

Couplage du procédé d'élaboration et des propriétés thermiques effectives d'un composite carbone/époxy chargé en particules

Y. Djebara¹, A. Imad², A. Saouab³, T. Kanit², S. Madani¹

¹Laboratoire de Mécanique des Structures et des Matériaux, Batna, Algérie, djebara.youcef@gmail.com,
salah.madani@univ-batna.dz

²Laboratoire de Mécanique de Lille, Univ. Lille1, France, abdellatif.imad@polytech-lille.fr, toufik.kanit@univ-lille1.fr

³Normandie Univ., Le HAVRE, CNRS, LOMC, 76600 Le Havre, France, abdelghani.saouab@univ-lehavre.fr

Résumé

Dans ce cette étude, nous envisageons de proposer une approche originale de couplage du procédé d'élaboration par la technique RTM (*Resin Transfer Molding*) et des propriétés thermiques effectives d'un composite stratifié (carbone/époxy) renforcé par des particules de différents matériaux (métalliques ou céramiques). Dans un premier temps, une simulation numérique du flux et de la filtration des suspensions est réalisée. La technique d'homogénéisation numérique utilisant une méthode par éléments finis a permis d'explorer le potentiel des particules sphériques afin d'évaluer la conductivité thermique du composite stratifié (carbone/époxy).

Mots clefs : Composites à particules; Couplage procédé/propriétés; Conductivité thermique effective; filtration des suspensions; Homogénéisation numérique.

1. Introduction

L'amélioration de la conductivité thermique des composites (matrice/fibres) constitue un challenge important en vue de nouvelles utilisations industrielles en concurrence avec les matériaux métalliques conducteurs de la chaleur. Actuellement, la faible conductivité thermique des composites limite leurs capacités à remplacer les structures métalliques destinées à la gestion thermique; tels que : les bords d'attaque des ailes d'avions, les systèmes d'admission ou d'échappement pour les moteurs à turbine à gaz, les enceintes des pompes et les matériaux d'emballage de l'électronique. Il est bien connu que l'ajout de particules conductrices de la chaleur dans les polymères au cours du processus de moulage par injection semble être une voie intéressante pour obtenir un composite conducteur. Récemment, les composites chargés de particules thermo-conductrices font l'objet de recherches de plus en plus importantes du fait de leur vaste gamme d'applications.

En général, deux techniques sont utilisées pour caractériser le comportement thermique des matériaux composites : les estimations analytiques, ou des simulations numériques basées sur la méthode des éléments finis (MEF).

Dans ce travail, une approche originale est proposée pour associer le procédé d'élaboration du composite par la technique RTM aux propriétés thermiques effectives.

Cette approche repose sur trois étapes principales: (i) Une simulation numérique du flux et de la filtration des suspensions, (ii) une optimisation du processus et (iii) une évaluation des propriétés thermiques effectives du composite.

2. Modélisation de l'écoulement et de la filtration des suspensions.

Une simulation numérique de l'écoulement de la suspension (résine/particules) à travers un milieu fibreux prenant en compte la porosité à double échelle dans le procédé RTM est utilisée. Pendant le flux, une forte interaction entre le mouvement des particules et l'écoulement du fluide s'effectue à la paroi du milieu poreux. Le couplage de Stokes-Darcy est utilisé pour décrire le flux de résine traitant les particules en suspension à l'échelle mésoscopique. Un modèle de fluide pour décrire le flux de suspension, un modèle de filtration pour décrire la capture de particules et un modèle solide pour la dynamique des particules de masse ont été utilisés. Dans le procédé RTM, on utilise fréquemment des renforts textiles avec des préformes de fibres de haute densité pour améliorer les propriétés mécaniques des composites.

La modélisation de l'écoulement repose sur l'emploi de la loi de Darcy dans les micropores et sur l'équation de Stokes dans les macropores. On s'intéresse ici au phénomène de filtration d'une suspension dans un milieu fibreux. Initialement, le milieu filtrant est caractérisé par une perméabilité K_f , une porosité ε_0 et une fraction volumique des fibres V_f . Tandis que la suspension est caractérisée par une fraction volumique initiale V_{p0} et une viscosité μ_0 . Pendant le flux, une partie des particules en suspension est piégée à l'intérieur du renfort. La fraction volumique de ces particules est appelée la rétention σ . Le filtre est constitué de fibres et de particules piégées.

De la même manière, une partie du liquide en suspension mobile est piégée entre les particules retenues ou entre les particules retenues et le filtre. La fraction volumique de ce liquide piégé peut être quantifiée par le terme $(\beta - 1)\sigma$ avec $\beta \geq 1$. Nous négligeons alors le volume de liquide piégé, et par conséquent la relation entre la porosité \mathcal{E} des milieux fibreux et la rétention σ peut être écrite :

$$\sigma = \varepsilon_0 - \mathcal{E}$$

Afin de modéliser la rétention des particules à travers les milieux fibreux, nous utilisons une approche directe pour prédire le volume sur un élément de petit volume d'un milieu fibreux :

$$\sigma = \frac{V_{stop}}{V_{total}}$$

V_{stop} est le volume de particules stoppées dans le dV et V_{total} est le volume total.

Pour la modélisation de dispersion de particules dans le flux laminaire de suspension à travers le milieu fibreux, nous utilisons une approche basée sur l'équation de transport par advection/diffusion, qui résulte par l'équation de continuité:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C - \bar{U}\nabla C - U_{deposit} \nabla C$$

Cette équation prédit la variation du taux de concentration $\frac{\partial C}{\partial t}$ en tenant compte de l'effet de la diffusion $D\nabla^2 C$, l'advection $\bar{U}\nabla C$ et le dépôt $U_{deposit} \nabla C$. D est le coefficient de diffusion et $U_{deposit}$ la vitesse de dépôt.

Le modèle développé est utilisé pour simuler l'injection de suspension dans le procédé de moulage par transfert de résine. Initialement à un temps $t = 0$ nous imposons à tout point du milieu, la fraction volumique des particules $V_p(x, 0) = 0$, la rétention $\sigma(x, 0) = 0$, la pression $P(x, 0) = 0$ et la porosité $\mathcal{E}(x, 0) = \varepsilon_0$.

Pour les conditions aux limites associées, nous avons imposé pendant l'injection à l'entrée $V_{p_0}(x_0, t) = V_{p_0}$ $Q(x_0, t) = Q_{inj}(t)$ où $P(x_0, t) = P_{inj}(t)$ et à l'évent $P(x_e, t) = 0$

Pour les conditions aux parois, nous avons appliqué les conditions de Dirichlet (paroi imperméable).

2.1. Simulation et optimisation de l'injection

Dans cette simulation, nous nous sommes intéressés par l'étude du flux de la résine remplie de particules sur un Volume Élémentaire Représentatif élémentaire (VER) d'un milieu fibreux. Les constituants utilisés sont la résine époxy, les renforts sont des fibres de carbone et des particules sphériques métalliques ou céramiques.

La taille du domaine de calcul est de $3 \times 2 \text{ mm}^2$, les dimensions des axes majeurs et secondaires de la mèche sont respectivement $1.32 \times 0.25 \text{ mm}^2$. La densité de maillage est 300×200 avec des éléments finis quadrangulaires. La perméabilité des fibres $K_F = 1.1718 \text{ } \Gamma^{11} \text{ m}^2$, la viscosité de la matrice en Epoxy $\mu_0 = 0.1 \frac{\text{Pa}}{\text{s}}$ et la porosité initiale de milieu fibreux $\varepsilon_0 = 0.49$

Dans cette application, nous avons injecté une suspension de particules avec une fraction volumique initiale de $V_{p_0} = 10.25\%$ ayant un diamètre de $d = 40 \mu\text{m}$ dans les milieux fibreux, à un gradient de pression $\Delta P = 10^3 \text{ Pa}$ entre l'entrée et la sortie. Au seuil d'injection et à chaque 0.02 s , nous injectons des particules progressivement d'une façon aléatoire jusqu'à atteindre le nombre total de particules.

Les résultats des simulations dans ce test montrent que la distribution des particules dans le milieu fibreux est difficile à réaliser. Les propriétés physiques de la suspension et celles du milieu filtrant influent sur la dynamique des particules.

La Figure 1 présente le cas de la simulation d'une injection réalisée sur toute la surface d'entrée.

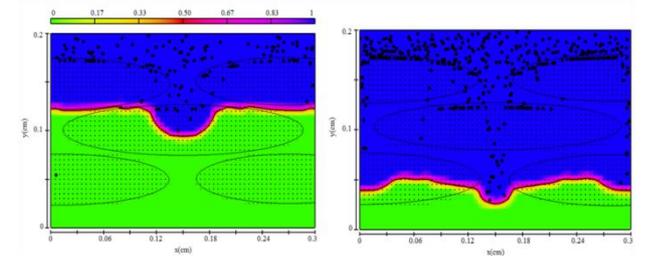


Figure 1 : Cinétique du front de résine chargé de particules pour $V_{p_0} = 10.25\%$ et $d_p = 40 \mu\text{m}$ (Injection sur toute la surface d'entrée).

Elle décrit la cinétique du front de résine rempli de particules à deux moments différents, au début et à la fin de l'injection. Globalement, on constate qu'il y a une bonne répartition des particules à travers toute la préforme. En outre, les particules suivent la ligne d'écoulement sans aucun décalage par rapport au déplacement relatif du fluide.

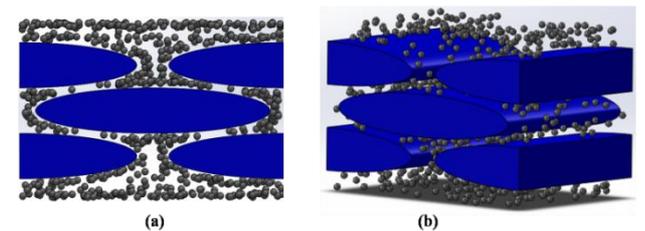


Figure 2 : Morphologie de la microstructure, (a) 2D et (b) 3D.

La Figure 2 représente la microstructure du composite à la fin du processus d'injection en 2D et en 3D. La distribution et la densité de dispersion des particules dans le milieu fibreux sont aléatoires et homogènes. Dans la présente étude, nous nous intéressons aux propriétés thermiques de cette configuration optimisée.

4. Détermination de la conductivité thermique effective

Pour les calculs thermiques, chacune des trois phases (matrice, fibres et particules) est considérée comme un solide isotrope homogène et présente une conductivité thermique linéaire.

Différents cas ont été étudiés numériquement pour différentes valeurs de conductivité thermique des matériaux métalliques et céramiques.

Après la définition de la microstructure, un maillage est généré. Une grille de maillage régulier est superposé sur l'image de la microstructure en utilisant la technique dite d'éléments multi phases [1]. Cette technique est largement utilisée par [2],[3] et [4] pour l'homogénéisation des images virtuelles et réelles en 3D et 2D. La Figure 3 donne un exemple de la microstructure 3D avec maillage régulier.

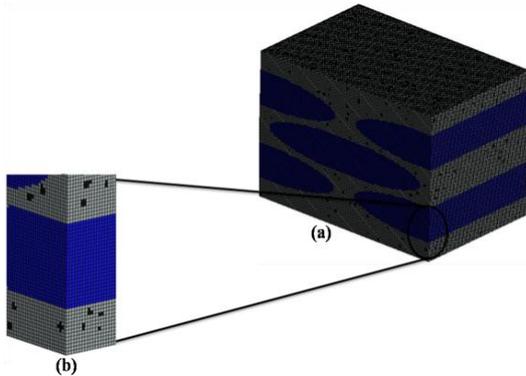


Figure 3 : Méthode de maillage de composite, (a) maillage régulier et (b) Zoom de maillage.

Une image de la microstructure est utilisée pour attribuer la propriété de la phase à chaque point d'intégration d'un maillage régulier, en fonction du voxel sous-jacent. Les éléments considérés sont quadratiques.

4.2 Calcul de la conduction thermique

Par la loi de Fourier, on relie le vecteur flux thermique \underline{q} au gradient de température $\underline{\nabla T}$ par l'intermédiaire du tenseur de la conductivité thermique $\underline{\lambda}$:

$$\underline{q} = -\underline{\lambda} \underline{\nabla T}$$

Pour les problèmes de conduction thermique linéaire, les conditions aux limites périodiques (PBC) décrites par [5] sont appliquées dans cette étude comme suit:

$$T = \underline{G} \underline{x} + \tilde{t}, \quad \forall \underline{x} \in \partial V$$

Avec \tilde{t} la fluctuation périodique.

Il est à noter que les conditions limites prescrites sur le volume doivent satisfaire au critère de Hill pour une homogénéisation plus fiable:

$$-\langle \underline{q} \cdot \underline{\nabla T} \rangle = -\langle \underline{q} \rangle \cdot \langle \underline{\nabla T} \rangle = \langle \underline{q} \rangle \cdot \langle -\underline{\nabla T} \rangle$$

Pour déterminer la conductivité thermique, on définit tous les composants du vecteur de gradient température uniforme selon les conditions. On récupère ainsi les composants du tenseur de la conductivité $\underline{\lambda}$ comme suit :

$$\lambda = -\frac{\langle \underline{q} \rangle_x \cdot \langle \underline{\nabla T} \rangle_x + \langle \underline{q} \rangle_y \cdot \langle \underline{\nabla T} \rangle_y + \langle \underline{q} \rangle_z \cdot \langle \underline{\nabla T} \rangle_z}{(\langle \underline{\nabla T} \rangle_x)^2 + (\langle \underline{\nabla T} \rangle_y)^2 + (\langle \underline{\nabla T} \rangle_z)^2}$$

Dans le cas d'une propriété isotrope, comme le cas de cette étude, le gradient de température est donné comme suit:

$$\underline{G} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

La conductivité thermique homogénéisée en tenant compte est donnée par:

$$\lambda = \frac{1}{3} \text{trace}(\langle \underline{q} \rangle)$$

5. Homogénéisation numérique

5.1 Conductivité thermique de composite Carbone/Epoxy

Le type de fibre de carbone utilisé dans cette étude fournit une conductivité thermique effective de 4,25(W/mK) et de 8,13(W/mK) suivant la direction uniaxiale de la fibre.

5.2 Conductivité thermique du composite stratifié renforcé par des particules

L'effet des valeurs de la conductivité thermique des particules métalliques et céramiques sur la conductivité thermique effective des microstructures (Carbone/Epoxy) est illustré dans la Figure 4.

En effet, la conductivité thermique effective globale augmente d'une façon linéaire avec la conductivité thermique des particules. Il faut noter que les résultats numériques sont encadrés par les modèles analytiques en série en en parallèle.

Pour mettre en évidence nos résultats, nous présentons l'évolution de la conductivité thermique effective normalisée en fonction de la conductivité thermique normalisée des particules (Figure 4).

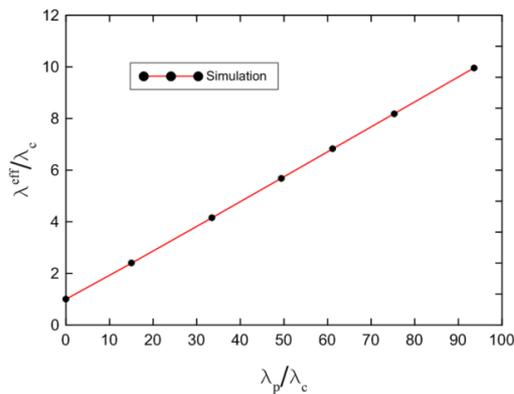


Figure 4 : Evolution de la conductivité thermique normalisée.

Cette Figure montre une variation linéaire de la conductivité thermique effective qui peut être représentée par la relation suivante:

$$\frac{\lambda^{eff}}{\lambda_c} = 1 + V_{p_0} \frac{\lambda_p}{\lambda_c}$$

Cette équation peut prédire les valeurs de la conductivité thermique effective du composite à double renforts et peut être réécrite comme suit:

$$\lambda^{eff} = \lambda_c + \alpha V_{p_0} \lambda_p$$

Il est intéressant de noter que la conductivité thermique du composite λ^{eff} peut être déterminée par une équation additive en termes de la conductivité thermique du composite (matrice/fibre) λ_c et la conductivité thermique des particules λ_p en prenant en compte la fraction volumique des particules V_{p_0} . Cette équation reste valable dans les conditions choisies et peut être généralisée en introduisant un coefficient de forme α . Ce coefficient prend en compte le rapport d'aspect des particules, qui prend la valeur 1 dans notre cas.

6. Conclusion

Dans l'ensemble, cette étude a conduit au développement d'une chaîne globale basée sur un couplage fort Procédé-Optimisation-Propriétés thermiques d'un composite matrice/fibres renforcé de particules. Une simulation numérique du processus basée sur une simulation du flux et la filtration des suspensions est réalisée en utilisant une interaction fluide-structure en vue de prédire la distribution des particules. Une phase d'optimisation du procédé est opérée afin d'obtenir une meilleure répartition des particules. Enfin, les propriétés thermiques effectives du composite optimisé sont déterminées par une technique d'homogénéisation numérique. Cette technique numérique a conduit à la détermination de la conductivité thermique effective en tenant compte de la conductivité thermique de chacune des trois phases (matrice, fibres et particules).

Références

- [1] EL Moumen A, Kanit T, Imad A and El Minor H., Computational thermal conductivity in porous materials using homogenization techniques: Numerical and statistical approaches, *Journal of Computational Materials Science.*, v97, (2015), p148–158.
- [2] Haji H, Saouab A and Nawab Y., 2015, Simulation of coupling filtration and flow in a dual scale fibrous media, *Journal of Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.*,v76 ,p272–280
- [3] El Moumen A, Kanit T, Imad A and El Minor H., Effect of overlapping inclusions on effective elastic properties of composites, *Journal of Mechanics Research Communications.*v53,(2013), p24–30.
- [4] Djebara Y, EL Moumen A, Kanit T, Madani, S and Imad, A., Modeling of the effect of particles size, particles distribution and particles number on mechanical properties of polymer-clay nanocomposites: Numerical homogenization versus experimental results. *Compos. Part B: Engineering.*, v86,(2016), p135 –142.
- [5] Kanit T, N'Guyen F, Forest S, Jeulin D, Reed, M and Singleton, S. Apparent and effective physical properties of heterogeneous materials: Representativity of samples of two materials from food industry, *Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.*,v195(33-36),(2006),p3960 – 3982.