



Etude du comportement thermique d'un composite polymère pigmenté avec des particules de dioxyde de titane

Nassima GHEBRID^{1*}, Messaoud GUELLAL⁽¹⁾

¹ Laboratoire de Génie des Procédés Chimiques, Université Ferhat Abbas, Sétif-1, 19000, Algérie

ouafaghebrid@yahoo.fr, mguellal@univ-setif.dz

Résumé : L'étude du comportement thermique d'un matériau composite à matrice de polystyrène pigmenté de grains de dioxyde de titane est proposée. Les résultats numériques obtenus sont comparés aux modèles analytiques classiques et aux valeurs expérimentales de la conductivité thermique mesurées dans différentes conditions de tremp. L'étude a permis d'examiner l'effet de la température de tremp et de la concentration du dioxyde de Titane sur le comportement thermique global du matériau.

Mots clés :

Conductivité thermique effective, Tremp, composite, modélisation numérique.

1. Introduction

La technologie moderne a besoin de matériaux qui allient à la fois rigidité, résistance mécanique, ténacité élevée et une grande légèreté. Aucun matériau simple ne permet de combiner ces caractéristiques physiques, et pour atteindre cet objectif il faut nécessairement utiliser un matériau composite. En général, les composites sont réalisés pour subir de nombreuses contraintes physiques qu'ils doivent supporter sans modification de leurs propriétés au cours de leur utilisation. L'évolution des propriétés thermophysiques de ces matériaux dépend de plusieurs facteurs : la forme, la concentration, la dispersion des charges et le procédé de fabrication...Le problème posé pour la plupart de ces composites est l'estimation de leurs propriétés thermophysiques. Les matériaux composites sont largement utilisés dans les applications de transfert de chaleur et de la gestion thermique des équipements. La conception des matières composites pour une application donnée exige une compréhension complète du phénomène de la conduction thermique. L'information sur la conductivité thermique est également nécessaire pour déterminer les conditions optimales pendant le traitement de ces matériaux. Différents modèles expérimentaux, théoriques et numériques ont été employés pour prévoir la conductivité thermique d'un matériau hétérogène. Les travaux expérimentaux et théoriques se sont concentrés sur la validation des modèles numériques. Beaucoup de modèles théoriques et empiriques sont proposés pour prédire la solution de l'équation de conduction thermique des matériaux hétérogènes [1- 8].

Le but de ce travail est d'étudier le comportement thermique d'un composite polymère (Polystyrène (PS)) chargé de grains dioxyde de titane (TiO₂), et de comparer les résultats numériques de la conductivité thermique effective aux modèles de prédiction analytique et aux résultats expérimentaux en fonction de la température de tremp. La différence entre le comportement thermique en régime transitoire du matériau composite et celui du matériau pur a été prise en compte dans cette étude.

2. Formulation mathématique

Une simulation numérique à deux dimensions basée sur la méthode des éléments finis a été utilisée pour résoudre le problème de transfert de chaleur par conduction en régime stationnaire. Les transferts de type radiatifs et convectifs sont négligeables. L'objectif de cette étude est d'estimer la conductivité thermique effective du matériau composite PS/TiO₂ en considérant la configuration géométrique représentée sur la figure 1. La cellule élémentaire est modélisée par la charge (TiO₂) de forme circulaire de rayon compris entre 0.3 μm et 0.8 μm, centrée dans la matrice (PS) de forme carrée de 2 μm de dimension.

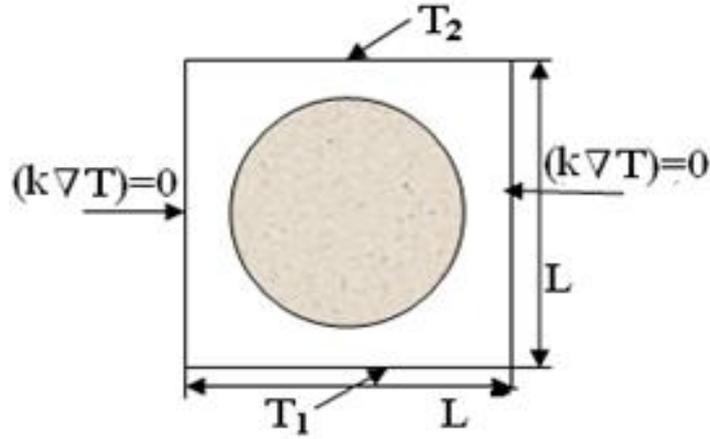


Figure 1 : Configuration géométrique et conditions aux limites

Les températures des surfaces supérieure et inférieure de la cellule sont données respectivement par T_1 et T_2 ($T_2 > T_1$). Les deux faces parallèles à la direction de l'écoulement de la chaleur sont supposées adiabatiques.

Si q_0 est la densité de flux de chaleur traversant le périmètre entourant la charge, la condition aux limites appliquée sur l'interface est une condition mixte de forme:

$$(k\nabla T) = q_0 \quad (1)$$

q_0 est donné par [9]:

$$q_0 = \frac{k_m(T_m - T_f)}{r \cdot R_c} \quad (2)$$

R_c : résistance de contact adimensionnelle définie par [9]:

$$R_c = \frac{r_c \cdot k_m}{r} \quad (3)$$

En introduisant la résistance de contact adimensionnelle R_c définie par [9], l'équation (2) s'écrit :

$$q_0 = \frac{(T_m - T_f)}{r_c} \quad (4)$$

r_c : résistance de contact thermique dimensionnelle ($K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$)

T_f et T_m sont respectivement les températures de la charge et de la matrice.

k_m : conductivité thermique de la matrice ($W/K \cdot m$)

r : rayon de la charge.

3. Approche numérique

Les transferts thermiques dans un matériau sont dus au phénomène de la conduction décrit par l'équation :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k\nabla T) = 0 \quad (5)$$

La simulation est réalisée en régime stationnaire, le temps n'intervient pas, et le premier terme de l'équation (5) est nul. Nous pouvons donc utiliser l'équation de Fourier pour calculer le flux de chaleur traversant la surface A du composite :

$$\phi = \int_A k \frac{\partial T}{\partial n} dA \quad (6)$$

k : Conductivité thermique du composite [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Variation de la température selon la direction n

Pour déterminer la conductivité thermique effective du matériau modélisé nous utilisons l'équation suivante [10]:

$$k_{eff} = \frac{\phi \cdot L}{A (T_1 - T_2)} \quad (7)$$

4. Comportement thermique du matériau pendant la trempe

Quand une perturbation de la température se produit, les températures dans le milieu changent avec le temps pour rechercher un nouvel équilibre thermique correspondant aux nouvelles conditions. Si cet équilibre thermique est atteint alors le régime devient à nouveau stationnaire.

Considérons une plaque plane d'épaisseur $2L$ initialement à la température T_i . On la trempe dans un fluide de température $T_\infty < T_i$, le profil de température est donné par la solution exacte [13]:

$$\frac{T(\frac{x}{L}, F_0) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 F_0) \cos(\frac{\xi_n x}{L}) \quad (7)$$

Avec $F_0 = \frac{a}{L^2} t$

F_0 : nombre de Fourier .

t : temps de trempe, dans notre cas égal 10 min .

a : diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$).

$$C_n = \frac{4 \sin \xi_n}{2 \xi_n + \sin(2 \xi_n)} \quad (8)$$

Les ξ_n sont les solutions réelles de l'équation :

$$\xi_n \operatorname{tng} \xi_n = Bi = \frac{hL}{K} \quad (9)$$

K : conductivité thermique du matériau ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

h : coefficient d'échange de chaleur par convection du matériau avec le milieu fluide ($W.m^{-2}.K^{-1}$).

Pour un nombre de Fourier $F_0 < 0.2$, la solution sous forme de série peut être approchée par son premier terme :

$$\frac{T(\frac{x}{L}, F_0) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = C_1 \exp(-\xi_1^2 F_0) \cos(\xi_1 \frac{x}{L}) \quad (10)$$

3. Résultats obtenus

3.1. Comportement en régime transitoire

Pour examiner la différence entre le comportement thermique instationnaire du matériau composite PS-TiO₂ et celui du matériau pur PS nous avons tracé sur la figure 3 les variations de température en fonction du temps pour ces deux matériaux au centre ($x=0$) et pour différentes températures de trempe. La même allure de l'évolution des températures a été observée pour les deux types de matériaux et pour toutes les températures de trempe, néanmoins l'écart observé entre les courbes s'accroît au fur et à mesure que la température de trempe augmente indiquant le rapprochement du comportement du matériau pur à celui du composite trempé à $T=0^\circ C$, ce qui est compatible avec la faible fraction de TiO₂ dans le composite (3%). L'effet de la pigmentation du polystyrène avec le dioxyde de titane est plus remarquable pour des températures de trempe plus élevées où la distribution de température dans le cas du matériau pur est nettement supérieure à celle du composite traduisant ainsi une amélioration de l'échange thermique dans le cas du composite.

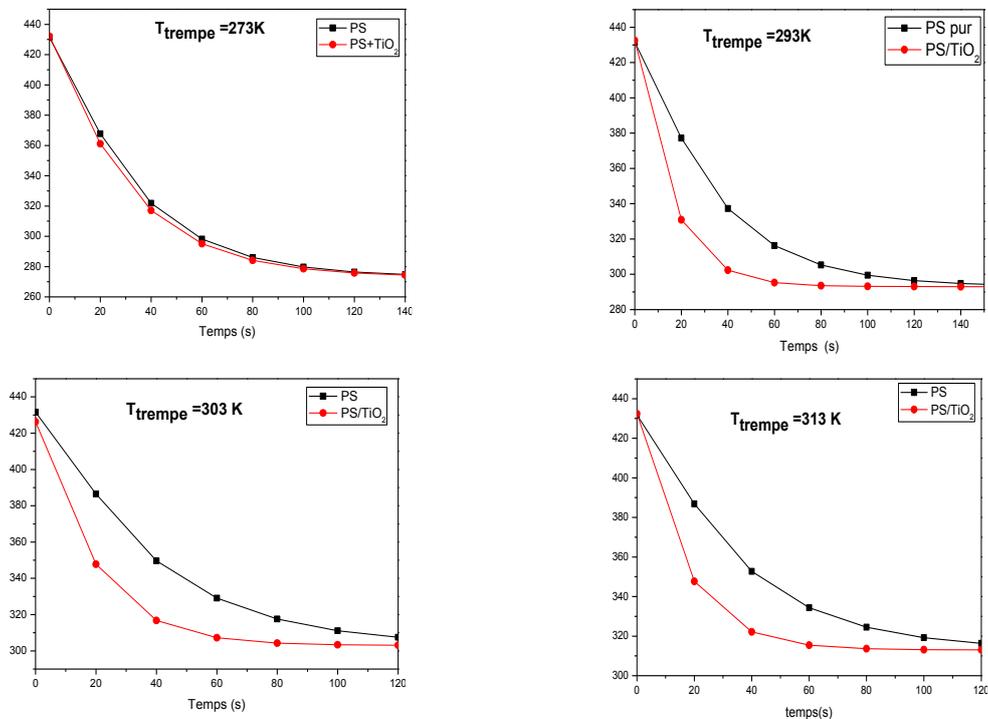


Figure 3 : Distribution de la température en fonction de la température de trempe

3.1. Conductivité thermique effective

Dans cette section les résultats numériques de la conductivité thermique effective du composite (PS/TiO₂) sont comparés aux modèles analytiques de Hatta et Taya [11] et de Hashin et Shtrikman [12] ainsi qu'aux résultats expérimentaux en fonction de la température de trempé. Les paramètres de simulation sont : la conductivité de la matrice polymère (PS) $K_m=0.08\text{W/m.K}$, la conductivité de la charge (TiO₂) $K_f=2.5\text{W/m.K}$, le rayon de la charge $r = 0.6\mu\text{m}$, et la dimension de la cellule $L= 2\mu\text{m}$.

La figure 2 représente l'évolution de la conductivité thermique effective du composite (PS/TiO₂) issue des deux modèles analytiques en fonction de la fraction de la charge comparée au modèle numérique. On remarque que, le modèle numérique approche convenablement les modèles analytiques de Hatta et Taya, et de Hashin et Shtrikman.

Les résultats obtenus illustrés dans le tableau 1 montrent que les valeurs expérimentaux sont très proches aux valeurs numériques pour une résistance de contact de 10^{-2} avec un écart de 2.86% pour une température de trempé de 50°C et 3.55% pour une température de trempé de 20°C.

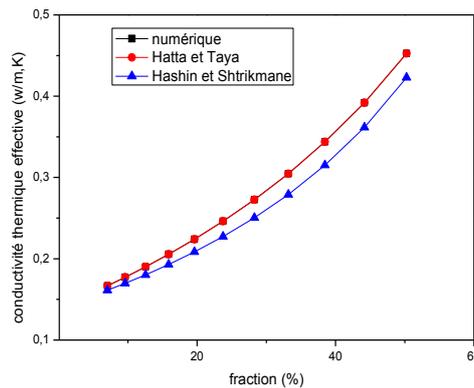


Figure 2 : Conductivité thermique effective du composite (PS/TiO₂) en fonction de la fraction de la charge.

Table1. Comparaison des résultats de la conductivité effective à $C=10^{-2}$

Température de trempé (°C)	Valeurs Expérimentales (W/m.K)	Résultats numériques		Résultats analytiques					
				Hatta et Taya			Hashin et Strikman		
		k_{eff} W/m.K	Ecart Ex-Nu (%)	k_{eff} W/m.K	Ecart An-Ex (%)	Ecart An-Nu (%)	k_{eff} W/m.K	Ecart An-Nu (%)	Ecart An-Ex (%)
0	0.127	0.136	7.09	0.1631	28.43	19.93	0.143	12.68	5.22
20	0.141		3.55		15.67			1.49	
30	0.095		43.16		71.68			50.63	
40	0.130		4.62		25.46			10.08	
50	0.140		2.86		16.5			2.21	

An-Ex: écart entre les conductivités thermiques effectives analytiques et expérimentales
An-Nu: écart entre les conductivités thermiques effectives analytiques et numériques
Ex-Nu : écart entre les conductivités thermiques effectives expérimentales et numériques

4. Conclusion

Nous avons développé une modélisation numérique permettant de prédire la conductivité thermique effective des composites. Ce modèle est validé par la comparaison avec les résultats expérimentaux et analytiques pour un arrangement d'une surface carrée (représentant la matrice PS) avec un cercle centré représentant le renfort (TiO₂). L'étude a montré que le modèle de Hashin et Shtrikman permet d'obtenir des prédictions proches des données numériques. La comparaison entre le matériau pur et le composite en terme de comportement thermique au cours du processus de la trempé a permis de conclure que l'effet de la pigmentation du polystyrène avec le dioxyde de titane est plus remarquable pour des températures de trempé plus élevées où la

distribution de température dans le cas du matériau pur est nettement supérieure à celle du composite traduisant ainsi une amélioration de l'échange thermique dans le cas du composite.

5. Références

- [1] C. Bonacina et G. Gomini, On the solution of the nonlinear heat conduction equations by numerical methods, *Int. J. Heat and mass transfer*, Volume 16, pages 581-589, 1973.
- [2] J. L. Auriault, Effective macroscopic description for heat conduction in periodic composites, *Int.J. Heat and mass transfer*, Volume 26, pages 861-869, 1983.
- [3] P. G. Klemens, Thermal conductivity of composites, *Int. J. of Thermophysics*, Volume 11, pages 971-976, 1990.
- [4] A. Sutradhar, G. H. Paulino, The simple boundary element method for transient heat conduction in functionally graded materials, *Comput. Methods appl., Engrg*, Volume 193, pages 4511-4539, 2004.
- [5] B. Agoudjil, L. Ibos, J.C. Majesté, Y. Candau, Ye. P. Mamunya, Correlation between transport properties of ethylene vinyl acetate/glass, silver-coated glass spheres composites, *Composites: Part A*, Volume 39, pages 342–351, 2008.
- [6] M. Shen, Y. Cui, J. He, Y. Zhang, Thermal conductivity model of filled polymer composites”, *Int. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume 18, pages 623-631, 2011.
- [7] M. Chikhi, B. Agoudjil, M. Haddadi, A. Boudenne, Numerical modeling of the effective thermal conductivity of heterogeneous materials, *J. of Thermoplastic Composite Materials*, Volume 26, pages 336-345, 2011.
- [8] M. Haddadi, B. Agoudjil, A. Boudenne, B. Garnier, Analytical and numerical investigation on effective thermal conductivity of polymer composites filled with conductive hollow particles, *Int. J. Thermophys*, Volume 34, pages 101–112, 2013.
- [9] M. Karkri, Effective Thermal Conductivity Of Composite: Numerical And Experimental Study, *COMSOL Conference Paris*, 2010.
- [10] M. Chikhi, Métrologie et modélisation des Transferts dans les composites naturels A faible cout pour l'isolation thermique dans Les panneaux solaires, *Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie*, 2013.
- [11] H. Hatta et M. Taya, Effective Thermal conductivity of a mise oriented short fiber composite, *J. Appl. Phys*, Volume 58, page 2478-2486, 1985.
- [12] Z. Hashin et S. Shtrikman, A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials, *J. Appl. Phys.*, Volume 33, pages 3125-3131, 1962.
- [13] T.L. Bergman, *Fundamental of Heat And Mass Transfert*”, 7th edition, John Wily and sons, 1981

25-27 Octobre 2017
Monastir – Tunisie

**Référence de
l'article: Th01-078**