes de plaques de polycarbonate. Des fils chauffants noyés dans une semelle de ciment assurent un chauffage de la face arrière du canal tandis que les visualisations rapides des structures d'écoulement diphases sont réalisées par la face avant transparente. L'instrumentation est basée sur l'acquisition simultanée des pressions et températures. 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. Le chauffage est réalisé avec des fils chauffants noyés dans une semelle en ciment. 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 img/s de l'écoulement est réalisée aussi bien à 1,8g qu'en microgravité. Cette procédure est répétée pour chaque débit d'entrée de 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.

3. Résultats

3.1 Déroulement d'une parabole

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 obtenus pour : un minicanal de 0,454x6x50 mm³ de diamètre hydraulique 0,844 mm, un débit de liquide de 8 ml/min soit 69 kg.s⁻¹.m⁻², un flux de chaleur de 3W/cm². Une campagne se compose de 3 journées de vol. 31 paraboles sont effectuées par journée ce qui permet donc 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° 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.

3.2 Influence de la gravité sur les pressions

Sur la figure 3, on observe que le passage en hypergravité ne change pas dynamiquement l’évolution des pressions ; cependant dès l’injection les pressions diminuent fortement durant la variation de gravité puis fluctuent autour d’une valeur moyenne durant la phase de microgravité. Dès le début de la ressource de fin de microgravité les pressions augmentent fortement pour de nouveau diminuer dès la fin de la parabole. La figure 3 permet d’analyser uniquement la perte de pression de l’écoulement sur une parabole. Il apparaît un comportement « copié » sur le signal de pesanteur.

Les mêmes profils de perte de pression sont obtenus durant toutes les paraboles. La perte de pression totale mesurée varie linéairement en fonction du nombre de Reynolds car l’ensemble de l’écoulement dans le minicanal est diphasique et évolue à bas Reynolds. La perte de pression totale est uniquement une perte de pression diphasique car le liquide entre à saturation grâce aux préchauffeurs. Les titres en vapeur de sortie sont compris entre 0,14 et 0,87. Pour le flux de chaleur 32 kW/m², l’écoulement à plus petit débit sort du minicanal avec un nombre de Reynolds de 55. Pour cette plage de variation des paramètres d’entrée, la perte de pression est donc uniquement la somme de trois contributions : gravitaire, inertielle par frottement.

Pour analyser plus finement l’influence de la gravité sur l’écoulement, nous allons nous intéresser à la perte de pression par frottement uniquement en retirant la partie gravitaire ainsi que la contribution inertielle. Les équations de 1 à 5 permettent de déterminer la perte de pression par gravité, pour cela nous utilisons une formule avec une vitesse de glissement entre phases séparées donnée par la corrélation de Zivi [6].

$$\Delta P_G = \int_0^L \rho(z) g dz \quad (1) \quad \rho(z) = \alpha(z)\rho_v + (1 - \alpha(z))\rho_L \quad (2)$$

$$\alpha(z) = \frac{\chi(z)\rho_L}{\chi(z)\rho_L + S(z)\rho_v(1 - \chi(z))} \quad (3) \quad \chi(z) = \chi_{out} \frac{z}{L} \quad (4)$$

$$S(z) = \left(1 + \chi(z) \left(\frac{\rho_L}{\rho_v} - 1 \right) \right)^{1/2} \quad (5)$$

La perte de pression inertielle est donnée par :

$$\Delta P_I = \rho_L U_L^2 (S(L) - 1) \quad (6)$$

La contribution inertielle pour notre plage de fonctionnement est toujours inférieur à 15 Pa ce qui représente moins de 1% de la perte de pression totale. En ce qui concerne la perte de pression par frottement entre phase, elle est donnée par l’équation 7 :

$$\Delta P_F = \Delta P_T - \Delta P_G - \Delta P_I \quad (7)$$

La figure 5, présente la perte de pression par frottement basée sur l’équation 7. Cette dernière n’est pas mathématiquement reliée à la gravité. Cependant le comportement

expérimental met en évidence une croissance de la perte de pression avec le débit fonction de la gravité. Cette perte de pression par frottement est composée de trois contributions, le frottement liquide, vapeur et entre phase ; seule cette dernière contribution est fonction de la structure d'écoulement.

La figure 4 indique également que la pente de ces variations est linéaire avec la gravité ce qui met en évidence que le frottement entre phase ici mis en évidence est linéairement relié à la gravité. Plus d'expériences pour d'autres points de fonctionnement nécessitent d'être traités et réalisés pour confirmer ce point. Si la perte de pression par frottement est modifiée par le niveau de gravité alors la structure de l'écoulement l'est également et plus particulièrement les interfaces liquide-vapeur. Pour un niveau plus important de gravité, la force d'Archimède s'exerçant sur une bulle est plus importante. Pour expliquer cette augmentation avec la gravité, nous présentons dans le paragraphe suivant l'analyse des structures d'écoulement.

3.3 Structures d'écoulement

Le minicanal de visualisation est ici utilisé pour analyser les différentes structures d'écoulement. Sur la figure 5, nous comparons pour une même géométrie, un même flux de chaleur et un même débit massique en entrée de minicanal, les structures d'écoulement en hypergravité (à gauche) et en microgravité (à droite). Bien que le confinement soit présent, les principales différences mises en évidence le sont sur la taille des bulles et paquets de vapeur. Pour les deux cas, le titre vapeur de sortie est de 0,2. La photo de gauche prise en hypergravité met en évidence un nombre important de bulles de petites tailles alors qu'en microgravité le minicanal est uniquement rempli de paquets de vapeur. La taille des bulles peut s'expliquer par les forces agissant sur les interfaces liquide-vapeur. Le diamètre de détachement lui aussi est influencé par le niveau de gravité. Avec un niveau de gravité plus important, la poussée d'Archimède étant plus importante, le détachement des bulles de vapeur sera plus précoce. Le nombre de Bond qui compare les effets de capillarité et de poussée d'Archimède intervient ici car dans les deux cas les forces convectives sont identiques. Avec un niveau de gravité très faible (0,05g contre 1,8g) une bulle de vapeur qui croît sur la surface chauffante deviendra importante en taille comparée à la même situation en hypergravité. Ainsi une augmentation du nombre de bulles augmente la surface totale de frottement liquide-vapeur et donc le frottement entre phase. Ces observations sont proposées comme explications au phénomène d'augmentation du frottement entre phases avec la gravité.

4. Conclusion

L'influence du niveau de gravité sur l'ébullition convective en minicanaux a été ici étudiée lors de campagnes de vols paraboliques. Nos premiers résultats sur les pertes de pression ainsi que les structures d'écoulement mettent en évidence l'influence du niveau de gravité sur la perte de pression par frottement entre phases. Durant les phases de microgravité, la perte de pression par frottement entre phase est deux fois plus faible comparée à la gravité terrestre, durant les phases d'hypergravité, elle est 1,3 fois plus importante qu'en gravité terrestre. L'analyse des structures d'écoulement montre des structures à paquets de vapeur remplissant tout le minicanal en microgravité alors qu'en hypergravité on observe uniquement des bulles isolées. Les mécanismes de coalescence sont donc fortement affectés par le niveau de gravité. Ces deux points peuvent également expliquer les résultats observés sur les pertes de pression. 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, pp 143-227 (1968).
- [2] J. Thome, *Enhanced boiling heat transfer*, Hemisphere Pub. Corp. (1989).
- [3] R. Shah, *Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries*, Begell house Inc., (1999).
- [4] P. Whalley, *Boiling, condensation and gas-liquid flow*, Oxford sci. Pub., (1987).
- [5] L. Zhao, K.S. Rezkallah. Pressure drop in gas-liquid flow in microgravity, *Int J Multiphase Flow*, vol. 21, 5, (1995), pp 837-849.
- [6] Zivi S. M., Estimation of steady-state steam void fraction by means of the principle of minimum entropy production, *J. of Heat Transfer*, Vol 86, (1964), pp 247-252.

Remerciements

Nous remercions le Centre National d'Etudes Spatiales et l'Agence Spatiale Européenne pour leurs soutiens financiers ainsi que pour les campagnes de vols paraboliques PF52-CNES et PF53-ESA. Nous remercions également toute l'équipe de Novespace® pour leur aide technique durant les campagnes.

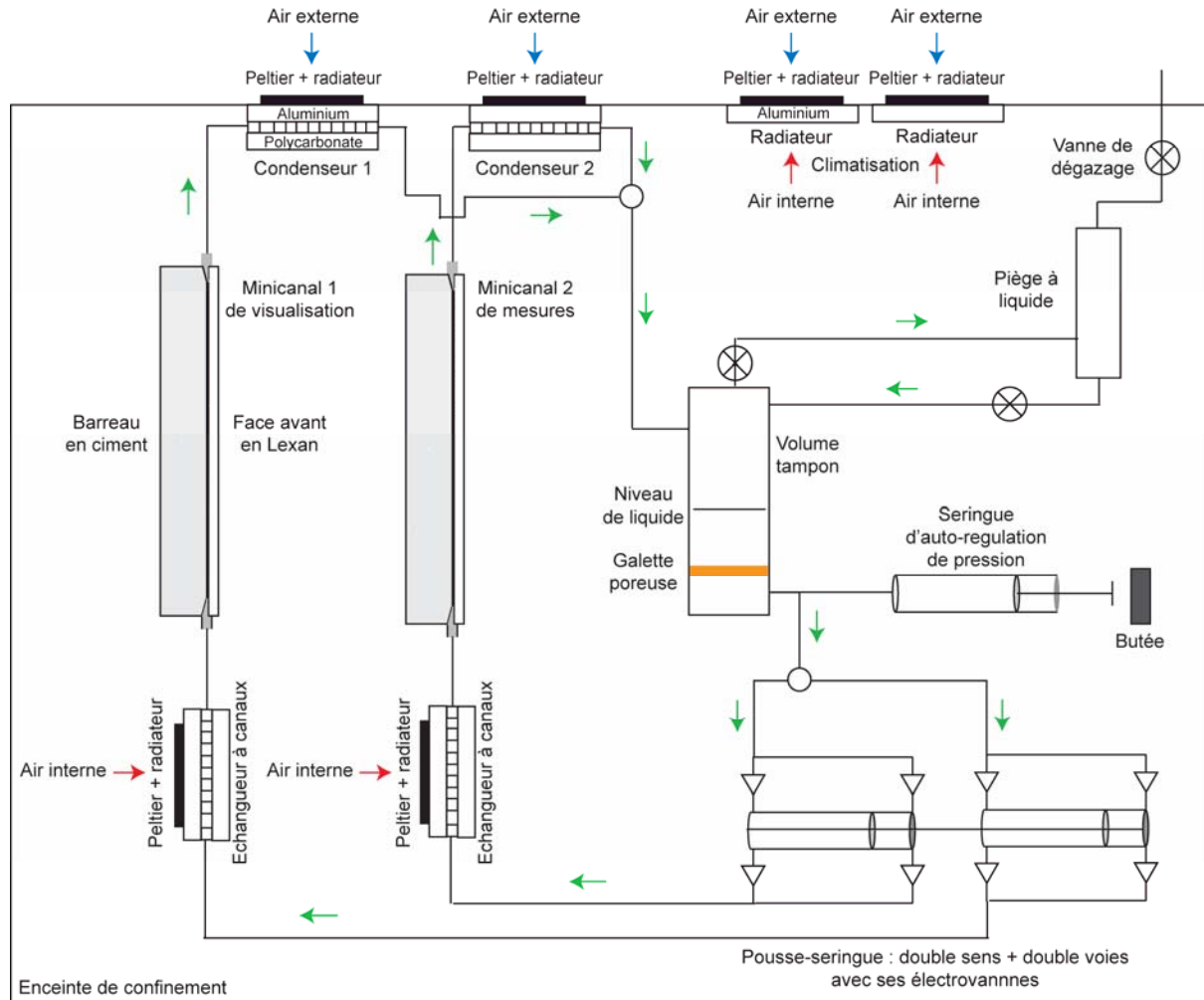


Fig. 1 : Principe de l'expérience réalisée : tout le fluide est dans l'enceinte de confinement.

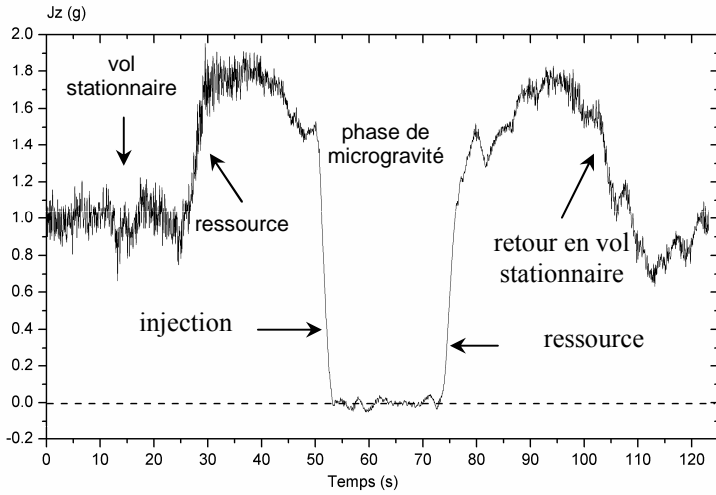


Fig. 2 : Evolution de la gravité suivant l'axe z sur une parabole entière.

Fig. 3 : Evolution des pressions d'entrée et en sortie du minicanal sur une parabole entière.

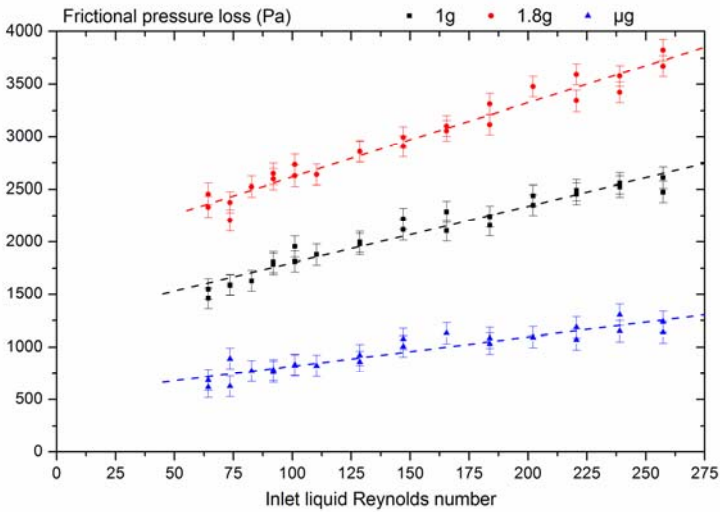
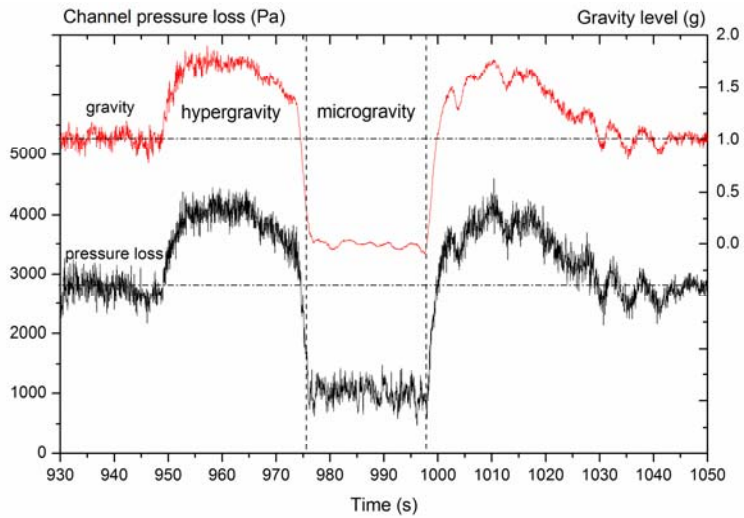


Fig. 4 : Perte de pression par frottement entre phase en fonction du nombre de Reynolds ($Q_w = 32 \text{ kW/m}^2$)

Fig. 5 : Structures d'écoulement pour $D_H = 0,84 \text{ mm}$ en hypergravité (à gauche) et microgravité (à droite) ($Q_w = 32 \text{ kW/m}^2$, $Q_m = 95 \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$)

