

# Étude numérique et expérimentale de la conductivité thermique effective des composites chargés avec des tubes creux conducteurs

Moussa AADMI\*<sup>1</sup>, Mustapha KARKRI<sup>2</sup>, Mimoun EL HAMMOUTI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Etudes Doctorales Sciences et Techniques, Faculté Pluridisciplinaire de Nador Equipe de la Science de l'environnement. 300 Selouane, 62700, Nador Maroc.

<sup>2</sup>Université Paris Est, Centre d'Etude et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes (CERTES) - EA 3481, 61 avenue du Général de Gaulle- 94010 Créteil, cedex.

\* (auteur correspondant : moussa\_aadmi@hotmail.com)

**Résumé** - Dans ce travail, une méthode des éléments finis en trois dimensions a été développée pour la prédiction de la conductivité thermique effective d'un composite polymère chargé avec des tubes creux conducteurs. Un volume élémentaire représentatif (3D-VER) a été utilisé pour représenter le matériau composite. La méthode de la plaque chaude gardée a été utilisée pour mesurer la conductivité effective des échantillons. Une comparaison entre les conductivités thermiques calculées numériquement et analytiques et celles mesurées pour différents échantillons est effectuée.

## Nomenclature

$b$  hauteur de la cellule élémentaire,  $m$

$r$  rayon du tube,  $m$

$q$  densité de flux,  $W.m^{-2}$

*Paramètres adimensionnels*

$Q$  flux thermique réduit

$B$  distance réduite entre 2 tubes

$C$  résistance de contact réduite

$D$  conductivité matrice/conductivité charge

$E$  conductivité effective/conductivité matrice

$F$  épaisseur relative de la paroi des tubes

$S, T$  températures [-]

$x, y, z$  coordonnées,  $m$

*Symboles grecs*

$\sigma, \tau$  températures,  $K$

$\phi$  fraction volumique de charge, (%)

$\alpha$  diffusivité thermique,  $m^2.s^{-1}$

$\lambda$  conductivité thermique,  $W.m^{-1}K^{-1}$

*Indices et exposants*

$f$  charge

$eff$  effective (composite)

$m$  matrice, mesure

$c$  calcul, résistance de contact

$th$  théorique

## 1. Introduction

Les matériaux polymères sont souvent utilisés comme isolants en raison de leur faible conductivité thermique. L'ajout de charges conductrices de chaleur peut augmenter significativement la conductivité thermique effective des composites. L'utilisation de polymères chargés permet de réaliser des géométries complexes tout en assurant un coût de production inférieur et un allègement par rapport aux matériaux métalliques. Cependant, la fraction massique de charges nécessaire pour assurer une augmentation significative de la conductivité est élevée. A titre d'exemple, Karkri *et al.* [1] ont obtenu une conductivité thermique d'une résine augmentée de 39.3% pour une fraction massique de 49.47% de bille de laiton. Une autre voie permettant d'augmenter le transfert de chaleur dans les polymères est d'utiliser des charges conductrices creuses. Les matériaux composites à base de charges conductrices creuses dispersées dans une matrice polymère sont utiles dans de nombreuses applications du fait que ce type de charge permet également d'obtenir un renforcement

mécanique important. Cette communication est une suite de la recherche publiée dans [1, 3]. L'objectif du présent travail est, dans un premier temps, d'étudier à l'aide d'une modélisation numérique 3D, l'effet de la réduction de l'épaisseur  $F$  des parois des tubes métalliques creux sur la conductivité effective  $E$  des composites. Cette étude est réalisée en fonction d'autres facteurs liés à la microstructure et aux caractéristiques thermiques du composite. Afin de simplifier les calculs sans limiter la portée des travaux, nous avons considéré un composite à deux phases avec une matrice continue remplie uniformément d'inclusions cylindriques de même diamètre. Pour obtenir une conductivité  $E$  relativement importante, on a choisi des inclusions à conductivité au moins 10 fois supérieure à celle de la matrice ainsi qu'une couche de polymère entre deux tubes successifs de faible épaisseur. Dans un second temps, les calculs effectués sont comparés à de nouveaux essais expérimentaux réalisés avec des tubes creux en laiton, en cuivre, et en aluminium incorporés dans une matrice thermodurcissable. Une comparaison des résultats de simulation à des données expérimentales et des modèles analytiques est également effectuée.

## 2. Méthodes de prédiction de conductivité thermique effective

### 2.1. Modèle mathématique

Dans la présente étude, la cellule élémentaire est parallélépipédique et contient un tube conducteur creux de rayons externe  $r_{ex}$  et interne  $r_{in}$  centré dans une cavité parallélépipédique de dimensions  $8a^2b$  (Figure 1). Soient  $\sigma$  et  $\tau$ , les températures respectivement dans l'inclusion et la matrice. Les faces inférieure ( $z=a$ ) et supérieure  $z=-a$  sont isothermes avec des températures respectivement égales à  $\tau_2$  et  $\tau_1$ , les quatre faces latérales étant adiabatiques.

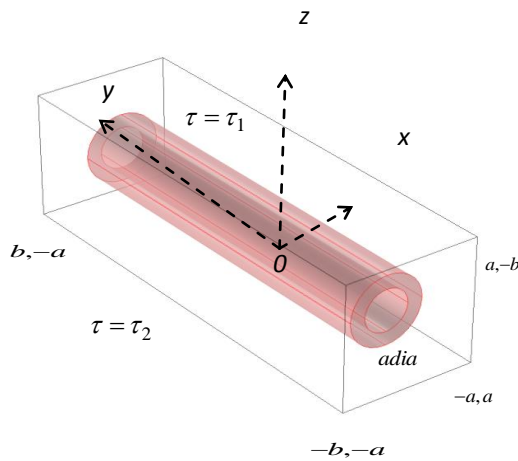


Figure 1 : Cellule élémentaire

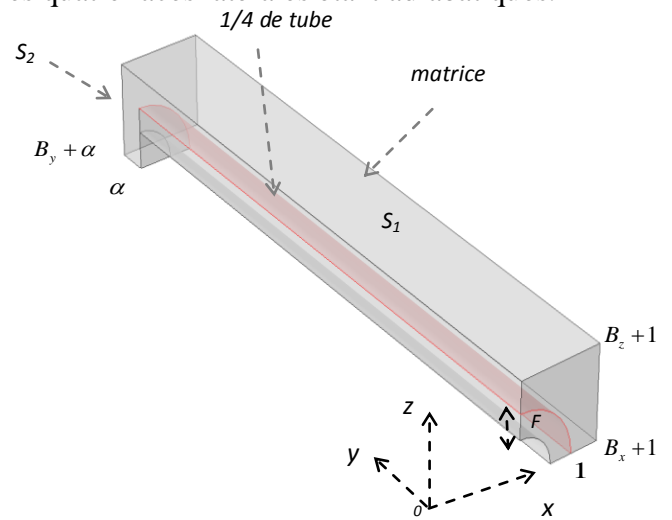


Figure 2 : Cellule élémentaire de calcul

Le choix de conditions aux limites de type température imposée provient des applications de ces composites conducteurs comme paroi séparant deux milieux fluides à températures différentes et plus ou moins constantes. Une condition adiabatique a été choisie au niveau de la paroi interne du tube creux. En tenant compte des symétries, seulement 1/4 de la cellule élémentaire nécessite d'être considérée pour les calculs (Figure 2). Soient  $\lambda_f$  et  $\lambda_m$  les conductivités respectives de la charge et de la matrice et  $\lambda_{eff}$  la conductivité effective transversale (direction-z). Les grandeurs adimensionnelles ont été définies comme suit:

$X = x/r_{ex}$ ,  $Y = y/r_{ex}$  et  $Z = z/r_{ex}$ : les dimensions.

$\xi = L/d_{ex}$ : le rapport réduit entre longueur et diamètre du tube.

$S = (2\sigma - \tau_1 - \tau_2)/(\tau_1 - \tau_2)$ ,  $T = (2\tau - \tau_1 - \tau_2)/(\tau_1 - \tau_2)$ : les températures de la charge et de la matrice.

$B_{x,z} = (2a - 2r_{ex}) / 2r_{ex}$  et  $B_y = (2b - L) / 2r_{ex}$  : la distance réduite entre deux tubes consécutifs.

$D = \lambda_m / \lambda_f$  : le rapport de conductivité entre les deux phases.

$C = r_c \lambda_m / r_{ex}$  : la résistance thermique de contact réduite située à l'interface du tube.

$E_{\perp} = \lambda_{eff\perp} / \lambda_m$ ,  $E_{\parallel} = \lambda_{eff\parallel} / \lambda_m$  : la conductivité thermique effective perpendiculaire et parallèle.

$F = 1 - r_{in} / r_{ex}$  : l'épaisseur relative de la paroi du tube conducteur creux.

Finalement, l'utilisation de grandeurs réduites pour les données géométriques et physiques permet d'exprimer E en fonction des seuls paramètres  $B$   $C$   $D$   $F$  :  $E = E(B_{x,y,z}, C, D, F)$ .

- La conductivité thermique effective du modèle perpendiculaire (Figure 1):

Le flux thermique traversant la cellule élémentaire est défini par:

$$\frac{\lambda_{eff\perp} s_1 \Delta \tau}{a} = -\lambda_m \iint_{S_1} \frac{d\tau}{dz} dy dx \quad (1)$$

La conductivité thermique effective perpendiculaire du modèle est donnée par:

$$E_{\perp} = Q_{\perp} / (\alpha + B_y) ; \quad Q_{\perp} = \int_0^{B_y + \alpha} \left( \int_0^{X=Y} \left( \frac{dT}{dZ} dX \right)_{Z=B_z+1} \right) dY \quad (2)$$

$Q_{\perp}$  est le flux de chaleur dans la direction Z sur la face supérieure ( $z = B_z + 1$ ) de la cellule élémentaire.

- La conductivité thermique effective du modèle parallèle :

Avec la même procédure, on calcule la conductivité thermique effective parallèle:

$$E_{\parallel} = Q_{\parallel} / (\alpha + B_y) / (1 + B_{x,z})^2 , \quad Q_{\parallel} = \int_0^{B_z+1} \left( \int_0^{X=Z} \left( \frac{dT}{dY} dX \right)_{Y=B_y+\alpha} \right) dZ \quad (3)$$

## 2.2. Modèle théorique

De nombreux modèles analytiques ont été proposés dans la littérature pour prédire la conductivité thermique des matériaux composites. Toutefois, seuls quelques modèles prennent en compte la taille des charges et la résistance thermique de contact entre les charges et la matrice. Hasselman et Johnson [4] ont proposé une modification du modèle Hashin et Shtrikman [5], afin de tenir compte de ces paramètres et appliquer ce modèle pour l'étude des dispersions de particules de nickel dans une matrice de sodium borosilicate. Selon ce modèle, aussi utilisé par Benveniste [6], la conductivité thermique effective  $\lambda_{eff}$  des matériaux composites est définie par:

$$\lambda_{eff} = \lambda_m \left[ 1 + (d-1) \phi \bar{\beta} / (1 - \phi \bar{\beta}) \right] \quad (4)$$

Avec

$$\bar{\beta} = \left[ (\lambda_f / \lambda_m) - (1 + (\lambda_f / r h_c)) \right] / \left[ (\lambda_f / \lambda_m) + (d-1) (1 + (\lambda_f / r h_c)) \right] \quad (5)$$

où  $\phi$  est la fraction de volume des charges,  $d$  est un paramètre dépendant de la forme des particules ( $d=2$  pour les cylindres),  $r$  est le rayon de particules et  $h_c$  est la conductance du contact entre les particules et la matrice définie par:  $h_c = 1/r_c$ .

Le modèle de Lewis & Nielsen est un modèle à l'origine utilisé pour la prédiction des propriétés mécaniques des composites [7]. Ce modèle a été aussi appliqué à la prédiction de la conductivité thermique effective des composites [7], en prenant en compte des paramètres différents pour la prédiction de la conductivité thermique effective telles que la forme, la répartition et l'orientation des charges dans la matrice et aussi les valeurs de conductivité thermique de la charge et de la matrice. L'intérêt principal de l'utilisation de ce modèle est que les prédictions considèrent aussi la valeur maximale de la fraction volumique des charges. Ce modèle est défini par [8]:

$$E = \lambda_{eff} / \lambda_m = (1 + A_{LN} B_{LN} \phi) / (1 - B_{LN} \psi \phi) \quad (6)$$

Avec

$$\begin{cases} B_{LN} = (\lambda_f / \lambda_m - 1) / (\lambda_f / \lambda_m + A_{LN}) = (1/D - 1) / (1/D + A_{LN}) \\ \psi = 1 + (1 - \phi_{max}) \phi / \phi_{max}^2 \end{cases} \quad (7)$$

où  $\phi_{max}$  est la fraction maximale des charges. La forme, la distribution et l'orientation permettent de définir la valeur du paramètre  $A_{LN}$ . Hatta et Taya [9] développent un modèle de

prédiction de la conductivité thermique effective pour des fibres courtes de différentes orientations. Cette approche prend en compte la forme et les interactions entre les fibres de différentes orientations. L'équation de Hatta & Taya est donnée par :

$$\lambda_{eff} / \lambda_m = [1 + \phi_f ((\lambda_f - \lambda_m)(2S_{33} + S_{11}) + 3\lambda_m) / J] \quad (8)$$

$$\text{Avec : } J = 3(1 - \phi_f)(\lambda_f - \lambda_m)S_{11}S_{33} + \lambda_m \left[ 3(S_{11} + S_{33}) - \phi_f(2S_{11} + S_{33}) + 3 \frac{\lambda_m^2}{\lambda_f - \lambda_m} \right]$$

$S_{ii}$  : Est un facteur lié à la géométrie des inclusions.

### 3. Etude expérimentale

#### 3.1 Préparation des échantillons (résine époxy / tube métallique creux)

Pour fabriquer les échantillons nous avons utilisé une matrice en résine époxy de VANTICO Company. Les tubes creux métalliques (de la société Goodfellow) sont placés dans un moule ( $200 \times 200 \text{ mm}^2$ ) avec une répartition équidistante de 1 mm entre les tubes (Fig. 3 (a-b-c)). Trois configurations d'échantillons ont été préparées dans les mêmes conditions de fabrication. Dans la première configuration (S1), les tubes utilisés sont en cuivre (99,9% de Cu) avec 3,2 mm et 4,02 mm de diamètre interne et externe respectivement. La seconde (S2) les tubes creux sont en laiton (70% Cu, 30% Zn) avec 2,74 mm et 3,56 mm de diamètre interne et externe respectivement. La troisième (S3) est composée de tube creux d'aluminium (99,5% Al) avec 1,62 mm et 3,02 mm de diamètre interne et externe respectivement.

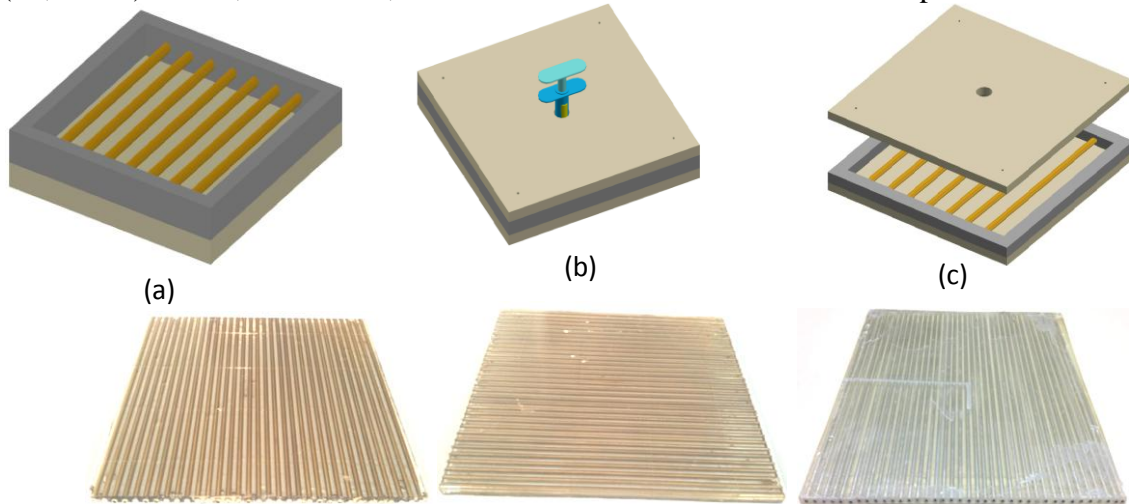


Figure 3: Fabrication des composites de résine époxy / tubes creux métalliques. (a et b) positions des tubes métalliques dans un moule, et (c) le processus d'injection. (S1) résine époxy + tubes de cuivre, (S2) résine époxy + tubes de laiton, (S3) résine époxy + tubes d'aluminium

#### 3.2 Méthodes de mesure et caractérisations préliminaires

Pour les échantillons de grande taille et la détermination de leurs propriétés thermophysiques, nous avons mis en place un nouveau dispositif expérimental. Ce dispositif (figure 4) est constitué de deux plaques échangeuses « isothermes » reliées à deux bains thermostatés, des résistances chauffantes, des fluxmètres et des thermocouples et un système d'acquisition. L'échantillon sous forme parallélépipédique est inséré entre deux fluxmètres et deux plaques échangeuses. L'ensemble est entouré par une plaque de mousse en polystyrène expansé afin d'en isoler les faces latérales. Le transfert de chaleur est supposé unidirectionnel. En fonction des consignes programmées et du traitement des données, il est possible avec cet équipement de déterminer avec précision les conductivités thermiques effectives [10] des composites.

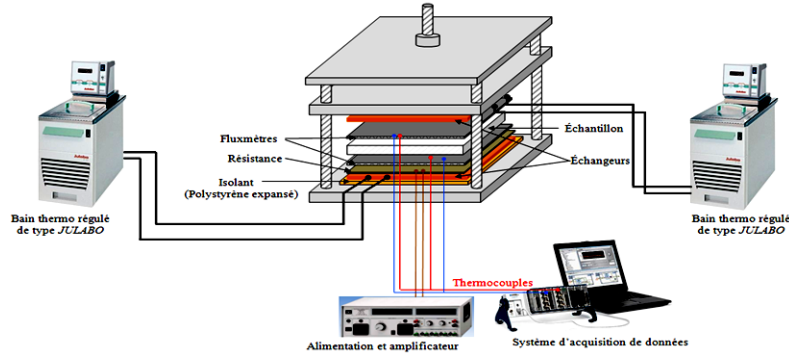


Figure 4 : *Plaque chaude gardée Transitoire*

La méthode utilisée pour mesurer la conductivité thermique apparente des composites consiste à mesurer simultanément les flux thermiques  $q_{1,ex}$  et  $q_{2,ex}$  et les températures  $T_1$  et  $T_2$  sur les deux faces de l'échantillon ( $T_1$  et  $T_2$  sont les deux thermocouples intégrés dans les fluxmètres). A l'instant  $t < 0s$ , les deux échangeurs sont maintenus à une température constante  $T_{éch,1} = T_{éch,2}$  jusqu'à ce que l'on obtienne une densité de flux nulle sur les deux faces de l'échantillon, puis on augmente à l'instant  $t > 0s$  la température sur une seule face uniquement ( $T_1 > T_2$ ) jusqu'à ce que l'on obtienne une densité de flux constant sur les deux faces de l'échantillon. La conductivité thermique apparente est calculée par l'expression (9). Les résultats sont avérés satisfaisants et les valeurs prévues de la conductivité thermique apparente ont été énumérées dans le tableau 1.

$$\lambda_{eff} = e \cdot \Sigma q / 2 \cdot \Delta T \quad (9)$$

Où  $e$  est l'épaisseur des échantillons;  $\Sigma \phi$  est la somme des flux de chaleur mesurés.

Echantillon	Diamètre interne et externe (mm)	Epaisseur $e$ (mm)	$C_p$ (kJ / Kg.K)	$\alpha_m$ ( $\times 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$ )	$\lambda_{eff}$ $W \cdot m^{-1} K^{-1}$	$\rho$ $kg / m^3$
(S1)	$d_{in} = 3.2, d_{ex} = 4.02$	6.26	1.1	3.07	$0.601 \pm 0.06$	$1780 \pm 74$
(S2)	$d_{in} = 2.74, d_{ex} = 3.56$	5.91	0.9	2.94	$0.466 \pm 0.022$	$1758 \pm 149$
(S3)	$d_{in} = 1.62, d_{ex} = 3.02$	5.58	0.87	3.31	$0.393 \pm 0.028$	$1363 \pm 84$
Matrix epoxy	-	3.45	1.4	1.237	$0.191 \pm 0.004$	$1034 \pm 28$

Table 1: *Mesures des paramètres de l'échantillon*

## 4. Résultats et discussion

### 4.1. Effet de la fraction volumique, de l'orientation des fibres et de la résistance thermique à $F = 1$ .

Dans les figures 6 et 7, l'effet du taux de concentration dans différents modèles des tubes est illustré dans un rapport de conductivité constante  $D = 10^3$  et  $C = 10^{-3}$ . On observe un accroissement non linéaire de la conductivité thermique en fonction de l'élévation de la concentration en charges. Cette augmentation était attendue, car les inclusions possèdent une conductivité thermique plus importante que celle de la matrice. On constate que la conductivité thermique effective perpendiculaire  $E_{\perp}$  est plus faible que celle parallèle  $E_{//}$ . Une comparaison a été faite avec les prédictions du modèle standard comme les modèles de Hasselaman et Johnson, Lewis-Nielsen et Hatta et Taya. Les simulations numériques donnent des valeurs de conductivité thermique effective très proches de celles prédites par les modèles analytiques aux fractions volumiques faibles ( $\phi \leq 30\%$ ). Pour des valeurs supérieures de la fraction volumique, un écart croissant entre les estimations numériques et théoriques est observé. La figure 8, montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la résistance thermique de contact à  $D = 10^{-3}$ . Nous avons pu observer que les variations de la

conductivité thermique effective deviennent presque négligeables, montrant un comportement asymptotique pour  $C \in [10^{-5}, 10^{-3}]$ . Pour une résistance de contact thermique  $C \geq 10^{-3}$ , nous constatons une influence dominante sur la conductivité thermique effective  $E$ . Cette influence est plus importante quand la fraction volumique augmente.

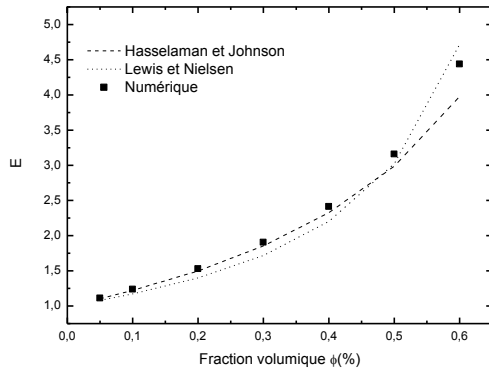


Figure 6 : modèle perpendiculaire,  $D=10^{-3}$ ,  $C=10^{-3}$   $F=1$

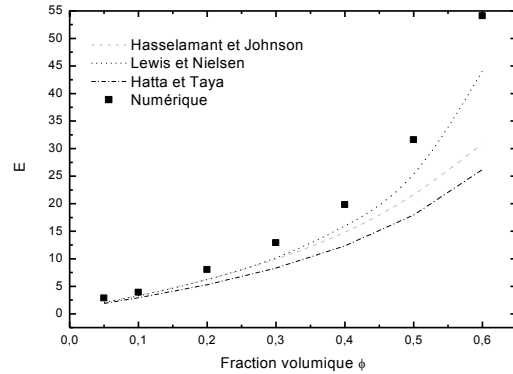


Figure 7 : modèle parallèle,  $D=10^{-3}$ ,  $C=10^{-3}$ ,  $F=1$

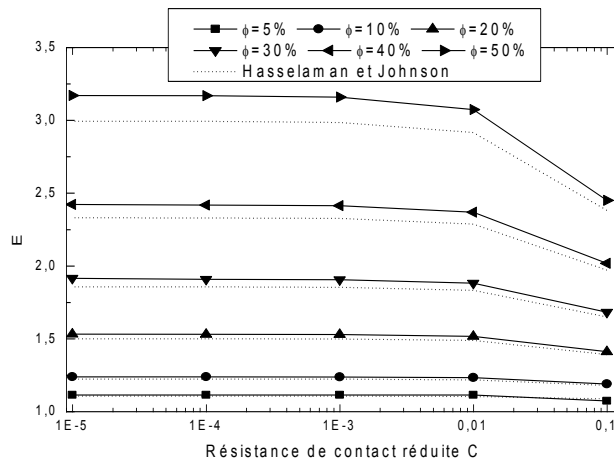


Figure 8 : Conductivité thermique effective dans le modèle perpendiculaire,  $D=10^{-3}$ ,  $F=1$

#### 4.2. Effet de l'épaisseur de paroi $F \in [0.05 - 1]$ du tube creux

La figure 9 (a) montre les résultats numériques pour  $D=10^{-3}$  et  $C=10^{-3}$  pour le modèle perpendiculaire. L'épaisseur de la paroi varie de 0,05 à 1. Il est clairement montré que, pour une fraction volumique donnée ( $B = cst$ ), la conductivité thermique effective augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi. L'examen de ces résultats montre que, pour une valeur constante de  $B$ , le paramètre  $F$  a un effet prédominant sur le transfert de chaleur entre la matrice et la charge et son augmentation conduit à des valeurs plus élevées de la conductivité thermique effective. En outre, les variations de la conductivité thermique effective deviennent presque négligeables montrant ainsi un comportement asymptotique. Notez que pour  $F > 0.2$ , il apparaît que les conductivités thermiques calculées augmentent très légèrement et tendent à une valeur constante. La variation de la conductivité effective avec l'augmentation de  $C$  est montrée dans la figure 9(b), pour le modèle perpendiculaire. Cependant, on peut voir que la conductivité effective augmente avec la diminution de la conductance inter-faciale. Pour de faibles valeurs de la résistance thermique de contact  $C \in [10^{-5}, 10^{-3}]$ , le paramètre  $F$  a le même effet sur le transfert de chaleur entre la matrice et la charge et son augmentation conduit à des valeurs plus élevées de la conductivité thermique effective. En outre, les variations de la conductivité thermique effective deviennent presque négligeables montrant un comportement asymptotique. Cela correspond au cas d'un contact

thermique parfait entre les constituants. Pour  $C \in [10^{-3}, 10^{-1}]$ , la résistance de contact a une influence dominante sur la conductivité thermique effective. On peut donc en déduire que la résistance inter-faciale affecte de manière significative la conductivité effective dans le modèle perpendiculaire. Ceci est un résultat très important. Enfin, en utilisant les mêmes résultats numériques que précédemment, la conductivité thermique effective du modèle perpendiculaire avec la variation du rapport de conductivité entre les deux phases est représentée sur la figure 9(c). On notera que tant que  $D \geq 10^{-3}$ , il apparaît que les conductivités thermiques calculées augmentent très légèrement et tend vers une valeur constante. Par conséquent, l'utilisation de la charge conductrice supérieure ( $\lambda_f \geq 10^3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) n'est pas intéressant pour améliorer la conductivité thermique composite [1].

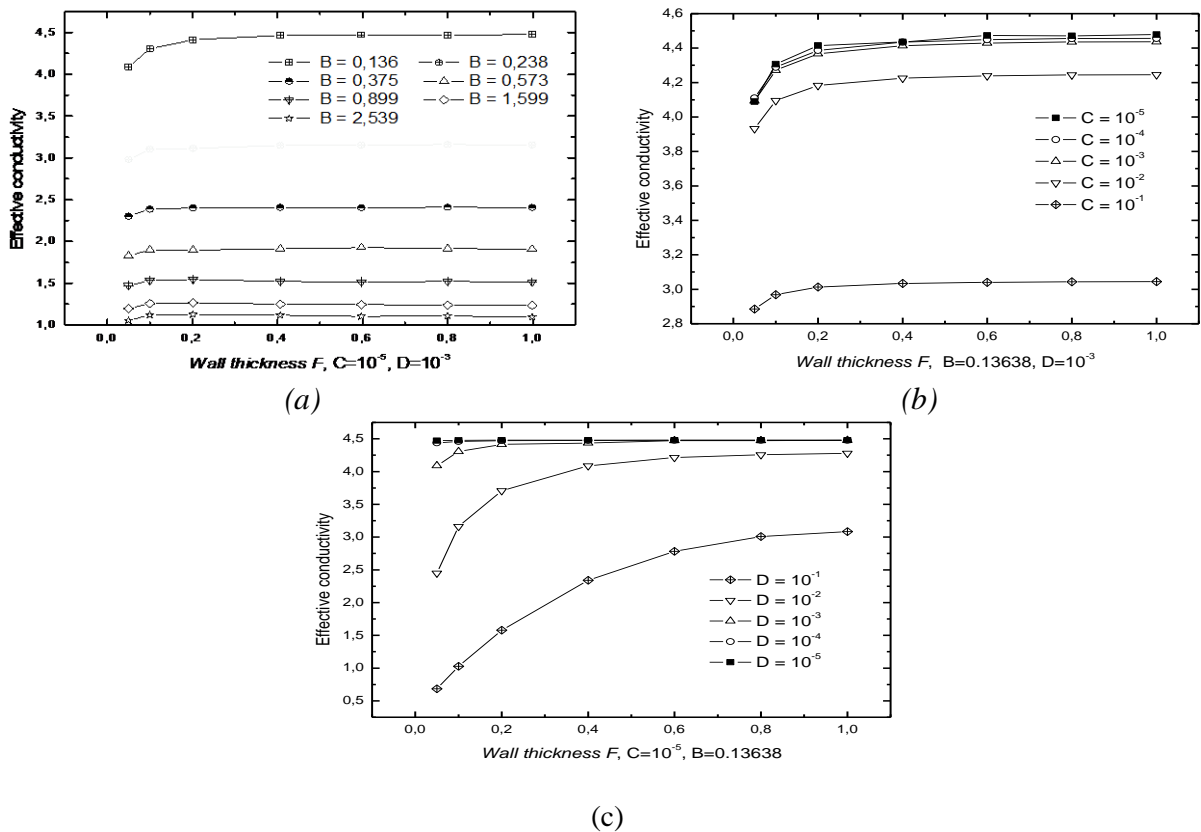


Figure 9 : La conductivité thermique effective  $E_{\perp}$  fonction de l'épaisseur de la paroi  $F$  ( $B = 0.136$ ) (a)  $D = 10^{-3}$ ,  $C = 10^{-5}$  ; (b)  $D = 10^{-3}$  ; (c)  $C = 10^{-5}$

### 4.3. Comparaisons entre simulations et les données expérimentales

Afin d'illustrer la différence entre les conductivités effectives mesurées et calculées, nous supposons le contact parfait entre les tubes creux et la matrice d'époxy. Les valeurs expérimentales ( $E_{m,\perp}$ ) à environ 20 °C sont comparées aux valeurs calculées ( $E_{c,\perp}$ ) à partir des simulations MEF (tableau 2). Les résultats montrent que la différence entre  $E_{m,\perp}$  et  $E_{c,\perp}$  est inférieure à 3%. Il est intéressant de noter que les paramètres  $B_m$  et  $F$  jouent un rôle fondamental dans le transfert de chaleur entre la matrice et le tube métallique donc une grande influence sur la valeur de la conductivité thermique effective. Pour l'échantillon (S1), le paramètre  $B_m$  est faible ( $B_{z,m} = 0.55$ ,  $B_{x,y,m} = 0.24$ ) dans ce cas la différence maximale entre  $E_{m,\perp}$  et  $E_{c,\perp}$  est d'environ -1,58%. On peut aussi observer l'influence de ce paramètre sur les conductivités thermiques effectives des échantillons (S2) et (S3). On peut voir que les différences entre  $E_{m,\perp}$  et  $E_{c,\perp}$  diminuent lorsque  $B_m$  diminue (augmentation de  $\phi_m$ ).

Echantillon	$\zeta = L/d_{ex}$	$\phi_m$ (%)	$D$ $\times 10^{-4}$	$F$	$B_{x,y,m}$	$B_{z,m}$	$E_{m,\perp}$	$E_{c,\perp}$	$(E_{m,\perp} - E_{c,\perp})/E_{c,\perp}$ (%)
(S1)	49.75	55.81	4.76	0.2	0.24	0.55	3.10	3.15	-1.58
(S2)	56.18	55.27	15.4	0.23	0.28	0.66	2.37	2.44	-2.86
(S3)	66.22	33.08	8.06	0.46	0.33	0.84	2.01	2.06	-2.42

Tableau 2: Comparaison entre les paramètres mesurées et calculées.

## 5. Conclusion

Dans cette communication, nous avons présenté un modèle mathématique pour le calcul de la conductivité thermique effective des composite résine / tubes creux. Nous avons montré que la résistance thermique de contact affecte de manière significative la conductivité thermique effective. Il a également été constaté que la conductivité effective est particulièrement sensible au paramètre  $F$  et plus élevée dans le modèle parallèle. Par ailleurs, il est apparu que l'utilisation de tubes creux conducteurs dans les composites à la place de tubes pleins permet de maintenir une conductivité effective très élevée tout en réduisant notablement la masse volumique du composite. La caractérisation de plusieurs échantillons avec des fractions volumiques d'inclusion différentes est en cours afin de permettre une confrontation plus approfondie des données expérimentales avec les modèles existants et proposés.

## References

- [1] M. Karkri, A. Boudenne, L. Ibos, B. Garnier, Y. Candau, Numerical and experimental study of the effective thermal conductivity of composite made of resin loaded with conductive spheres, *Int. J. High Temperatures-High Pressures*, 40 (2011), 61-84.
- [2] M. Aadmi, M. Karkri, L. Ibos, M. El hammouti, Effective thermal conductivity of random two-phase composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33 (2014), 69-80.
- [3] M. Haddadi, B. Agoudjil, V. Feuillet, L. Ibos, M. Karkri, Conductivité thermique effective de composites polymère/fibres conductrices, *Congrès français de thermique, SFT, ville des Hautes-Vosges*, 2013.
- [4] D-P-H. Hasselman, J-F. Johnson, Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance, *J. Comp. Mater.*, 21(1987), 508-515.
- [5] Z. Hashin, S. Shtrikman, A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials, *Journal of Applied Physics.*, 33 (1962), 3125-3131.
- [6] Y. Benveniste, T. Miloh, The effective conductivity of composites with imperfect thermal contact at constituent interfaces, *Int. J. Eng. Sci.*, 24 (1986), 1537–1552.
- [7] T. Lewis, L. Nielsen, Dynamic mechanical properties of particulate-filled composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 14 (1970), 1449-1471.
- [8] N. Wakao, K. Kato, Effective thermal conductivity of packed beds, *Chemical Engineering of Japan*, 2 (1969), 24-33.
- [9] H. Hatta, M. Taya, Thermal conductivity of coated filler composites, *Journal of Applied Physics* 59 (1986), 1851-1860.
- [10] A. Trigui, M. Karkri, I. Krupa, Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage properties of LDPE/wax as a shape-stabilized composite phase change material, *Energy Conversion and Management* 77 (2014), 586–596.