

# Apport de la microscopie confocale à l'étude de diffuseurs thermiques diphasiques.

**Stéphane LIPS, Frédéric LEFEVRE\* , Romuald RULLIERE, Jocelyn BONJOUR**

CETHIL, UMR 5008 CNRS-INSA-Univ. Lyon 1,  
INSA-Lyon, 20 av. Einstein, F-69621 Villeurbanne Cedex  
\*(auteur correspondant : frederic.lefevre@insa-lyon.fr)

**Résumé** - Cette communication a pour but de montrer l'apport de la microscopie confocale pour mesurer les films liquides dans la structure capillaire d'un diffuseur thermique diphasique. L'outil et la procédure expérimentale pour mesurer ces films sont détaillés, ainsi que les différentes limites de la microscopie confocale pour ce type d'études. Des résultats expérimentaux obtenus à partir d'un diffuseur en fonctionnement sont comparés à un modèle numérique disponible dans la littérature.

## 1. Introduction

Les diffuseurs thermiques diphasiques (DTD) sont des systèmes de refroidissement particulièrement efficaces qui permettent de transférer de fortes densités de flux [1]. Ils sont utilisés non seulement pour leur capacité de transport mais aussi en tant que répartiteurs de la chaleur pour réduire les gradients de température. Un DTD est constitué d'une enceinte étanche de faible épaisseur, remplie d'un fluide caloporteur à l'état d'équilibre liquide-vapeur. Le liquide s'évapore au niveau d'une source chaude (évaporateur) et la vapeur se condense au niveau d'une source froide (condenseur). Le diffuseur comporte une structure capillaire (mèches, rainures, ...), qui permet le retour du liquide du condenseur vers l'évaporateur.

Ces dernières années, un nombre important d'articles a été publié dans la littérature pour modéliser le fonctionnement des diffuseurs thermiques diphasiques [2-5]. Les modèles fins de ces systèmes prennent en compte à la fois l'écoulement du fluide dans la structure capillaire et dans l'espace vapeur mais également la diffusion de la chaleur à travers la paroi et la structure capillaire et le transfert avec changement de phase à l'interface liquide/vapeur. Ces modèles dépendent de la forme de l'interface liquide/vapeur et plus particulièrement du rayon de courbure du ménisque dont la valeur évolue de la source chaude vers la source froide. Le rayon de courbure est relié aux paramètres hydrodynamiques de l'écoulement par l'équation de Laplace-Young. De plus, sa valeur influence les échanges thermiques à la fois au condenseur et à l'évaporateur. Il s'agit donc d'un paramètre caractéristique du fonctionnement des DTD, qu'il est essentiel de mesurer pour comprendre le fonctionnement de ces systèmes. Néanmoins, la plupart des études expérimentales de la littérature sur les DTD, et même sur les caloducs, ne présentent que des mesures de températures, qui ne suffisent pas pour valider les modèles [6]. Signalons toutefois le développement récent par Jacolot et al. [7,8] d'un banc expérimental, malheureusement relativement complexe, permettant la visualisation des ménisques au sein d'une rainure de caloduc hors fonctionnement. Parallèlement, nous avons développé un banc expérimental utilisant la microscopie confocale pour l'étude de DTD [9]. Nous présentons dans cette communication des résultats obtenus avec de nouvelles structures capillaires. Les performances et les limites de la microscopie confocale sont discutées pour différents types de DTD.

## 2. Bancs expérimentaux

### 2.1. Les diffuseurs thermiques diphasiques

Trois DTD, de géométries différentes, ont été étudiés. Les deux premiers sont en cuivre et de forme rectangulaire (90 X 70 mm<sup>2</sup>). Leur structure capillaire est composée de rainures longitudinales ou de rainures croisées (figure 1). La largeur, l'espacement et la profondeur des rainures sont égaux à 400 μm. Ces systèmes ont été testés avec du n-pentane. Le troisième diffuseur est en silicium et a une structure circulaire de 50 mm de diamètre (figure 2). Des rainures axiales permettent le retour du liquide du condenseur (à la périphérie) vers l'évaporateur (au centre). La largeur des rainures varie de 670 à 110 μm. Au centre, la structure capillaire est formée de picots carrés de 100 μm de large. La profondeur de la structure capillaire est de 200 μm. Le système a été testé avec du méthanol. Les DTD sont fermés hermétiquement sur leur partie supérieure à l'aide d'une plaque transparente qui permet la visualisation du liquide dans les rainures. La source chaude est composée d'une résistance chauffante, tandis que la source froide est un échangeur à eau dont la température d'entrée est régulée par un bain thermostaté. La position des sources chaude et froide dépend de la géométrie du diffuseur considéré.

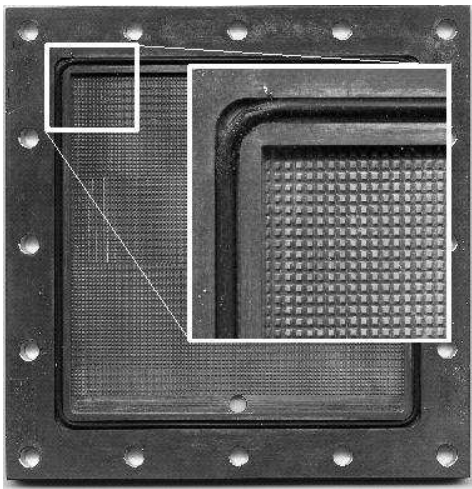


Figure 1 : Diffuseur rectangulaire en cuivre

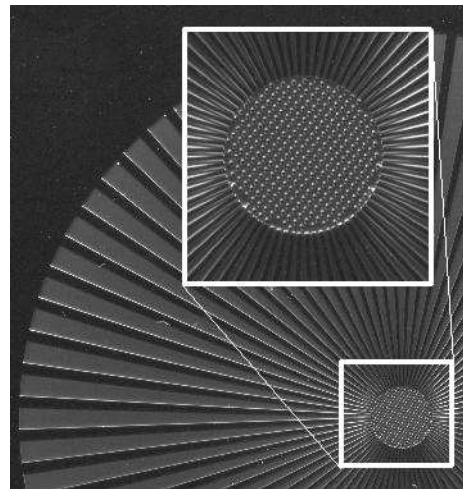


Figure 2 : Diffuseur radial en silicium

### 2.2. Le microscope Confocal

Les mesures des paramètres hydrodynamiques à l'intérieur d'un DTD sont délicates. Les méthodes usuelles non intrusives ne sont pas adaptées à ce type d'étude. La PIV, très utilisée pour caractériser les écoulements, ne peut être appliquée dans le cas des caloducs à pompage capillaire car les particules d'inséminations introduites dans le liquide s'accumuleraient à l'évaporateur sans pouvoir s'évaporer. La mesure des films liquides par imagerie interférométrique n'est pas possible car la présence des sources chaudes et des sources froides ne permet pas d'obtenir un système transparent. La visualisation des ménisques doit donc s'effectuer par le dessus du film et non à travers celui-ci. La microscopie confocale (figure 3) permet une mesure non intrusive de la forme des films à l'intérieur de la structure capillaire. Il faut pour cela réaliser un diffuseur étanche muni d'une plaque transparente permettant une mesure en atmosphère saturée. Cette technique est généralement utilisée pour la mesure de rugosité de paroi. Une source lumineuse ponctuelle de lumière blanche traverse une lentille à

aberrations chromatiques axiales contrôlées. L'image de la source ponctuelle blanche est un continuum de points monochromatiques répartis le long de l'axe optique. Si une interface est présente dans l'espace de mesure, elle réfléchit l'image monochromatique correspondant à sa distance depuis la référence du système optique. La position de cette interface est déterminée par une analyse spectrométrique de l'image réfléchie.

Le microscope confocal utilisé a été développé par la société STIL SA. Il s'agit de la station de mesure MICROMESURE2 associée au contrôleur CHR 150. La lentille à aberrations chromatiques contrôlées est montée dans un crayon optique fixé sur une table motorisée suivant la direction z. Le champ de mesure est de 350  $\mu\text{m}$  et la distance de travail du crayon est de 12,7 mm. La précision de la mesure en altitude est de 60 nm. Le diamètre du faisceau lumineux est égal à 3  $\mu\text{m}$ . La mesure étant ponctuelle, le diffuseur est monté sur une table micrométrique motorisée, permettant d'obtenir des profils ou des surfaces. Un étalonnage particulier du crayon optique a été effectué pour prendre en compte l'épaisseur de la plaque transparente à traverser dans notre application. L'acquisition des profils est effectuée grâce au logiciel SurfaceMap, développé par la société STIL SA. La détermination des rayons de courbure de chaque ménisque est réalisée à l'aide du logiciel commercial SPIP.

La visualisation de profils ou de surfaces d'interfaces est limitée à des configurations qui ne varient pas dans le temps. En effet, le temps de balayage du crayon peut varier de quelques secondes, pour une mesure de profil, à quelques heures, pour une mesure de surface en haute définition. L'utilisation du microscope confocal pour mesurer des phénomènes transitoires est donc particulièrement délicate et se limite à des mesures ponctuelles ou à des profils de petites dimensions. A noter que cette technique de mesure ne permet pas de caractériser des DTD avec de forts flux thermiques à cause de la présence d'ébullition à l'évaporateur [10]. Dans les configurations étudiées, le déclenchement de l'ébullition a été observé pour des flux compris entre 6 et 10  $\text{W}/\text{cm}^2$  à l'évaporateur.

### **3. Résultats expérimentaux obtenus par microscopie confocale**

#### **3.1. Mesure du ménisque dans les rainures**

Nous présentons dans ce paragraphe des résultats obtenus à l'aide du DTD en cuivre à rainures longitudinales. Sa structure capillaire interne est composée de 88 rainures longitudinales de longueur 90 mm, usinées dans une plaque de cuivre. La hauteur du canal de la vapeur est de 2 mm et l'épaisseur de la paroi de cuivre sous les rainures est égale à 3 mm. La source chaude est constituée d'une résistance chauffante insérée dans un bloc de cuivre de 20 x 70  $\text{mm}^2$ . La source froide est un échangeur à eau de dimensions 30 x 70  $\text{mm}^2$ . Deux séries de 9 thermistances mesurent le champ de températures dans le diffuseur. Pendant les essais, la température moyenne dans la zone adiabatique du diffuseur, assimilée à la température de saturation du fluide, est maintenue à 40°C.

La figure 4 présente la superposition de deux profils obtenus au condenseur et à l'évaporateur. Les ménisques et le sommet des ailettes en cuivres sont aisément identifiables. A l'évaporateur, où le rayon de courbure est faible, la jonction entre le ménisque et le sommet des ailettes n'est pas visible, contrairement au condenseur. Lorsque le rayon incident intercepte une surface spéculaire ayant une pente importante par rapport à l'horizontale, le rayon est réfléchi en dehors du système de mesure, ce qui rend la visualisation impossible. L'angle limite donné par le constructeur est égal à 27°. Cela constitue une limite opérationnelle de la microscopie confocale car la zone d'accroche du ménisque est une zone critique dans le fonctionnement des DTD (transferts thermiques importants à travers le film mince et récession potentielle des ménisques dans les rainures). Néanmoins, cela n'empêche

pas la mesure du rayon de courbure au centre de la rainure. Il est à noter que le cercle obtenu à partir des points expérimentaux passe bien par le sommet des ailettes, ce qui tend à indiquer que le ménisque reste accroché à celui-ci, même à l'évaporateur.

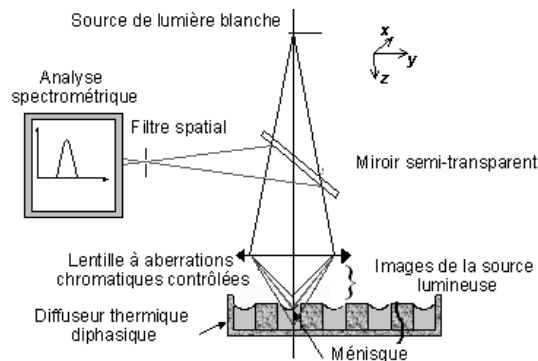


Figure 3 : Principe du microscope confocal

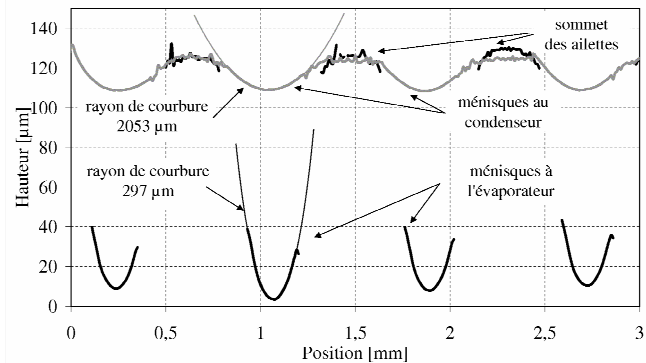


Figure 4 : Exemples de profils mesurés

Les figures 5 et 6 représentent respectivement l'évolution du rayon de courbure et le champ de température dans le DTD pour différents flux transférés. Des résultats numériques issus du modèle de Lefèvre et al. [2] sont présentés en lignes continues. La mesure du rayon de courbure dans plusieurs rainures montre une certaine dispersion entre celles-ci (l'écart-type est de l'ordre de 50 µm). Les résultats expérimentaux présentés sont une moyenne des rayons de courbures mesurés dans une dizaine de rainures consécutives. On observe une très bonne concordance entre les mesures et les simulations. La microscopie confocale, associée à des mesures de température, permet ainsi de valider les modèles numériques thermiques et hydrodynamiques qui dépendent de la courbure du ménisque du condensateur à l'évaporateur.

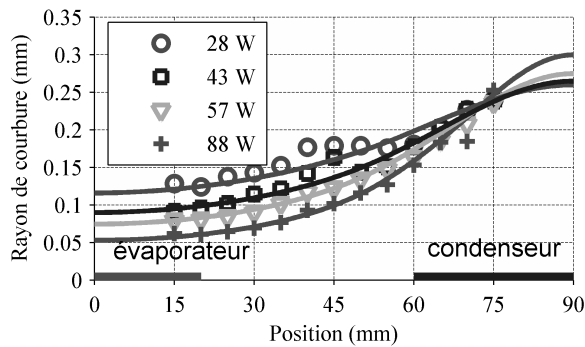


Figure 5 : Evolution des rayons de courbure expérimentaux (marqueurs) et simulés (lignes continues) pour différents flux transférés

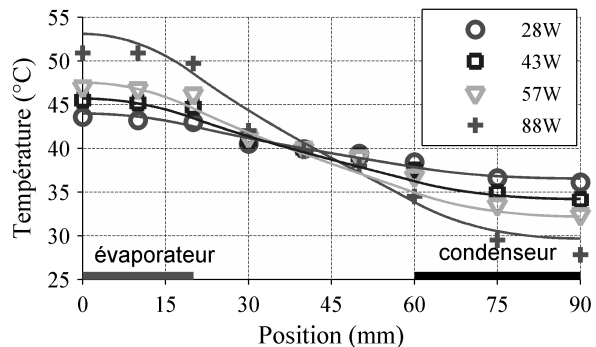


Figure 6 : Champs de température dans le DTD expérimentaux (marqueurs) et simulés (lignes continues) pour différents flux transférés

### 3.2. Mesure du film de condensat sur les ailettes

Un autre paramètre important dans le fonctionnement des DTD est l'épaisseur du film liquide qui se dépose sur les ailettes dans la zone de condensation. Ce film de liquide crée en effet une résistance thermique importante. La difficulté de visualiser ce film par microscopie confocale provient de la proximité de l'interface liquide-vapeur avec la surface de l'ailette. Deux interfaces réfléchissantes sont ainsi présentes dans le champ de mesure du microscope et l'analyse spectrale de la lumière réfléchie devient plus délicate. La possibilité de mesurer

ce film dépend de son épaisseur et de la nature de la surface de l'ailette. Les figures 7 et 8 présentent le profil de plusieurs rainures, dont les ailettes sont recouvertes d'un film de liquide de quelques micromètres d'épaisseur, pour le DTD en cuivre à rainures longitudinales et le DTD en silicium. Sur une ailette en cuivre, le signal mesuré est extrêmement bruité. Le cuivre étant particulièrement réfléchissant, le système détecte soit l'interface liquide-vapeur, soit l'interface solide-liquide, vue à travers l'épaisseur de liquide. Ce type d'acquisition n'est pas exploitable pour déterminer de manière fiable l'épaisseur de liquide. Au contraire, sur une ailette en silicium, l'interface observée apparaît comme lisse car le silicium est beaucoup moins réfléchissant. Il est possible de mesurer des films d'épaisseur supérieure à 2  $\mu\text{m}$ . La précision de la mesure n'est tout de même pas suffisante pour étudier finement la jonction entre le ménisque du liquide dans la rainure, et celui du liquide sur le sommet des ailettes.

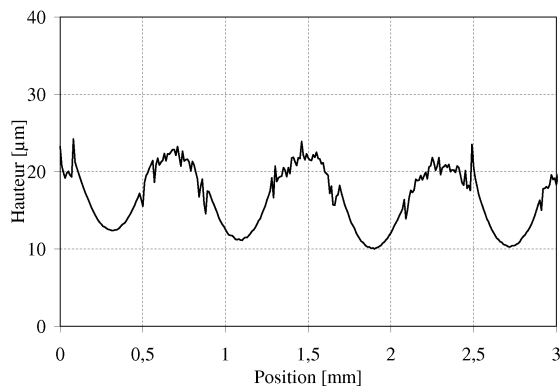


Figure 7 : Visualisation du film de condensats sur une ailette en cuivre

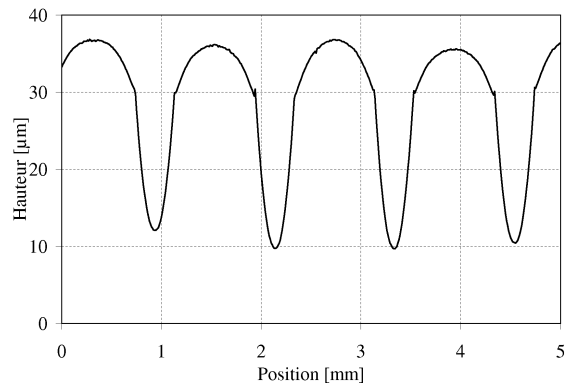


Figure 8 : Visualisation du film de condensats sur une ailette en silicium

### 3.3. Mesures de ménisques non cylindriques

Les DTD en cuivre à rainures croisées et en silicium comportent une structure capillaire formée par des picots carrés. Dans ces structures, les ménisques ne sont pas cylindriques et il faut déterminer les deux rayons de courbures principaux en chaque point de la surface pour en déduire une courbure moyenne. Cela nécessite d'effectuer des mesures de surfaces avec une résolution importante. La figure 9 présente une mesure de surface pour le diffuseur en cuivre à rainures croisées hors fonctionnement, mais en atmosphère saturée. La figure 10 illustre la forme théorique d'une surface à courbure constante entre des picots carrés. La concordance entre les formes des ménisques théorique et expérimentale est bonne et peut permettre de remonter au champ de pression dans le diffuseur en fonctionnement.

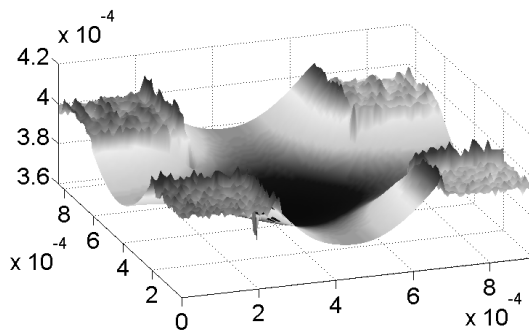


Figure 9 : Visualisation expérimentale d'un ménisque entre des picots (distances en mètres)

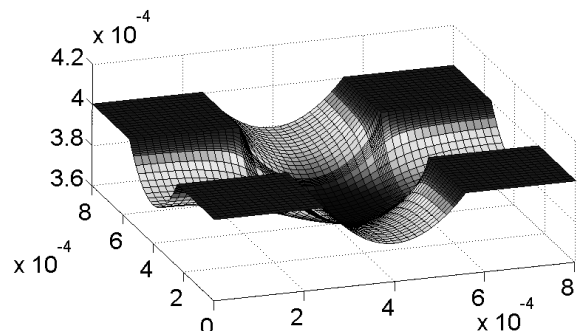


Figure 10 : simulation numérique du ménisque entre des picots (distances en mètres)

## 4. Conclusions et perspectives

La microscopie confocale est un outil performant pour caractériser les formes des ménisques, et donc indirectement les propriétés des écoulements et les performances thermiques dans des diffuseurs thermiques diphasiques. Elle est adaptée à la mesure d'interfaces cylindriques, qui peuvent facilement être caractérisées grâce à une mesure de profil. Cependant, un certain nombre de limites de cette technique ont pu être montrées dans cette communication : la mesure d'interfaces inclinées, ou la mesure d'interfaces liquide-vapeur près d'une paroi réfléchissante sont particulièrement difficile à obtenir. La mesure du microscope étant ponctuelle, il n'est possible d'observer que des phénomènes particulièrement stables à cause du temps de balayage qui peut être important. De même, la visualisation des DTD à fort flux thermique n'est pas réalisable à cause de la présence d'ébullition à l'évaporateur.

Son utilisation est possible pour l'analyse de ménisques non cylindriques. Ce type de ménisque nécessite des mesures de surfaces, beaucoup plus longues à effectuer si l'on souhaite conserver une résolution satisfaisante.

La microscopie confocale peut aussi être appliquée à la mesure de film minces. En effet, il est possible de mesurer des films de quelques micromètres d'épaisseur seulement, sous réserve de bien choisir les matériaux utilisés.

### Références

- [1] M. Lallemand, F. Lefèvre, Micro/mini heat pipes for the cooling of electronic devices, *13th International Heat Pipe Conference* (Shanghai, China, 2004), 12-22.
- [2] F. Lefèvre, R. Rullière, G. Pandraud, M. Lallemand, Prediction of the temperature field in flat plate heat pipes with micro-grooves – Experimental validation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51 (2008), 4083-4094.
- [3] S.J. Kim, J.K. Seo, H.K. Do, Analytical and experimental investigation on the operational characteristics and the thermal optimisation of a miniature heat pipe with a grooved wick structure, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46 (2003), 2051-2063.
- [4] R. Revellin, R. Rullière, F. Lefèvre, Experimental validation of an analytical model for predicting the thermal and hydrodynamic capabilities of flat micro heat pipes, *Applied Thermal Engineering*, (2008), in press.
- [5] D. Khrustalev, A. Faghri, Coupled liquid and vapor flow in miniature passages with micro grooves, *J. Heat Transfer*, 121 (1999), 729-733.
- [6] R. Hopkins, A. Faghri, D. Khrustalev, Flat miniature heat pipes with micro capillary grooves, *J. Heat Transfer*, 121 (1999) 102-109.
- [7] R. Jacolot, C. Romestant, V. Ayel, Y. Bertin, J. Hugon, Visualisation et analyse expérimentale du comportement du fluide dans un caloduc rainuré, *congrès SFT* (île de Ré, 16-19 mai 2006)
- [8] R. Jacolot, C. Romestant, Y. Bertin, V. Ayel, G. Burban, A. Alexandre, C. Fuentes, J. Hugon, Transferts thermiques en caloduc rainuré : visualisation et analyse expérimentale du comportement du fluide, *congrès SFT* (île des Embiez, 29 mai -1 juin 2007)
- [9] R. Rullière, F. Lefèvre, M. Lallemand, Prediction of the maximum heat transfer capability of two-phase heat spreaders - Experimental validation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 50 (2007), 1255-1262.
- [10] S. Lips, F. Lefèvre, J. Bonjour, Nucleate boiling in a flat grooved heat pipe, *International Journal of Thermal Sciences*, (2008), in press.