

Conception et caractérisation de matériaux composites polymères à conductivité thermique améliorée

Oguzhan DER¹, Stuart EDWARDSON², Volfango BERTOLA^{1*}

¹Laboratory of Technical Physics, School of Engineering, University of Liverpool
Brownlow Hill - Liverpool L69 3GH, UK

²Centre for Laser Manufacturing, School of Engineering, University of Liverpool
Brownlow Hill - Liverpool L69 3GH, UK

*(auteur correspondant : Volfango.Bertola@liverpool.ac.uk)

Résumé - Un nouveau type de feuille de polypropylène composite est décrit et testé. Le concept consiste à prendre en sandwich un canal serpentin en boucle fermée, découpé dans une feuille de polypropylène et contenant un mélange liquide-vapeur automoteur, entre deux feuilles du même matériau liées par soudage laser sélectif. La réponse thermique d'une feuille de polymère prototype a été caractérisée pour différents niveaux de puissance thermique et orientations spatiales. La conductance thermique équivalente, calculée à partir des températures de surface aux extrémités de la feuille, augmente quatre à six fois par rapport à une feuille de polypropylène composite sans fluide de travail.

Nomenclature

D	diamètre, m	<i>Indices et exposants</i>	
g	constante de gravité, m/s^2	C	condenseur
K	conductance thermique, $W/^\circ C$	eq	équivalente
P	pression, Pa	E	évaporateur
\dot{Q}	puissance thermique, W	G	gaz
T	température, K	H	hydraulique
<i>Symboles grecs</i>		L	liquide
σ	tension de surface, N/m		
ρ	densité, kg/m^3		

1. Introduction

L'utilisation de matériaux polymères pour remplacer les pièces métalliques est le choix naturel pour répondre aux contraintes de poids et de coût d'un grand nombre d'appareils et d'applications, y compris les applications spatiales, aéronautiques et électroniques portables. Alors que les matériaux polymères offrent d'excellentes caractéristiques de flexibilité mécanique, de résistance à la fatigue, de faible poids et de faible coût par rapport aux matériaux métalliques, ils présentent des performances de transfert de chaleur médiocres en raison de leur faible conductivité thermique.

Récemment, plusieurs tentatives ont été menées pour augmenter la conductivité thermique des polymères en utilisant des additifs à conductivité thermique élevée, tels que des minéraux, des fibres et des métaux [1]. La taille des charges atteint souvent l'échelle nanométrique pour obtenir une interaction directe et efficace entre les composants. Les propriétés finales de ces nanocomposites dépendent des propriétés de leurs composants, de la forme, de la taille, de la distribution et de l'orientation de la phase dispersée. Les additifs peuvent être ajoutés in situ

pendant le processus de synthèse ou ex-situ par dispersion mécanique dans un polymère fondu en utilisant un turbomixeur ou une extrudeuse à double vis. Les additifs couramment utilisés comprennent des particules [2, 3], des fibres [4], des poudres ou particules métalliques [5, 6] et des nanotubes de carbone [7, 8, 9].

Dans le présent travail, il est proposé de fabriquer des feuilles de polymère composites incorporant des caloducs pulsés, qui présentent une conductivité thermique équivalente significativement supérieure à celle du matériau polymère solide [10, 11]. La technologie des caloducs pulsés est basée sur la circulation d'un fluide de travail autopulsé dans un canal serpentin à boucle fermée, qui est découpé dans une feuille de polypropylène et pris en sandwich entre deux feuilles de polypropylène transparentes, liées par soudage par transmission laser sélective. Quand de la chaleur est fournie à un côté de la feuille polymère composite (l'évaporateur), le fluide de travail s'évapore ; l'augmentation de température et de pression qui en résulte provoque la dilatation de la vapeur et pousse le fluide de l'évaporateur vers la section du condenseur, où la chaleur est rejetée dans un environnement plus froid. Les bouchons de vapeur agissent mécaniquement comme un piston sur les bouchons de liquide adjacents, assurant la circulation du fluide de travail. Le retour du condensat à l'évaporateur peut être davantage entraîné par la gravité et/ou la capillarité, en fonction du diamètre hydraulique du canal.

Les performances thermiques d'une feuille de polypropylène composite ayant des dimensions de 250 mm de longueur, 98 mm de largeur et 1,5 mm d'épaisseur, et contenant un fluide caloporteur, ont été testées en appliquant à la section de l'évaporateur une rampe de puissance à étages croissante/décroissante comprise environ entre 2 W et 30 W, et en mesurant les températures à la surface de la feuille. Lorsque l'apport calorifique maximal est de 31,82 W, la résistance thermique équivalente atteint un minimum de 1,35°C/W ; en comparaison, la résistance thermique équivalente de l'enveloppe en feuille de polymère composite sans fluide de travail est de 7,9°C/W, ce qui signifie que la conductance thermique équivalente augmente de 585% par rapport à la feuille de polypropylène composite sans fluide caloporteur.

2. Conception et fabrication

2.1. Sélection des matériaux

Les polymères thermoplastiques sont le choix plus sensé pour produire des dispositifs fluidiques peu coûteux et caractérisés par une flexibilité mécanique ; Les autres avantages sont le rapport résistance mécanique / poids, la simplicité de mise en forme et de production en série, et la facilité de recyclage. Cependant, leur conductivité thermique relativement faible empêche leur utilisation dans les applications de transfert de chaleur et de gestion thermique. Dans la présente étude, des matériaux polymères appropriés pour la fabrication de dispositifs fluidiques ont été sélectionnés selon les critères suivants :

- Flexibilité mécanique - Matériaux avec module de Young et module de flexion inférieur à 1 GPa et allongement à la contrainte critique supérieur à 2%.
- Compatibilité chimique avec les fluides de travail (eau, acétone, éthanol),
- Températures de service maximales et minimales.
- Soudabilité par transmission laser sélective.

Sur la base de ces critères, le polypropylène a été identifié comme le meilleur candidat à l'aide du logiciel CES EduPack 2015 (Granta Design Ltd.). Le polypropylène présente des avantages supplémentaires, tels qu'une résistance élevée à l'abrasion, une résistance à plusieurs acides, alcalins et solvants dans une plage de températures jusqu'à 140°C, et un coût relativement bas par rapport à d'autres matériaux plastiques.

2.2. Conception thermohydraulique

Le caloduc pulsé a été conçu comme un canal serpentin à boucle fermée [12], découpé dans une feuille de polypropylène rectangulaire ayant des dimensions de 250 mm de longueur et 98 mm de largeur, comme illustré à la figure 1. Pour assurer la circulation du fluide caloporteur dans le régime capillaire, le diamètre hydraulique, D_H , doit être compris dans la plage suivante [13] :

$$0.7 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}} \leq D_H \leq 1.8 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}} \quad (1)$$

Selon Eq. (1) le diamètre hydraulique dépend des propriétés du fluide ; en particulier pour l'éthanol ($\rho = 789 \text{ kg/m}^3$; $\sigma = 22 \text{ mN/m}$) Eq. (1) donne $1,18 \text{ mm} \leq D_H \leq 3,04 \text{ mm}$, tandis que pour le fluide réfrigérant FC-72 ($\rho = 1680 \text{ kg/m}^3$; $\sigma = 10 \text{ mN/m}$), le critère devient $0,54 \text{ mm} \leq D_H \leq 1,4 \text{ mm}$. Afin d'assurer une bonne flexibilité mécanique, le canal du caloduc a été obtenu dans une feuille de polypropylène d'une épaisseur de 0,7 mm ; en conséquence, avec une largeur de canal de 9 mm, on obtient un diamètre hydraulique de 1,3 mm, ce qui convient pour l'utilisation du caloduc avec les deux fluides considérés. Par conséquent, il est possible d'insérer jusqu'à six portions parallèles du canal à l'intérieur de la largeur du caloduc, correspondant à un canal à cinq courbes, comme illustré à la figure 1. Dans cette configuration, le canal a un volume total de 8,4 mL, tandis que dans la configuration à trois courbes, il est de 5 mL.

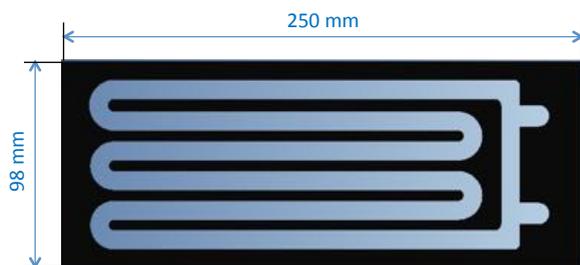


Figure 1 : Schéma du canal serpentin en boucle fermée

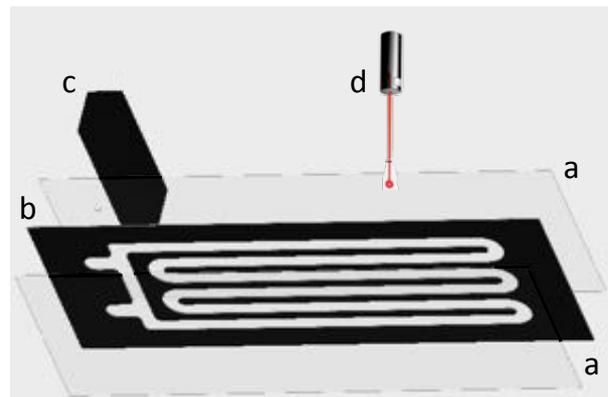


Figure 2 : Schéma du processus d'assemblage et de soudage au laser

2.3. Fabrication

Le canal du caloduc pulsé a été obtenu dans une feuille de polypropylène noir par découpe au laser. La découpe au laser a été préférée aux autres technologies de fabrication parce que elle permet d'obtenir des géométries de découpe complexes rapidement et avec précision par rapport à d'autres procédés, à condition que le matériau ne surchauffe pas, ce qui provoquerait une déformation du contour du canal. La qualité de la coupe est principalement déterminée par sa largeur, qui a été minimisée en agissant sur la mise au point du laser, et par la rugosité de ses bords [14]. Pour améliorer la finition des bords de coupe, chaque canal a été coupé en répétant plusieurs passes de gravure, en enlevant environ 0,1 mm de matériau à chaque passe.

La deuxième étape du processus de fabrication a consisté à sceller les deux côtés ouverts du canal avec deux feuilles de polypropylène transparent par soudage par transmission laser afin de créer des joints lisses, sans soudure et robustes entre les couches [15]. L'énergie du laser traverse la couche transparente transmissive et est absorbée par la couche noire adjacente, en

fondant les deux feuilles exactement à l'interface [16], comme indiqué schématiquement à la figure 2. Pour assurer un soudage uniforme, les feuilles de plastique ont été serrées entre deux lames de verre pour permettre au faisceau laser d'atteindre la feuille de polypropylène.

Les principaux paramètres de soudage ont été optimisés à l'aide d'une approche essais et erreurs ; ils correspondent à une distance focale égale à 24,7 cm, une puissance laser de 1,9 W et une vitesse de coupe de 18 mm/min, tandis que la largeur de la ligne de soudure est égale à 0,3 mm. Pour assurer un soudage plus fort et éliminer les éventuelles imperfections, le processus consistait en deux passes avec des directions de soudage orthogonales.

3. Montage expérimental et procédure

Le montage expérimental est représenté schématiquement à la figure 3. Les feuilles caloducs composites ont été montées sur un cadre de support vertical, avec la zone de l'évaporateur en bas et le condenseur en haut.

Deux plaques chauffantes en céramique (100 W chacune) ont été appliquées des deux côtés du caloduc dans la région de l'évaporateur ; pour distribuer uniformément la chaleur, deux plaques de cuivre ont été placées entre chaque élément chauffant et la surface du caloduc pulsant, tandis qu'une pâte thermique a été utilisée pour minimiser la résistance de contact. Les plaques chauffantes ont été connectées à une alimentation CC réglable (Circuit Specialists CSI 12001X) pour permettre un contrôle précis de la puissance thermique fournie à l'évaporateur. Le condenseur était refroidi par deux dissipateurs de chaleur assistés par ventilateur (Malico).

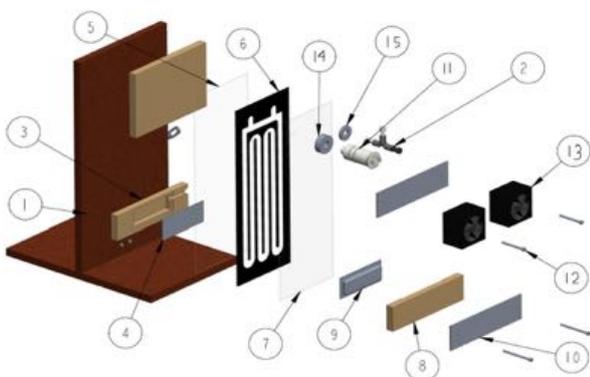


Figure 3 : Vue d'assemblage éclaté du montage expérimental : (1) cadre de support ; (2) vanne micrométrique ; (3,8) isolation thermique ; (4,9) plaques chauffantes ; (5,6,7) feuilles de polypropylène ; (10) plaque de fixation ; (11) transducteur de pression ; (13) ventilateurs de refroidissement

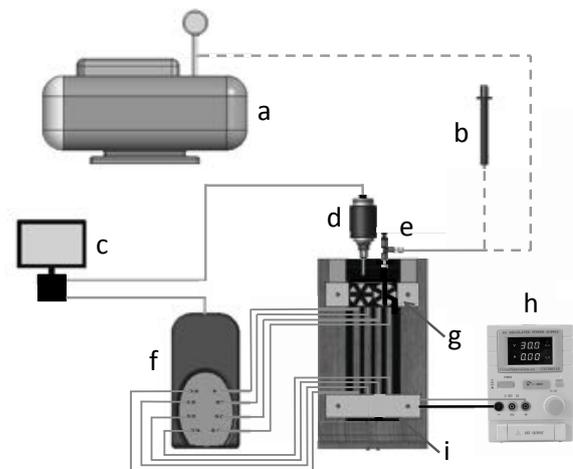


Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental : (a) pompe à vide, (b) seringue, (c) acquisition numérique et PC, (d) transducteur de pression, (e) vanne micrométrique, (f) unité thermocouples, (g) ventilateurs de refroidissement, (h) alimentation électrique, et (i) plaques chauffantes

Le canal du caloduc a été connecté à un transducteur de pression (Gems 3500, 0-160 kPa) et à une vanne micrométrique (Upchurch Scientific), utilisée à la fois pour créer le vide à l'intérieur du canal et pour introduire le fluide caloporteur. La sortie CC du transducteur de pression a été échantillonnée à 1 Hz par un système d'acquisition numérique (LabJack U6).

Huit thermocouples de surface (Omega Engineering) ont été placés à la surface du caloduc,

quatre dans la zone de l'évaporateur et quatre dans la zone du condenseur, et connectés à leur système d'acquisition numérique. La distribution de la température dans la région adiabatique a été visualisée par une caméra infrarouge FLIR One (FLIR Systems Inc.).

Pour introduire le fluide caloporteur (éthanol ou réfrigérant FC-72), on a d'abord créé le vide à une pression de $0,2 \pm 0,5$ kPa (abs) à l'intérieur du canal, à l'aide d'une pompe à vide à deux étages (Bacoeng) ; ensuite, le fluide contenu dans un réservoir externe à la pression atmosphérique a été introduit dans la quantité souhaitée (3 ml pour l'éthanol et 4 ml pour le FC-72, correspondant respectivement à 60% et 50% du volume du canal) en ouvrant doucement la vanne micrométrique de dosage.

Les expériences ont été menées avec le caloduc en position verticale, en appliquant à la section de l'évaporateur une rampe échelonnée de puissance thermique ascendante / descendante d'environ 2 W à 30 W et en mesurant les températures à la surface de la feuille de polypropylène à une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz. Pour chaque niveau de puissance, l'apport de chaleur était maintenu constant jusqu'à ce qu'un régime pseudo-stationnaire soit atteint. Les tests ont été interrompus plus tôt si un point quelconque de la feuille de polypropylène atteignait une température de 110°C , pour éviter de s'approcher du point de fusion du matériau. Des expériences préliminaires ont montré que la circulation en deux phases dans le caloduc avec FC-72 commençait avec un apport de chaleur d'environ 2,5 W à l'évaporateur, et d'environ 5 W dans le caloduc avec éthanol.

4. Résultats

La figure 5 montre le transitoire de chauffage d'une feuille de polypropylène composite avec un canal à trois courbes contenant de l'éthanol lorsqu'une puissance thermique constante d'environ 5 W est fournie à l'évaporateur.

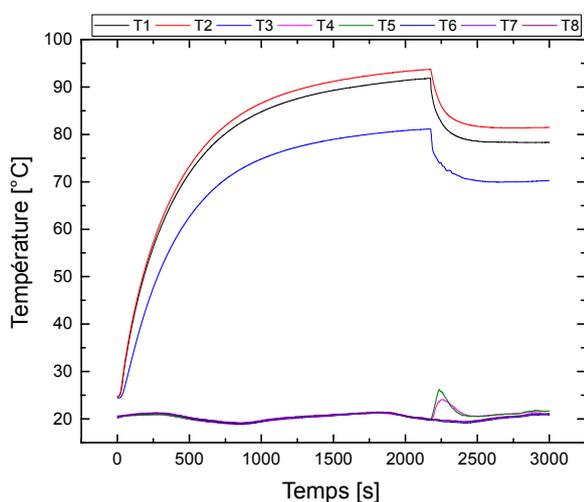


Figure 5 : Températures sur l'évaporateur et sur le condenseur d'un caloduc avec un canal serpentin à trois courbes et éthanol comme fluide caloporteur, pour une puissance thermique constante de 5,2 W

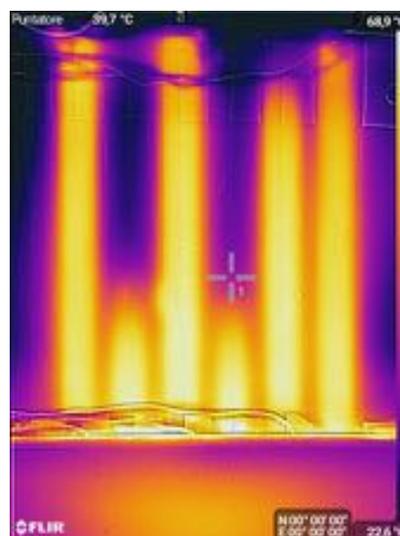


Figure 6 : Distribution de la température dans la région adiabatique d'un caloduc à cinq courbes avec FC-72 comme fluide caloporteur, pour une puissance thermique de 5,2 W

Initialement, la température de l'évaporateur augmente de façon exponentielle, comme dans un processus normal de transmission de chaleur par conduction ; le début de l'ébullition, qui entraîne la circulation du fluide dans le canal, correspond à une forte diminution de la température

dans l'évaporateur en raison de l'augmentation du coefficient d'échange thermique.

Un exemple de répartition de la température dans la région adiabatique lorsque la feuille de polymère composite est chauffée dans la zone de l'évaporateur, obtenu à l'aide de l'imagerie infrarouge, est présenté à la figure 6. Contrairement aux matériaux homogènes dans la direction du flux de chaleur, où l'on peut identifier un gradient de température avec des lignes isothermes orthogonales au flux de chaleur, la feuille de polypropylène composite présente une alternance de bandes chaudes et froides, correspondant respectivement au fluide en ébullition (ascendant) et au condensat (descendant).

Les températures mesurées à la surface de l'évaporateur et du condenseur pendant la rampe montante / descendante de la puissance thermique fournie à l'évaporateur sont illustrées à la figure 7, tandis que la figure 8 présente les valeurs correspondantes de la pression mesurée à l'intérieur du canal. En raison de la conductivité thermique relativement faible du polypropylène et de l'écoulement diphasique liquide-vapeur intrinsèquement instable, la feuille composite présente une inertie thermique importante et atteint un état pseudo-stationnaire environ 40 minutes après chaque changement du niveau de la puissance de chauffage.

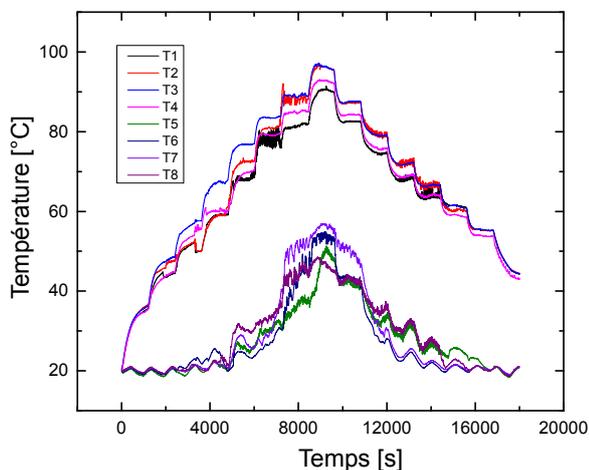


Figure 7 : Températures mesurées dans les zones de l'évaporateur (T1-T4) et du condenseur (T5-T8) du caloduc rempli de FC-72 en position verticale pendant la rampe d'alimentation montante / descendante

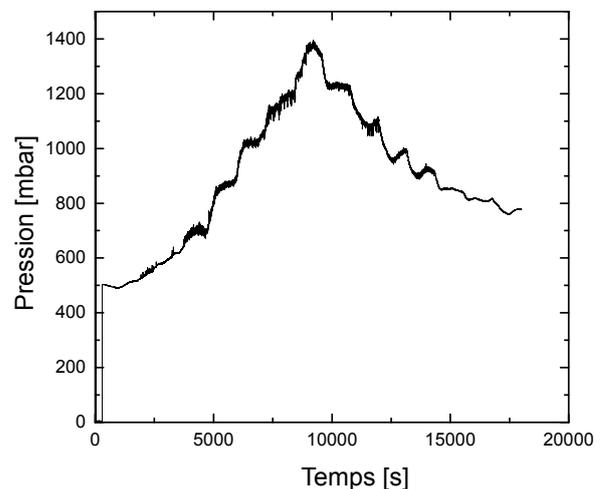


Figure 8 : Pression absolue mesurée dans le canal du caloduc en position verticale pendant la rampe d'alimentation montante / descendante

La conductance thermique équivalente de la feuille de polypropylène composite conçue dans la direction longitudinale a été calculée comme suit :

$$K_{eq} = \frac{\dot{Q}}{T_E - T_C} \quad (2)$$

Les performances thermiques globales de la feuille de polymère composite sont illustrées aux figures 9 et 10, qui montrent la conductance thermique équivalente du matériau entre l'extrémité chaude et l'extrémité froide, calculée selon l'équation 2, en fonction de la puissance thermique de chauffage à l'évaporateur, respectivement pour la feuille à trois tours remplie d'éthanol et la feuille à cinq tours remplie de FC-72. Pour quantifier l'amélioration du transfert de chaleur due à la circulation du fluide, ces valeurs sont comparées à la conductance thermique équivalente des feuilles composites sans fluide caloporteur.

La valeur la plus élevée de la conductance thermique équivalente est observée pour le caloduc à cinq courbes rempli de FC-72, à la puissance de chauffage maximale de 31,3 W, où la conductance thermique atteint une valeur maximale de 0,74 W/°C ; cela signifie que la conductance thermique équivalente du caloduc augmente de 585% par rapport à la feuille de polypropylène composite sans fluide de travail (0,126 W/°C). L'augmentation correspondante de la conductivité thermique observée dans la feuille à trois tours remplie d'éthanol est environ 250% plus élevée que celle de la feuille composite sans fluide de travail (0,067 W/°C), soit 0,16 W/°C au chauffage maximal. alimentation de 14,7 W. Les performances différentes sont évidemment dues au nombre de tours du canal et aux propriétés de fluide différentes : l'évaporation du FC-72 (capacité thermique : 1,1 kJ/kgK ; chaleur latente ; 88 kJ/kg) est plus facile que celle de l'éthanol (capacité thermique : 2,5 kJ/kgK ; chaleur latente ; 846 kJ/kg). Dans les deux cas, la performance maximale est limitée par la température de la feuille composite dans la région de l'évaporateur, qui est limitée par la température maximale de service continu du matériau utilisé.

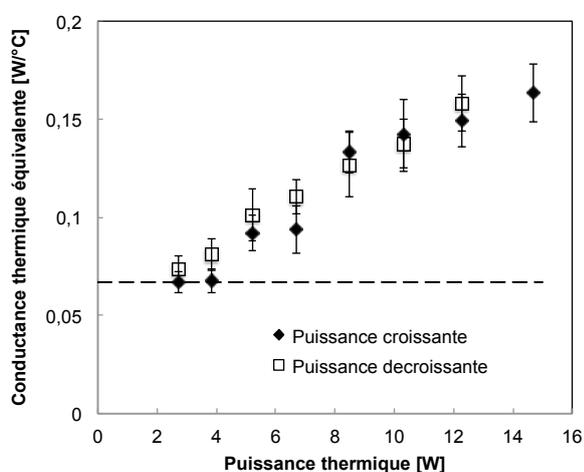


Figure 9 : Conductance thermique équivalente d'un caloduc avec canal à trois courbes rempli d'éthanol, en fonction de la puissance thermique fournie à l'évaporateur ; la ligne en pointillé indique la conductance thermique de la feuille de polypropylène composite sans fluide

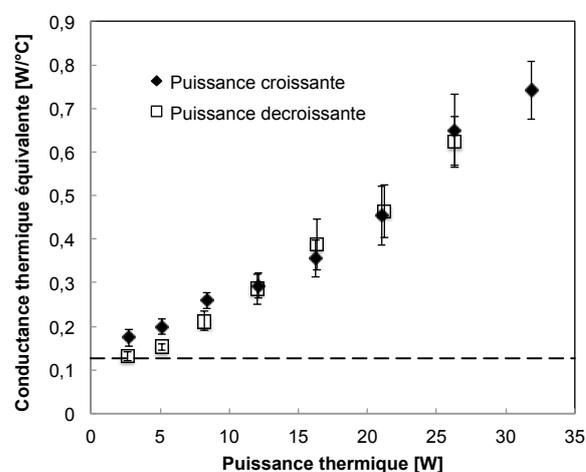


Figure 10 : Conductance thermique équivalente d'un caloduc avec canal à cinq courbes rempli de FC-72, en fonction de la puissance thermique fournie à l'évaporateur ; la ligne en pointillé indique la conductance thermique de la feuille de polypropylène composite sans fluide

5. Conclusion

Un nouveau concept de feuille polymère composite avec conductivité thermique améliorée a été conçu et fabriqué à l'aide de trois feuilles de polypropylène, liées entre elles par soudage au laser sélectif, la feuille centrale contenant un canal en serpentin rempli d'un fluide caloporteur. La réponse thermique a été évaluée pour deux géométries différentes du canal et deux fluides différents, pour différentes valeurs de l'apport de chaleur à l'évaporateur.

Les résultats préliminaires indiquent une augmentation de 250% de la conductance thermique équivalente pour la feuille avec canal à trois courbes remplie d'éthanol et une augmentation de 585% pour la feuille avec canal à cinq courbes remplie de FC-72, respectivement. La technologie proposée représente une voie prometteuse pour produire des matériaux polymères composites présentant des caractéristiques thermiques améliorées.

Références

- [1] S.K. Mazumdar, *Composites Manufacturing : Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press (2001).
- [2] D. Kumlutas, I.H. Tavman, A numerical and experimental study on thermal conductivity of particle filled polymer composites, *Journal of thermoplastic composite materials*, 19-4 (2006) 441-455.
- [3] I. Krupa, A. Boudenne, L. Ibos, Thermophysical properties of polyethylene filled with metal coated polyamide articles, *European Polymer Journal*, 43-6 (2007) 2443-2452.
- [4] I.H. Tavman, H. Akinci, Transverse thermal conductivity of fiber reinforced polymer composites, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27-2 (2000) 253-261.
- [5] S.N. Maiti, K. Ghosh, Thermal characteristics of silver powder-filled polypropylene composites, *Journal of applied polymer science*, 52-8 (1994) 1091-1103.
- [6] D.W. Chae, S.S. Hwang, S.M. Hong, S.P. Hong, B.G. Cho, B.C. Kim, Influence oh hight contents of silver nanoparticles on the physical properties of poly(vinylidene fluoride), *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 464 (2007) 233-241.
- [7] M. Biercuk, M. Llaguno, M. Radosavljevic, J. Hyun, A. Johnson, J. Fischer, Carbon nanotube composites for thermal management, *Appl. Phys. Lett.*, 80 (2000) 2767-2769.
- [8] R. Haggemueller, C. Guthy, J.R. Lukes, J.E. Fischer, K.I. Winey, Single wall carbon nanotube/polyethylene nanocomposites : thermal and electrical conductivity, *Macromolecules*, 40-7 (2007) 2417-2421.
- [9] K.I. Winey, T. Kashiwagi, M. Mu, Improving electrical conductivity and thermal properties of polymers by the addition of carbon nanotubes as fillers, *MRS Bull.*, 32 (2007) 348-353.
- [10] O. Der, M. Marengo and V. Bertola, A low cost, flexible pulsating heat pipe technology, *Proc. 3rd Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC)* (Fort Lauderdale, Florida, USA, 4–7 mar. 2018), Paper No. TFEC-2018-21455.
- [11] O. Der, M. Marengo and V. Bertola, Thermal performance of pulsating heat stripes (PHS) built with plastic materials, *Proc. Joint 19th International Heat Pipe Conference (IHPC) and the 13th International Heat Pipe Symposium (IHPS)* (Pisa, Italy, 10-14 juin 2018).
- [12] H. Ma, *Oscillating Heat Pipes*, Springer, New York (2015).
- [13] S.B. Paudel and G.J. Michna, Effect of inclination angle on pulsating heat pipe performance, *Proc. 12th ASME International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels* (Chicago, Illinois, USA, 3–7 aug. 2014), Paper No. ICNMM2014-22016.
- [14] I.A Choudhury and S. Shirley, Laser cutting of polymeric materials : An experimental investigation, *Optics–Laser Technology*, 42 (2010) 503-508.
- [15] N. Amanat, N.L. James and D.R. McKenzie, Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices, *Med. Eng. Phys.*, 32 (2010) 690-699.
- [16] A.B Humbe, P.A. Deshmukh, C.P. Jadhav and S.R. Wadgane, Review of laser plastic welding process, *International Journal of Research in Engineering - Technology*, 2 (2014) 191-206.

Remerciements

O. Der reconnaît avec gratitude une bourse doctorale YLSY de la République de Turquie, ministère de l'Education nationale.