

Caractérisation des performances de poreux céramiques bicouches pour boucles diphasiques à pompage capillaire

Riadh Boubaker^{1*}, Yannick Lorgouilloux², Safouene Ouenzerfi¹, Souad Harmand¹

¹Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH-UMR CNRS 8201), Université Polytechnique Hauts-de-France, Valenciennes 59313, France

² CERAMATHS – Département Matériaux et Procédés, Université Polytechnique Hauts-de-France, Valenciennes 59313, France

*(auteur correspondant : boubaker.riadh@gmail.com)

Résumé - Cet article présente une étude expérimentale comparative entre les performances thermiques des mèches poreuses céramiques uniforme et bicouche, utilisées dans l'évaporateur des boucles diphasiques à pompage capillaire. Les résultats expérimentaux montrent l'intérêt de la mèche céramique bicouche à gradient de diamètre de pores sur les performances thermiques de l'évaporateur grâce à son pompage capillaire élevé.

1. Introduction

Dans le domaine de l'électronique de puissance, la réduction de la taille des composants et l'augmentation de leurs fréquences de fonctionnement ont conduit à une augmentation importante des densités de flux thermiques. Parmi les techniques de refroidissement existantes, les boucles diphasiques à pompage capillaire sont particulièrement prometteuses [1,2]. Il s'agit de systèmes à changement de phase entièrement passifs (sauf pour les boucles avec réservoir séparé CPL), où le fluide est mis en mouvement par des forces capillaires créées au sein d'une structure poreuse, placée dans l'évaporateur. Ce dernier est couplé à un réservoir qui contrôle la température de fonctionnement de la boucle. Entre l'évaporateur et le condenseur, le liquide et la vapeur circulent séparément à l'intérieur de tubes lisses. L'intérêt majeur de ces systèmes réside dans la passivité de la mise en mouvement du fluide de travail : le pompage capillaire remplace l'utilisation d'une pompe mécanique [3]. Les principaux composants des boucles diphasiques sont l'évaporateur, la chambre de compensation (CC), le condenseur, les conduites de vapeur et de liquide. Le transfert de masse et de chaleur dans l'évaporateur a une grande influence sur le fonctionnement de la boucle [4, 5]. En particulier, les propriétés thermo-fluidiques de la mèche poreuse sont essentielles dans la conception des boucles de fluide de pompage capillaire [6]. C'est pourquoi différents chercheurs s'intéressent à l'étude de l'influence de cette structure poreuse sur les performances thermiques des boucles diphasiques, en particulier les mèches bicouches.

Chen et al. [7] ont analysé le fonctionnement d'une boucle diphasique de type Loop Heat Pipe (LHP) avec une mèche biporeuse en nickel. Les résultats montrent que la boucle fonctionne d'une manière très stable. En particulier, les auteurs n'ont pas observé d'oscillation de température évidente ou des phénomènes de dépassement lors du démarrage et du fonctionnement avec une charge variable (comme c'est le cas sur certaines mini-boucles avec un milieu poreux uniforme). Yeh et al. [8] ont également investigué le transfert de masse et de chaleur dans la mèche biporeuse en Nickel d'une LHP. Ils ont montré que le coefficient de transfert de chaleur par évaporation de la mèche biporeuse était environ six fois supérieur à celui de la mèche monoporeuse. Xu et al. [9] ont présenté une comparaison entre des mèches en céramique Ti₃AlC₂ monoporeuse et biporeuse. Ils ont prouvé que la LHP avec une mèche

en céramique biporeuse Ti_3AlC_2 fonctionne avec succès. Lin et al. [10] ont investigué l'effet de différentes distributions de tailles de pores dans les mèches bidispersées. Il a constaté que le coefficient de transfert de chaleur par évaporation dans la mèche bidispersée était environ 2.3 fois supérieur à celui dans la mèche monoporeuse.

Cet article présente une étude expérimentale comparative entre les performances de poreux céramiques uniforme et bicouche utilisés dans l'évaporateur des boucles diphasiques à pompage capillaire.

2. Etude expérimentale

2.1. Banc expérimental

Le banc expérimental illustré à la figure 1 représente une section d'un évaporateur d'une boucle diphasique. L'évaporateur se compose d'une mèche poreuse céramique. Les dimensions de la mèche poreuse sont $5 \times 3 \times 1.5 \text{ cm}^3$. Une caméra infrarouge (série FLIR SC7000 (système vue d'ensemble : SC7200 7500/SC7300) est installée devant le saphir/interface poreuse qui permet la visualisation de la phase changement à la surface. La surface supérieure de la mèche poreuse est chauffée avec des cartouches chauffantes placées dans un bloc en cuivre. Le bloc chauffant est recouvert avec trois couches de matériaux différents (une couche de bakélite de 1 cm, une couche de laine de verre d'épaisseur 2 cm et une couche rigide de polystyrène de 1.5 cm) pour éviter les pertes de chaleur sur toutes les faces autres que la face de contact avec la mèche poreuse. Les dimensions de la zone de contact entre le bloc chauffant et la partie supérieure du poreux sont $3 \times 1.5 \text{ cm}$. Tout au long de l'expérience, l'évaporateur a été connecté à un réservoir à niveau constant pour alimenter la mèche avec un fluide sous-refroidi. Ce niveau constant est contrôlé par l'élévation hydrostatique Δh (la distance entre la partie supérieure de la structure poreuse et le niveau d'eau).

Le liquide à l'intérieur du réservoir est à température ambiante et une résistance chauffante est utilisée pour chauffer le fluide avant son entrée dans le milieu poreux. Deux thermocouples de type K permettent de mesurer la température de la culasse et la température du fluide à l'entrée de la mèche. L'acquisition de ces températures se fait par le système GRAPHTEC GL 240. Le débit d'entrée du fluide est contrôlé par une pompe et est maintenu constant pendant tous les essais.

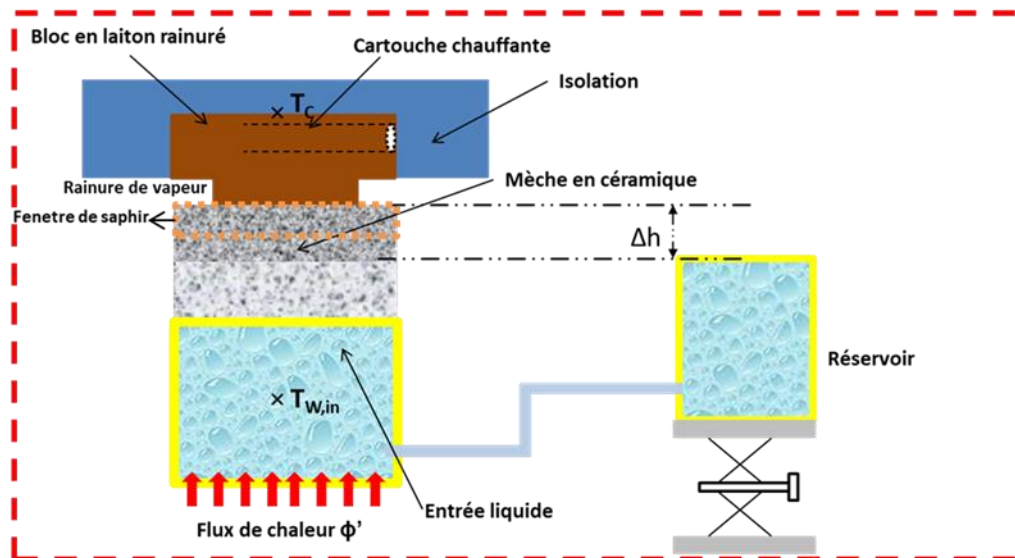
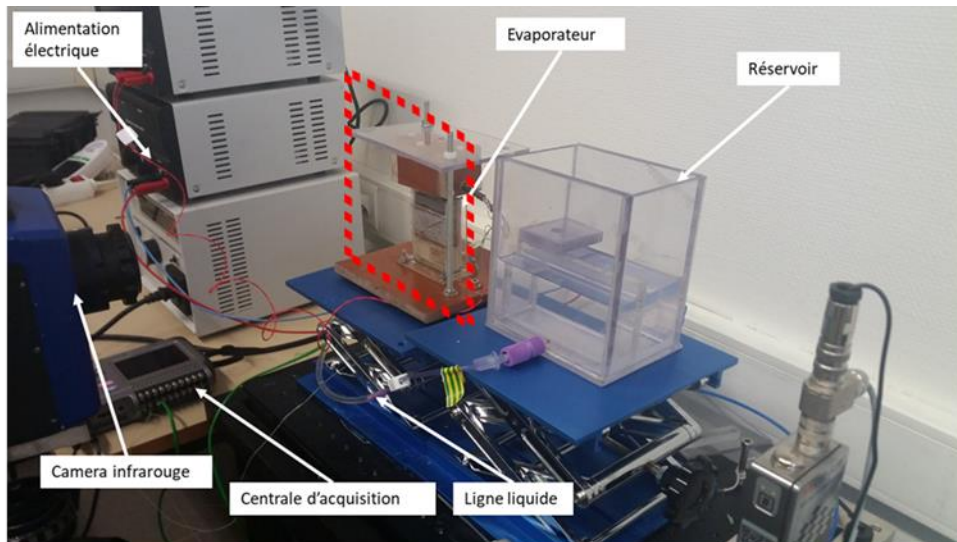
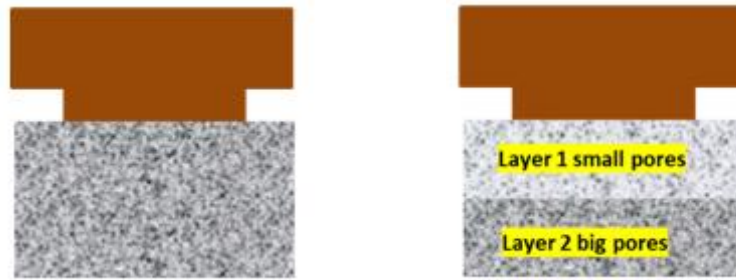


Figure 1 : Banc expérimental

2.2. Description des échantillons

Deux échantillons sont testés. Dans les deux cas, il s'agit d'alumine contenant des cavités sphériques interconnectées. Ces céramiques poreuses ont été obtenues par réplique d'édifices de billes polymériques (PMMA). La porosité est donc quasiment totalement ouverte et accessible. La première mèche est une céramique poreuse uniforme (diamètre de pores de 600-680 μm , 66% de porosité). La seconde est une mèche poreuse bicouche. Cette dernière possède deux couches ayant le même taux de porosité (65%) mais des tailles de pores différentes (diamètre de pores de 580-660 et 330-410 μm). Ces tailles de pores sont calculées à partir des tailles de billes polymériques, sélectionnées par tamisage, et du retrait macroscopique mesuré lors du frittage des céramiques (15,0% +/- 0,2%). Le taux de porosité est déterminé par pesée hydrostatique. Les diamètres d'interconnexion (tailles des fenêtres reliant deux cavités sphériques voisines) ont également été mesurés par analyse d'images obtenues par microscopie électronique à balayage. Le tableau 1 regroupe ces informations.



Echantillon 1 : Mèche uniforme

Echantillon 2 : Mèche bicouche

Figure 2 : *Echantillons testés*

	<i>Echantillon 1</i>	<i>Echantillon 2</i>
Porosité	66%	65%
Diamètre de pores	600-680 μm	580-660 μm et 330-410 μm
Diamètre d'interconnexion	111 μm	106 μm et 76 μm

Tableau 1 : *Propriétés des échantillons*

2.3. Analyse des erreurs

L'analyse d'erreur a été prise en compte pour l'expérimentation des mesures. Les températures du fluide à l'entrée de la mèche et boîtier sont mesurés à l'aide de thermocouples de type K. La mesure- les incertitudes de mesure sont de l'ordre de $\pm 1^\circ\text{C}$. Alors qu'en ce qui concerne l'entrée puissances, l'incertitude relative est estimée à 3,18% et elle est déterminé en utilisant l'équation suivante [11] :

$$\frac{\delta\varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I}\right)^2}$$

Où φ désigne la puissance appliquée, V est la tension et I est le courant.

Ces analyses d'erreur ont été trouvées après avoir représenté la répétabilité de la mesure pour chaque mèche poreuse utilisée

3. Résultats

3.1. Transfert de chaleur

La figure 3 décrit l'évolution de la température de la culasse pour les deux mèches étudiées en fonction du temps suite à une succession de paliers de puissance croissants appliqués uniformément sur l'évaporateur. Cette figure montre que lorsque la puissance thermique augmente, la température de l'évaporateur augmente également.

La température de la culasse pour la mèche bicouche (échantillon 2) est toujours inférieure à celle de la mèche uniforme (échantillon 1). En effet, lors du fonctionnement de l'évaporateur, la température de l'enveloppe est d'environ 157 °C pour la mèche bicouche et d'environ 185 °C pour la mèche uniforme pour une charge thermique de 70 W. La surchauffe dans le boîtier de l'évaporateur est plus élevée pour le poreux uniforme (échantillon 1), car la poche de vapeur qui s'est développée à l'intérieur de la mèche poreuse est plus grande.

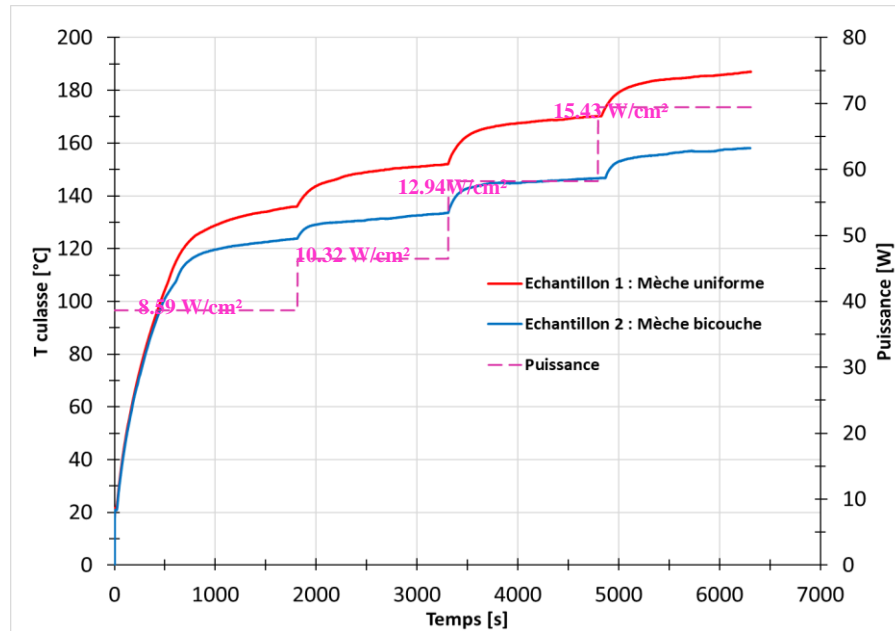


Figure 3 : Evolution de la température de la culasse pour les deux échantillons

La variation du coefficient d'échange en fonction de la puissance appliquée pour les échantillons étudiés est présentée dans la figure 4. Afin de décrire les performances thermiques de l'évaporateur, nous définir le coefficient de transfert de chaleur de l'évaporateur comme suit :

$$h = \frac{\varphi}{S(T_c - T_{w,in})}$$

où φ désigne le flux thermique appliqué à l'évaporateur, T_c désigne la température du boîtier, $T_{w,in}$, désigne la température du liquide au niveau de entrée et S désigne la surface de contact entre la surface d'entrée.

On constate que le coefficient d'échange thermique pour l'échantillon 2 est largement meilleur.

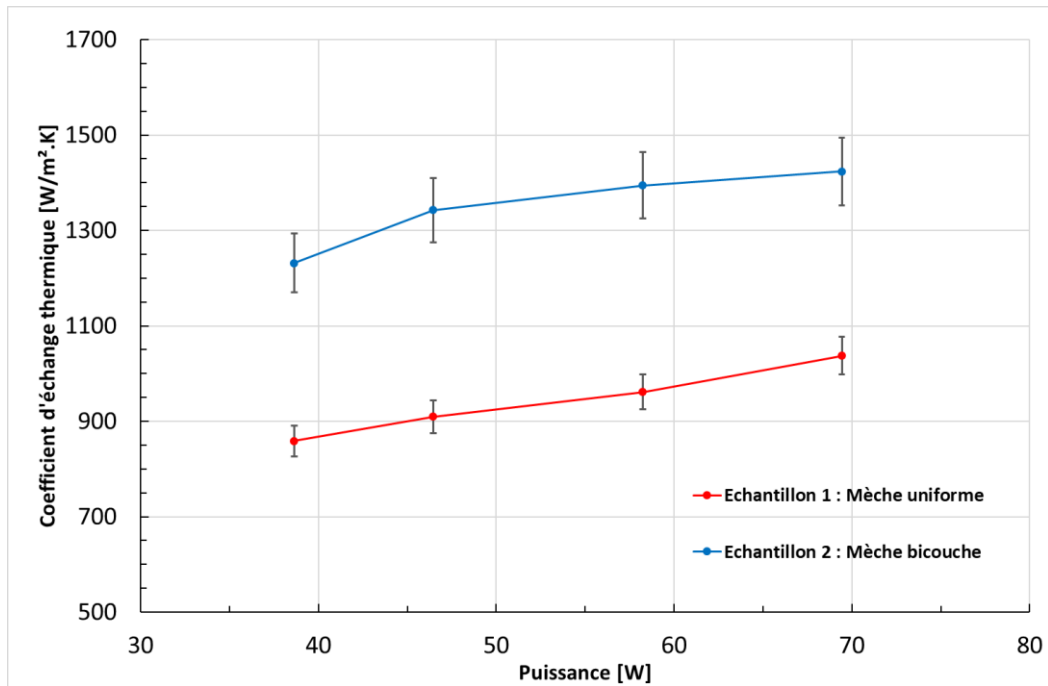
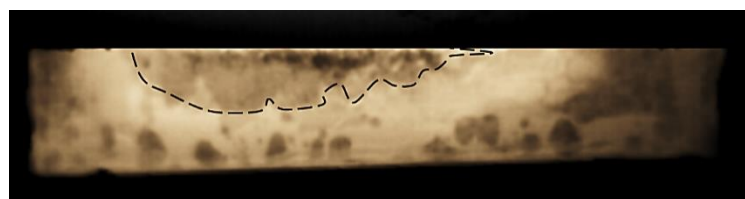


Figure 4 : Evolution du coefficient d'échange thermique

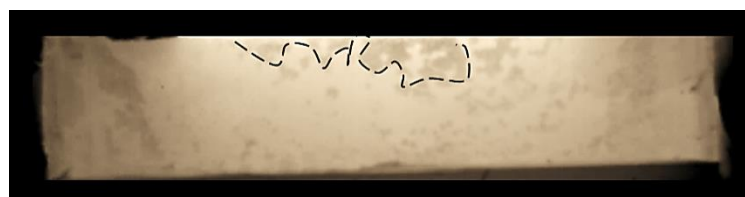
3.2. Poche vapeur

Afin de comprendre l'amélioration des performances thermiques de l'évaporateur au sein des deux mèches étudiées, le changement de phase liquide/vapeur a été visualisé. Les émissivités infrarouges liquide, vapeur/solide sont différentes à une température donnée, ce qui permet la localisation de l'interface liquide/vapeur par imagerie thermique IR.

Nous pouvons voir clairement sur la figure 5, que la mèche bicouche avec un gradient de diamètre de pores montre la plus petite poche de vapeur contrairement à la mèche uniforme. En fait pour l'échantillon 2, c'est la couche avec de petits diamètres des pores qui est en contact avec le bloc chauffant (comme présenté sur la figure), ce qui génère permettant des forces capillaires plus élevées.



(a)-Echantillon 1 : mèche uniforme



(b)-Echantillon 2: mèche bicouche

Figure 5 : Evolution de la poche vapeur

La grande poche vapeur développée dans la mèche uniforme cause une dégradation du transfert de chaleur dans l'évaporateur et augmente donc la température de l'enveloppe.

4. Conclusion

Ce travail présente une étude expérimentale du phénomène de changement de phase dans des mèches poreuse uniforme et bicouche en céramique. L'utilisation d'une mèche bicouche améliore le pompage capillaire dans l'évaporateur et réduit la taille de la poche vapeur, ce qui permet d'augmenter le coefficient d'échange thermique et diminuer la température de la culasse.

Références

- [1] P. Chen, W. Lin, The application of capillary pumped loop for cooling of electronic components, *Applied Thermal Engineering*, 21, 1739-1754, 2001.
- [2] A. Jouhara, T. Chauhan, S. Nannou, B. Almahmoud, L. Delpech, C. Wrobel, Heat pipe based systems - Advances and applications, *Energy*, Volume 128, 2017,
- [3] S. Launay, M. Valée, State-of-the-art experimental studies on loop heat pipes, *Frontiers in Heat Pipes*, 2, 2011.
- [4] B. Siedel, V. Sartre, F. Lefèvre, Complete analytical model of a loop heat pipe with a flat evaporator, *International Journal of Thermal Sciences*, 89, 372-386, 2015.
- [5] K. Blauciak, P. Szymanski, D. Mikielwicz, The Influence of Loop Heat Pipe Evaporator Porous Structure Parameters and Charge on Its Effectiveness for Ethanol and Water as Working Fluids, *Materials (Basel)*, 14, 7029, 2021.
- [6] R. Giraudon, S. Lips, D. Fabrègue, L. Gremillard, E. Maire, V. Sartre, Effect of the wick characteristics on the thermal behaviour of a LHP capillary evaporator, *International Journal of Thermal Sciences*, 133, pp.22-31, 2018.
- [7] B. B. Chen, W. Liu, Z. C. Liu, H. Li, and J. G. Yang, Experimental investigation of loop heat pipe with flat evaporator using biporous wick, *Applied Thermal Engineering*, vol. 42, pp. 34– 40, 2012.
- [8] C.C. Yeh, C.N. Chen, Y.M. Chen, Heat transfer analysis of a loop heat pipe with biporous wicks, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 52, 4426–4434, 2009.
- [9] X. Jiyuan, Z. Yong, Y. Deshuai, F. Mingxiu, Development of biporous Ti3AlC2 ceramic wicks for loop heat pipe, *Materials Letters*, 91, 121–124, 2013.
- [10] F.C. Lin, B.H. Liu, C.C. Juan, Y.M. Chen, Effect of pore size distribution in bidisperse wick on heat transfer in a loop heat pipe, *Heat Mass Transfer*, 47, 933, 2011.
- [11] R.J. Moffat, Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental Thermal Fluid Sciences*, 3-17, 1988.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet CE2I (Convertisseur d'énergie Intelligent intégré). Le CE2I est cofinancé par l'Union Européenne avec le soutien financier de Fonds européen de développement régional (FEDER), État français et Région française des Hauts- de France.