

# Etudes expérimentale et numérique des propriétés thermiques de mousses métalliques remplies de matériau à changement de phase

Jaona RANDRIANALISOA \*, Jean-François HENRY \*, Didier CARON

URCA/GRESPI : Groupe de Recherche en Sciences Pour l'Ingénieur (EA 4694)

Campus du Moulin de la Housse – 51687 Reims cedex 2

\*(auteurs correspondants : [jaona.randrianalisoa@univ-reims.fr](mailto:jaona.randrianalisoa@univ-reims.fr), [jf.henry@univ-reims.fr](mailto:jf.henry@univ-reims.fr))

**Résumé** - Cette communication présente les résultats d'études numérique et expérimentale des caractéristiques thermiques des mousses aluminium et de mousses aluminium infiltrées de paraffine ou d'érythritol. Les caractéristiques expérimentales sont déterminées à partir des mesures dites « plan chaud » sur des échantillons représentatifs de mêmes compositions mais de différentes épaisseurs. Cette approche permet de contourner la méconnaissance des résistances thermiques de contact entre l'échantillon et les plans chauds. En ce qui concerne l'approche numérique, des matériaux représentatifs (mousses ou mousses avec MCP) sont d'abord numérisées en utilisant l'imagerie tomographique à rayon X et ensuite après un maillage approprié, une simulation par éléments finis est réalisée pour déterminer la conductivité effective de chaque échantillon numérisé. Un effort important a été fait pour alimenter le modèle numérique avec des données représentatives des matériaux constitutifs (en termes de microstructure et de propriétés thermiques de base). En effet ceci constitue une étape clé pour aboutir à un modèle prédictif. Les résultats issus des calculs et les données expérimentales sur les mousses aluminium sont cohérents avec les données de la littérature. D'ailleurs, le bon accord entre les résultats de calculs et les données de mesures confirme la capacité du modèle numérique à prédire les propriétés effectives à la fois des mousses seules et les mousses infiltrées de MCP.

## Nomenclature

$L_{fs}$  chaleur latente de fusion,  $J.kg^{-1}$   
 $\vec{n}$  normale à la surface, -  
 $R_c$  Résistance thermique de contact,  $m^2KW^{-1}$   
 $R_t$  Résistance thermique,  $m^2KW^{-1}$

### Exposants :

*exp* propriétés expérimentales  
*lower* température du fluxmètre inférieur  
*théo* propriétés théoriques  
*upper* température du fluxmètre supérieur

## 1. Introduction

Les mousses métalliques se présentent comme des matériaux clés pour l'intensification des transferts thermiques dans des systèmes tels que les échangeurs de chaleur ou les dispositifs de stockage d'énergie par chaleur latente [1]. La forte conductivité thermique des brins (de l'ordre de 150 à 240  $W.m^{-1}.K^{-1}$  pour les alliages à base d'aluminium) joue un rôle majeur dans l'augmentation des transferts de chaleur et l'homogénéisation des champs de température. De même, la très grande surface d'échange, entre le fluide et le solide, générée par la tortuosité de la mousse favorise ces transferts [2]. Enfin, la porosité des mousses permet d'affecter un grand volume au matériau à changement de phase (MCP) afin de favoriser la capacité de stockage d'énergie [3]. Une bonne connaissance des propriétés thermo-physiques des différents composants est maintenant nécessaire pour optimiser les composites mousses-MCP.

Ces dernières années, un grand nombre d'études théoriques et expérimentales ont été menées tant sur les mousses [4] que sur les composites mousses-MCP [5]. Les propriétés thermiques des éléments

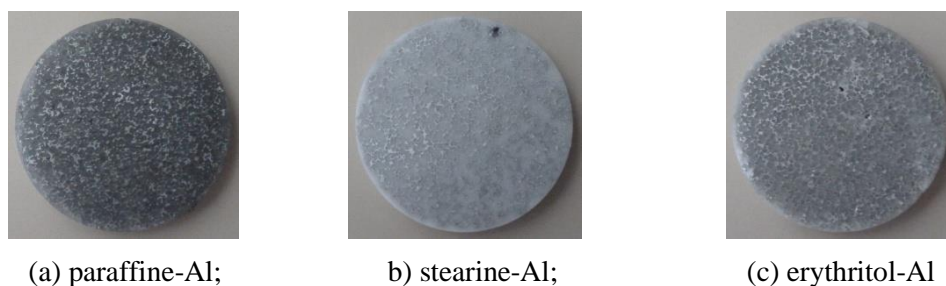
(mousse et MCP) sont mesurées par des techniques en régime stationnaire [5]. Différents modèles analytiques ont été développés à partir de morphologies simples de mousses ou de paramètres empiriques de transferts. [4]. Les progrès constants en terme de simulation numérique, comme la méthode des éléments finis (FEM), et les techniques d'imagerie par tomographie X ont permis de modéliser les échanges thermiques en trois dimensions (3D) sur les milieux de plus en plus complexes telles que les mousses [6]. La modélisation nécessite alors les valeurs des propriétés thermiques des différents constituants du milieu étudié (brin de la mousse et MCP) qui peuvent être affectées par la présence d'impuretés issues du processus de fabrication.

Ce travail est une contribution à la caractérisation et à la prédiction des propriétés thermiques des mousses métalliques et de leurs composites.

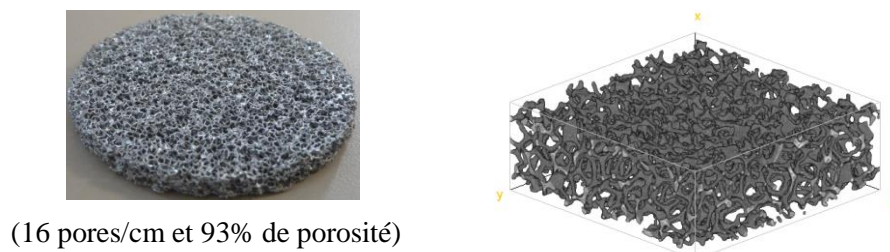
## 2. Partie expérimentale

### 2.1. Réalisation des échantillons

Les échantillons sont préparés par fusion du MCP (matériau à changement de phase) dans la mousse d'aluminium (Fig 1). La paraffine se présente sous forme de lit de particules tandis que les deux autres MCP (stéarine et érythritol) sont initialement sous forme de poudre. La mousse d'aluminium utilisée (nuance 6101 de pureté 98,5%) comporte 16 pores par cm, sa densité est de  $0,2 \text{ g.cm}^{-3}$  et sa porosité est 93%. Les échantillons se présentent sous forme de cylindres de 60 mm de diamètre (Fig 2a) sous deux épaisseurs : 6,3 mm et 20 mm dont les faces sont polies mécaniquement pour limiter l'influence des résistances thermiques de contact. Les images 3D sont obtenues par tomographie X avec une résolution de  $25 \mu\text{m}$  (Fig 2b) [3].



**Fig. 1** Photographies des mousses charges



**Fig. 2** (a) Photographies de la mousse d'aluminium                      (b) Image 3D correspondante

Les principales propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase sont regroupées dans le tableau 1. Les chaleurs spécifiques en phases solide et liquide, la chaleur latente de fusion et le point de fusion sont déterminés par calorimétrie différentielle

(calorimètre de marque SETARAM C80). Les conductivités thermiques ont été mesurées à l'aide du dispositif décrit dans le paragraphe 2.2.

| MCP        | $C_{ps}$<br>( $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ) | $C_{pl}$<br>( $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ) | $T_{fusion}$<br>( $^{\circ}C$ ) | $L_{fs}$<br>( $kJ/kg$ ) | $\rho_s$<br>( $kg/m^3$ ) | $k_s$<br>( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) |
|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Paraffine  | 2,29                                | 2,35                                | 60,0                            | 124,24                  | 900,3±7,8                | 0,31±0,03                      |
| Stéarine   | 1,93                                | 2,27                                | 62,4                            | 179,50                  | 924,6±14,1               | 0,29±0,02                      |
| Erythritol | 0,79                                | 2,84                                | 126,5                           | 337,48                  | 1426±20,6                | 0,93±0,01                      |

Tableau 1 : *Propriétés thermophysiques des trois matériaux à changement de phase utilisés*<sup>1</sup>

Les échantillons, qu'ils soient massifs en MCP ou composite MCP/mousse, sont préparés en respectant le même protocole. Dans un premier temps, des moules ouverts cylindriques, de 60 mm de diamètre, sont emplis de MCP sous forme de copeaux ou de poudre, puis portés à une température supérieure de 10°C à la température de fusion du MCP dans une étuve régulée. Les mousses sont insérées par gravité dans le bain de MCP puis l'ensemble est refroidi lentement jusqu'à la température ambiante. Enfin, les échantillons sont polis manuellement à l'aide d'une lame de cutter. Ce protocole identique doit permettre pour chaque couple d'échantillons (massif et composite) d'obtenir des propriétés thermiques.

## 2.2. Mesure des conductivités thermiques

Les conductivités thermiques des différents matériaux mis en œuvre, mousse d'aluminium, MCP et composite mousse-MCP sont déterminées à l'aide d'un dispositif de type plaques chaudes en régime permanent. Le principe consiste à imposer un écart de température entre les deux faces du matériau et à mesurer le flux de chaleur qui le traverse. Le dispositif expérimental se compose donc d'une « colonne » cylindrique de 60 mm de diamètre, constituée d'une plaque supérieure chaude, d'un fluxmètre supérieur, de l'échantillon, du fluxmètre inférieur et de la plaque chaude inférieure : l'écart entre les deux plaques chaudes est de 10°C. La configuration est identique à celles d'autres études [5] et [7]. Les plaques chaudes, supérieures et inférieures, sont constituées de cylindres de cuivre dans lesquelles circule de l'eau à une température contrôlée, ce qui permet d'imposer un écart constant de température de part et d'autre de l'échantillon. Les fluxmètres, de marque VATEL, sont des disques de 0,5 mm d'épaisseur munis de thermocouples de type T internes qui donnent la température à l'endroit même de la mesure du flux. Ces capteurs sont étalonnés en flux par la Société qui les commercialise et étalonnés en température au laboratoire avant d'être utilisés. Une masse de 2kg est placée sur le dessus afin de minimiser l'action des résistances de contact entre les fluxmètres et l'échantillon. L'ensemble est positionné dans une enceinte en polystyrène afin de limiter les mouvements d'air et les pertes thermiques. Les fluxmètres sont reliés à deux microvoltmètres (F 12960 MT Française d'Instrumentation) et les températures sont mesurées à l'aide d'une centrale d'acquisition (type Picolog) jusqu'au régime permanent. La résistance thermique  $R_t$  (en  $m^2KW^{-1}$ ), qui inclut les résistances thermiques de contact entre les fluxmètres et l'échantillon s'écrit :

$$R_t = R_c + \delta / k_{exp} = (T_{sup} - T_{inf}) / \phi \quad (1)$$

Où  $\delta$  est l'épaisseur de l'échantillon et  $k_{exp}$  sa conductivité thermique apparente.  $T_{sup}$  et  $T_{inf}$

<sup>1</sup> L'incertitude sur la densité est due à l'incertitude sur la masse et celle sur volume des échantillons. L'incertitude sur la conductivité thermique est discutée dans la section 2.2

désignent respectivement les températures des fluxmètres supérieur et inférieur et  $\phi$  est le flux qui traverse l'échantillon. Les mesures  $R_{t1}$  et  $R_{t2}$  sur deux (au moins) échantillons de composition identique et d'épaisseurs différentes  $\delta_1$  et  $\delta_2$  permettent de s'affranchir des résistances thermiques de contact supposées égales. La conductivité thermique s'obtient alors :

$$k_{\text{exp}} = (\delta_1 - \delta_2) / (R_{t,1} - R_{t,2}) \quad (2)$$

L'incertitude sur les mesures de conductivité est évaluée à 7%. Cette incertitude correspond à la moyenne quadratique des incertitudes relatives à l'épaisseur  $\delta$ , les températures  $T$  et le flux  $\phi$  [7].

### 3. Modèle numérique

La conductivité thermique effective des mousses et des composite mousse-MCP est obtenue *via* l'Eq. (3) en résolvant les transferts thermiques en géométrie unidimensionnelle dans des volumes élémentaires représentatifs (REVs) d'épaisseur  $\delta$  soumis à des températures imposées  $T_{\text{sup}}$  et  $T_{\text{inf}}$  et en condition adiabatique sur sa surface latérale. [8]

$$k_{\text{theo}} = \phi \delta / (T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}) \quad \text{avec } T_{\text{sup}} > T_{\text{inf}} \quad (3)$$

La pertinence de l'approche numérique dépend de la bonne connaissance de la conductivité thermique du matériau constitutif et de l'aptitude à calculer avec précision le flux de chaleur  $\phi$  qui traverse le REV.

Le régime thermique permanent dans la mousse saturée, que ce soit avec un fluide immobile ou un MCP, en négligeant les effets radiatifs et convectifs<sup>2</sup> peut être obtenu en couplant les équations de transfert conductif dans la matrice solide (aluminium) et le fluide de remplissage (air ou MCP) Eq. 4 et en appliquant les conditions limites Eq. 5 [8].

$$\nabla(k_s \nabla T_s) = 0 \quad \text{et} \quad \nabla(k_f \nabla T_f) = 0 \quad (4)$$

$$T_s = T_f \quad \text{et} \quad k_s \nabla T_s \cdot \vec{n} = k_f \nabla T_f \cdot \vec{n} \quad \text{aux interfaces} \quad (5)$$

Dans les expressions (4) et (5),  $k_s$  et  $k_f$  sont respectivement les conductivités thermiques de la phase solide (aluminium) et fluide (air ou MCP). Ces équations sont résolues sous Abaqus FEM (Dassault Systèmes Simulia Corp). Le REV obtenu par tomographie X [9] est maillé en tétraèdres. La taille des mailles a été étudiée pour obtenir des pertes inférieures à 0,1%. Les calculs ont été menés avec des températures  $T_{\text{sup}} = 301$  K et  $T_{\text{inf}} = 289$  K. Les détails de la méthode numérique de détermination de la conductivité thermique effective des mousses ont été reportés dans [8].

## 4. Résultats et discussion.

### 4.1. Propriétés thermiques du MCP massif ( $k_f$ ).

Les propriétés thermiques des matériaux en « bulk » sont mesurées à l'aide du dispositif expérimental présenté en section 2 et les résultats sont reportés dans le tableau n°1. Les

---

<sup>2</sup> La conductivité radiative d'une mousse aluminium à température ambiante obtenue avec l'approximation de Rosseland est de l'ordre de 0.02 W/m/K, deux ordres de grandeurs plus petits que la conductivité thermique totale. La convection n'est actuellement pas prise en compte dans ce modèle mais fait l'objet d'études en cours.

résultats sont globalement en accord avec ceux donnés dans la littérature. Les légers écarts peuvent être attribués aux différences de composition chimique entre les matériaux à changement de phase.

#### 4.2. Propriétés thermiques effectives de la mousse d'aluminium dans l'air

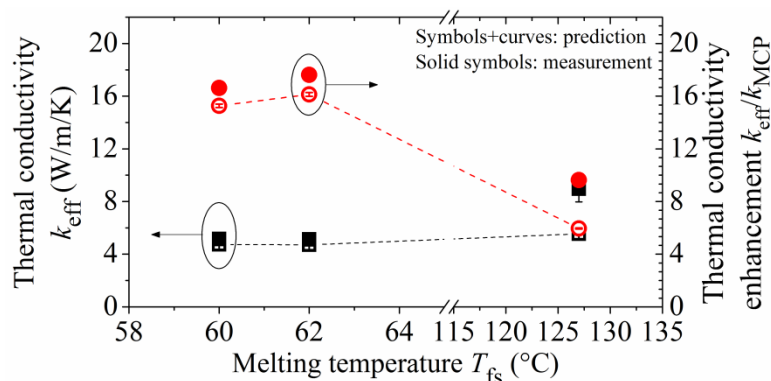
La conductivité thermique effective de la mousse d'aluminium à la température moyenne de 28°C est de  $4,34 \pm 0,54 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Les données de la littérature, pour des porosités de 92 à 94% et pour différents types de mousses sont comprises entre  $4,25$  et  $5,8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  [10]. Cela confirme la pertinence de la méthode expérimentale utilisée pour la mesure sur les mousses métalliques.

#### 4.3. Conductivité thermique des filaments d'aluminium constitutif de la mousse.

La conductivité thermique des filaments est obtenue en minimisant les écarts entre la mesure effective sur la mousse ( $k_{eff} = 4,34 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) et la valeur obtenue par l'approche numérique décrite dans le paragraphe 3. Après minimisation, la valeur déduite pour la conductivité thermique de l'aluminium est de  $212 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , valeur légèrement inférieure à celle donnée pour la nuance Al 6101 ( $218$  à  $237 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), mais bien supérieure à celle estimée ( $160$ - $170 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) par l'approche analytique de mousses d'une même nuance ERG [10]

#### 4.4. Comparaison entre conductivité thermiques mesurées et calculées sur des composite mousse-MCP

La Figure 3 présente les valeurs expérimentales et numériques des conductivités thermiques effectives obtenues sur des composites Al-MCP en fonction de la température, ainsi que les rapports entre les conductivités effectives et celles des MCP massifs. Pour seulement 7% en volume d'aluminium, les composites testés présentent un rapport des conductivités allant de 9 à 19. Le composite à base d'érythritol présente la plus grande conductivité effective ( $8,97 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), mais elle n'est que 9 fois plus élevée que celle de l'érythritol en masse ( $0,93 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ). Inversement, les mousses chargées en paraffine et stéarine obtiennent des facteurs de 16 à 19. Dans l'ensemble, on constate un bon agrément entre les valeurs mesurées et celles issues des calculs numériques. Cela valide l'approche théorique proposée pour prédire les conductivités thermiques effectives de mousses composites.



**Fig. 3** Conductivités thermiques effectives de mousses composites à base d'aluminium Al-paraffine, Al-stéarine, et Al-érythritol

## 5. Conclusion.

Deux approches, expérimentale et numérique, de détermination des conductivités thermiques effectives de mousses composites ont été développées. Elles ont été appliquées sur trois types de composite à base d'aluminium (paraffine, stéarine et érythritol). Les résultats de la modélisation numérique sont en bon accord avec les mesures. La principale précaution à prendre du point de vue expérimental concerne les résistances thermiques de contact entre les mousses et les fluxmètres : l'utilisation de deux (au moins) échantillons de même structure et d'épaisseurs différentes est nécessaire. Il est également nécessaire de soigner la préparation (état de surface) et la composition des échantillons. La réussite au niveau de la prédiction quantitative des conductivités thermiques impose la connaissance de la microstructure de la mousse grâce à des images tomographiques obtenues par rayon X et la connaissance des propriétés thermiques des constituants des composites mousse-MCP. Les études en cours comprennent l'évaluation de l'effet convectif et des mesures à différentes températures.

## Références

- [1] Wang, Q., Han, X.H., Sommers, A., Park, Y., Joen, C. T, Jacobi, A, "A review on application of carbonaceous materials and carbon matrix composites for heat exchangers and heat sinks," *Int. J. Refrig.*, 35, pp.7-26, (2012).
- [2] Boomsma, K., Poulikakos, D., Zwick, F., "Metal foams as compact high performance heat exchangers," *Mech. Mat.*, 35, pp. 1161–76, (2003)
- [3] Zhao, C-Y., Lu, W., and Tian, Y. "Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs)." *Solar Energy*, 84 (8). pp. 1402-1412, (2010).
- [4] Randrianalisoa, J., Baillis, D., "Thermal conductive and radiative properties of solid foams: Traditional and recent advanced modelling approaches," *Compt. Rend. Phys.*, 15, pp. 649-785, (2014).
- [5] Xiao, X., Zhang, P., Li, M., "Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage," *Int. J Therm. Sci.*, 81, pp. 94-105 (2014)
- [6] Coquard, R., Baillis, D., "Numerical investigation of conductive heat transfer in high-porosity foams," *Acta Mat.*, 57, pp. 5466–5479, (2009).
- [7] Sadeghi, E., Hsieh, S., and Bahrami, M., "Thermal conductivity and contact resistance of metal foams," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 44, No. 125406, (2011).
- [8] Randrianalisoa, J; Baillis, D; Martin, CL; and Dendievel, R, "Microstructure effects on thermal conductivity of open-cell foams generated from the Laguerre–Voronoi tessellation method," *Int. J. Therm. Sci.*, 98, pp. 277-286 (2015).
- [9] Buffiere, J. Y., Maire, E., Adrien, J., Masse, J. P., and Boller, E. "In situ experiments with X ray tomography: an attractive tool for experimental mechanics." *Exp. Mech.*, 50, pp. 289-305 (2010).
- [10] Kumar, P., Topin, F., "Simultaneous determination of intrinsic solid phase conductivity and effective thermal conductivity of Kelvin like foams," *Appl. Thermal Eng.*, 71, pp. 536 – 547 (2014).

## Remerciements

Les calculs numériques ont été effectués sur le supercalculateur ROMEO mis à disposition par l'Université de Reims Champagne – Ardenne. Ce travail a également été soutenu conjointement par la région « Champagne – Ardenne » et l'Union Européenne grâce aux fonds européens pour le développement régional du projet Effi-Science.