



HAL
open science

Matériaux composites alumine/aluminium à gradient de fonction : modélisation numérique pour le calcul de la conductivité thermique effective

Nabil Ferguen, Emmanuel Bellenger, Mohamed Guessasma, Claudia Cogné,
Christine Pelegris, Christian Courtois, Olivier Rigo

► To cite this version:

Nabil Ferguen, Emmanuel Bellenger, Mohamed Guessasma, Claudia Cogné, Christine Pelegris, et al.. Matériaux composites alumine/aluminium à gradient de fonction : modélisation numérique pour le calcul de la conductivité thermique effective. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422866

HAL Id: hal-03422866

<https://hal.science/hal-03422866>

Submitted on 9 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Matériaux composites alumine/aluminium à gradient de fonction : modélisation numérique pour le calcul de la conductivité thermique effective

Nabil Ferguen^a, Emmanuel Bellenger^a, Mohamed Guessasma^a, Claudia Cogné^a,
Christine Pelegris^a, Christian Courtois^b, Olivier Rigo^c

a. LTI, IUT de l'Aisne, 48 rue d'Ostende, 02100 SAINT QUENTIN

b. LMPCA, Université de Lille Nord de France, ZI du Champ de l'Abbesse, 59600 MAUBEUGE

c. SIRRIS, Liège Science Park Rue du Bois Saint-Jean 12, BE 4102 SERAING, Belgique

Résumé :

Un procédé d'élaboration original a été développé permettant la réalisation d'un matériau à gradient de fonction aux propriétés thermiques intéressantes. Ces matériaux sont constitués d'une matrice céramique renforcée par des particules d'aluminium interconnectées. Ces matériaux sont capables de conduire à un management thermique permettant ainsi de maintenir les éléments fonctionnels d'un système à leur température nominale de fonctionnement. Par ailleurs, un modèle numérique a été développé afin d'optimiser thermiquement l'architecture des phases en présence. Ce modèle utilise conjointement la Méthode des Eléments Discrets (MED) et la Méthode des Eléments Finis (MEF).

Abstract :

An original process was developed for the production of functionally graded materials. These materials with interesting thermal properties are based on a ceramic matrix reinforced with interconnected aluminum particles. These materials are able to manage the heat flux to maintain the functional elements to their nominal operating temperature. An improvement of thermal properties of these materials is achieved by optimizing the architecture of the phases in particular the interconnected aluminum. Otherwise, a model is developed to optimize the architecture of phases and to evaluate the effective thermal conductivity of the material. This model, is based on both Discrete Element Method (DEM) and Finite Element Method (FEM).

Mots clefs : FGMs ; conductivité thermique ; modélisation numérique

1 Introduction

Le développement de nouveaux matériaux performants (grande dureté, résistance à la corrosion, conductivité thermique optimale, etc.) est un enjeu industriel important de nos jours. Ces performances dépendent en grande partie des propriétés du matériau, mais aussi de l'optimisation de l'architecture des phases en présence [1]. Une variété de méthodes a été proposée dans la littérature pour la production de nouveaux matériaux. Parmi celles qui suscitent un intérêt particulier, il y a la réalisation des matériaux à gradient de fonction (FGMs, Functionally Graded Materials en anglais). En effet, les FGMs sont une classe de composites particuliers caractérisée par une composition et une structure qui varient d'une manière graduelle dans le matériau, conduisant ainsi à une variation progressive des propriétés [2]. Cette gradation des propriétés confère à ces matériaux une plus grande efficacité par rapport aux matériaux composites conventionnels.

Ce travail a pour objectif de développer un matériau à gradient de fonction alumine/aluminium capable de réaliser un meilleur management thermique afin de maintenir les éléments fonctionnels à leur température nominale de fonctionnement. Les applications visées concernent le domaine du transport terrestre et particulièrement l'industrie automobile pour l'évacuation de la chaleur dans les blocs moteurs et le refroidissement des pièces électroniques.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux différentes étapes d'élaboration du matériau à gradient de fonction. Nous présentons ensuite la partie modélisation numérique du procédé d'élaboration. Dans cette démarche de modélisation, la MED et la MEF ont été utilisées conjointement. Dans un premier temps, le modèle ED nous permet de réaliser l'architecture du matériau à partir d'un empilement granulaire monodisperse. Ensuite, la caractérisation thermique du matériau par la MEF permet d'évaluer sa conductivité thermique effective. Dans cette phase d'optimisation, différents paramètres ont été étudiés : l'influence de la surface de contact entre les billes et le rayon des billes sur la conductivité thermique effective du matériau.

2 Étude expérimentale

Il s'agit de concevoir un matériau composite alumine/aluminium obtenu par infiltration d'une phase métallique continue dans un réseau de pores orientés dans une structure céramique isolante.

2.1 Élaboration de la mousse d'alumine

Une structure solide en billes de polyméthylméthacrylate (PMMA) à granulométrie contrôlée est réalisée grâce à un solvant qui permet une faible dissolution superficielle du polymère et assure des liens aux points de contact des billes. La fusion des billes entre-elles dépend de nombreux paramètres tels que la nature chimique du solvant, de la température et de la durée de la dissolution. Les billes sont calibrées par tamis de $100\ \mu\text{m}$, sur une plage de $200\ \mu\text{m}$ à $900\ \mu\text{m}$. Après séchage, une barbotine d'alumine est coulée entre les interstices des billes. Les billes de PMMA sont ensuite éliminées par traitement thermique à faible température. Un chauffage à $200\ ^\circ\text{C}$ pendant 30 heures permet de brûler une grande quantité de polymère. Enfin, un cycle de frittage favorise la consolidation de la structure.

2.2 Imprégnation de la phase d'aluminium

Après l'étape d'élaboration de la mousse céramique, celle-ci est ensuite imprégnée d'aluminium. Les conditions opératoires du procédé d'imprégnation ont été optimisées à la fois en pression et en température. Il est à noter que l'imprégnation est difficile pour de faibles granulométries ($200 - 300\ \mu\text{m}$). La Fig. 1 résume l'ensemble du procédé d'élaboration des matériaux à gradient.

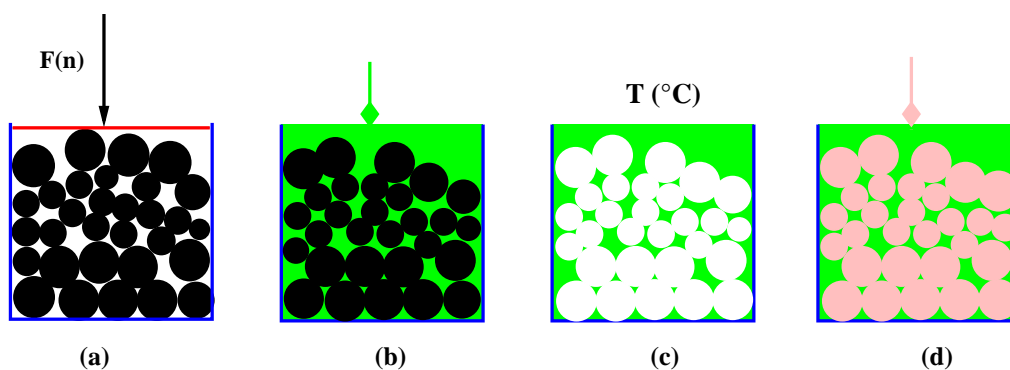


FIGURE 1 – Schéma illustratif du procédé d'élaboration d'un matériau à gradient alumine/aluminium ; (a) empilement et compression de billes en PMMA ; (b) barbotine d'alumine coulée dans la préforme ; (c) obtention de la mousse d'alumine par élimination des billes de PMMA ; (d) imprégnation de la mousse par l'aluminium.

2.3 Contrôle du diamètre d'interconnexion des billes de PMMA

Le diamètre d'interconnexion des billes de PMMA est un facteur déterminant dans le transfert thermique au sein du matériau à gradient. Un dispositif expérimental a été conçu pour quantifier ce diamètre à l'aide de la mesure du retrait de la phase organique [3]. Un piston est mis en contact avec la surface du lit de billes disposées dans un moule métallique. Un capteur électronique de déplacement est positionné en haut du piston avec une résolution de $1\mu\text{m}$ afin d'enregistrer le retrait de la phase polymère selon l'axe vertical. En parallèle, le diamètre d'interconnexion des billes est mesuré par microscopie électronique à balayage (Hitachi S-3500N). Ainsi, il a été possible de corrélérer le retrait des billes aux diamètres moyens d'interconnexion (Fig. 2).

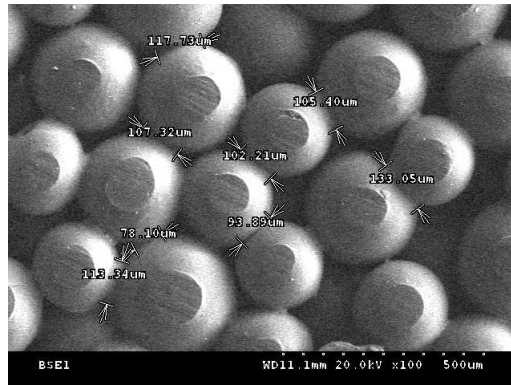


FIGURE 2 – Détermination par MEB du diamètre d'interconnexion des billes de 200 à 300 μm .

3 Modélisation numérique

L'objectif de cette partie est de modéliser le comportement thermique des matériaux à gradient alumine/aluminium. D'un point de vue bibliographique, il existe de nombreux modèles analytiques de conductivité thermique qui tiennent compte des propriétés intrinsèques de chaque phase ainsi que de leur répartition géométrique. On peut citer des travaux dans le domaine des milieux granulaires [4], des matériaux poreux [5] ou des céramiques [6] sur lesquels peuvent s'appuyer cette étude.

L'une des difficultés récurrentes concerne la représentation en 3 dimensions de la géométrie des structures fractales de la phase composite. En effet, d'un point de vue numérique, il est nécessaire de représenter ce matériau par des géométries périodiques basées sur des éléments générateurs. L'originalité de notre étude par rapport à la bibliographie réside au niveau de l'anisotropie du matériau généré, qui est à la fois isolant et conducteur de chaleur. Des solutions numériques par la MED sont envisagées dans le domaine mécanique [7, 8] mais très peu d'articles s'intéressent à la modélisation thermique de ce type de milieux. Proche de notre étude, on peut citer les récents travaux de Yun et Evans [9] sur la modélisation de la conductivité thermique dans un empilement aléatoire de billes. La solution retenue dans ce projet consiste à développer un modèle en plusieurs étapes en tenant compte des propriétés thermiques et de la répartition de chacune des phases.

3.1 Génération d'un empilement aléatoire

La première étape du modèle consiste à représenter la phase aluminium initialement définie par les billes porogènes de PMMA. Afin de représenter le caractère aléatoire de la position des billes, le modèle s'est appuyé sur un code de calcul basé sur la MED. Il s'agit d'une méthode utilisée pour décrire un grand nombre de particules en mouvement. La méthode utilisée est basée sur la méthode Dynamique Moléculaire. Elle consiste à intégrer le mouvement de chacune des particules tout en tenant compte de leurs interactions. Après avoir généré les particules dans un moule, puis les avoir laissé sédimenter par gravité, il est possible de tasser la structure de façon plus ou moins importante à l'aide d'une paroi chargée en vue d'interconnecter les particules entre-elles. Le post-traitement des données permet de récupérer la position du centre de chaque bille.

3.2 Génération du matériau composite

Après l'étape de sédimentation, et à l'aide du logiciel SolidWorks de conception mécanique en 3D, on assemble les billes d'aluminium (Fig. 3 a) à une empreinte cubique d'alumine (Fig. 3 b) pour obtenir au final un matériau composite (Fig. 3 c). Le maillage et l'analyse thermique du matériau sont réalisés par la MEF, représentés sur la Fig. 4. Les propriétés thermiques de chacune des phases sont résumées dans le Tab. 1.

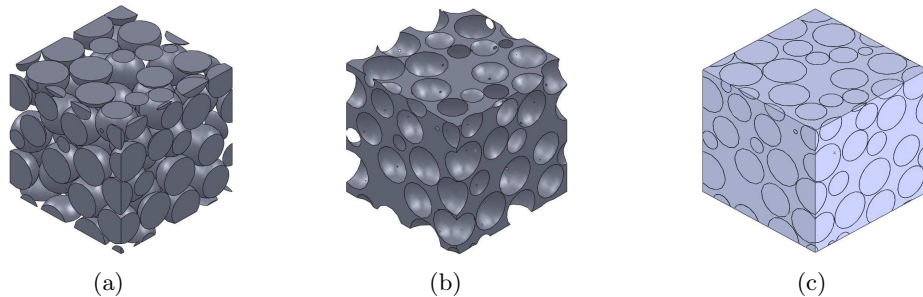


FIGURE 3 – Modèle d'assemblage du composite. (a) Phase d'aluminium, (b) Phase d'alumine et (c) Assemblage des phases (a) et (b).

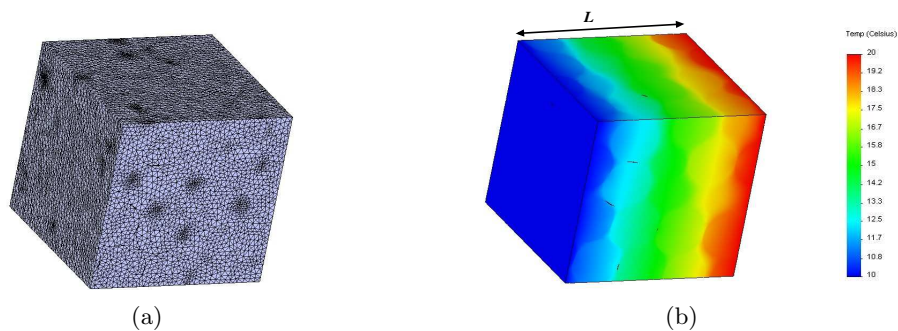


FIGURE 4 – Modélisation du matériau composite par la MEF. (a) Maillage et (b) Calcul du gradient de température. Le cube d'arête $L = 5$ mm.

TABLE 1 – Propriétés thermophysiques du composite

	Chaleur spécifique ($J/kg.K$)	Conductivité thermique ($W/m.K$)	Masse volumique (kg/m^3)
Alumine	850	30	3960
Aluminium	875	193	2780

3.3 Détermination de la conductivité thermique

Pour calculer la conductivité thermique effective du matériau, la méthode retenue consiste à imposer une différence de température sur les deux faces opposées de l'échantillon suivant la direction de compression, l'ensemble des autres faces étant supposé adiabatique. La moyenne du flux de chaleur lorsque l'équilibre est atteint, permet alors de calculer la conductivité selon la loi de Fourier (Eq. 1) :

$$k_{eff} = Q \frac{L}{A (T_{sup} - T_{inf})} \quad (1)$$

où k_{eff} représente la conductivité thermique effective ($W/m.K$), Q est le flux de chaleur moyen (W), L est la longueur de l'échantillon (m), A est sa section (m^2), et $(T_{sup} - T_{inf})$ est l'écart de température (K) entre les deux faces opposées.

4 Résultats numériques et discussions

4.1 Optimisation de la taille de l'échantillon

La détermination d'une taille d'échantillon optimale qu'on peut qualifier de Volume Élémentaire Représentatif (VER) est une étape importante dans la caractérisation des propriétés thermiques du matériau composite, notamment la conductivité thermique effective (k_{eff}). Le VER a été défini de manière à ce que pour une taille minimale la conductivité thermique du matériau ne varie plus de manière significative. Il est représenté par une forme de cube contenant des particules monodisperse d'aluminium interconnectées et réparties aléatoirement (Fig. 5 a).

On a étudié la variation de la conductivité thermique pour 3 rayons R des particules 500, 700 et 1000 μm , dont les diamètres moyens d'interconnexion respectifs sont 62, 98 et 226 μm . Les simulations ont été réalisées sur des cellules cubiques d'arêtes L . L'évolution de k_{eff} en fonction du rapport L/R est montré sur la Fig. 5 b. On remarque que pour $1 \leq L/R < 10$, les valeurs de la conductivité thermique sont relativement importantes et décroissent au fur et mesure que la longueur L de la cellule augmente. À partir d'un rapport $L/R \geq 12$, les valeurs de k_{eff} ne varient plus de manière significative, et on peut donc conclure que la conductivité thermique du matériau peut être considérée comme représentative pour les rayons des particules étudiés.

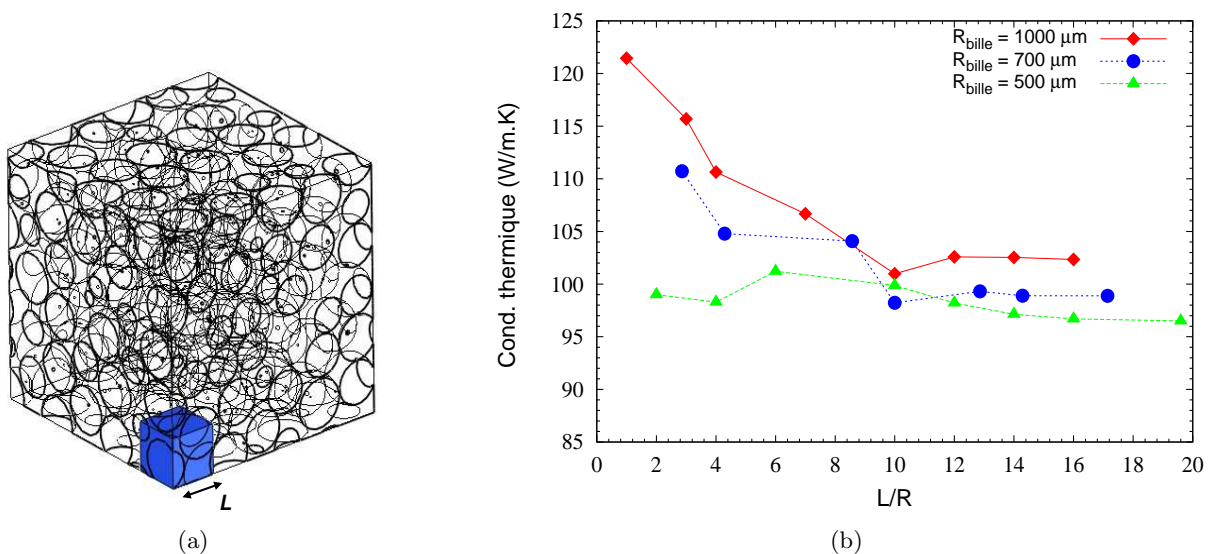


FIGURE 5 – (a) Cellule de forme cubique pour le calcul du VER (couleur bleu) - (b) Evolution de la conductivité thermique effective des cellules en fonction du rayon des particules : $R = 500, 700$ et $1000 \mu m$.

4.2 Influence de la taille des billes

La Fig. 6 montre l'évolution de la conductivité thermique effective en fonction du rayon moyen d'interconnexion pour différentes tailles de billes. On remarque une augmentation de cette conductivité avec l'augmentation de la taille des interconnexions. Les résultats semblent montrer une stabilisation de la conductivité thermique effective lorsque la taille des interconnexions augmente. On peut mettre aussi en évidence une conductivité du matériau plus importante avec des tailles de billes plus petites pour des tailles d'interconnexions équivalentes.

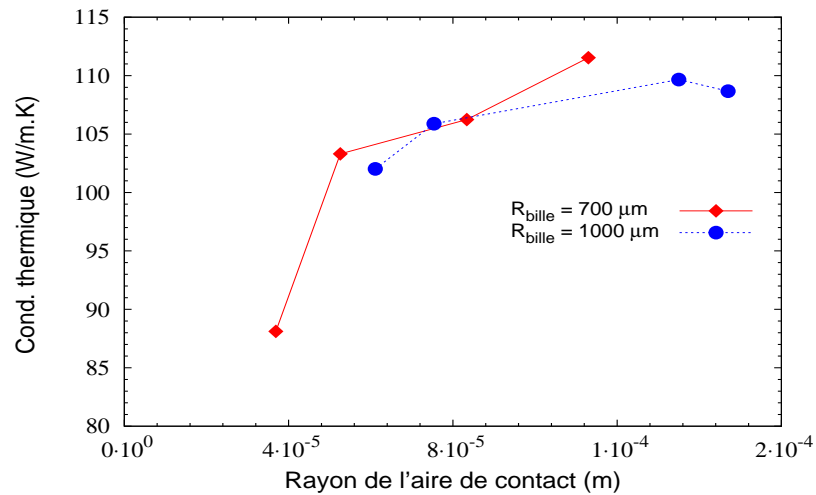


FIGURE 6 – Evolution de la conductivité thermique effective en fonction des interconnexions des particules.

5 Conclusions

Un procédé original d'élaboration de matériaux à gradient de fonction a été développé. La maîtrise totale du procédé permet de gérer l'architecture des phases en présence, l'interconnexion des particules et la nature des interfaces. En parallèle, un modèle numérique a été développé afin d'optimiser l'architecture du matériau et ses propriétés thermiques. Cette étude préliminaire a permis de définir une taille optimale des échantillons qui peut être qualifiée de VER pour le calcul de la conductivité thermique. Par la suite, une analyse paramétrique du modèle a mis en évidence l'influence de la taille d'interconnexions des billes sur la conductivité thermique. À court terme, le modèle sera validé à partir d'essais expérimentaux sur des matériaux prototypes. De plus, une analyse plus approfondie permettra de quantifier d'un point de vue numérique et expérimental l'anisotropie thermique du matériau.

Références

- [1] Mishnaevsky, L. and Schmauder, S. 2001 Continuum mesomechanical finite element modeling in materials development : A state-of-the-art review *Applied Mechanics Reviews*, 54, pp. 49-69.
- [2] Shiota, I., and Miyamoto, Y 1996 Functionally Grade Materials *Proceedings of the 4th international symposium on Functionally Graded Materials, October 21-24, 1996*.
- [3] Descamps, M., Richart, O., Hardouin, P. 2007 Synthesis of macroporous β tri-calcium phosphate with controlled porous architectural. *Ceramics International*, 34, pp. 1131-37.
- [4] Vargas-Escobar, W., McCarthy, J.J. 2002 Conductivity of granular media with stagnant interstitial fluids via thermal particle dynamics simulation. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 45, pp. 4847-4857.
- [5] Grandjean, S., Absi, J., Smith, D. 2006 Numerical calculations of the thermal conductivity of porous ceramics based on micrographs. *J. of the European Ceramic Society*, 26, pp. 2669-2676.
- [6] Michot, A., Smith, D. S., Degot, S., Gault, C. 2008 Thermal conductivity and specific heat of kaolinite : Evolution with thermal treatment. *Journal of the European Ceramic Society*, 28, pp. 2639-2644.
- [7] Raether, F., Iuga, M. 2006 Effect of particle shape and arrangement on thermoelastic properties of porous ceramics. *J. of the European Ceramic Society*, 26, pp. 2653-2667.
- [8] Farooqi, J.K., Sheikh, M.A. 2006 Finite element modelling of thermal transport in ceramic matrix composites. *Computational Materials Science*, 26, pp. 361-373.
- [9] Yun, T.S., Evans, T.M. 2010 Three-dimensional random network model for thermal conductivity in particulate materials. *Computers and Geotechnics*, 37, pp. 991-998.