



HAL
open science

Mesure du débit de liquide instationnaire en ébullition naturelle confinée

Mourad Ait Ameer, Benoît Stutz, Monique Lallemand

► **To cite this version:**

Mourad Ait Ameer, Benoît Stutz, Monique Lallemand. Mesure du débit de liquide instationnaire en ébullition naturelle confinée. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00154383

HAL Id: hal-00154383

<https://hal.science/hal-00154383>

Submitted on 29 Aug 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MESURE DU DEBIT DE LIQUIDE INSTATIONNAIRE EN EBULLITION NATURELLE CONFINEE

Mourad AIT AMEUR, Benoît STUTZ, Monique LALLEMAND
CETHIL, UMR5008, CNRS, INSA-Lyon, Université Lyon1, F-69 621, Villeurbanne, France
mourad.ait-ameur@insa-lyon.fr, benoit.stutz@insa-lyon.fr, monique.lallemand@insa-lyon.fr

Résumé : Ce travail expérimental porte sur l'étude de l'ébullition naturelle confinée du n-pentane, à l'état saturé sous une pression de 1 bar dans un canal étroit vertical. Des mesures de débit du liquide instationnaire ont été réalisées par analyse d'images et par anémométrie à fil chaud pour des épaisseurs du canal comprises entre 0,4 et 0,8 mm. Les mesures montrent que le débit du fluide qui traverse le canal est faible par rapport au débit du fluide déplacé en entrée du canal.

Mots clés : ébullition confinée, débit instationnaire, expérimental, transferts thermiques.

1. INTRODUCTION

L'intensification des transferts thermiques fait l'objet d'importants efforts de recherche pour répondre à une augmentation croissante des densités de flux à dissiper. Lorsque les dimensions caractéristiques de l'écoulement deviennent inférieures à la longueur capillaire, l'ébullition est dite confinée. On observe une intensification des transferts thermiques à bas flux et une dégradation à haut flux par rapport à l'ébullition libre [1]. La dégradation des transferts à haut flux est attribuée à l'augmentation du taux de vide avec la réduction de la section de passage, conduisant à des assèchements de la paroi chauffée [2]. L'intensification des transferts thermiques à bas flux est généralement attribuée à trois mécanismes physiques : l'intensification des transferts de chaleur par changement de phase, une augmentation du nombre de sites de nucléation actifs et l'intensification des effets convectifs. L'influence de l'épaisseur du canal sur le débit de liquide traversant le canal n'a été étudiée que pour l'eau en ébullition dans un canal confiné vertical pour des épaisseurs du canal supérieures à la longueur capillaire [3].

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre l'évolution des transferts convectifs monophasiques au sein du liquide avec la réduction de l'épaisseur du canal. Des mesures de débit du liquide par anémométrie à fil chaud et des mesures par analyse d'images ont été développées en vue de répondre à cet objectif.

2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

2.1. Cellule d'essais

La cellule d'essais est composée d'une cuve remplie de n-pentane à l'état saturé ($p = 1$ bar) contenant un échantillon en cuivre, isolé thermiquement par du téflon[®] sur toutes ses faces excepté sur la surface d'échange [4]. Les conditions de saturation sont maintenues constantes par l'intermédiaire d'un condenseur et d'une résistance chauffante pilotée par un régulateur PID. L'échantillon, un bloc en cuivre de hauteur 120 mm et de largeur 50 mm, est segmenté en cinq éléments isolés thermiquement les uns des autres par des plaques en téflon[®] (2 mm). Chaque élément comporte à sa base une cartouche chauffante de façon à garantir une condition de flux constant en paroi. Deux thermocouples, implantés à 5 et 25 mm de la

surface d'échange et à mi-hauteur de chaque élément, permettent de déterminer la température de la paroi et la densité de flux pariétale imposée. L'espace confiné est situé entre la surface chauffée et le hublot de la cuve, qui constitue la paroi de confinement. L'épaisseur e du canal, comprise entre 0,2 mm et 4,8 mm, est contrôlée à l'aide d'entretoises calibrées. Les visualisations de l'ébullition sont effectuées grâce à une caméra rapide (1000 images s^{-1}). Le débit du liquide est mesuré, soit avec un anémomètre à fil chaud, soit par analyse d'images.

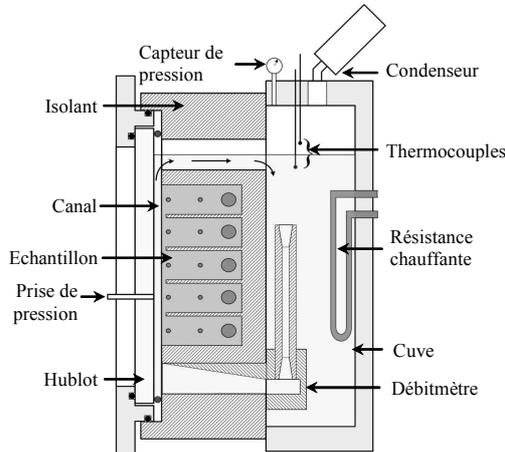


Figure 1 : Cellule d'essais

2.2. Mesure du débit par analyse d'images

La détermination de la distribution spatiale des vitesses des interfaces liquide-vapeur se développant entre la paroi de confinement et la surface chauffée est réalisée en deux étapes successives (figure 2). A partir d'une image brute (fig. 2-a), la position des interfaces est déterminée à l'aide d'une méthode basée sur l'analyse locale du gradient de niveau de gris (fig. 2-b). Les images binarisées sont ensuite traitées à l'aide du logiciel de PIV David 7 (fig. 2-c). A une hauteur donnée du canal, le débit du liquide est estimé par intégration de la distribution des vitesses mesurées sur toute la largeur du canal.

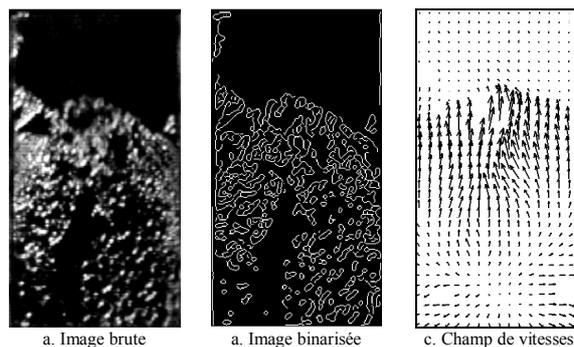


Figure 2 : Mesure des vitesses d'interface par traitement d'images

2.3. Mesure du débit par anémométrie à fil chaud

En raison des conditions expérimentales (ébullition libre instationnaire d'un fluide saturé non conducteur) les méthodes usuelles de mesure du débit ne sont pas adaptées. Afin de valider la méthode de mesure du débit par analyse d'images, on utilise une autre méthode de mesure. La méthode retenue est un débitmètre par anémométrie à fil chaud, qui permet de mesurer que le débit du liquide à l'entrée du canal. Le débitmètre est constitué d'un tube de 10 mm de diamètre et 140 mm de longueur. L'élément sensible est un fil de platine de 25 μm ,

implanté diamétralement à mi-hauteur du tube. Il est relié à un anémomètre à température constante. L'étalonnage quasi-statique, réalisé par une vidange lente d'un réservoir, permet d'établir la loi tension - débit massique délivrée par l'anémomètre (figure 3). L'étalonnage en dynamique est réalisé grâce à un dispositif du type bielle/manivelle, permettant de simuler les fluctuations du débit pour des fréquences et des amplitudes égales à celles rencontrées dans les essais. La figure 4 montre une comparaison entre le débit imposé par le piston et celui mesuré par le débitmètre. On note une bonne concordance entre les deux courbes. L'écart relatif maximum entre le débit imposé par le piston et le débit mesuré est inférieur à 1,5 %.

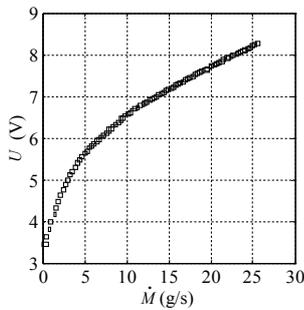


Figure 3 : Etalonnage statique du débitmètre

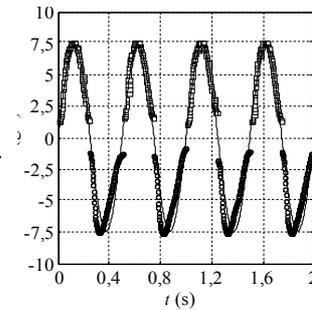


Figure 4 : Etalonnage dynamique du débitmètre
(□ : point expérimentaux, — : débit imposé)

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les visualisations par caméra rapide ont permis de mettre en évidence des régimes d'ébullition instationnaire sur une large gamme de flux. Les figures 5 et 6 montrent un cycle instationnaire pour $e = 0,8$ mm et une densité de flux réduite $\dot{q}/\dot{q}_{\text{crit},e} = 0,9$ ($\dot{q}_{\text{crit},0,8} = 9 \text{ Wcm}^{-2}$). Le cycle peut être décomposé en deux phases. A $t = 0$ s, le canal est essentiellement rempli de vapeur. Un front liquide pénètre à la base du canal ($t = 15$ ms). De petites bulles sont très rapidement émises dans le liquide par les sites de nucléation. A $t = 30$ ms, le front liquide/vapeur atteint le tiers de la hauteur du canal. Le fort taux d'expansion des bulles, associé au confinement, conduit à une réduction sensible, puis à un arrêt de l'alimentation en liquide. Ainsi, à $t \approx 45$ ms, les structures localisées à la mi-largeur et au tiers inférieur du canal sont caractérisées par une vitesse nulle. Leur position correspond au « centre d'expansion » apparent du fluide. Ensuite, pendant la phase d'expansion de la vapeur, le mélange diphasique est expulsé par la base et par le haut du canal (figure 6). Le canal s'assèche progressivement avant l'arrivée d'un nouveau front de liquide.

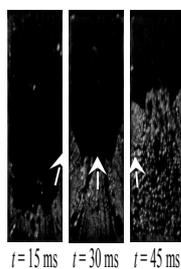


Figure 5 : Phase d'alimentation

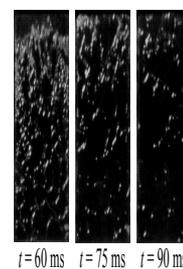


Figure 6 : Phase d'expulsion

Le confinement des écoulements s'accompagne d'une diminution du flux critique (figure 7). Pour une épaisseur du canal inférieure à la longueur capillaire (1,6 mm pour le pentane sous 1 bar), on observe une intensification des transferts thermiques à bas flux par

rapport à l'ébullition libre. L'intensification maximale des transferts thermiques est obtenue pour un régime d'écoulement à bulles. L'optimum $h/h_{\text{libre}} = 7$ correspond à une épaisseur du canal $e = 0,4$ mm. Le développement du régime d'écoulement à phase dispersée se traduit par une diminution des transferts thermiques.

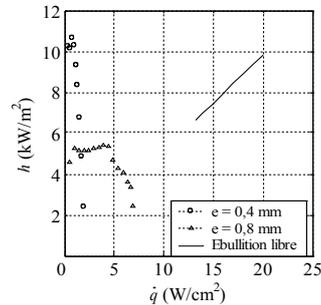


Figure 7 : Influence de l'épaisseur du canal sur le coefficient d'échange

Le débit du liquide à l'entrée du canal, évalué par les deux méthodes, est donné sur la figure 8. On observe une bonne concordance entre les deux méthodes, par conséquent, la mesure par analyse d'images est validée. Le débit massique à l'entrée du canal, moyenné sur un cycle, croît avec l'augmentation de la densité de flux et atteint un maximum pour $\dot{q} = 4 \text{ Wcm}^{-2}$, correspondant à la transition entre un écoulement à bulles et le régime à phase dispersée. Il décroît pour des flux élevés du fait de l'augmentation sensible de la pression au sein du canal lors de la vaporisation du fluide (effet d'inertie et pertes de charge). Le titre moyen (débit du liquide vaporisé obtenu par bilan énergétique/débit mesuré du liquide entrant) en fonction du flux réduit augmente régulièrement avec le flux (figure 9). En sortie du canal, la proportion de liquide non vaporisé reste non négligeable y compris au voisinage du flux critique.

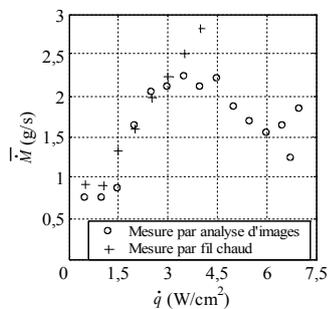


Figure 8 : Débit massique du liquide à l'entrée du canal

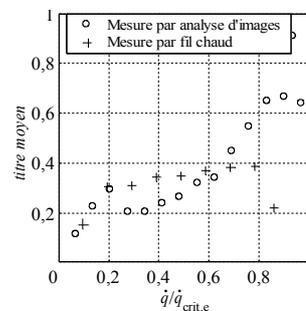


Figure 9 : Titre moyen

L'évolution du débit massique instantané du liquide, mesuré à l'aide du débitmètre à fil chaud à l'entrée du canal, présente une allure sinusoïdale pour le régime d'ébullition pulsée (figure 10). Les débits positifs correspondent aux phases d'alimentation du canal en liquide. Les débits négatifs correspondent à la phase d'expulsion du fluide à la base du canal. Le débit massique moyen du liquide traversant le canal est très faible par rapport à l'amplitude des oscillations du débit du liquide mis en mouvement en amont du canal. Les écoulements de liquide au sein de l'espace confiné étant laminaires, les transferts convectifs associés dépendent de la racine carrée du nombre de Reynolds du liquide. Les mesures de vitesse du liquide au sein de l'espace confiné ne montrent aucune augmentation significative de la vitesse avec la réduction de l'épaisseur du canal. De ce fait, l'intensification des transferts de chaleur avec la réduction de l'épaisseur du canal ne peut être attribuée à l'augmentation des

effets convectifs. Des visualisations par caméra rapide montre la présence de films minces sur la paroi chauffée, permettant une intensification des échanges par changement de phase [5].

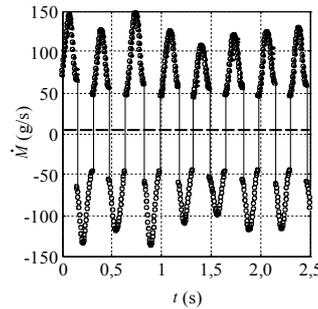


Figure 10 : Fluctuations du débit ($e = 0,8$ mm, $\dot{q}/\dot{q}_{crit,e} \approx 0,8$)
(● : phase d'alimentation. ○ : phase d'expulsion)

4. CONCLUSION

Pour l'ébullition confinée dans un canal vertical, des mesures de débit ont été réalisées par analyse d'images. Cette technique a été validée par des mesures du débit à l'entrée du canal à l'aide d'un anémomètre à fil chaud. Le confinement de l'ébullition s'accompagne de régimes d'écoulement instationnaire. Les amplitudes des oscillations du débit du liquide mis en mouvement en amont du canal lors des cycles instationnaires sont plus importantes que le débit moyen du liquide traversant le canal. L'intensification des transferts de chaleur avec la réduction de l'épaisseur du canal ne peut être attribuée à l'augmentation des effets convectifs, mais elle est principalement due à la présence de films minces.

Nomenclature

e	épaisseur du canal, m	U	tension, V
h	coefficient d'échange, $Wm^{-2}K$		
\dot{M}	débit massique, $kg s^{-1}$	Indices	
p	pression, Pa	crit	flux critique
\dot{q}	densité de flux, Wm^{-2}	e	confiné
t	temps, s	libre	ébullition libre

Références

- [1] J. Bonjour, M. Lallemand, Effects of confinement and pressure on critical heat flux during natural convective boiling in vertical channels, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 24, 2, 191-200, 1997.
- [2] B. Stutz, M. Aït-Ameur, M. Lallemand, Void fraction measurements during pool boiling in narrow spaces, *Euromech Colloquium 472 on Microfluidics and Transfer*, Grenoble, 6-8 Sept 2005, 7 p.
- [3] C. Xia, W. Hu, Z. Guo, Natural convective boiling in vertical rectangular narrow channels, *Exp Thermal and Fluid Science*, 12, 313-324, 1996.
- [4] M. Aït-Ameur, B. Stutz, M. Lallemand, Régime d'instabilités en ébullition naturelle confinée, *La Houille Blanche*, 4, 31-36, 2006.
- [5] M. Aït-Ameur, Etude expérimentale de l'ébullition naturelle confinée : analyse des instabilités et des transferts thermiques. *Thèse de Doctorat*, INSA Lyon, 2006, 150 p.