

FABRICATION DE MICROCALODUCS À SECTION TRIANGULAIRE PAR ÉCRITURE DIRECTE

Micro-heat Pipe triangular cross section by direct-write

Samy palm*¹, Ramzi Bey-Oueslati**², Sylvain Martel**³, Daniel Therriault*⁴
Centre de recherche en plasturgie et composites (CREPEC)*
Laboratoire de Micro- et de Nanofabrication par Écriture Directe*
Laboratoire de nanorobotique**
École Polytechnique de Montréal, Canada
samy.palm, ramzi.bey-oueslati, daniel.therriault, sylvain.martel :@polymtl.ca

MOTS-CLEFS

microcaloduc, microcanaux, écriture directe, transfert thermique

RÉSUMÉ

Dans cet article, la microfabrication par écriture directe est proposée pour la création de microcaloducs à section triangulaire, habituellement fabriqués par les techniques conventionnelles de lithographie. Les microcaloducs sont très prometteurs pour la dissipation de chaleur à l'intérieur d'appareils compacts dans le domaine de la microélectronique et de l'aérospatiale. La méthode d'écriture directe utilisée consiste à la déposition robotisée d'une encre fugitive suivie par l'infiltration d'une résine polymérique et du retrait de l'encre pour la fabrication de microcanaux de quelques centaines de microns de section transversale triangulaire. Ces microcanaux sont ensuite remplis d'un fluide caloporteur et scellés afin d'obtenir des microcaloducs. La fabrication des premiers prototypes à section triangulaire a démontré l'efficacité de la méthode par écriture directe. Des tests thermiques ont été effectués pour l'évaluation de l'efficacité thermique des microcaloducs produits. Plus particulièrement, nous avons effectué des tests préliminaires pour déterminer le potentiel en transfert thermique de cette nouvelle génération de microcaloduc.

ABSTRACT

In this article, the direct-write method is proposed for the fabrication of micro-heat-pipes (MHP) which are usually manufactured by conventional lithography techniques. MHP are very promising for the heat dissipation inside compact devices in several fields such as microelectronics and aerospace. Direct-write method consists of the robotically controlled deposition of a fugitive ink followed by the infiltration of a polymeric resin and the removal of the ink for the creation of microchannels with a cross section of few hundred microns. These microchannels are then filled with a working fluid and sealed in order to obtain MHP. Prototypes with triangular cross section were built to demonstrate the direct-write method effectiveness. Thermal tests were then carried out to evaluate the heat transfer potential of this new generation of micro heat pipe.

1. INTRODUCTION

L'augmentation de la densité des puces électroniques et la réduction de leurs dimensions mènent à une génération importante de chaleur [Moore, 1998]. Lorsque la dissipation de cette chaleur est insuffisante, des températures locales élevées sont créées et la défaillance électrique ou mécanique des puces est inévitable. Présentement, le flux thermique moyen généré par une composante électronique est de l'ordre de 35 -100 W/cm² et progressera rapidement dans quelques années autour de 1000 W/cm² selon l'ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductor*). Grâce aux récents progrès en microfabrication, plusieurs systèmes à haute conductivité thermique ont vu le jour comme des microéchangeurs de chaleur [Kawano *et al.*, 2001]

et des réseaux de microcaloducs [Cotter, 1984]. Un microcaloduc est un système passif biphasique possédant une conductivité thermique effective élevée, capable de transférer de grande quantité de chaleur sur des distances considérables tout en ayant un faible gradient thermique. Des recherches antérieures sur le sujet montrent que la conductivité thermique des microcaloducs est de 100 à 1000 fois supérieures à celle du cuivre [Cao *et al.*, 1996; Vasilev, 2006]. Le fonctionnement d'un microcaloduc à section triangulaire, microcanal rempli d'un volume spécifique de fluide caloporteur et scellé, est illustré à la figure 1. Un flux thermique imposé à l'une des extrémités du microcaloduc entraîne la vaporisation du fluide dans cette région (zone chaude). Les gradients de températures et de pression obligent la phase vapeur à migrer vers la zone froide où la condensation se produit. Le différentiel de pression capillaire entre l'évaporateur et le condenseur initie le retour du fluide caloporteur sous forme liquide du condenseur vers l'évaporateur. Les microcaloducs (diamètre hydraulique de 10 μm à 500 μm) [Vasilev, 2006] sont très compacts et possèdent une plus grande surface d'échange de chaleur par unité de volume comparativement aux caloducs ayant une section transversale plus grande que 1 mm. Les microcanaux à section transversale triangulaire [Berre *et al.*, 2003] et à formes polygonales [Moon *et al.*, 2004 et Shung-Wen & Derlin, 2002] offrent des forces capillaires élevées grâce aux coins à angle vif pour le retour du liquide ce qui libère le centre du canal pour le transport de la phase vapeur.

Les microcaloducs sont habituellement fabriqués par lithographie [Mallik *et al.*, 1995], technique nécessitant une infrastructure importante et des temps de fabrication longs. Les matériaux utilisés pour la fabrication des microcanaux sont principalement le silicium [Gillot *et al.*, 2003], le cuivre et l'argent [Babin *et al.*, 1990]. Dans cet article, nous présentons la fabrication de microcaloducs à section transversale triangulaire par la méthode d'écriture directe basée sur la déposition d'une encre fugitive et la caractérisation de leurs conductivités thermiques effectives.

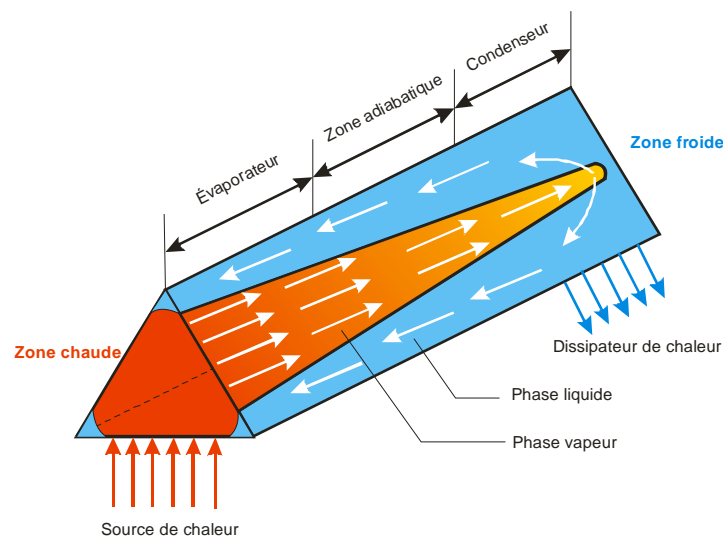


Figure 1: Fonctionnement d'un microcaloduc à section triangulaire et les principales zones caractéristiques

2. FABRICATION PAR ÉCRITURE DIRECTE DE MICROCALODUCS

La méthode d'écriture directe permet la fabrication rapide de microstructures complexes en deux ou trois dimensions (2D et 3D) [Lewis & Gratson, 2004] qui sont difficilement réalisables par la technique de lithographie. Une encre fugitive est utilisée pour la fabrication des microcanaux [Therriault *et al.*, 2003] qui serviront à encapsuler le fluide caloporteur.

2.1 Microcanal à section triangulaire

La méthode consiste à une déposition robotisée d'une encre fugitive organique et les principales étapes de fabrication des microcanaux à section triangulaire sont illustrées à la figure 2.

La *déposition de l'encre organique* (figure 2a,b) qui est effectuée à l'aide un robot de micropositionnement (IJ2200, I&J Fisnar) à 4 degrés de libertés (x, y, z, θ) et d'un système d'extrusion à air comprimé (modèle 2400, EFD). L'encre utilisée est un mélange de cire microcristalline et de gelée de pétrole (proportion 20% et 80% respectivement). L'encre, placée à l'intérieur d'une seringue, est extrudée à pression constante (~ 2.4 MPa) à travers d'une micro-aiguille métallique (« High-precision stainless steel tips », EFD) ayant un diamètre interne de $100 \mu\text{m}$. Le filament d'encre cylindrique extrudé est déposé sur un substrat de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) se déplaçant à $V_y = 10 \text{ mm/s}$. Un microcanal à section transversale triangulaire est obtenu par un empilement de canaux à section circulaire (figure 2b). La première couche consiste à quatre filaments parallèles à section circulaire de $100 \mu\text{m}$ dont la distance externe entre les filaments est nulle afin d'avoir une structure solidaire. Cette procédure est répétée pour les couches supérieures en faisant un incrément de la position verticale de la micro-aiguille (90% du diamètre du filament), une translation des filaments déposés et le décrétement du nombre de filament d'une entité à chaque fois. La qualité de la déposition de la structure est fonction de certains paramètres expérimentaux comme la vitesse de déplacement du robot, la pression appliquée pour extruder l'encre et enfin la distance entre l'extrémité de l'aiguille et le substrat. La déposition est observée à l'aide d'un stéréomicroscopique rattaché au montage. L'*infiltration de la structure* déposée (figure 2c) est réalisée à température ambiante à l'aide d'un époxy à faible viscosité (mélange 2.5 :1, Epon-828 (Shell Chemicals) et de l'Epi-Cure 3274 (Shell Chemicals)). Après durcissement partiel de la résine, d'environ 24h à température ambiante, l'échantillon est placé dans un four à 55°C pendant 8h, afin de compléter la polymérisation de la résine. À la sortie de l'échantillon du four, l'encre fondue est extraite (figure 2d) en appliquant une pression à l'une des ouvertures de la structure. Finalement, le microcanal est nettoyé par la circulation d'eau chaude (température $\sim 55^\circ\text{C}$) pendant quelques secondes.

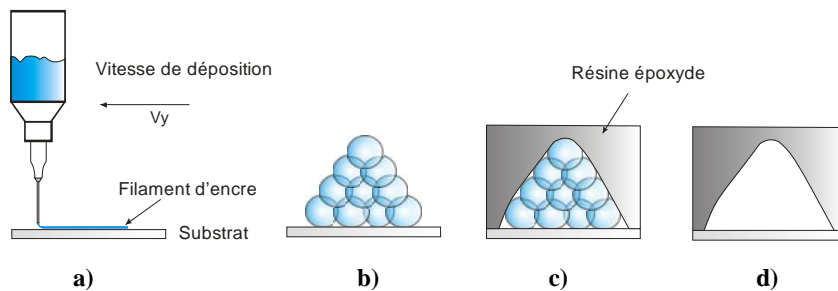


Figure 2: Fabrication d'un microcanal à section transversale triangulaire par écriture directe. **a)** Déposition de l'encre, **b)** Déposition multicouche, **c)** Infiltration de la structure et **d)** Retrait de la structure.

La figure 3 montre le microcanal à section triangulaire fabriqué par écriture directe après infiltration par un liquide fluorescent. La section transversale est $\sim 450 \mu\text{m}$ de hauteur et $\sim 650 \mu\text{m}$ de largeur à la base et la longueur totale du canal est de 15 mm. Deux coins vifs $\sim 70^\circ$ sont obtenus à l'interface entre le PMMA et l'époxy grâce aux forces de tension de surface entre l'encre et le substrat présentes lors de l'infiltration de la résine. Cependant, un coin arrondi est obtenu au sommet supérieur de la section puisque la géométrie est obtenue à partir d'un assemblage de filaments cylindriques.

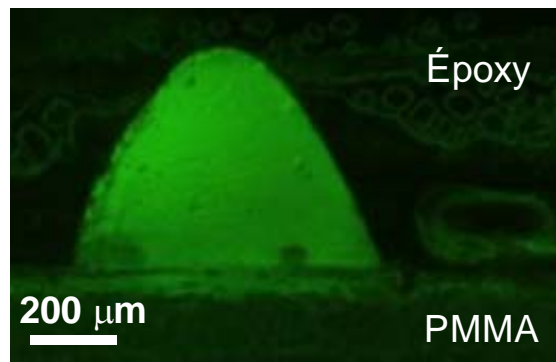


Figure 3: Image de microscope UV d'un microanal à section triangulaire infiltré par un liquide fluorescent.

2.2 Remplissage et de scellage du microcanal

Les microcanaux fabriqués, sont remplis de deux fluides caloporteurs, soit de l'eau désionisée ou de l'éthanol. Le type et la charge du fluide caloporteur sont des paramètres critiques pour la performance thermique du microcaloduc. Avant de procéder à l'injection du fluide caloporteur, un microtube de polymère (diamètre interne = 1 mm) est collé (Colle époxyde 5 min, *Permatex*) à l'une des ouvertures du microcanal à section triangulaire. Le montage utilisé pour le remplissage fixe du microcanal (figure 4) est basé sur le dispositif développé par [Cao *et al.*, 1997] avec l'ajout d'une pompe à seringue permettant de contrôler le volume de fluide injecté. Le processus de remplissage débute par une mise sous vide (pompe à vide, *Brandtech*) de l'échantillon pendant 3h. Cette procédure permet d'éliminer les impuretés et les gaz condensables présents dans le microcanal. Après le vide, la valve 1 (voir figure 4) est fermée et un volume précis de fluide caloporteur est injecté à l'intérieur du microcanal. Une fois que le taux de remplissage désiré est atteint, la colle (*Xtreme all temperature, Loctite*) est manuellement injectée pour sceller l'orifice de remplissage à l'entrée du microcanal. Pour finir, le microtube utilisé pour le remplissage est sectionné près de son extrémité collée au microcaloduc. Le puits de pression présent dans notre dispositif de remplissage sert à éviter tout retour de fluide à l'intérieur de la pompe à vide.

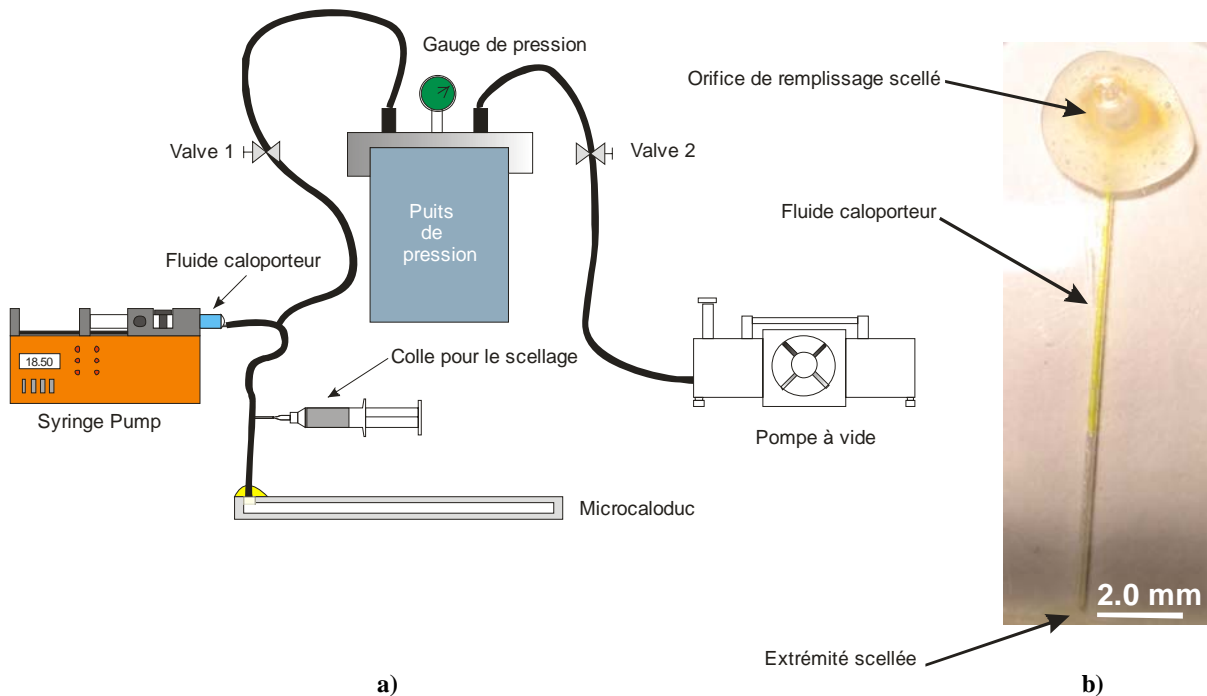


Figure 4: Remplissage et scellage d'un microcaloduc. a) Schéma du montage utilisé pour le remplissage à volume fixe. b) Image de microscopie optique d'un microcaloduc infiltré et scellé.

3. CARACTÉRISATION THERMIQUE DES MICROCALODUCS

3.1 Montage expérimental

Le but des tests thermiques est l'évaluation de la capacité en transfert thermique des microcaloducs fabriqués par écriture directe. Le montage expérimental utilisé pour évaluer les performances en transfert thermique des microcaloducs est illustré à la figure 5. Le protocole expérimental commence par la prise de différentes mesures de l'échantillon, dont l'épaisseur, la hauteur et la longueur. Les thermocouples de type K (diamètre = 0.080 mm) sont disposés selon l'axe longitudinal du microcanal et fixés localement à l'aide d'adhésifs thermiques («Tap», *Omega*). La position exacte des thermocouples est obtenue par analyse d'image digitale (Logiciel *Image-Pro Plus* version 5, *MediaCybernetics*) grâce à la caméra CCD installée sur un stéréomicroscope (SZ61, *Olympus*). Une des extrémités de l'échantillon (évaporateur ou zone chaude) est chauffée en à l'aide d'une résistance électrique de 16 Ω . Le flux thermique désiré est obtenu en ajustant le voltage d'alimentation de la source de tension DC. Une pâte thermique (0.75 W/m.K) est appliquée entre la résistance de chauffage et l'échantillon afin de minimiser la résistance de contact. L'autre extrémité du microcanal (condenseur ou zone froide) est insérée dans un tube dans lequel circule un mélange de fluide refroidissant (éthylène-glycol, eau à la proportion respective 1 :1). Ce fluide refroidissant est acheminé grâce à un bain à température constante (*Polyscience*). L'échantillon et les différentes composantes assemblées sont ensuite placés dans une chambre scellée. Les parois supérieures et inférieures en acrylique permettent l'admission de la lumière dans la chambre et facilitent les prises de mesures, tandis que les parois verticales en garolite sont opaques. L'air ambiant dans la chambre est retiré à l'aide d'une pompe (MD4, *BrandTech*) jusqu'à une pression de \sim 2mbar. Cette faible pression permet ainsi de minimiser les pertes de chaleur par convection vers l'environnement lors des essais. Après avoir démarré l'alimentation de la résistance et la circulation du fluide de refroidissement, le régime stationnaire est atteint après \sim 1h30 min. Les températures sont mesurées et enregistrées grâce un système d'acquisition des données (NI-SCXI-1000 avec l'accessoire NI-SCXI-1112 pour connecter les thermocouples, *National Instruments*) à huit canaux ayant une précision de \pm 0.5°C. L'ensemble du montage est contrôlé en temps réel à travers une interface développée sur labview (*LabView* version 8, *National Instruments*). La sauvegarde des données en régime permanent est effectuée sur \sim 5 min.

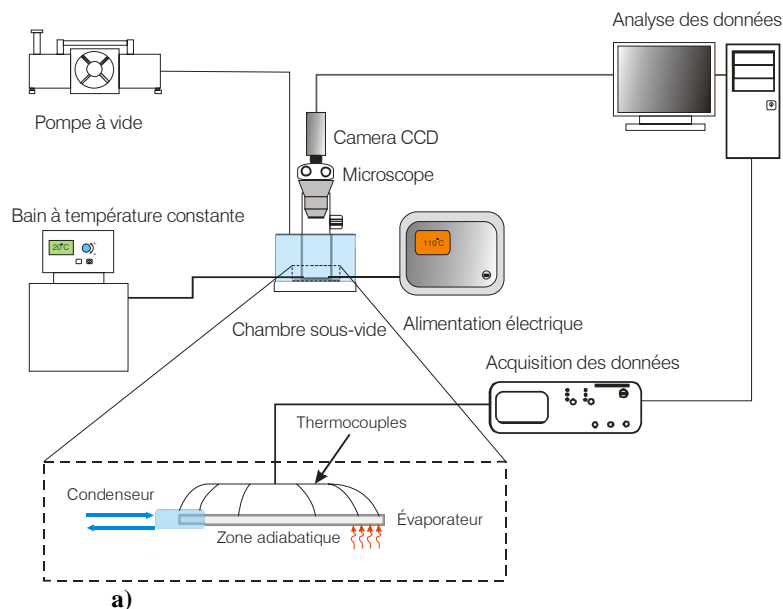


Figure 5: Montage thermique. a) Schéma du dispositif expérimental pour évaluer les caractéristiques thermiques d'un microcaloduc.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés dans cet l'article ont été obtenus pour des tests thermiques effectués sur un microcaloduc ayant les dimensions: $L = 27.50$ mm, $\ell = 11.09$ mm et δ (épaisseur) = 2.23 mm (1.60 mm de PMMA et 0.63 mm d'époxy)). Le fluide caloporteur utilisé pour cette application est de l'eau. Le pourcentage de remplissage du microcanal est d'environ 65%.

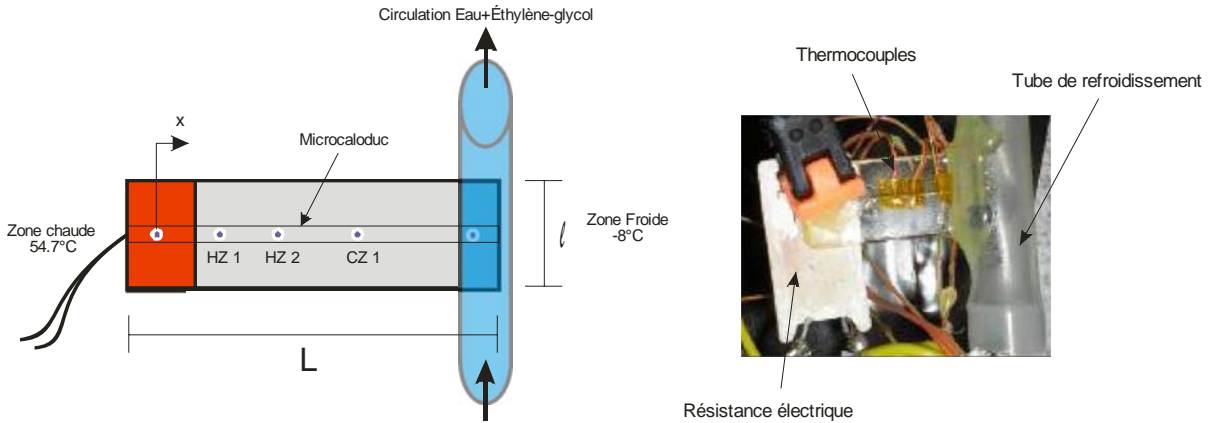


Figure 6: Représentation schématique de la position des thermocouples.

4.1 Comportement thermique local du microcaloduc

La figure 7 illustre la variation de température à la paroi du microcaloduc pour un microcanal rempli et vide. La température est maximale au niveau de la zone de chauffage et diminue considérablement vers la zone froide (condenseur). À première vue, le microcanal rempli offre de meilleures performances thermiques que le microcanal vide. En effet, le différentiel de température entre l'évaporateur et le condenseur pour un microcanal rempli et vide est de 49.09°C et 50.04°C respectivement. Ainsi, le fluide caloporteur à l'intérieur du microcanal permet la réduction du gradient thermique de quelques degrés.

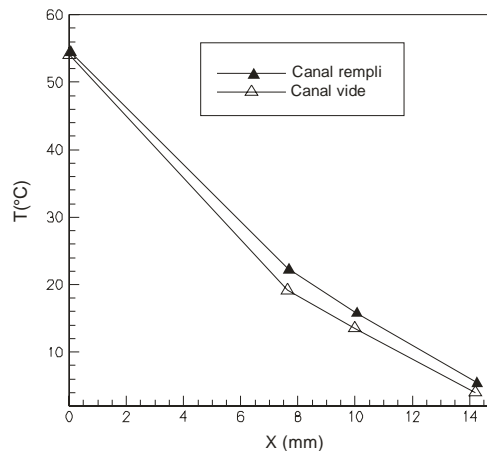


Figure 7: Distribution de la température à la paroi pour le microcanal vide et rempli.

Cependant, une meilleure quantification des propriétés en transfert thermique du microcaloduc est d'évaluer la conductivité thermique effective (K_{eff}) [Shung-Wen & Derlin] de l'ensemble substrat-microcanal. Elle est basée sur la loi de Fourier :

$$K_{eff} = \frac{Q_{in}}{A_{eff}} \frac{L_{eff}}{T_h - T_c} \quad (1)$$

où Q_{in} est l'énergie dissipée par effet joule, A_{eff} est la section transversale de la structure, $T_h - T_c$ est la différence de température entre l'évaporateur et le condenseur et L_{eff} représente la longueur effective entre

l'évaporateur et le condenseur et est définie comme: $L_{eff} = L + \frac{L_e + L_c}{2}$

où L correspond à la longueur de la zone adiabatique, L_e et L_c désigne la longueur de l'évaporateur et du condenseur respectivement. Pour une charge de chauffage de $Q_{in} = 1$ W, nous obtenons un $K_{eff} = 13.82$ W/m.K pour le microcanal rempli et un $K_{eff} = 13.56$ W/m.K pour le microcanal vide. Ce qui représente une différence insignifiante entre les deux cas. Cette observation particulière peut s'expliquer par la présence possible de fuites du fluide caloporteur lors du chauffage du microcanal rempli. Un autre facteur qui peut expliquer ce phénomène serait que la température de chauffage au niveau de l'évaporateur est inférieure à la plage de températures de mise en fonctionnement de notre microcaloduc testé. Également, l'aire relative de la section triangulaire par rapport à l'aire de la matrice est évaluée à 0.49%, ce qui permet d'expliquer en partie la conductivité thermique insatisfaisante qui a été notée. En effet, le flux thermique imposé au niveau de la zone chaude est surtout transmis à la matrice d'encapsulation.

4.2 Résistance thermique du substrat

Hors mis tous les autres critères limitatifs qui interviennent dans l'évaluation de l'efficacité du microcaloduc, la résistance thermique équivalente, inhérente au fonctionnement du microcaloduc et à la matrice d'encapsulation, permet d'évaluer le différentiel de température entre l'évaporateur et le condenseur. La figure 8, illustre les principales résistances dans le contexte d'un microcaloduc à section triangulaire.

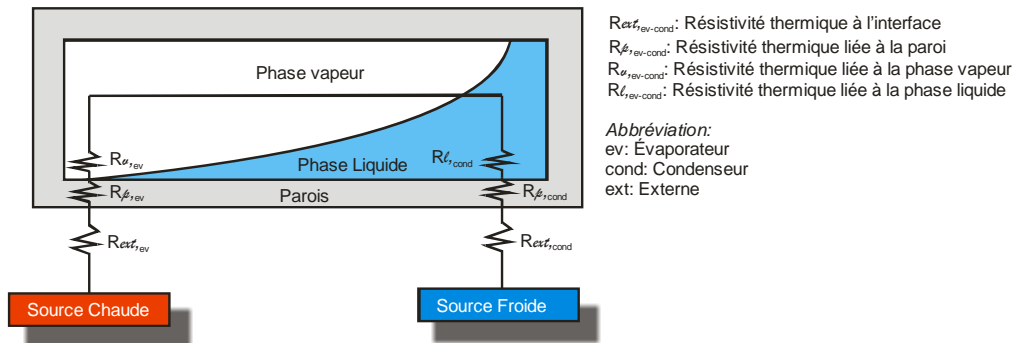


Figure 8: Résistance thermique de la matrice constituée d'époxy.

Des travaux antérieurs [Gad-el-Hak, 2002] montrèrent que la résistance de la phase vapeur, la résistance axiale des parois du canal et la résistance à l'interface liquide-vapeur peuvent dans la plupart des cas être négligées. Ainsi, restent les résistances radiales à la paroi à l'évaporateur et au condenseur. Généralement, elles sont calculées grâce à la loi de Fourier (2) :

$$R = \frac{\delta}{k_p A}, \quad (2)$$

où δ représente l'épaisseur de la paroi, k_p la conductivité thermique de la paroi et A l'aire de la section (dans notre contexte à l'évaporateur et au condenseur.)

La formule de Fourier met tout de suite en relief l'importance particulière que l'on devrait accorder à l'épaisseur de notre matrice d'encapsulation compte tenu de la faible conductivité thermique de notre époxy et du substrat (PMMA). Ainsi, l'une des premières approches pour réduire les résistances thermiques liées à l'interface et à la paroi serait d'utiliser une pâte thermique ayant une haute conductivité thermique et réduire l'épaisseur de l'époxy et du PMMA (substrat). Également, l'autre possibilité envisagée est de renforcer la matrice d'époxy avec des nanoparticules de SiO_2 beaucoup plus conductrices.

5. CONCLUSION

Dans cet article, la méthode d'écriture directe par déposition d'une encre fugitive a été utilisée pour fabriquer des microcaloducs à section triangulaire avec succès. La méthode a démontré sa capacité dans la fabrication de microcanaux de quelques microns. Également, des tests expérimentaux ont été menés pour évaluer les performances en transfert thermique. Cependant, des faiblesses au niveau du scellage des microcaloducs et certains critères expérimentaux n'ont pas permis la détermination précise des capacités en transfert thermique de nos échantillons. Des travaux supplémentaires seront menés sur l'amélioration de la méthode de scellage et d'autres paramètres expérimentaux comme l'étude de l'influence du taux de remplissage et de la charge de chauffage imposée à l'évaporateur.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été possible grâce au support financier du conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

RÉFÉRENCES

- Babin, B. R., Peterson, G. P., & Wu, D. 1990. Steady-state modeling and testing of a micro heat pipe, *Journal of Heat Transfer, Transactions ASME*, 112, 595-601.
- Cao, Y., Gao, M., Beam, J. E., & Donovan, B., Experiments and analyses of flat miniature heat pipes, 1996.
- Cao, Y., Gao, M., & Pinilla, E., Fabrication and test of a filling station for micro/miniature devices, 1997.
- Choy, C. L. 1977. Thermal conductivity of polymers, *Polymer*, 18, 984-1004.
- Gad-el-Hak, M., *The MEMS handbook* Boca Raton, FL.: CRC Press, 2002.
- Gad-el-Hak, M., *The MEMS handbook. MEMS : applications*, 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Taylor & Francis, 2006.
- Gillot, C., Avenas, Y., Cezac, N., Poupon, G., Schaeffer, C., & Fournier, E. 2003. Silicon heat pipes used as thermal spreaders, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26, 332-339.
- Kawano, K., Sekimura, M., Minakami, K., Iwasaki, H., & Ishizuka, M. 2001. Development of micro channel heat exchanging, *JSME International Journal, Series B (Fluids and Thermal Engineering)*, 44, 592-8.
- Le Berre, M., Launay, S., Sartre, V., & Lallemand, M. 2003. Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13, 436-441.
- Lewis, J. A. & Gratson, G. M. 2004. Direct writing in three dimensions, *Materials Today*, 7, 32-39.
- Mallik, A. K., Peterson, G. P., & Weichold, M. H. 1995. Fabrication of vapor-deposited micro heat pipe arrays as an integral part of semiconductor devices, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 4, 119-31.
- Moon, S. H., Hwang, G., Ko, S. C., & Kim, Y. T. 2004. Experimental study on the thermal performance of micro-heat pipe with cross-section of polygon, *Microelectronics Reliability*, 44, 315-321.
- Moore, G. E. 1998. Cramming More Components Onto Integrated Circuits, *Proceedings of the IEEE*, 86, 82-85.
- Moran, M. J., *Introduction to thermal systems engineering : thermodynamics, fluid mechanics, and heat transfer*. Hoboken, NJ: Wiley, 2003.

Peterson, G. P., Duncan, A. B., & Weichold, M. H. 1993. Experimental investigation of micro heat pipes fabricated in silicon wafers, *Journal of Heat Transfer, Transactions ASME*, 115, 751-756.

Schaller, R. R. 1997. Moore's law: past, present and future, *Spectrum, IEEE*, 34, 52-59.

Shung-Wen, K. & Derlin, H. 2002. Fabrication of star grooves and rhombus grooves micro heat pipe, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12, 525-31.

Therriault, D., Shepherd, R. F., White, S. R., & Lewis, J. A. 2005. Fugitive inks for direct-write assembly of three-dimensional microvascular networks, *Advanced Materials*, 17, 395-399.

Vasiliev, L. L. Micro and miniature heat pipes - Electronic component coolers, *Applied Thermal Engineering*, In Press, Corrected Proof.

Zhang, L., Wang, E. N., Goodson, K. E., & Kenny, T. W. 2005. Phase change phenomena in silicon microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 1572-1582.