

Etude expérimentale de la répartition des phases lors de la vaporisation dans un micro-canal en configuration de pompage capillaire

Valérie SERIN, Pascal LAVIEILLE*, Marc MISCEVIC

LAPLACE UMR 5213

Université Paul Sabatier, bat 3R1b3

118, route de Narbonne - 31062 Toulouse Cedex 09

*(auteur correspondant : pascal.lavieille@laplace.univ-tlse.fr)

Résumé – Un banc expérimental a été développé afin d'étudier la vaporisation d'un fluide induisant un pompage capillaire. L'étude est effectuée sur un micro-canal unique de section carrée de 500 μm d'arête interne, chauffé uniquement sur les parois supérieure et inférieure pour permettre la visualisation. Un programme de traitement des images obtenues par ombroscopie avec une caméra numérique a été développé offrant la possibilité de déterminer plusieurs grandeurs caractérisant l'écoulement. Une analyse de cet écoulement est proposée en s'appuyant sur les résultats expérimentaux issus du traitement d'images, complétés par les informations fournies par le reste de l'instrumentation mise en place sur le dispositif expérimental.

1. Introduction

Dans un contexte actuel de miniaturisation des systèmes électroniques, les densités surfaciques et volumiques de chaleur dégagées sont de plus en plus importantes. Le développement de ces systèmes se trouve alors conditionné par la capacité à gérer les flux thermiques dissipés. Le refroidissement de tels systèmes tant au niveau de l'évacuation que du transport de la chaleur demande par conséquent des innovations technologiques fiables et performantes. La conception architecturale du refroidissement est également un paramètre important dans la mesure où les systèmes concernant l'électronique de puissance développés à l'heure actuelle s'orientent vers une configuration tridimensionnelle [1]. Pour répondre à ces contraintes des boucles fluides (monophasiques ou diphasiques, à pompage mécanique, capillaire ou gravitaire) sont développés depuis quelques décennies à l'échelle métrique. Il apparaît intéressant de miniaturiser ces systèmes afin de pouvoir les intégrer au plus près de l'objet à refroidir et d'accroître ainsi leur capacité à évacuer la chaleur [2,3]. Les changements d'échelles imposés par cette miniaturisation modifient notablement les mécanismes physiques dominants [4]. Des études ciblées sur ces différents mécanismes doivent être menées pour pouvoir disposer de modèles adaptés à la physique de ces échelles.

L'étude expérimentale présentée s'est focalisée sur un des composants essentiels au fonctionnement d'une micro-boucle, à savoir l'évaporateur. Ce dernier doit assurer la circulation du fluide caloporteur et détient également le rôle crucial de l'évacuation du flux de chaleur dégagé par le composant à refroidir. La compréhension des mécanismes physiques intervenant dans cet élément a été appréhendée dans une configuration simplifiée. La première partie de cette communication est consacrée à la description du banc expérimental. Dans une deuxième partie, le programme de traitement des images obtenues par ombroscopie avec la caméra numérique est détaillé. Ce traitement offre la possibilité de déterminer

plusieurs grandeurs caractérisant l'écoulement diphasique observé. Dans une dernière partie une analyse de cet écoulement est proposée.

2. Dispositif expérimental

2.1. Description

Le banc expérimental (fig.1) est constitué d'un mini-tube horizontal en verre de section carrée, de 500 μm d'arête interne. Afin de vaporiser le fluide, ce mini-tube est chauffé à sa sortie sur une longueur de 3 mm, sur les parois latérales supérieure et inférieure pour permettre la visualisation sur les deux autres faces. Ses extrémités sont chacune connectées à un réservoir. Les niveaux du fluide dans ces deux réservoirs sont maintenus constants et à la même hauteur afin qu'il n'y ait pas d'écoulement. Ainsi le débit obtenu durant les expériences n'est dû qu'aux forces de tension superficielle. Un système de dégazage en amont du mini-tube a été installé afin de réduire au maximum l'influence néfaste de gaz incondensables. Le fluide utilisé est de l'éthanol.

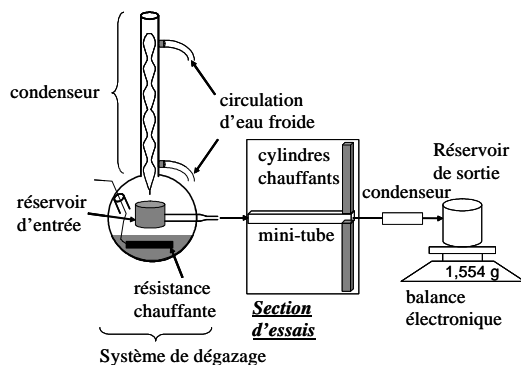


Figure 1 : Schématisation du dispositif expérimental.

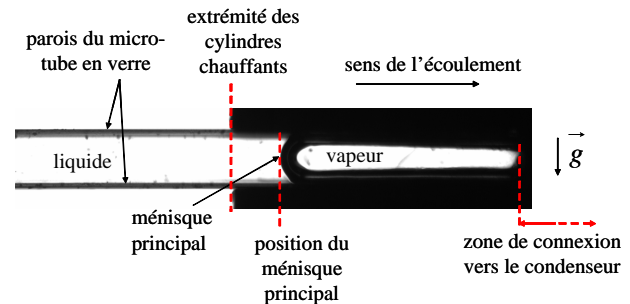


Figure 2 : Exemple d'image obtenue.

2.2. Instrumentation

Deux thermocouples de type-K et de diamètre 0,5 mm sont placés à chacune des extrémités du mini-tube ainsi que 2 dans chacune des extrémités des cylindres chauffants. Les températures sont mesurées avec une précision de 0,2 $^{\circ}\text{C}$. Un capteur de pression différentielle est positionné entre l'entrée et la sortie du mini-tube. Il est de type Sensym SCX01DN et offre une sensibilité de 7 Pa. Toutes les mesures sont relevées grâce à une centrale d'acquisition National Instrument. Le débit du fluide est obtenu par pesée, le réservoir de sortie étant placé sur une balance de marque Précisa et de type XB620M, interfacée, dont la précision est de 1 mg. Pour visualiser la répartition des phases lors de la vaporisation du fluide, une caméra numérique est utilisée. Cette caméra de marque BASLER et de type A202K est positionnée sur deux platines de déplacement horizontal contrôlées par des vis micrométriques donnant le déplacement avec une précision de 10 μm . L'éclairage est obtenu grâce à un stroboscope dont la durée d'un flash est de 10 μs . Ce type d'éclairage permet d'observer nettement, sans effet de traînée, des phénomènes rapidement variables. La fréquence des flashes est synchronisée avec la fréquence d'acquisition de la caméra à 97,5 Hz. Le stroboscope est placé derrière le micro-tube, dans l'alignement de l'objectif de la caméra de façon à obtenir un éclairage en lumière blanche par ombroscopie. Afin de pouvoir réaliser une étude quantitative et statistique des images obtenues, un code numérique de traitement

automatique des images a été développé sous le logiciel commercial Matlab. La description détaillée de ce traitement d'images fait l'objet de la prochaine partie.

3. Traitement des images

Pour chaque test, correspondant à une certaine puissance appliquée, une série de 5 films espacés de 5 min est réalisée. Chaque film comporte 500 images acquises à une fréquence de 97,5 Hz, ce qui correspond à une séquence d'un peu plus de 5 s. Par conséquent, pour chaque campagne expérimentale, 30 films sont réalisés correspondant à 6 puissances appliquées et 5 films par puissance. Le type d'images obtenues avec la caméra numérique est représenté sur la figure 2. Les différentes parties observables y sont repérées, à savoir les parois du tube en verre, les cylindres chauffants, l'interface liquide-vapeur et la connexion en sortie du micro-tube. L'écoulement du fluide sur les images s'effectue de la gauche vers la droite. Les images obtenues permettent d'observer la répartition spatiale des phases lors de la vaporisation, ainsi que l'évolution temporelle de cette répartition. Chaque image comporte 197 lignes et 1024 colonnes. L'intensité lumineuse de chaque point de l'image est codée sur 256 niveaux de gris (8 bits). Le niveau 0 correspond à une intensité nulle (noir), le niveau 255 à l'intensité maximale (blanc). Ces niveaux d'intensité sont donc stockés dans une matrice de dimensions 197x1024. L'objectif est d'obtenir le profil de l'interface liquide-vapeur, ou autrement dit, de l'épaisseur de liquide le long des parois du micro-tube. Les différentes étapes de traitement sont brièvement décrites dans les paragraphes suivants. Une description plus détaillée est disponible dans [5].

3.1. Prise en compte des paramètres optiques et géométriques

Afin d'obtenir des données quantitative de ces images obtenues par ombroscopie, un code de tracé de rayons prenant en compte les différents paramètres optiques et géométriques utilisés sur le banc de mesure a été réalisé. Le principe est de lancer une série de rayons lumineux pour simuler la source de lumière utilisée (ici le stroboscope) et d'évaluer leurs trajectoires à travers les différents milieux traversés (le tube en verre, l'éthanol liquide et vapeur, l'air, les optiques de la caméra) afin de calculer l'image observable sur la caméra. Une série d'images a été calculée en faisant varier la quantité de liquide présente dans les coins du tube. A partir de ces images simulées, le lien entre l'épaisseur réelle de liquide présente dans les coins du tube et l'épaisseur observable sur l'image de la caméra peut être établi. Ces résultats montrent que la présence d'un film de liquide n'est pas décelable en dessous de 14 μm dû au fait que les coins du tube ne sont pas des angles vifs, mais présentent une courbure dont le rayon est estimé à 22 μm . Au-delà de ce seuil de détection, le décalage entre les deux épaisseurs reste constant et égal à 11 μm .

3.2. Vérification de la validité de l'image

Comme il est précisé dans la partie description qualitative qui suit, certaines images présentent une zone diphasique complexe où la phase vapeur est discontinue. Afin d'éliminer les images correspondant à cette situation, un critère de validation des images est préalablement défini. L'analyse d'une image s'effectue selon les étapes suivantes :

- l'image est d'abord binarisée (fig. 3)
- la fonction de détection des zones "bwlabel" disponible dans la toolbox image de matlab est alors appliquée. Cette fonction permet de numéroter les différentes zones blanches de l'image. Deux zones blanches de l'image auront un numéro différent si il

n'existe aucun trajet continu possible en suivant les pixels blancs de l'image permettant de passer d'une zone à l'autre (fig. 3).

- lorsque la phase vapeur est continue, le nombre de zones blanches est de 2, correspondant à la phase vapeur d'une part, et au liquide en amont du ménisque principal d'autre part. Une image présentant plus de deux zones blanches sera donc rejetée (fig. 3).

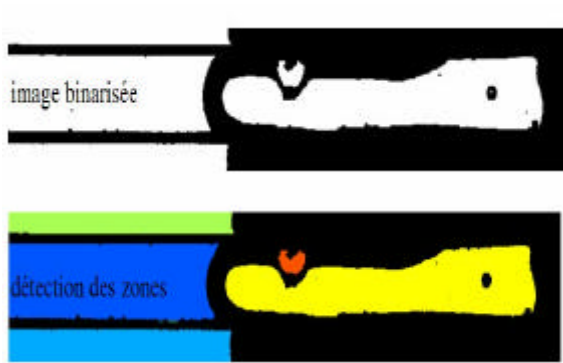


Figure 3 : Exemple d'image rejetée.

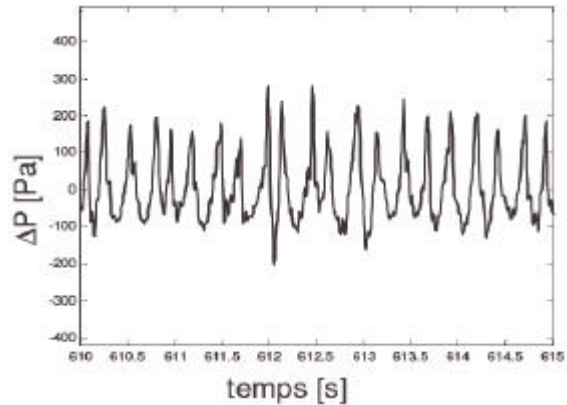


Figure 4 : Evolution temporelle de la différence de pression aux extrémités du micro-tube pour une puissance appliquée de 10,6 W.

Lorsque l'image est acceptée, il reste à déterminer le profil des interfaces liquide-vapeur.

3.3. Détermination du profil des interfaces liquide-vapeur

En l'absence de phénomènes de nucléation le contour apparent de l'interface est détecté. La comparaison des coordonnées des points de l'interface aux coordonnées des parois du tube préalablement enregistrées permet de déterminer l'épaisseur apparente de liquide. Cette épaisseur en pixels est alors convertie en μm grâce à la connaissance très précise du facteur de grandissement (obtenu par un étalonnage préalable) et ensuite corrigée en prenant en compte la distorsion induite par la géométrie du tube (cf. 3.1).

4. Analyse des images

4.1. Analyse qualitative

Au cours des différentes expériences, la répartition des phases est très variable. Plusieurs structures d'écoulement ont été observées. Malgré cette grande diversité le comportement instable de la répartition des phases présente un caractère cyclique assez rigoureux sur lequel viennent se greffer quelques phases moins reproductibles associées aux phénomènes de nucléation. La trame de ce cycle peut se décrire de la façon suivante :

- dans un premier temps les films minces sont continus jusqu'à l'extrémité du micro-tube. La vaporisation du fluide est accentuée et une diminution de l'épaisseur des films de liquide est alors observée.
- Cet amincissement se poursuit jusqu'à l'assèchement de la paroi, créant ainsi une rupture du film de liquide au coeur de la zone chauffée. Lorsque cette rupture apparaît, la zone diphasique se structure en deux zones caractérisées par la présence de liquide sur les parois et une zone asséchée.

- Les films minces situés en aval de la zone asséchée ne sont alors plus alimentés en liquide. L'assèchement se propage donc dans cette région jusqu'à obtenir une unique zone diphasique beaucoup plus courte que celle de la première étape.
- Les forces capillaires tendent à ramener rapidement le fluide vers l'extrémité du tube. Le fluide revient alors brutalement par les coins du tube sur les zones précédemment asséchées entraînant alors l'apparition de films de liquide relativement épais sur une paroi surchauffée du fait de l'assèchement précédent.
- Si cette surchauffe est trop importante, des phénomènes de nucléation apparaissent, conduisant aux structures d'écoulement à géométrie complexe.

Ces oscillations se retrouvent dans le signal traduisant la différence de pression aux extrémités du micro-tube (figure 4) et, dans une moindre mesure, sur les quatre signaux correspondant aux températures des thermocouples insérés dans les cylindres chauffants. A partir du traitement d'images développé, des informations quantitatives ont pu être obtenues dont certaines sont présentées dans la partie suivante.

4.2. Analyse quantitative

Une première information donnée par cette analyse concerne le nombre d'images valides. Il ressort que le nombre d'images acceptées est situé en moyenne aux alentours de 70 %. Comme cela a été mentionné précédemment, les images traitées concernent uniquement les images où la phase vapeur reste continue. La phase de nucléation représentant l'ensemble des images rejetées occupe néanmoins, en moyenne, environ 30 % du temps du cycle.

Les longueurs des films de liquide ont ensuite été calculées pour les situations où les films de liquides dans les coins du tubes sont continus (i.e le film de liquide n'est pas fragmenté par la présence de zones asséchées). Pour chaque puissance appliquée, un certain nombre d'images sur les 5 films correspondent à cette configuration. Une moyenne est réalisée sur ces images pour obtenir une longueur moyenne par puissance appliquée et par campagne expérimentale. La figure 5 représente les valeurs moyennes de ces longueurs pour les parties inférieure et supérieure du micro-tube. Les barres d'erreurs représentent les écart-types. Ce graphe montre tout d'abord que quel que soit le débit pompé, la longueur diphasique reste sensiblement constante. Il n'y a donc pas d'influence de la puissance reçue par le fluide sur la longueur moyenne des films de liquide qui par ailleurs se situe autour de 3 mm, c'est-à-dire proche de la valeur de la longueur des cylindres chauffants. Comme les écart-types sont faibles, il semble donc que lorsque la zone diphasique est composée d'un ménisque principal et de films de liquide continus la longueur de la zone diphasique est égale à celle de la zone de chauffe. Dans les autres situations analysées c'est-à-dire lorsque la zone diphasique est formée d'un ménisque principal et de films de liquide discontinus, la longueur totale de la zone diphasique (c'est-à-dire la somme de la longueur du ménisque principal, des zones de films de liquide et des zones asséchées) est à peu près constante et égale à la longueur de la zone de chauffe. La figure 6 représente un exemple de profil moyen de la zone diphasique calculé à partir des profils de chaque image des 5 films réalisés pour une puissance appliquée donnée. Ce profil moyen met en évidence le lien direct entre la longueur de la zone de chauffe et la longueur diphasique précédemment étudié et permet en outre d'observer une épaisseur relativement constante des films de liquide sur la totalité de la zone diphasique. Ainsi malgré l'étendue relativement importante de la zone de chauffe devant le diamètre hydraulique ($L=6.D_h$) les instabilités intrinsèques à l'évaporateur permettent le refroidissement de la totalité de la zone chauffée. Cet exemple est représentatif de l'ensemble des résultats obtenus pour les différents flux de chaleur considérés.

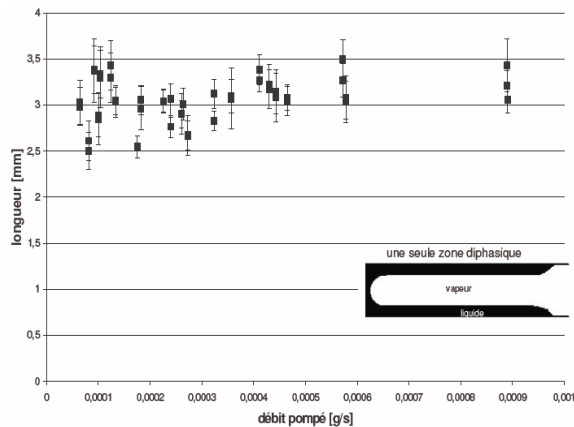


Figure 5 : Longueurs moyennes dans les parties inférieure et supérieure du micro-tube

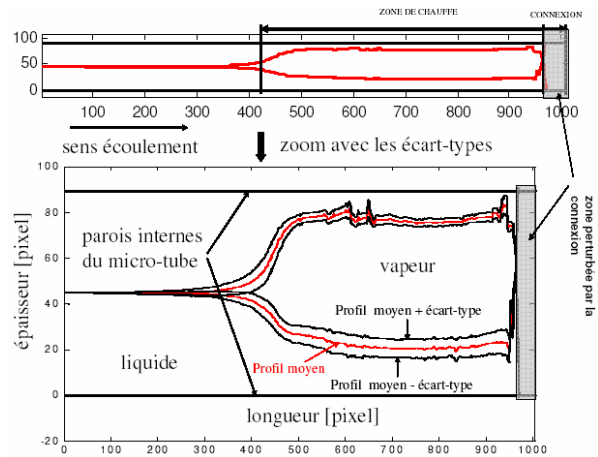


Figure 6 : Moyenne temporelle des épaisseurs des films de liquide en fonction de la position longitudinale.

5. Conclusion

En conclusion de ces résultats expérimentaux, plusieurs points ont été analysés. Tout d'abord, la description qualitative des images montre que le phénomène de vaporisation dans un micro-tube dans de telles conditions opératoires est très instable. Le ménisque oscille fortement autour d'une position relativement constante. Lors de ces oscillations, il arrive que les films liquides dans les coins se cassent et la zone diphasique est alors formée de plusieurs zones liquides et sèches. D'un point de vue quantitatif un traitement spécifique des images a été réalisé afin de déterminer à partir des visualisations obtenues en ombroscopie les caractéristiques géométriques précises des films de liquide. L'étude statistique de ces données a montré que dans la majorité des cas, la zone diphasique est constituée d'une seule zone ou de deux zones liquides. Ce sont par conséquent ces configurations qui ont été principalement analysées. Pour ces deux situations, la longueur de la zone diphasique est constante et égale à celle de la zone de chauffe. Ce résultat est très important surtout pour le refroidissement des systèmes électroniques. La taille du système à refroidir a donc une influence notable sur la structure d'écoulement.

Remerciements : Ces travaux ont été financés dans le cadre des ANR du programme blanc « Intensifilm » et « 3DPhi ».

Références

- [1] L. Ménager, B. Allard, C. Martin, D. Tournier, V. Bley, *New bonding technologies for power packages/modules-state of the art, recommendations*, rapport ISP3D Group, CNRS (2006).
- [2] S. Khandekar, M. Groll, V. Luckchoura, W. Findl, J. Zhuang, *Micro heat pipes for stacked 3D microelectronic modules*, *IPACK03 International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition*, (Hawaï USA, 2003), n°35109.
- [3] D. Liepmann, *Design and fabrication of a micro-CPL for chip-level cooling*, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (2001)
- [4] B. Mathieu, *Etudes physique, expérimentale et numérique des mécanismes de base intervenant dans les écoulements diphasiques en micro-fluidique*. Doctorat de l'Université de Provence, Marseille (2003).
- [5] V. Serin, *Etude hydrodynamique et thermique de la vaporisation dans un micro-canal de section carrée : application aux micro-boucles diphasiques à pompage capillaire*. Doctorat de l'Université de Toulouse (Nov. 2007).