

Utilisation de mèches métalliques comme structure capillaire pour des caloducs plats.

Stéphane LIPS^{1,2*}, Alba FORNELLS-VERNET^{1,2}, Frédéric LEFEVRE^{1,2}

¹Université de Lyon, CNRS

²INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne

* (auteur correspondant : stephane.lips@insa-lyon.fr)

Résumé - Cette communication synthétise les résultats expérimentaux d'études menées sur trois caloducs plats dont les structures capillaires sont composées de mèches en bronze associées ou non avec des rainures. Les performances de trois configurations différentes sont évaluées et discutées. L'utilisation de mèches seules limite la puissance maximale transférable. L'association entre des rainures et des mèches entraîne une résistance thermique plus importante qu'une structure capillaire composée uniquement de rainures. Une configuration innovante, où la vapeur circule dans les rainures, est proposée et permet de transférer des puissances importantes avec une faible résistance thermique.

Nomenclature

d	diamètre, m	<i>Indices et exposants</i>
h	hauteur, m	<i>cond</i> condenseur
L	longueur, m	<i>evap</i> évaporateur
l	largeur, m	<i>max</i> maximum
p	distance, m	<i>min</i> minimum
R_{th}	résistance thermique, K/W	<i>sat</i> saturation
Q	puissance thermique, W	<i>tot</i> total
T	température, K	

1. Introduction

Les caloducs sont largement utilisés dans de nombreuses d'applications industrielles pour le contrôle thermique de systèmes variés, et en particulier de composants électroniques. L'utilisation du phénomène de changement de phase liquide-vapeur permet en effet de transférer de fortes densités de puissance avec une faible différence de température entre les sources chaudes et froides. Les caloducs sont généralement cylindriques pour des questions de facilité de fabrication mais ils peuvent également être plats, ce qui permet de développer des systèmes plus fins avec des performances similaires. Ce type de caloduc, aussi appelés diffuseurs thermique diphasiques (DTD), permettent le refroidissement de plusieurs sources chaudes simultanément. Les performances d'un caloduc peuvent être quantifiées au moyen de deux critères distincts : leur résistance thermique totale et la puissance thermique maximale qu'ils permettent de transférer. Pour un fluide caloporteur donné, ces critères dépendent principalement du type et de la géométrie du caloduc, et en particulier de la structure capillaire utilisée. La puissance maximale transférable est directement liée aux pertes de charge dans la phase liquide et à la pression capillaire maximale que peut fournir le couple fluide-structure capillaire. La résistance thermique totale dépend quant à elle de la conductivité thermique équivalente de la structure capillaire saturée en liquide. Trois grandes familles de structures capillaires sont couramment utilisées dans les caloducs : les structures rainurées, les poudres frittées et les mèches métalliques.

Un nombre important d'études expérimentales et théoriques ont été menées sur des caloducs plats munis de rainures rectangulaires en régime permanent [1,2] et transitoire [3].

Les modèles thermiques et hydrodynamiques sont généralement basés sur les équations de bilan couplées à la relation de Laplace-Young, qui relie la forme de l'interface liquide-vapeur à la pression capillaire au sein du caloduc [1,2,4]. Des études expérimentales reposant sur la mesure de la forme des ménisques dans la structure rainurée des caloducs plats par microscopie confocale ont permis de valider certains de ces modèles et de comprendre les phénomènes hydrodynamiques mis en jeu dans ce type de caloduc et de structure capillaire [1,2,5,6].

Comparativement, la compréhension des phénomènes impliqués dans des caloducs possédant des structures capillaires composées de mèches métalliques ou de milieux frittés est moins avancée. La mesure de l'interface liquide-vapeur dans ce type de structure est délicate et les modèles numériques sont généralement basés sur la loi de Darcy [7]. Ils ne prennent pas en compte la courbure de l'interface liquide-vapeur. Le comportement de la structure capillaire remplie de liquide est alors représenté par sa perméabilité et sa conductivité thermique équivalente, mais peu d'études expérimentales ont permis de valider les modèles ou corrélations proposés dans la littérature [8].

Cette communication traite de l'utilisation de mèches en bronze dans des caloducs plats. Il s'agit d'une synthèse de plusieurs études portant sur des caloducs de géométries différentes, mais dont la structure capillaire est composée soit de mèches métalliques seules, soit de mèches métalliques associées à des rainures. Quelques résultats expérimentaux proviennent de travaux antérieurs [1,2,8], mais de nouvelles mesures et analyses sont présentées dans cet article. Les performances de l'association mèches et rainures sont comparées à celles de rainures seules. La synthèse des principaux résultats expérimentaux issus de ces études permet de faire un bilan sur l'influence des mèches métalliques dans le comportement thermique des caloducs plats et de souligner les verrous scientifiques qu'il reste à lever pour aboutir à une compréhension détaillée des phénomènes mis en jeu dans les structures.

2. Description des caloducs étudiés et du banc expérimental

L'étude porte sur trois caloducs plats, de forme rectangulaire et constitués de l'assemblage hermétique d'une plaque de cuivre et d'une plaque transparente (figure 1). Ils permettent de transférer de la chaleur d'une source chaude, simulée par une résistance électrique à une source froide, constituée d'un échangeur à eau relié à un bain thermostaté. Les sources chaude et froide sont rectangulaires et sont situées aux extrémités du caloduc. Le tableau 1 récapitule les dimensions des caloducs et des sources associées. Des mèches métalliques en bronze, dont les dimensions sont précisées sur la figure 2, sont utilisées comme structure capillaire, soit seules, soit associées à des rainures. Dans tous les cas, les mèches sont plaquées contre la plaque en cuivre à l'aide d'une grille de plus grosse taille (figure 2). Trois configurations différentes sont étudiées (figure 3). La structure capillaire du caloduc n°1 est composée d'une ou de deux couches de mèches métalliques seules (configuration A). Les caloducs n°2 et 3 permettent d'étudier l'association entre des rainures et des mèches métalliques (configuration B). La largeur, la profondeur et l'espacement des rainures sont égaux à 400 μm . Dans le cas du caloduc 3, une configuration où les rainures servent d'espace vapeur est aussi testée. Dans ce cas, l'espace compris entre la plaque de cuivre et la plaque transparente est rempli de mèches métalliques et permet la circulation du liquide (configuration C). Les caloducs et les bancs expérimentaux associés sont décrits plus en détails par Lefèvre *et al.* [8], Rullière *et al.* [1] et Lips *et al.* [2] pour les caloducs n°1, 2 et 3 respectivement.

Tableau 1 : Dimensions des caloducs étudiés et configuration des structures capillaires associées

N°	Caloduc			Sources		Structure capillaire	
	L [mm]	l [mm]	h [mm]	L_{evap} [mm]	L_{cond} [mm]	Config.	Nbre de mèches
1	230	90	2	55	30	A	2
2	230	90	2	190	30	B	2
3	90	70	2	20	30	B	3
						C	15

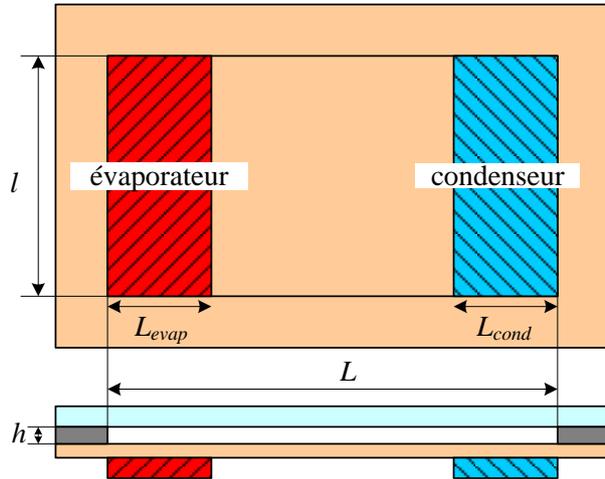


Figure 1 : Géométries des caloducs étudiés

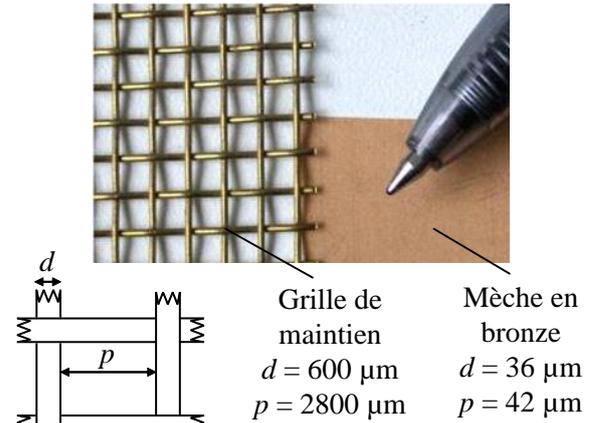


Figure 2 : Détail des mèches métalliques

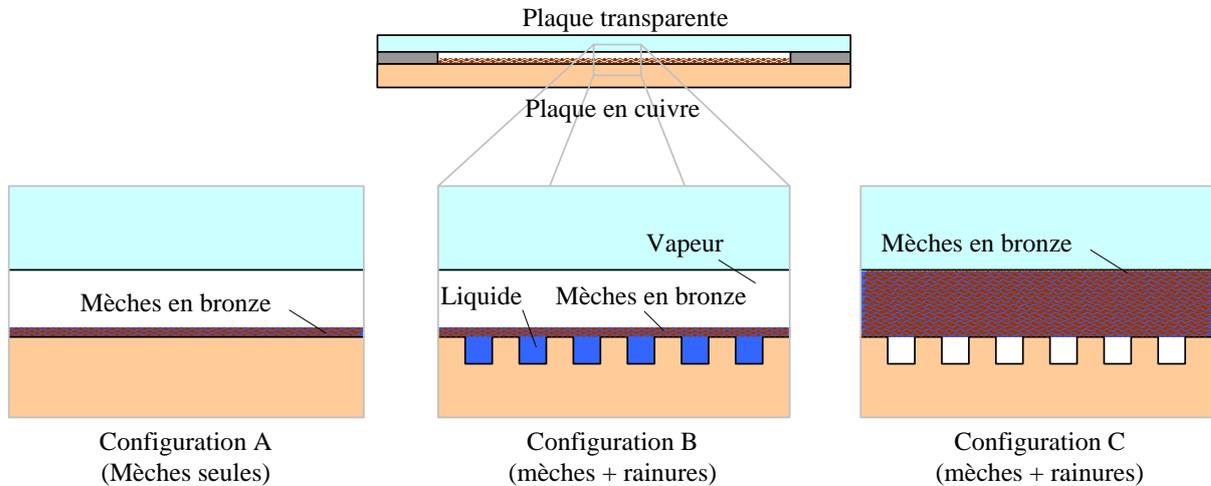


Figure 3 : Coupes transversales correspondant aux différents caloducs étudiés

L'ensemble des caloducs étudiés sont instrumentés à l'aide de 16 ou 18 thermocouples permettant de mesurer le champ de température de la plaque en cuivre supportant la structure capillaire. A partir du flux thermique transféré et des températures maximale et minimale relevées, il est possible de déterminer la résistance thermique totale du système. Pour aider à l'étude des phénomènes mis en jeu, la distinction est faite entre les résistances thermiques à l'évaporateur et au condenseur :

$$R_{th,tot} = \frac{T_{max} - T_{min}}{Q} ; R_{th,evap} = \frac{T_{max} - T_{sat}}{Q} ; R_{th,cond} = \frac{T_{sat} - T_{min}}{Q} \quad (1)$$

T_{sat} est la température moyenne de la paroi dans la zone adiabatique. La comparaison des résistances thermiques obtenues expérimentalement permet de comparer les performances de chaque configuration étudiée, et donc d'évaluer leur limite et de montrer leur intérêt.

3. Synthèse des résultats expérimentaux

3.1. Caloduc à mèches seules (configuration A)

La configuration A est étudiée à l'aide du caloduc n°1. Des résultats obtenus avec du méthanol comme fluide caloporteur sont présentés par Lefèvre *et al.* [8]. Des tests ont été réalisés avec une et deux mèches métalliques. En position horizontale, l'utilisation de deux mèches métalliques permet de repousser la limite capillaire par rapport à une seule mèche, mais augmente de 50% la résistance thermique. Le caloduc n'est pas utilisable en position inclinée défavorable à cause de l'assèchement immédiat de la structure capillaire.

De nouveaux résultats obtenus avec de l'eau et deux mèches métalliques sont présentés sur la figure 4. Les résistances thermiques sont tracées en fonction du flux imposé pour le caloduc en position horizontale et verticale défavorable. L'utilisation de l'eau rend nécessaire l'oxydation préalable des mèches métalliques afin d'obtenir une bonne mouillabilité du fluide. Le caloduc est capable de transférer jusqu'à 30 W en position horizontale, mais également en position verticale défavorable. Les performances sont légèrement meilleures en position verticale qu'en position horizontale. Ce résultat étonnant laisse à penser que la limite de fonctionnement observée n'est pas la limite capillaire, mais qu'elle est probablement due à un autre phénomène entraînant l'assèchement de la structure capillaire. Une étude plus approfondie est nécessaire pour expliquer ce phénomène. La comparaison des résultats obtenus avec de l'eau et du méthanol est présentée sur la figure 5. L'eau permet de transférer des flux plus importants avant l'assèchement, y compris en position verticale, tout en engendrant une résistance thermique plus faible.

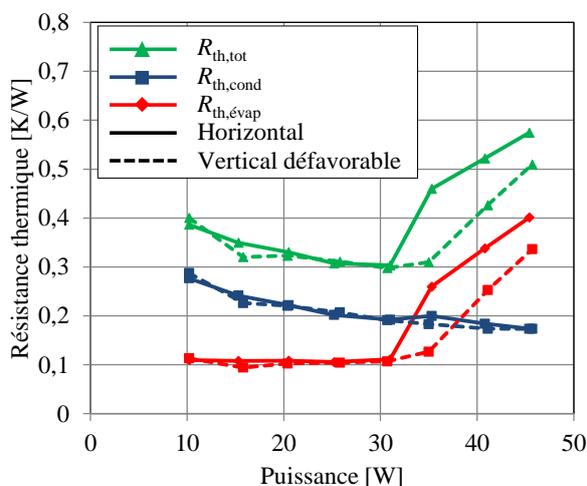


Figure 4 : Performances en positions horizontale et verticale (caloduc n°1 chargé en eau)

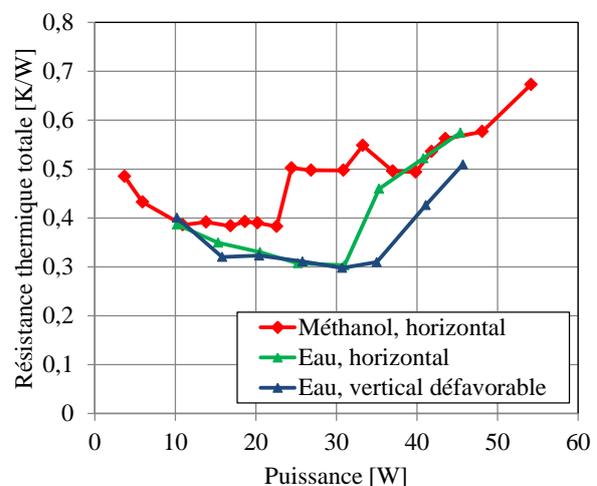


Figure 5 : Comparaison des performances du caloduc n°1 chargé en méthanol et en eau

A partir des résultats expérimentaux présentés sur la figure 4, il est possible d'utiliser le modèle numérique présenté par Lips *et al.* [9] pour déterminer les coefficients d'échange moyens à l'évaporateur et au condenseur. Le modèle numérique permet de prendre en compte les différentes résistances thermiques, aussi bien transversales que longitudinales dans le caloduc. Les coefficients d'échange ainsi déterminés sont tracés sur la figure 6. Des coefficients d'échange calculés à partir de modèles de mèches métalliques provenant de la littérature sont tracés sur la figure 7. Les relations de Chang [10], d'Alexander [11] et de Rayleigh [12] sont comparés. Le modèle de porosité d'Ikeda [13] est introduit en combinaison des deux dernières relations. Ces trois modèles ne distinguent pas la zone d'évaporation de la zone de condensation et ils ne prennent pas en compte le flux thermique. Toutefois, ils

dépendent fortement de l'épaisseur effective de la structure capillaire, qui dépend elle-même de la manière dont les mèches sont maintenues dans le système. La hauteur de 300 μm correspond à l'épaisseur de deux mèches simplement empilées l'une sur l'autre. Le coefficient d'échange prédit à partir d'un modèle de conduction pure, en considérant la structure capillaire comme étant composée uniquement d'eau, est aussi tracé. La comparaison entre les coefficients d'échange expérimentaux (figure 6) et ceux calculés à partir des modèles (figure 7) montre que les corrélations surestiment les coefficients d'échange. Le modèle de conduction pur est le plus proche des résultats expérimentaux en considérant que la structure capillaire a une épaisseur de 300 μm à l'évaporateur et entre 400 et 600 μm au condenseur. L'augmentation de cette épaisseur au condenseur pourrait être due à un ennoiment partiel de celui-ci. Ces résultats montrent que des études théoriques et expérimentales sont nécessaires pour développer des modèles prédictifs fiables.

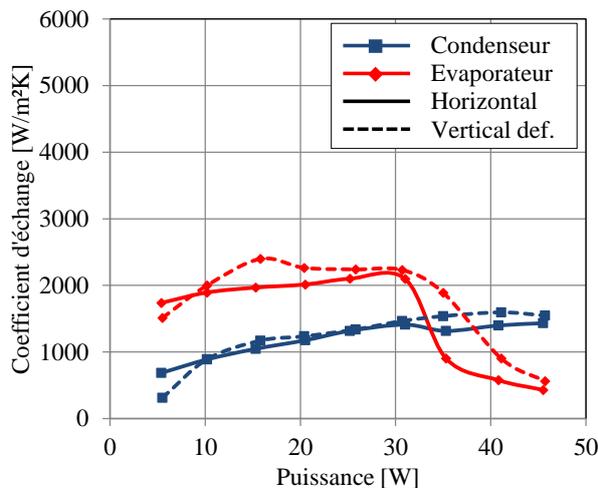


Figure 6 : Coefficients d'échange déterminés à partir des résultats expérimentaux (eau)

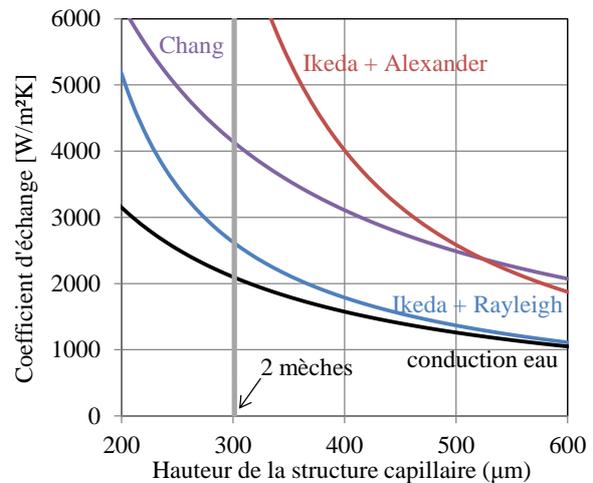


Figure 7 : Coefficients d'échange calculés par quelques modèles de la littérature

3.2. Caloduc à mèches et rainures (configuration B)

La configuration A a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et bon marché, mais les exemples précédents montrent que les performances sont limitées en termes de flux maximal transférable. Une idée généralement retenue dans la littérature est de coupler des mèches métalliques à des rainures longitudinales. C'est le principe de la configuration B, qui associe la grande perméabilité des rainures à la forte pression capillaire engendrée par les mèches métalliques. Si l'idée est répandue dans les livres de référence traitant des caloducs [14], peu d'études expérimentales ont été menées jusqu'à présent. Lefèvre *et al.* [8] présentent des résultats obtenus avec le caloduc n°2 en position horizontale et chargé en méthanol. Ils observent un décrochage brusque des ménisques dans l'évaporateur à partir d'un flux relativement faible comparativement à ce que le caloduc peut transférer sans mèche métallique. La figure 8, qui compare les performances du caloduc n°2 avec et sans mèches métalliques, illustre ce décrochage en termes de résistance thermique. Ce décrochage pourrait être dû à l'apparition de vapeur au sein des rainures, mais il reste mal compris pour l'instant. Cette même figure montre que l'ajout d'une mèche sur les rainures entraîne une augmentation de la résistance thermique à l'évaporateur. La figure 9 présente la comparaison des performances thermiques du caloduc n°3 utilisé avec des rainures seules ou des rainures associées à des mèches. Le caloduc est en position horizontale et chargé en méthanol. La limite capillaire n'est pas atteinte pour des raisons de limite du banc expérimental mais l'ajout d'une mèche aux rainures entraîne une dégradation des performances thermiques, aussi bien

au condenseur qu'à l'évaporateur. Ceci s'explique par la résistance de contact supplémentaire due à la mèche métallique. Il n'existe pas pour l'instant de modèles disponibles dans la littérature pour prédire les performances thermiques d'une structure capillaire composée de rainures et de mèches métalliques.

La configuration B, bien qu'intéressante en théorie, ne permet pas d'améliorer les performances d'un caloduc par rapport à des rainures seules. La limite capillaire semble réduite tandis que l'augmentation de la résistance thermique est due à l'augmentation de l'épaisseur de la structure capillaire. Pour pallier ces inconvénients, la configuration C est proposée dans la suite de l'étude.

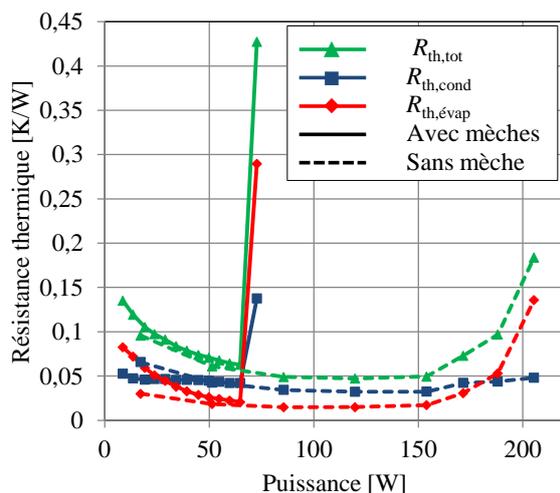


Figure 8 : Comparaison des résultats avec ou sans mèches métalliques pour le caloduc n°2 (méthanol, position horizontale)

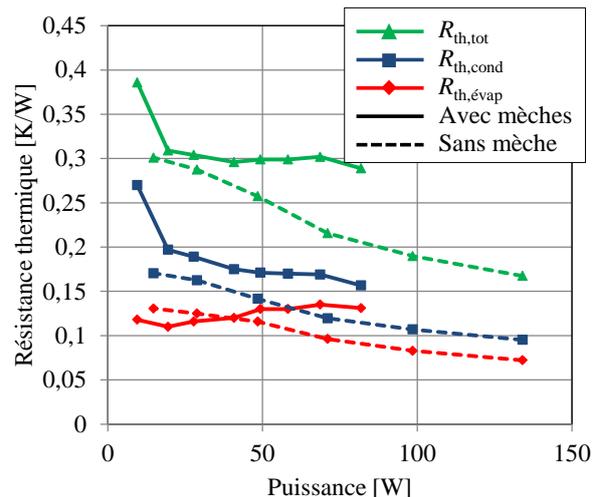


Figure 9 : Comparaison des résultats avec ou sans mèches métalliques pour le caloduc n°3 (méthanol, position horizontale)

3.3. Caloduc à mèches et rainures en configuration inversée (configuration C)

Le principe de la configuration C est d'utiliser la forte pression capillaire que peut engendrer une mèche métallique, mais sans réduire la section de passage du liquide (configuration A), ni augmenter la résistance thermique au condenseur et à l'évaporateur (configuration B). L'espace entre la plaque en cuivre et la plaque transparente est rempli de mèches métalliques servant de structure capillaire. Les rainures servent alors d'espace vapeur (figure 3). L'évolution des résistances thermiques du caloduc n°3 chargé en méthanol et en position horizontale est présentée sur la figure 10 pour deux charges en liquide différentes. Du fait de la configuration des mèches métalliques, il n'est pas possible de déterminer la charge visuellement et une procédure spécifique est mise en place. Après avoir fait le vide, le caloduc est rempli entièrement de liquide. Pour un flux thermique donné, la charge optimale est déterminée en ôtant progressivement du liquide et en recherchant la charge conduisant à la résistance thermique totale minimum. Les charges 1 et 2 correspondent aux charges optimales pour des flux de 40 W et 140 W respectivement. La figure 10 montre que la configuration C permet d'obtenir des résistances thermiques totales presque deux fois inférieures à la configuration B (0,17 K/W au lieu de 0,3 K/W). Dans cette configuration particulière, les faibles résistances thermiques s'expliquent par le fait que le flux de chaleur traverse une faible épaisseur de structure capillaire avant de rejoindre l'interface liquide-vapeur. Cette configuration ressemble beaucoup à l'évaporateur d'une boucle diphasique capillaire qui présente en général de faibles résistances thermiques à l'évaporateur. Cependant, il est également possible de noter que la résistance thermique au condenseur dépend très fortement de la charge utilisée. Cela est dû au très faible volume des rainures par rapport au reste du

système : une charge légèrement trop élevée entraîne un ennoïement important des rainures. Sur la figure 10, la limite capillaire n'est pas atteinte pour la charge 2, mais un début d'assèchement est observé pour la charge 1 pour un flux de 100 W. La charge est donc un paramètre essentiel du fonctionnement d'un caloduc dans cette configuration.

La figure 11 permet de comparer les performances obtenues en positions horizontale et verticale défavorable pour la charge 2. La configuration C permet ainsi un fonctionnement en position verticale défavorable. Cela n'est pas possible dans le cas où le caloduc est utilisé avec des mèches seules ou associées à des rainures. Une des limites de l'étude est que le banc expérimental ne permet pas d'atteindre la limite d'assèchement, même pour la position verticale défavorable, et des études supplémentaires sont donc nécessaires pour étudier la limite capillaire dans ce type de configuration. La figure 11 montre aussi que la résistance thermique au condenseur dépend de l'orientation du caloduc. Ceci est dû à l'organisation du liquide au sein du système et, là aussi, des études plus approfondies sont nécessaires pour comprendre les phénomènes d'ennoïement au condenseur. Au final, malgré le manque de connaissances sur le comportement thermique de ce type de structure capillaire, la configuration C apparaît comme une configuration prometteuse pour associer des mèches et des rainures en position inversée dans un caloduc.

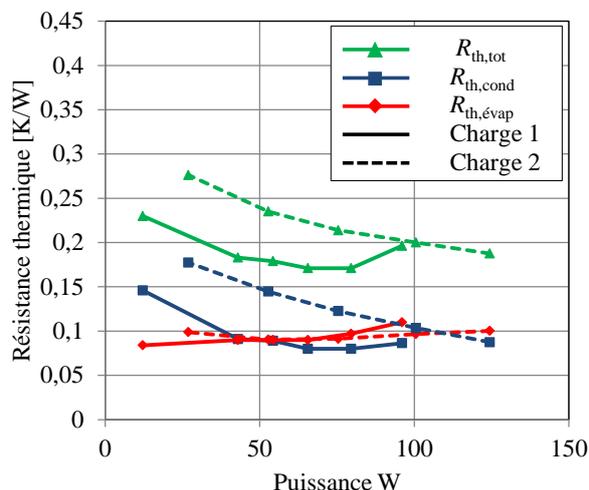


Figure 10 : Evolution des résistances thermiques et influence de la charge en position horizontale (caloduc 3 chargé en méthanol)

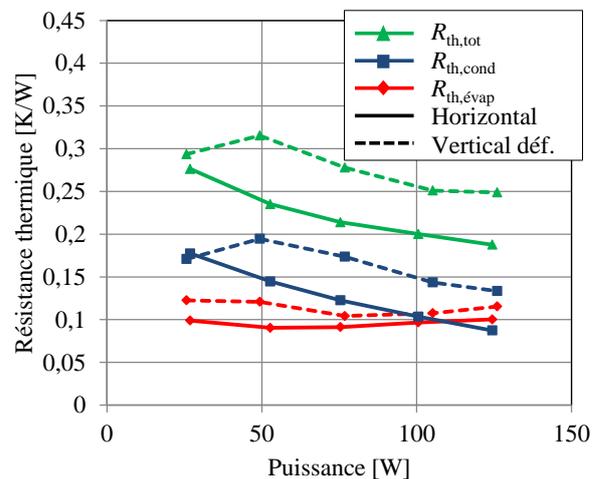


Figure 11 : Comparaison des résistances thermiques en position horizontale et verticale défavorable (caloduc 3, méthanol, charge 2)

4. Conclusion

Cet article fait la synthèse d'études portant sur trois caloducs différents dont la structure capillaire est composée de mèches métalliques associées ou non avec des rainures. Les performances et les limites de trois configurations distinctes ont été comparées.

Dans la configuration A, l'utilisation de deux mèches superposées à la place d'une seule mèche permet de transférer un flux thermique plus important mais induit une augmentation de la résistance thermique du système. Le méthanol ne permet pas d'atteindre des pressions capillaires suffisantes pour fonctionner en position inclinée défavorable. L'eau permet de pallier cet inconvénient, mais il est alors nécessaire d'oxyder les mèches métalliques pour obtenir une mouillabilité satisfaisante.

Contrairement à ce qui est généralement admis dans la littérature, la configuration B ne permet pas de gains en termes de résistance thermique ou de puissance maximale transférable

par rapport à des rainures seules. Des phénomènes d'assèchement brusque associés à de forts effets d'hystérésis restent en partie inexplicables et non prévisibles.

Les essais réalisés avec la configuration C montrent que de bonnes performances peuvent être obtenues, aussi bien en termes de résistance thermique que de limite capillaire. La charge au sein du caloduc doit cependant être ajustée de manière précise car tout excès de liquide entraîne un ennoiment rapide des rainures et donc une forte dégradation des performances thermiques au condenseur. Ce type de configuration est donc extrêmement prometteur, mais des études supplémentaires sont nécessaires pour comprendre l'ensemble des phénomènes mis en jeu et ainsi aboutir au développement de modèles permettant de prédire et d'optimiser les performances hydrodynamiques et thermiques de ce type de caloduc.

Références

- [1] 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*, 50 (2007), 1255–1262.
- [2] S. Lips, F. Lefèvre, J. Bonjour, Combined effects of the filling ratio and the vapour space thickness on the performance of a flat plate heat pipe, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 53 (2010), 694–702.
- [3] R. Sonan, S. Harmand, J. Pellé, D. Leger, M. Fakès, Transient thermal and hydrodynamic model of flat heat pipe for the cooling of electronics components, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51 (2008), 6006–6017.
- [4] F. Lefèvre, R. Rullière, G. Pandraud, M. Lallemand, Prediction of the temperature field in two-phase heat spreaders with microgrooves – Experimental validation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51 (2008), 4083–4094.
- [5] F. Lefèvre, R. Rullière, S. Lips, J. Bonjour, Confocal Microscopy for Capillary Film Measurements in a Flat Plate Heat Pipe, *J. Heat Transfer*, 132 (2010), 031502.
- [6] S. Lips, F. Lefèvre, R. Rullière, J. Bonjour, Apport de la microscopie confocale à l'étude de diffuseurs thermiques diphasiques, *Congrès Français de Thermique*, Vannes, France, 2009.
- [7] F. Lefèvre, M. Lallemand, Coupled thermal and hydrodynamic models of flat micro heat pipes for the cooling of multiple electronic components, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49 (2006), 1375–1383.
- [8] F. Lefèvre, J.-B. Conrardy, M. Raynaud, J. Bonjour, Experimental investigations of flat plate heat pipes with screen meshes or grooves covered with screen meshes as capillary structure, *Appl. Therm. Eng.*, 37 (2012), 95–102.
- [9] S. Lips, J. Bonjour, F. Lefèvre, Investigation of evaporation and condensation processes specific to grooved flat heat pipes, *Frontiers in Heat Pipes*, 1 (2010), 023001.
- [10] W. Chang, Porosity and effective thermal conductivity of wire screens, *Journal of heat transfer*, 112 (1990), 5–9.
- [11] E.G. Alexander, Structure-property relationships in heat pipe wicking materials, Ph. D. Thesis, Department of Chemical Engineering, North Carolina State University, 1972.
- [12] L. Rayleigh, On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium, *Phil. mag.*, 34 (1892), 205.
- [13] Y. Ikeda, The Permeability of a Screen Wick, *Trans. JSME.*, 52 (1985), 2621–2618.
- [14] A. Faghri, Heat Pipe Science And Technology, 1^{re} éd., Taylor & Francis, 1995.