



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEM



MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

**Spécialité : Matériaux Polymères, Composites Avancés à base de
Polymères - Etude et Applications**

Par :

BENARBIA MERIEM

Epouse BENAÏSSA

Sur le Thème :

**Influences de la Nature et de la Forme Géométrique des
Particules de Renfort sur le Comportement Thermique des
Matériaux Composites Hybrides (PMMA-ALUMINIUM)/VERRE et
(PMMA-VERRE)/ALUMINIUM et de leurs Composites
Précurseurs PMMA/ALUMINIUM et PMMA/VERRE**

Soutenu publiquement le 02 juillet 2017 devant le jury composé de :

M. HAMOUNI	Professeur	Université de Tlemcen	Président
S. KHALDI	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur
M. BENHAMOU	MCB	ESSAT	Examineur

Mes remerciements

- *Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Recherche sur les Macromolécules de la Faculté des Sciences de l'Université de Tlemcen sous la direction du professeur Smain Khaldi. Je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude pour son suivi constant et ses précieuses orientations.*
- *Je tiens aussi à remercier, vivement, le professeur Mohammed Hamouni, chef du département de physique à la faculté des sciences de l'université de Tlemcen, d'avoir bien voulu accepter, malgré ses nombreuses occupations, de présider le jury de cette soutenance.*
- *Le docteur Mohammed Benhamou, maitre de Conférences à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, a bien voulu accepter de juger le présent travail, qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.*

Table des matières

1. Introduction générale	1
2. Position du problème	3
3. Données du problème	4
4. Modèle théorique utilisé	5
5. Grandeurs thermiques	6
6. Résultats et discussions	7
6.1. Influence de la nature du renfort	8
6.1.1. Cas du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre	9
6.1.2. Cas du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al	21
6.1.3. Etude comparative : (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al	32
6.2. Influence de la forme géométrique des particules de renfort	41
6.2.1. Cas du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre.....	42
6.2.2. Cas du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al	50
6.2.3. Etude comparative : (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al	57
7. Conclusions	67

1. INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction générale

Les matériaux composites connaissent de nos jours une large utilisation qui touche de nombreux domaines d'application et, particulièrement, celui des transferts thermiques. La conductivité thermique est l'une des propriétés thermophysiques qui sont souvent utilisées pour examiner et prédire le comportement thermique de ces matériaux hétérogènes. La conductivité thermique des matériaux composites dépend fortement de leur composition et de leur structure [1].

Par matériau composite hybride, nous entendons un matériau composite constitué de plusieurs phases discontinues (renfort) de natures différentes dispersées dans une phase continue (matrice) [2].

Dans notre cas, il s'agit d'une matrice thermoplastique en poly (méthacrylate de méthyle) ou pmma dans laquelle sont dispersées des particules en aluminium et des particules en verre.

Nombreux sont les modèles théoriques et semi-empiriques qui ont été développés afin de prédire la conductivité thermique des matériaux composites en partant de leur composition et de leur structure [3,1].

Dans ce travail, nous avons retenu le modèle théorique de Hashin et Shtrikman qui a été développé en 1965 afin de prédire la conductivité thermique des composites pour différentes formes de particule de renfort.

Nous nous appuyons sur ce modèle pour examiner les effets de la nature et de la forme géométrique des particules de renfort sur la conductivité thermique λ et la diffusivité thermique a des deux matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al et de leurs matériaux composites précurseurs (pmma/Al) et (pmma/verre).

- Dans une première étape de notre travail, nous examinons l'influence de la nature des particules du renfort (aluminium ou verre) sur la conductivité thermique λ et la diffusivité thermique a des deux matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al et de leurs matériaux composites précurseurs (pmma/Al) et (pmma/verre). Pour ce faire, nous avons adopté la forme sphérique pour les particules de renfort.

- Dans une deuxième étape de notre travail, nous examinons l'influence de la forme géométrique des particules de renfort (aluminium ou verre) sur la conductivité thermique λ et la diffusivité thermique a des deux matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al et de leurs matériaux composites précurseurs (pmma/Al) et (pmma/verre) pour des particules de renfort sphériques ou cylindriques.
- Dans chacune des deux étapes, nous effectuons une étude comparative afin de mettre en évidence l'influence de la nature et celle de la forme géométrique des particules de renfort sur le comportement thermique de ces deux matériaux composites hybrides et de leurs composites précurseurs.

Références

- [1] J. Wang, J. K. Carson, M. F. North, and D. J. Cleland, "A new structural model of effective thermal conductivity for heterogeneous materials with co-continuous phases," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 2389–2397, 2008.
- [2] J.M Berthelot, *Matériaux composites, Comportement Mécanique et Analyse des Structures*, Editions Tec & Doc, Lavoisier- Paris, 2005, p.645
- [3] D. Kumlutas, I. H. Tavman, and M. T. Coban, "Thermal conductivity of particle filled polyéthylène composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 63, pp.113–117, 2003.

2. Position de problème étudié

Le problème que nous examinons dans ce mémoire de master est le suivant :
Connaissant les propriétés thermophysiques des trois matériaux suivants :

- Le poly (méthacrylate de méthyle) : un polymère thermoplastique amorphe
- L'aluminium : un métal non ferreux
- Le verre : un matériau minéral

Nous cherchons à prédire, en nous appuyant sur le modèle théorique de Hashin et Shtrikman, les propriétés thermophysiques suivantes :

- Masse volumique : $\rho(\Phi_r)$
- Capacité thermique : $C(\Phi_r)$
- Conductivité thermique : $\lambda(\Phi_r)$
- Diffusivité thermique : $a(\Phi_r)$

De deux matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al et celles de leurs composites précurseurs (pmma/Al) et (pmma/verre) lorsque les fractions volumiques Φ_r des deux matériaux de renfort varient.

Nous examinons successivement les effets de la nature (Aluminium, verre) et de la forme géométrique (sphérique, cylindrique) des particules de renfort sur le comportement thermique de ces deux matériaux composites hybrides et de leurs composites précurseurs.

3. Données du problème retenues

Pour effectuer ce travail, nous avons retenu les données suivantes que nous jugeons suffisantes du point de vue nombre et de bonne qualité:

- **Poly (méthacrylate de méthyle)**

- Masse volumique : $\rho = 1188 \text{ Kg/m}^3$
- Capacité thermique $C_p = 1600 \text{ J/(Kg} \cdot \text{K)}$
- Conductivité thermique $\lambda = 0.18 \text{ w/(m} \cdot \text{K)}$

- **Aluminium**

- Masse volumique : $\rho = 2700 \text{ Kg/m}^3$
- Capacité thermique $C_p = 897 \text{ J/(Kg} \cdot \text{K)}$
- Conductivité thermique $\lambda = 237 \text{ w/(m} \cdot \text{K)}$

- **Verre**

- Masse volumique : $\rho = 2500 \text{ Kg/m}^3$
- Capacité thermique $C_p = 830 \text{ J/(Kg} \cdot \text{K)}$
- Conductivité thermique $\lambda = 1.2 \text{ w/(m} \cdot \text{K)}$

- **Particules de renfort**

Les particules sphériques et cylindriques de renfort en aluminium et en verre sont supposées avoir le même volume afin de générer la même chaleur volumique : $\gamma = \rho \cdot C_p$.

- **Dimensions retenues**

Rayon de la particule sphérique : r_s

Rayon de la particule cylindrique : $r_c = \frac{r_s}{\sqrt{3}}$

Hauteur de la particule cylindrique : $h = 4 r_s$

Volume de la particule : $V_c = V_s = \frac{4}{3} \pi \cdot r_s^3$

4. Modèle Théorique de Hashin-Shtrikman

Ce modèle a été développé par Hashin et Shtrikman, en 1965, afin de prédire la conductivité thermique des matériaux composites en fonction de la fraction volumique du renfort, pour différentes formes de particule (sphérique, cylindrique, ellipsoïdale).

Dans ce modèle, Hashin et Shtrikman supposent que la conductivité thermique λ_r du renfort est supérieure à celle de la matrice λ_m . Avec cette hypothèse, les auteurs expriment la conductivité thermique effective du matériau composite à matrice polymère par ^[1] :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_m \cdot \frac{1+(d-1) \cdot \beta \cdot \Phi_r}{1-\beta \cdot \Phi_r}$$

Avec
$$\beta = \frac{\lambda_r - \lambda_m}{\lambda_r + (d-1) \cdot \lambda_m}$$

λ_m : Conductivité thermique de la matrice.

λ_r : Conductivité thermique du renfort.

d : est un paramètre qui tient compte de la dimensionnalité du renfort et qui définit la forme des particules d'inclusion.

d= 3 dans le cas des particules sphériques.

d= 2 dans le cas des particules cylindriques.

d = $\frac{A+B+C}{A}$ dans le cas des particules ellipsoïdales

Avec
$$A = \frac{1}{x}, B = \frac{1}{y}, C = \frac{1}{z}$$

x, y, z : étant les axes de la particule de forme ellipsoïdale

5. Grandeurs thermiques :

Pour étudier les influences de la nature et de la forme géométrique des particules de renfort sur le comportement thermique des matériaux composites hybrides (pmma-Aluminium)/verre et (pmma-verre)/Aluminium et de leurs composites précurseurs (pmma/Aluminium) et (pmma/verre), nous avons utilisé en plus du modèle théorique de Hashin-Shtrikman les grandeurs thermiques dont les symboles, les équations de définition, les dimensions et les unités (SI) sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Ce tableau a été rapporté par Sacadura et ses collaborateurs dans leur ouvrage intitulé « Initiation aux transferts thermiques, publié en 1982 aux Editions. Tec & Doc Lavoisier, Paris, France.

Grandeurs	Symboles	Equations de définition	Dimensions	Unités SI
Conductivité thermique	λ	$\lambda = \frac{dQ}{dt \cdot ds} \cdot \frac{1}{\text{grad } T}$	$\frac{M \cdot L^2 \cdot t^{-3}}{L \cdot T}$	$\frac{Watt}{m \cdot k}$
Capacité thermique	C	$C = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT}$	$\frac{M \cdot L^2 \cdot t^{-2}}{M \cdot T}$	$\frac{Joule}{Kg \cdot k}$
Diffusivité thermique	a	$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$	$L^2 \cdot t^{-1}$	$\frac{m^2}{s}$
Effusivité thermique	b	$b = (\lambda \cdot \rho \cdot C)^{1/2}$	$\frac{M \cdot L^2 \cdot t^{-2}}{L^2 \cdot T \cdot t^{1/2}}$	$\frac{Joule}{m^2 \cdot K \cdot S^{1/2}}$

Tableau : Grandeurs thermiques [2]

Références bibliographiques :

[1] mémoire de master « Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermo physiques des matériaux composites à matrice polymère » Hadadi manel. 2010/2011

[2] J.F SACADURA, Initiation aux transferts thermiques, Ed. Tec & Doc Lavoisier, Paris 1982, P25, 445.

6. RESULTATS ET DISCUSSIONS

6.1. Influence de la nature du renfort sur le comportement thermique des matériaux composites hybrides à matrice polymère (pmma-Al)/verre, (pmma-verre)/Al et de leurs composites précurseurs (pmma/Al), (pmma/verre), à particules de renfort sphériques.

6.1.1 Cas du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre et de son composite précurseur (pmma/Al)

Dans cette première partie de notre travail, nous examinons l'influence de la nature des particules de renfort sur le comportement thermique des matériaux composites hybrides et de leurs matériaux composites précurseurs.

Par matériau composite hybride, nous entendons un matériau composite constitué de deux phases discontinues (renforts) de natures différentes dispersées dans une phase continue (matrice).

Dans notre cas, il s'agit d'une matrice thermoplastique en poly (méthacrylate de méthyle) dans laquelle sont dispersées des particules de verre et des particules d'aluminium.

Pour effectuer cette partie de notre travail, nous nous appuyons sur le modèle théorique de Hashin et Shtrikman pour examiner les effets de la nature de renfort sur la conductivité thermique λ et la diffusivité thermique a des deux matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre, (pmma-verre)/Al et de leurs composites précurseurs respectifs pmma/Al et pmma/verre.

Pour ce faire, nous choisissons des particules de renfort de forme sphériques ($d=3$).

1. Matériau composite pmma/Al :

1.1. Conductivité thermique :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{pmma}} \cdot \frac{1+(d-1) \Phi_{\text{Al}} \cdot \beta}{1-\Phi_{\text{Al}} \cdot \beta} \quad (1)$$

$$\text{Avec } \beta = \frac{\lambda_{\text{Al}} - \lambda_{\text{pmma}}}{\lambda_{\text{Al}} + (d-1) \cdot \lambda_{\text{pmma}}} \quad (2)$$

$$\beta = 0.9977249747 \quad (3)$$

La variation de la conductivité thermique du matériau composite pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium s'écrit :

$$\lambda_{\text{pmma/Al}} = \frac{0.18(1+1.995449949 \cdot \Phi_{\text{Al}})}{(1-0.9977549747 \cdot \Phi_{\text{Al}})} \quad (4)$$

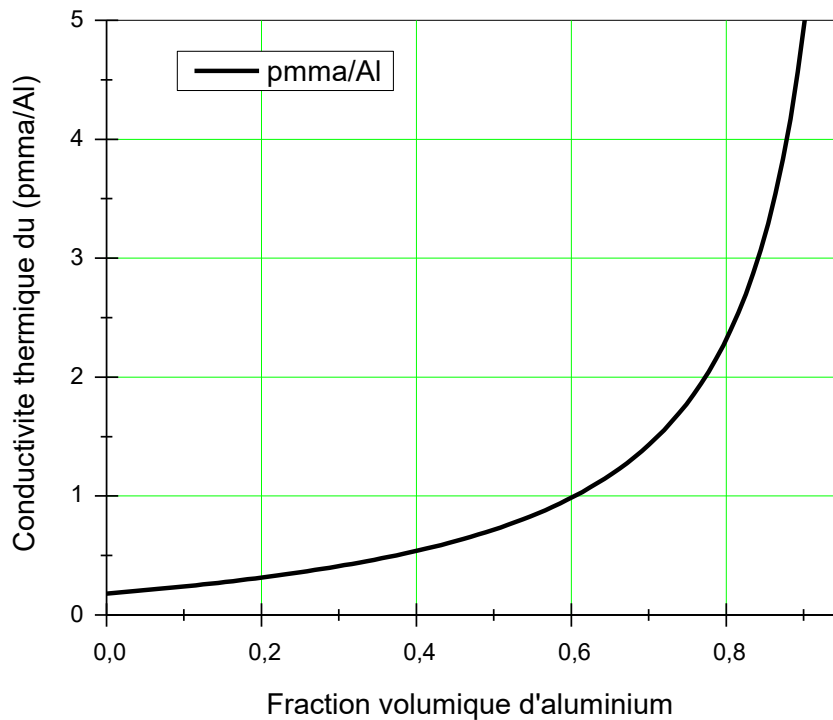


Fig. 1 : variation de la conductivité thermique du pmma /Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 1 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique d'aluminium provoque une augmentation de la conductivité thermique du matériau composite pmma/Al.

1.2. Capacité thermique :

Pour déterminer la loi de variation de la capacité thermique du matériau composite en fonction de la fraction volumique du renfort, nous appliquons la loi des mélanges :

$$C_{\text{composite}} = \Phi_r \cdot C_{\text{pr}} + (1 - \Phi_r) \cdot C_{\text{pm}} \quad (5)$$

C_{pm} : capacité thermique de la matrice polymère.

C_{pr} : capacité thermique du matériau de renfort

Φ_r : fraction volumique du matériau de renfort

La variation de la capacité thermique du matériau composite pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium s'écrit :

$$C_{\text{pmma/Al}} = \Phi_{\text{Al}} \cdot C_{\text{Al}} + (1 - \Phi_{\text{Al}}) \cdot C_{\text{pmma}} \quad (6)$$

$$C_{\text{pmma/Al}} = -703\Phi_{\text{Al}} + 1600 \quad (7)$$

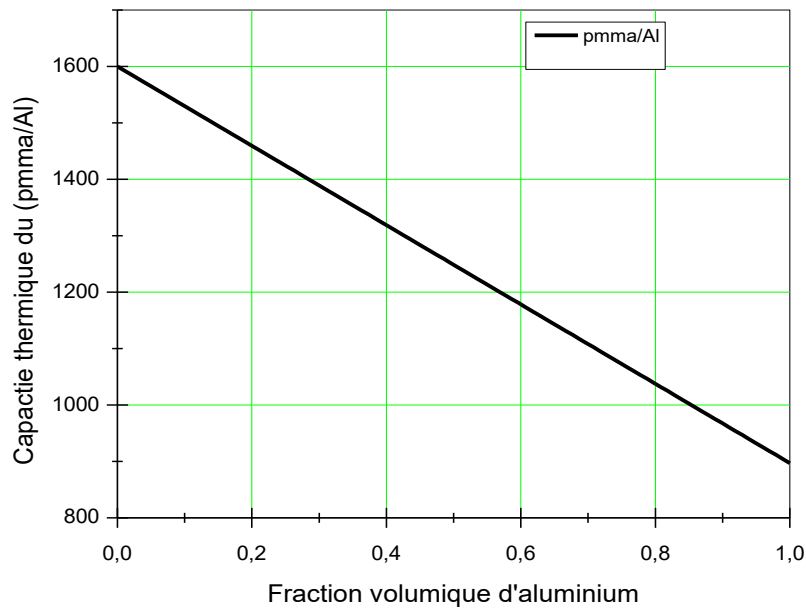


Fig. 2 : variation de la capacité thermique du pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 2 représente la variation de la capacité thermique C_p du matériau composite pmma/Al en fonction de la fraction volumique des particules sphériques d'aluminium Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre que la capacité thermique du matériau composite pmma/Al décroît avec l'augmentation de la fraction volumique d'aluminium.

1.3. Masse volumique :

Pour établir la loi de variation de la masse volumique du matériau composite pmma/Al) en fonction de la fraction volumique d'aluminium, nous appliquons la loi des mélanges :

$$\rho_{\text{composite}} = \rho_m + (\rho_r - \rho_m) \Phi_r \quad (8)$$

$\rho_{\text{composite}}$: masse volumique du composite

ρ_m : masse volumique de la matrice

ρ_r : masse volumique du renfort

La variation de la masse volumique du matériau composite PMMA/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium s'écrit :

$$\rho_{\text{pmma/Al}} = \rho_{\text{pmma}} + (\rho_{\text{Al}} - \rho_{\text{pmma}}) \cdot \Phi_{\text{Al}} \quad (9)$$

$$\rho_{\text{pmma/Al}} = 1188 + 1512 \cdot \Phi_{\text{Al}} \quad (10)$$

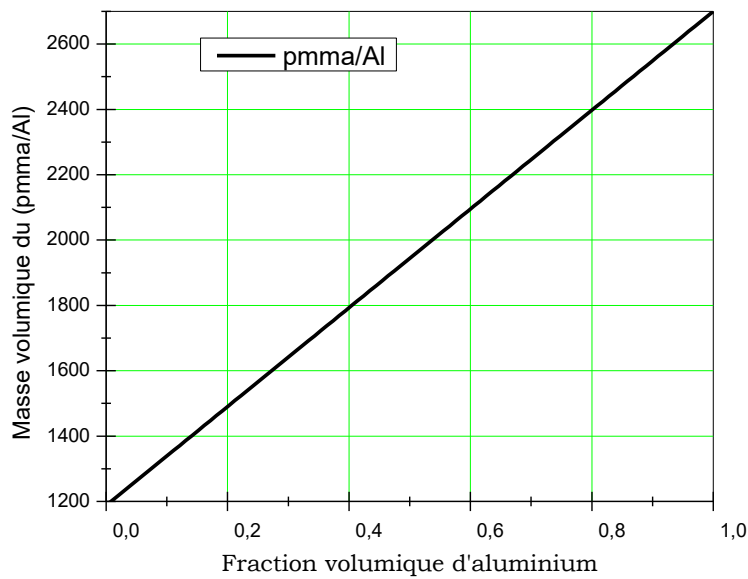


Fig. 3 : variation de la masse volumique du pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 3 représente la variation de la masse volumique ρ du matériau composite pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium Φ_{Al} . Cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique d'aluminium induit une augmentation de la masse volumique du matériau composite conformément à la formule de définition de la masse volumique d'un matériau composite $\rho_{\text{composite}} = \rho_m + (\rho_r - \rho_m) \Phi_r$

1.4. Diffusivité thermique :

$$a_{\text{composite}} = \frac{\lambda_{\text{composite}}}{\rho_{\text{composite}} \cdot C_{\text{composite}}} \quad (11)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium s'écrit :

$$a_{\text{pmma/Al}} = \frac{4(4.5 \cdot 10^8 + 8.97 \cdot 10^{10} \cdot \Phi_{\text{Al}})}{((-1 \cdot 10^{10} + 9.97 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{\text{Al}})(703 \Phi_{\text{Al}} - 1600)(1188 + 1512 \Phi_{\text{Al}}))} \quad (12)$$

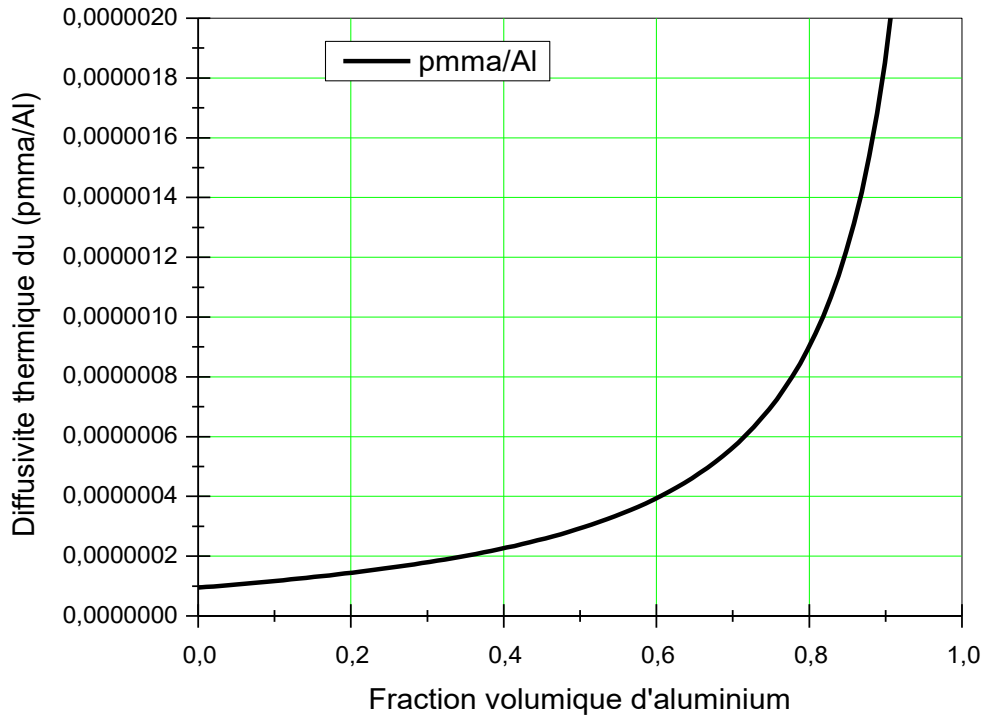


Fig. 4 : variation de la diffusivité thermique du pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 4 représente la variation de la diffusivité thermique du matériau composite pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique d'aluminium croît, la diffusivité thermique du pmma/Al varie dans le même sens que la conductivité thermique, résultat prédit par la formule de définition de la diffusivité thermique $a = \lambda / \rho \cdot C$.

2. Matériau composite hybride (pmma-Al)/verre

2.1. Conductivité thermique :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{pmma/Al}} \cdot \frac{1 + (d-1) \Phi_{\text{verre}} \cdot \beta}{1 - \Phi_{\text{verre}} \cdot \beta} \quad (13)$$

$$\text{Avec } \beta = \frac{\lambda_{\text{verre}} - \lambda_{\text{pmma/Al}}}{\lambda_{\text{verre}} + (d-1) \cdot \lambda_{\text{pmma/Al}}} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{0.38461e-3(-1.70000 \cdot 10^{10} + 2.59408 \cdot 10^{10} \Phi_{\text{Al}})}{(-1.00000 \cdot 10^7 + 3.06992 \cdot 10^6 \cdot \Phi_{\text{Al}})} \quad (15)$$

La variation de la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction des deux fractions volumiques des deux renforts s'écrit

$$\lambda(\text{pmma} - \text{Al})/\text{verre} = \frac{(-4.6 \cdot 10^{10} + 14.1 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{\text{Al}} - 6.1 \cdot 10^{10} \Phi_{\text{verre}} + 9 \cdot 10^{10} \cdot \Phi_{\text{verre}} \cdot \Phi_{\text{Al}})}{(3.610^9 + 7.2 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{\text{Al}})} \quad (16)$$

$$\frac{((-10^{10} + 9.97 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{\text{Al}}) \cdot (2.6 \cdot 10^{10} - 2.498 \cdot 10^{10} \cdot \Phi_{\text{Al}} + 2.594 \cdot 10^{10} \cdot \Phi_{\text{Al}}^2))}{}$$

Dans le cas du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre, les fractions volumiques doivent vérifier la relation suivante :

$$\Phi_{\text{pmma}} + \Phi_{\text{Al}} + \Phi_{\text{verre}} = 1 \quad (17)$$

En réservant une fraction volumique de 50% à la matrice en pmma, nous avons :

$$\Phi_{\text{Al}} + \Phi_{\text{verre}} = 0.5 \quad (18)$$

Soit :

$$\Phi_{\text{Al}} = 0.5 - \Phi_{\text{verre}} \quad (19)$$

La variation de la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du verre s'écrit :

$$\lambda(\text{pmma} - \text{Al})/\text{verre} = \frac{(38.088 \cdot 10^8 + 27.75 \cdot 10^8 \cdot \Phi_{\text{verre}} + 8.97 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{\text{verre}}^2)(1.99 \cdot 10^9 + 1.99 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{\text{verre}})}{((-2.11 \cdot 10^9 - 3.80 \cdot 10^8 \cdot \Phi_{\text{verre}} + 5.01 \cdot 10^9 + 9.97 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{\text{verre}} + 2.49 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{\text{verre}}^2))} \quad (20)$$

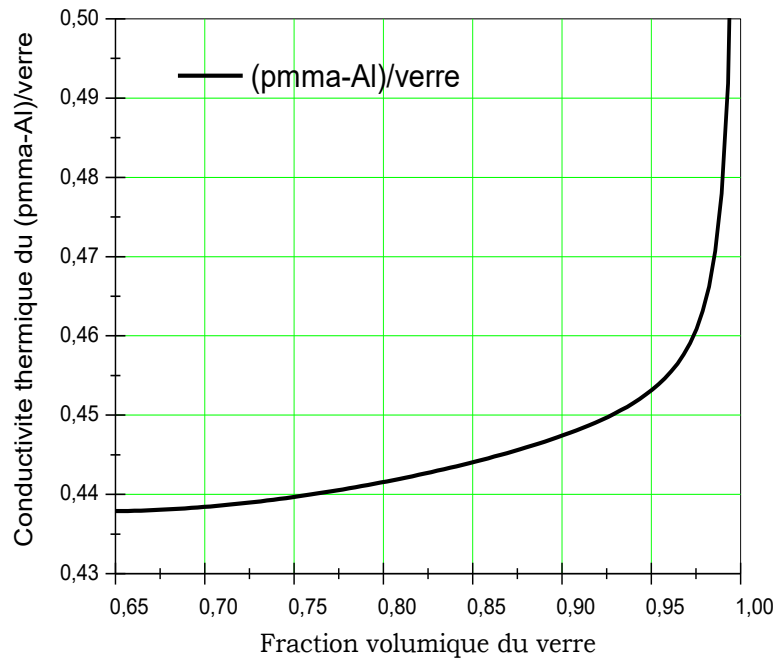


Fig. 5 : variation de la conductivité thermique du (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 5 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique des particules du verre Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre croît avec l'augmentation de la fraction volumique des particules sphériques du renfort en verre.

2.2. Capacité thermique :

$$C_{(\text{pmma-Al})/\text{verre}} = \Phi_{\text{verre}} \cdot C_{\text{verre}} + (1 - \Phi_{\text{verre}}) \cdot C_{\text{pmma-Al}} \quad (21)$$

La variation de la capacité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction des deux fractions volumiques des deux matériaux de renfort s'écrit

$$C_{(\text{pmma-Al})/\text{verre}} = -770 \cdot \Phi_{\text{verre}} - 703 \cdot \Phi_{\text{Al}} + 703 \Phi_{\text{Al}} \Phi_{\text{verre}} \quad (22)$$

Avec :

$$\Phi_{Al} = 0.5 - \Phi_{verre} \quad (23)$$

La variation de la capacité thermique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique du verre devient :

$$C \text{ (pmma-Al)/verre} = 284.5 \cdot \Phi_{verre} + 1248.5 - 703 \cdot \Phi_{verre}^2 \quad (24)$$

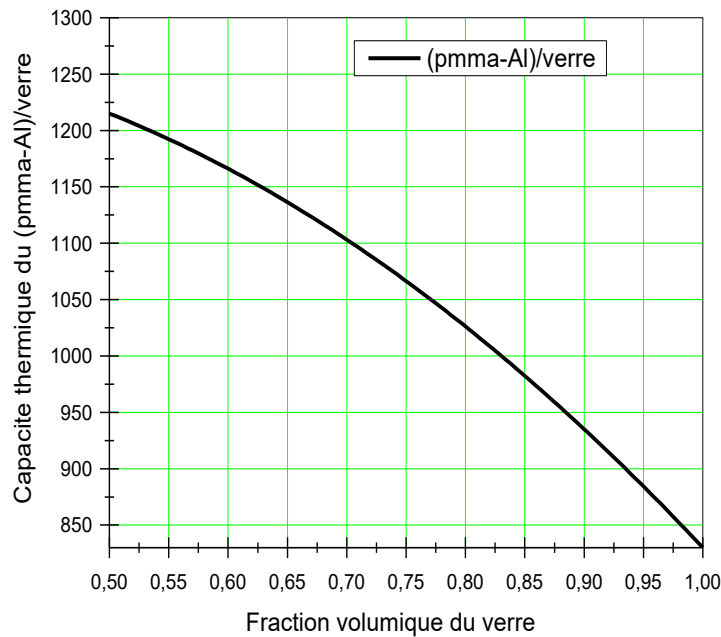


Fig. 6 : variation de la capacité thermique du (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 6 représente la variation de la capacité thermique C_p du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du renfort verre Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que la capacité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre décroît lorsque la fraction volumique du renfort augmente, ce résultat est prédit par la formule de définition de la capacité thermique d'un matériau composite hybride (loi des mélanges)

2.3. Masse volumique :

$$\rho \text{ (pmm-Al)/verre} = \rho_{pmma/Al} + (\rho_{verre} - \rho_{pmma/Al}) \cdot \Phi_{verre} \quad (25)$$

La variation de la masse volumique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction des deux fractions volumiques des deux matériaux de renfort s'écrit

$$\rho_{(pmma-Al)/verre} = 1188 + 1512 \cdot \Phi_{Al} + (1312 \cdot \Phi_{verre} - 1512 \cdot \Phi_{Al}) \Phi_{verre} \quad (26)$$

Avec :

$$\Phi_{Al} = 0.5 - \Phi_{verre} \quad (27)$$

La variation de la masse volumique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique du verre devient :

$$\rho_{(pmma-Al)/verre} = 1944 - 956 \cdot \Phi_{verre} + 1512 \cdot \Phi_{verre}^2 \quad (28)$$

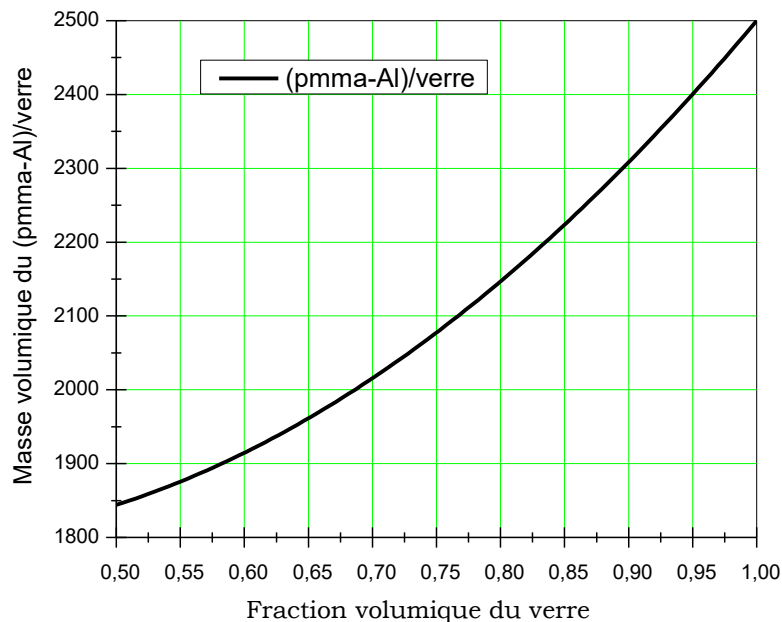


Fig. 7 : variation de la masse volumique du (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 7 représente la variation de la masse volumique ρ du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du verre Φ_{verre} . Cette figure montre que la masse volumique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre augmente avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort, résultat prédit par la formule de définition de la masse volumique d'un matériau composite hybride.

2.4. Diffusivité thermique :

$$a_{(pmma-Al)verre} = \frac{\lambda_{(pmma-Al)verre}}{\rho_{(pmma-Al)verre} \cdot C_{(pmma-Al)verre}} \quad (29)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction des deux fractions volumiques des deux matériaux de renfort s'écrit :

$$a_{(pmma-Al)verre} = \frac{-\left(0.9(-1.25 \cdot 10^9 + 3.85 \cdot 10^8 \cdot \Phi_{Al} - 1.63 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{verre} + 2.49 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{verre} \Phi_{Al})\right)}{(10^9 + 1.95 \cdot 10^9 \Phi_{Al})} \quad (30)$$

$$\frac{\left(\left(2.5 \cdot 10^9 - 7.67 \cdot 10^8 \Phi_{Al} - 1.63 \cdot 10^9 \Phi_{verre} + 2.49 \cdot 10^9 \Phi_{verre} \Phi_{Al}\right)\right)}{\left(-10^{10} + 9.97 \cdot 10^9 \Phi_{Al}\right) \left(-297 - 378 \Phi_{Al} (-770 \Phi_{verre} - 703 \Phi_{Al} + 1600 + 703 \Phi_{verre} \Phi_{Al}) - 378 \Phi_{verre} (-770 \Phi_{verre} - 703 \Phi_{Al} + 1600 + 703 \Phi_{verre} \Phi_{Al}) + 378 \Phi_{verre} (-770 \Phi_{verre} - 703 \Phi_{Al} + 1600 + 703 \Phi_{verre} \Phi_{Al}) \Phi_{Al} (-770 \Phi_{verre} - 703 \Phi_{Al} + 1600 + 703 \Phi_{verre} \Phi_{Al})\right)}$$

Avec :

$$\Phi_{Al} = 0.5 - \Phi_{verre} \quad (31)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique du verre devient :

$$a_{(pmma-Al)verre} = \frac{\left(01.8(5.29 \cdot 10^8 + 3.85 \cdot 10^8 \Phi_{verre} + 1.24 \cdot 10^9 \Phi_{verre}^2)\right)}{\left(-1.99 \cdot 10^9 + 1.99 \cdot 10^9 \Phi_{verre}\right)} \quad (32)$$

$$\frac{\left(\left(-2.11 \cdot 10^9 - 3.8 \cdot 10^8 \Phi_{verre} + 2.49 \cdot 10^9 \Phi_{verre}^2\right)\right) \left(5.01 \cdot 10^9 + 9.97 \cdot 10^9 \Phi_{verre}\right)}{\left(486 - 239 \Phi_{verre} (284.5 \Phi_{verre} + 1248.5 - 703 \Phi_{verre}^2) + 378 (284.5 \Phi_{verre} + 1248.5 - 703 \Phi_{verre}^2)^2\right)}$$

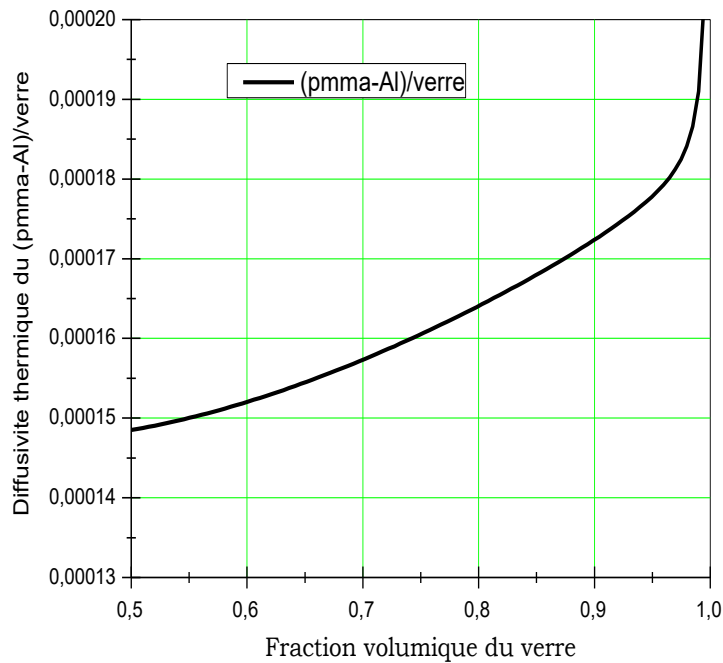


Fig. 8 : variation de la diffusivité thermique du (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 8 représente la variation de la diffusivité thermique **a** du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du renfort verre Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique du renfort augmente, la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre varie dans le même sens que la conductivité thermique du (pmma-Al)/verre, résultat prédit par l'équation de définition de la diffusivité thermique $a = \lambda / \rho \cdot C$.

6.1.2 Cas du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al et de son composite précurseur (pmma/verre)

1. Matériau composite pmma/verre :

1.1. Conductivité thermique :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{pmma}} \cdot \frac{1+(d-1) \Phi_{\text{verre}} \cdot \beta}{1-\Phi_{\text{verre}} \cdot \beta} \quad (33)$$

$$\text{Avec } \beta = \frac{\lambda_{\text{verre}} - \lambda_{\text{pmma}}}{\lambda_{\text{verre}} + (d-1) \cdot \lambda_{\text{pmma}}} \quad (34)$$

$$\beta = 0.683846153 \quad (35)$$

La de variation de la conductivité thermique du matériau composite pmma/verre en fonction de la fraction volumique du verre s'écrit :

$$\lambda_{\text{pmma/verre}} = \frac{0.18(1+1.30769 \cdot \Phi_{\text{verre}})}{(1-0.6538467 \cdot \Phi_{\text{verre}})} \quad (36)$$

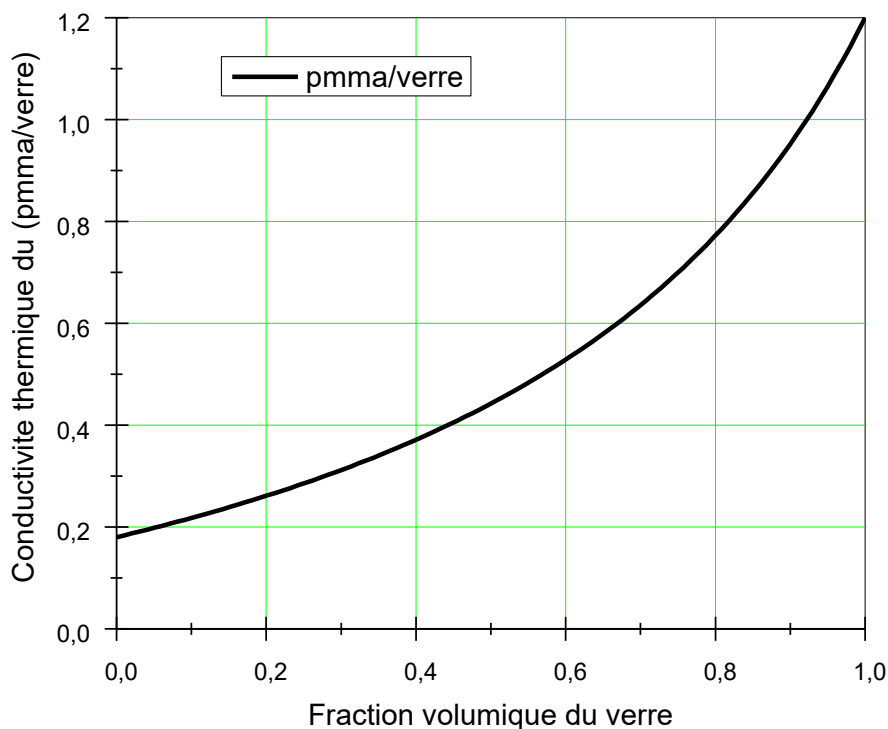


Fig. 9 : variation de la conductivité thermique du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 9 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du verre Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que la conductivité thermique du matériau composite (pmma/verre) augmente lorsque la fraction volumique du verre augmente. Ceci est dû au fait que la conductivité thermique du verre ($\lambda_{\text{verre}}=1.2 \text{ w/m.k}$) soit supérieure à la conductivité thermique du poly (méthacrylate de méthyle) ($\lambda_{\text{pmma}}=0.18 \text{ w/m.k}$).

1.2. Capacité thermique :

La variation de la capacité thermique du matériau composite pmma/verre en fonction de la fraction volumique du verre s'écrit :

$$C_{\text{pmma/verre}} = \Phi_{\text{verre}} \cdot C_{\text{verre}} + (1 - \Phi_{\text{verre}}) \cdot C_{\text{pmma}} \quad (37)$$

$$C_{\text{pmma/verre}} = -770 \Phi_{\text{verre}} + 1600 \quad (38)$$

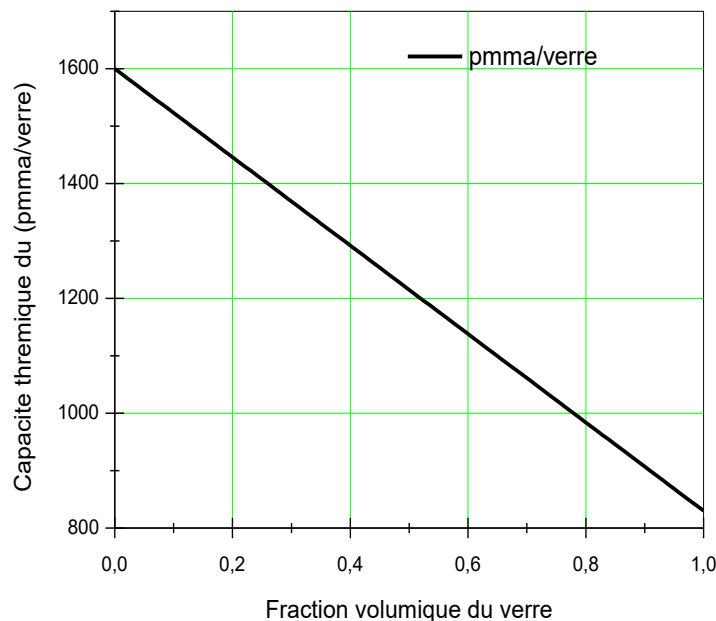


Fig. 10 : variation de la capacité thermique du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 10 représente la variation de la capacité thermique du matériau composite pmma/verre en fonction de la fraction volumique du verre Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique du verre augmente, la capacité thermique du matériau composite pmma/verre

diminue parce que la capacité thermique du poly (méthacrylate de méthyle) ($C_{\text{pmma}}=1600\text{j/kg.k}$) est plus grande que la capacité thermique du verre ($C_{\text{verre}}=830\text{j/kg.k}$).

1.3. Masse volumique :

La variation de la masse volumique du matériau composite pmma/verre en fonction de la fraction volumique d'aluminium s'écrit :

$$\rho_{\text{pmma/verre}} = \rho_{\text{pmma}} + (\rho_{\text{verre}} - \rho_{\text{pmma}}) \cdot \Phi_{\text{verre}} \quad (39)$$

$$\rho_{\text{pmma/verre}} = 1188 + 1312 \cdot \Phi_{\text{verre}} \quad (40)$$

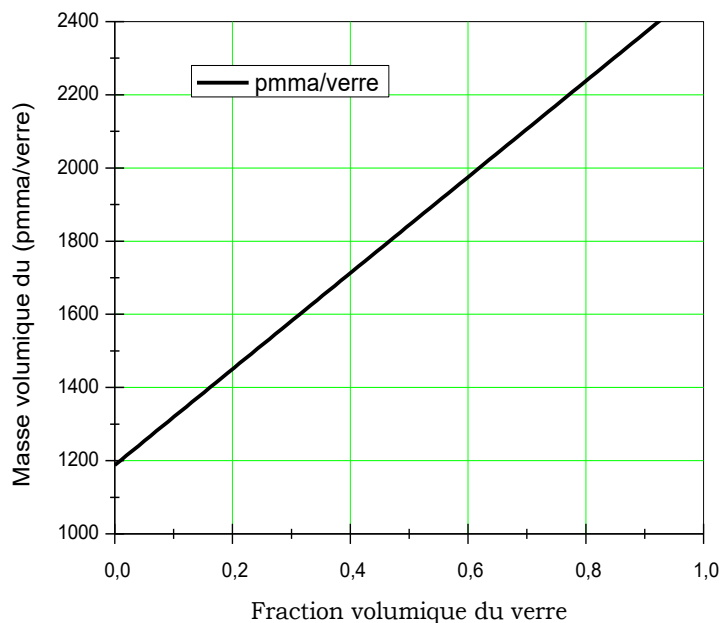


Fig. 11 : variation de la masse volumique du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du verre

La figure11 représente la variation de la masse volumique ρ du matériau composite pmma/verre en fonction de la fraction volumique du verre Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que la masse volumique du matériau composite pmma/verre augmente avec l'augmentation de la fraction volumique du verre, pour la même raison évoquée précédemment.

1.4. Diffusivité thermique :

$$a_{\text{pmma/verre}} = \frac{\lambda_{\text{pmma/verre}}}{\rho_{\text{pmma/verre}} \cdot C_{\text{pmma/verre}}} \quad (41)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite pmma/verre en fonction de la fraction volumique d'aluminium s'écrit :

$$a_{\text{pmma/verre}} = \frac{0.1(9.10^8 + 1.17.10^9 \cdot \Phi_{\text{verre}})}{((-5.10^9 + 3.26.10^9 \cdot \Phi_{\text{verre}})(770 \cdot \Phi_{\text{verre}} - 1600)(1188 + 1312 \cdot \Phi_{\text{verre}}))} \quad (42)$$

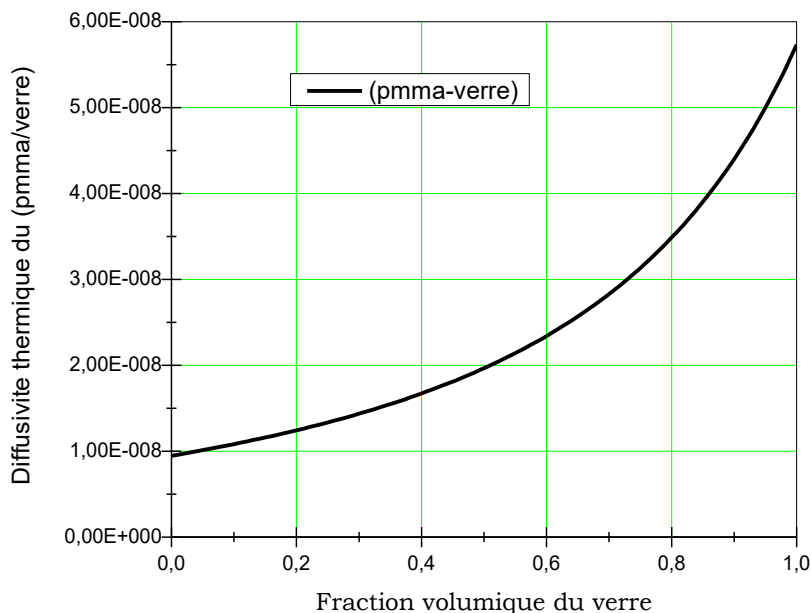


Fig. 12 : variation de la diffusivité thermique du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 12 représente la variation de la diffusivité thermique a du matériau composite (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du verre Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique du verre augmente, la diffusivité thermique du matériau composite pmma/verre varie dans le même sens que la conductivité thermique du pmma/verre, résultat prédit par la formule de définition $a = \lambda / \rho \cdot C$.

2. Matériau composite hybride pmma-verre)/Al :

2.1. Conductivité thermique :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{pmma/verre}} \cdot \frac{1+(d-1) \Phi_{\text{Al}} \cdot \beta}{1-\Phi_{\text{Al}} \cdot \beta} \quad (43)$$

$$\text{Avec } \beta = \frac{\lambda_{\text{Al}} - \lambda_{\text{pmma/verre}}}{\lambda_{\text{Al}} + (d-1) \cdot \lambda_{\text{pmma/verre}}} \quad (44)$$

$$\beta = \frac{-1.973 \cdot 10^{12} + 1.293 \cdot 10^{12} \cdot \Phi_{\text{verre}}}{-1.978 \cdot 10^{12} + 1.287 \cdot 10^{12} \cdot \Phi_{\text{verre}}} \quad (45)$$

La variation de la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction des deux fractions volumiques des deux matériaux de renfort s'écrit :

$$\lambda_{(\text{pmma-verre})/\text{Al}} = \frac{(-7.12 \cdot 10^{12} + 4.631 \cdot 10^{12} \Phi_{\text{verre}} - 14.20 \cdot 10^{12} \Phi_{\text{Al}} + 9.30 \cdot 10^{12} \Phi_{\text{verre}} \Phi_{\text{Al}}) \cdot (-2.5 \cdot 10^8 + 3.26 \cdot 10^8 \Phi_{\text{verre}})}{(((-5.10^9 + 3.26 \cdot 10^9 \Phi_{\text{verre}}) \cdot (1.97 \cdot 10^{12} - 1.287 \cdot 10^{12} \Phi_{\text{verre}} - 1.97 \cdot 10^{12} \Phi_{\text{Al}} + 1.29 \cdot 10^{12} \Phi_{\text{verre}} \Phi_{\text{Al}}))} \quad (46)$$

Avec :

$$\Phi_{\text{verre}} = 0.5 - \Phi_{\text{Al}} \quad (47)$$

La variation de la conductivité thermique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique d'aluminium devient :

$$\lambda_{(\text{pmma-verre})/\text{Al}} = \frac{(2.40 \cdot 10^9 + 7.0989 \cdot 10^9 \Phi_{\text{Al}} + 4.65 \cdot 10^9 \Phi_{\text{Al}}^2) \cdot (-8.26 \cdot 10^8 + 6.53 \cdot 10^8 \Phi_{\text{Al}})}{((-1.33 \cdot 10^9 + 3.94 \cdot 10^7 \Phi_{\text{Al}} + 1.29 \cdot 10^9 \Phi_{\text{Al}}^2) \cdot (3.36 \cdot 10^9 + 3.26 \cdot 10^9 \Phi_{\text{Al}})} \quad (48)$$

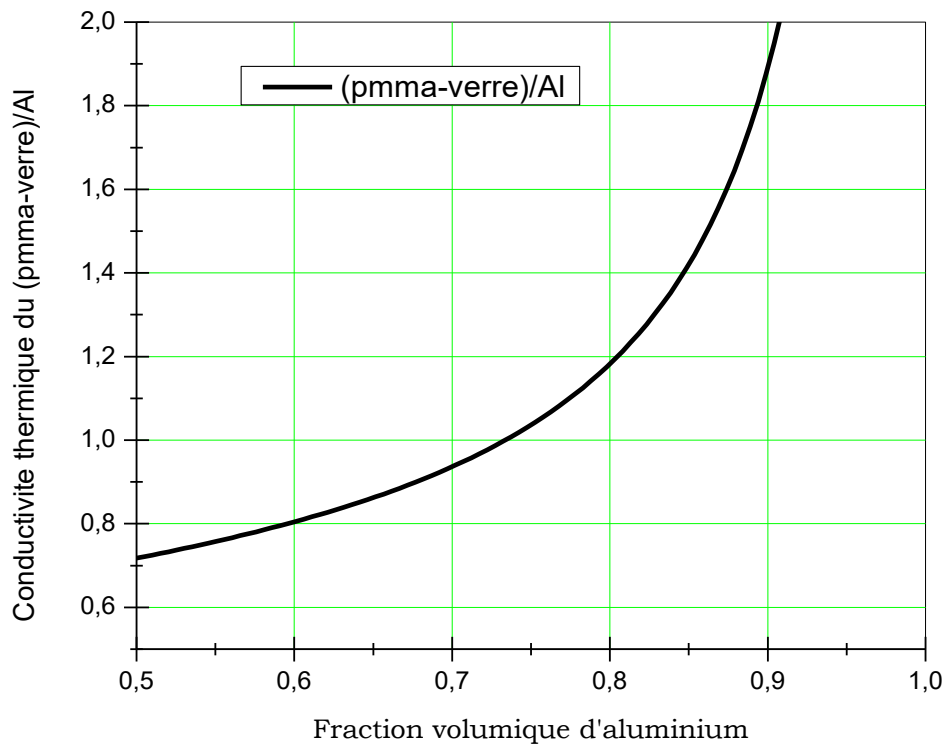


Fig. 13 : variation de la conductivité thermique du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 13 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du renfort Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique d'aluminium provoque une augmentation de la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al.

2.2. Capacité thermique :

$$C_{(pmma-verre)/Al} = \Phi_{Al} \cdot C_{Al} + (1 - \Phi_{Al}) \cdot C_{pmma-verre} \quad (49)$$

La variation de la capacité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction des deux fractions volumiques des deux matériaux de renfort s'écrit :

$$C_{(pmma-verre)/Al} = -703\Phi_{Al} - 770\Phi_{verre} + 1600 + 770\Phi_{verre}\Phi_{Al} \quad (50)$$

Avec :

$$\Phi_{\text{verre}} = 0.5 - \Phi_{\text{Al}} \quad (51)$$

La variation de la capacité thermique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique d'aluminium devient :

$$C_{(\text{pmma-verre})/\text{Al}} = 452\Phi_{\text{Al}} + 1215 - 770\Phi_{\text{Al}}^2 \quad (52)$$

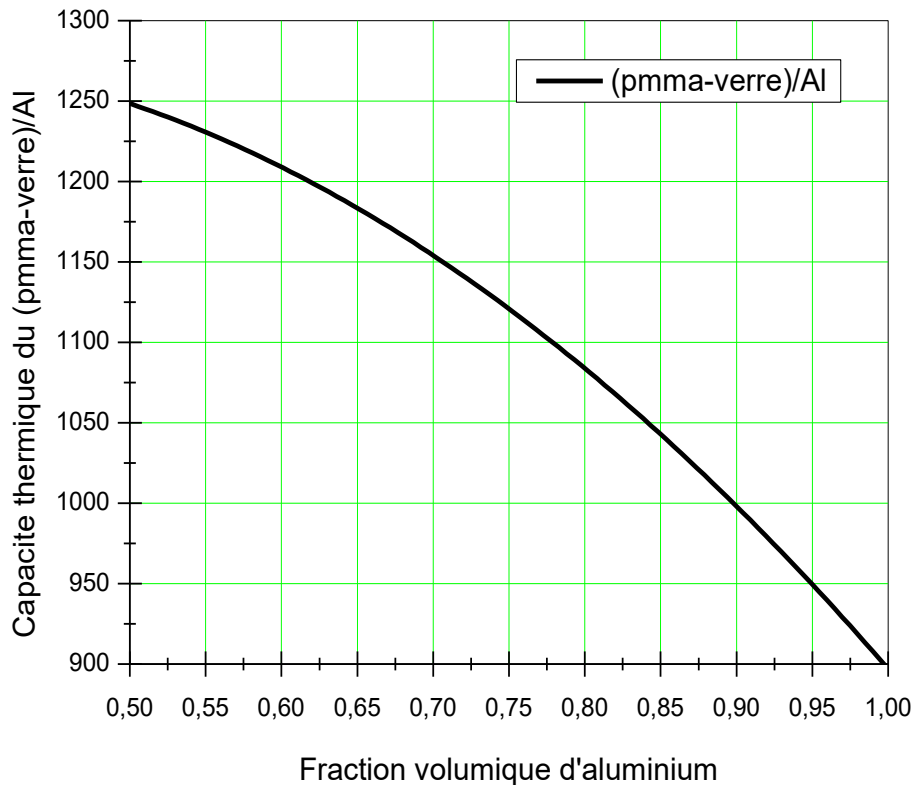


Fig. 14 : variation de la capacité thermique du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 14 représente la variation de la capacité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du renfort Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique d'aluminium augmente la capacité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al diminue, conformément à la formule de définition de la capacité thermique d'un matériau composite hybride.

2.3. Masse volumique :

$$\rho_{(\text{pmm-verre})/\text{Al}} = \rho_{\text{pmma/verre}} + (\rho_{\text{Al}} - \rho_{\text{pmma/verre}}) \cdot \Phi_{\text{Al}} \quad (53)$$

La variation de la masse volumique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction des deux fractions volumiques des deux matériaux de renfort s'écrit

$$\rho_{(pmma-verre)/Al} = 1188 + 1312 \cdot \Phi_{verre} + (1512 - 1312 \cdot \Phi_{verre}) \Phi_{Al} \quad (54)$$

Avec :

$$\Phi_{verre} = 0.5 - \Phi_{Al} \quad (55)$$

La variation de la masse volumique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique d'aluminium devient :

$$\rho_{(pmma-verre)/Al} = 1844 - 456 \Phi_{Al} + 1312 \cdot \Phi_{Al}^2 \quad (56)$$

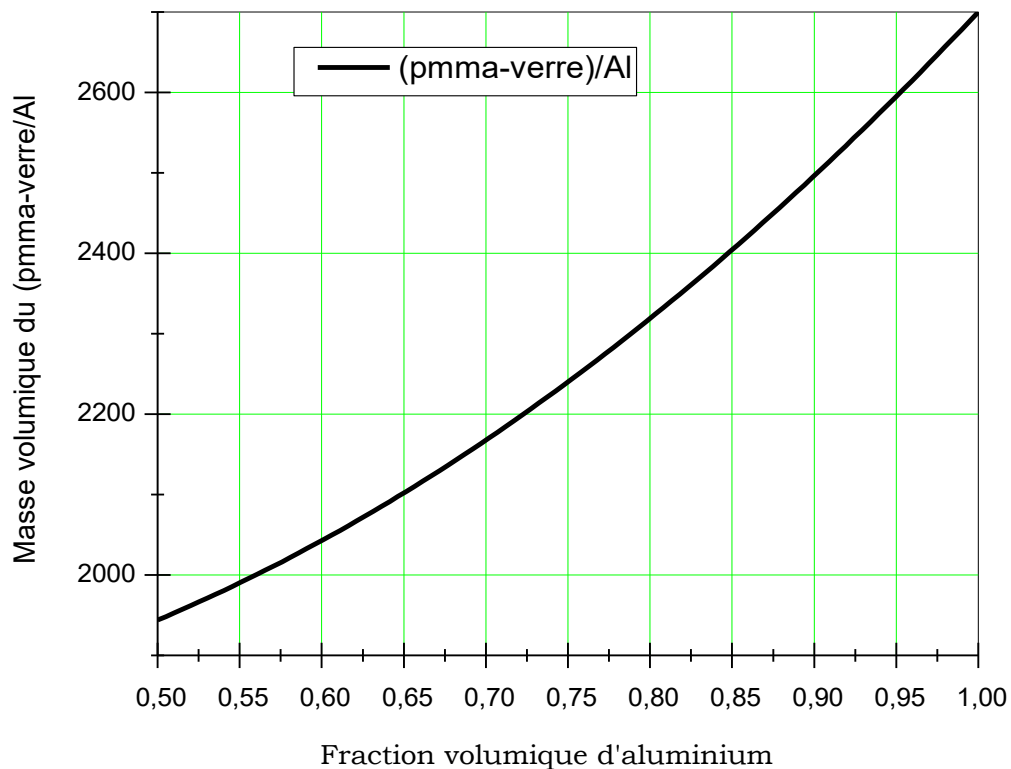


Fig. 15 : variation de la masse volumique du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 15 représente la variation de la masse volumique ρ du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du

renfort Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre que la masse volumique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des particules sphériques d'aluminium Φ_{Al} . Cette augmentation se traduit par la formule de définition

$$\rho_{(pmma-verre)/Al} = \rho_{pmma-verre} + (\rho_{Al} - \rho_{pmma-verre}) \cdot \Phi_{Al}$$

2.4. Diffusivité thermique :

$$a_{(pmma-verre)/Al} = \frac{\lambda_{(pmma-verre)/Al}}{\rho_{(pmma-verre)/Al} \cdot C_{(pmma-verre)/Al}} \quad (57)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction des deux fractions volumiques des deux matériaux de renfort s'écrit :

$$a_{(pmma-Al)verre} = \frac{-0.9 \cdot (-1.97 \cdot 10^9 + 1.28 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{verre} - 3.94 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{Al} + 2.58 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{Al} \cdot \Phi_{verre})}{(2.5 \cdot 10^8 + 3.26 \cdot 10^8 \cdot \Phi_{verre})} \cdot \frac{((1.97 \cdot 10^9 - 1.28 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{verre} - 1.79 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{Al} + 1.29 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{verre} \cdot \Phi_{Al})}{(-5.10^9 + 3.26 \cdot 10^9 \cdot \Phi_{verre}) \cdot (-297 - 328 \cdot \Phi_{verre} \cdot (-703 \cdot \Phi_{Al} - 770 \cdot \Phi_{verre} + 1600 + 770 \cdot \Phi_{Al} \cdot \Phi_{verre}) - 328 \cdot \Phi_{Al} \cdot (-703 \cdot \Phi_{Al} - 770 \cdot \Phi_{verre} + 1600 + 770 \cdot \Phi_{Al} \cdot \Phi_{verre}) + 328 \cdot \Phi_{Al} \cdot (-703 \cdot \Phi_{Al} - 770 \cdot \Phi_{verre} + 1600 + 770 \cdot \Phi_{Al} \cdot \Phi_{verre}) \cdot \Phi_{verre} \cdot (-703 \cdot \Phi_{Al} - 770 \cdot \Phi_{verre} + 1600 + 770 \cdot \Phi_{Al} \cdot \Phi_{verre}))} \quad (58)$$

Avec :

$$\Phi_{verre} = 0.5 - \Phi_{Al} \quad (59)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique d'aluminium devient :

$$a_{(pmma-verre)/Al} = \frac{(4.5(1 \cdot 10^9 + 3.94 \cdot 10^9 \Phi_{Al} + 2.58 \cdot 10^9 \Phi_{Al}^2))(-8.26 \cdot 10^8 + 6.53 \cdot 10^8 \Phi_{Al})}{((-1.33 \cdot 10^9 + 3.94 \cdot 10^7 \Phi_{Al} + 1.29 \cdot 10^9 \Phi_{Al}^2)(3.36 \cdot 10^9 + 3.26 \cdot 10^9 \Phi_{Al} + 461 - 114 \Phi_{Al}(1844 - 456 \Phi_{Al} + 1312 \Phi_{Al}^2) + 328 \Phi_{Al}(1844 - 456 \Phi_{Al} + 1312 \Phi_{Al}^2)^2))} \quad (60)$$

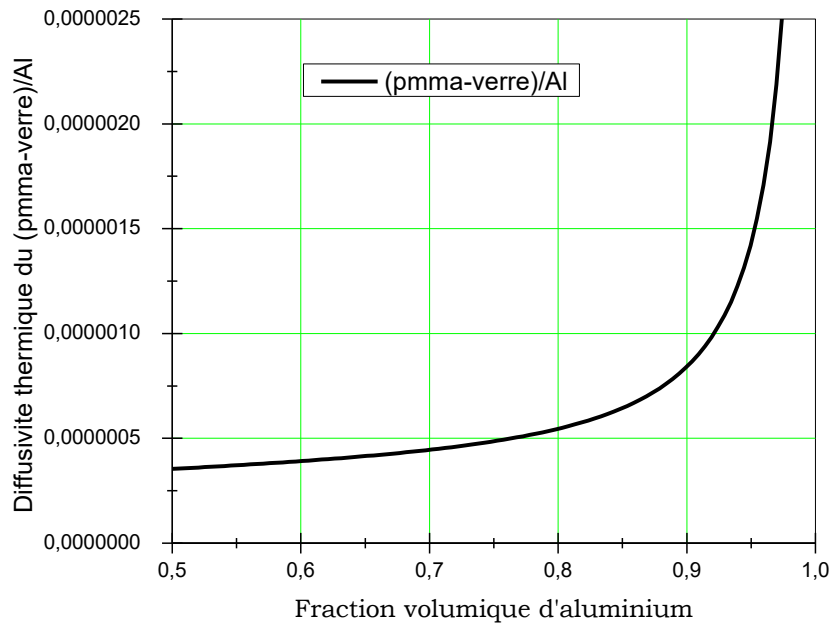


Fig. 16 : variation de la diffusivité thermique du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 16 représente la variation de la diffusivité thermique a du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du renfort Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre quand la fraction volumique des particules sphériques du renfort croît, la diffusivité thermique varie dans le même sens que la conductivité thermique du matériau composite hybride du (pmma-verre)/Al, résultat prédit par le formule de définition $a = \lambda / \rho \cdot C$.

6.1.3. Etude comparative du comportement thermique des matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al et de leurs composites précurseurs (pmma/Al) et (pmma/verre).

6.1.3.1. Conductivité thermique des matériaux composites : Pmma/Al et pmma/verre

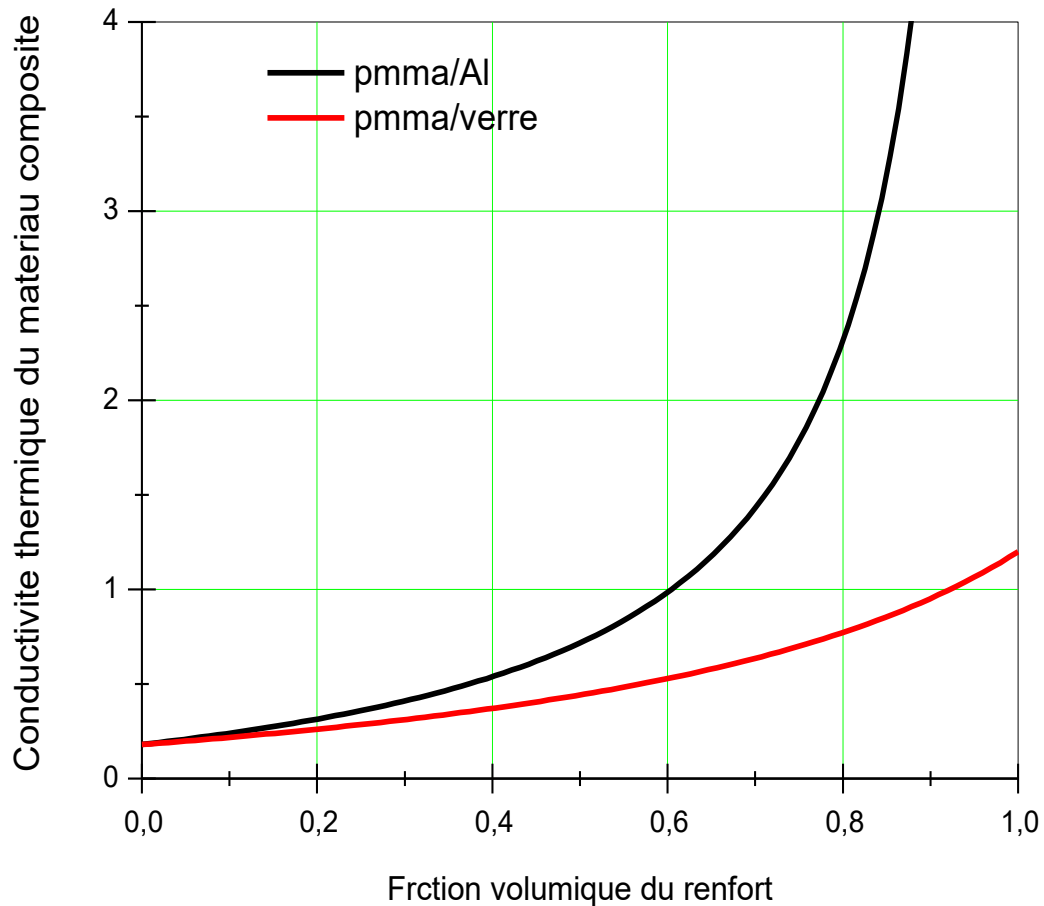


Fig. 17 : variation de la conductivité thermique du (pmma/Al) et du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 17 représente les variations respectives de la conductivité thermique λ des matériaux composites (pmma/Al) et (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique des particules sphériques d'aluminium Φ_{Al} et de verre Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique du renfort (aluminium ou verre) provoque un changement dans le comportement thermique de ces matériaux composites.

En effet, les particules du renfort étant plus conductrices de chaleur ($\lambda_{Al}=237$ w/m.k et $\lambda_{verre}=1.2$ w/m.k) que la matrice en poly (méthacrylate de méthyle) ($\lambda_{pmma}=0.18$ w/m.k), les conductivités thermiques des deux

matériaux composites $\lambda_{\text{pmma/Al}}$ et $\lambda_{\text{pmma/verre}}$ augmentent avec l'augmentation des fractions volumiques respectives du renfort.

Cependant, le fait que la conductivité thermique de l'aluminium soit largement supérieure à celle du verre, $\lambda_{\text{pmma/Al}}$ croît plus rapidement que $\lambda_{\text{pmma/verre}}$. Cette différence perceptible dans le comportement thermique de ces deux composites traduit, à travers l'application du modèle théorique de Hashin et Shtrikman, l'effet de la nature du matériau du renfort sur leurs propriétés thermophysiques.

6.1.3.2. Capacité thermique des matériaux composites : pmma/Al et pmma/verre.

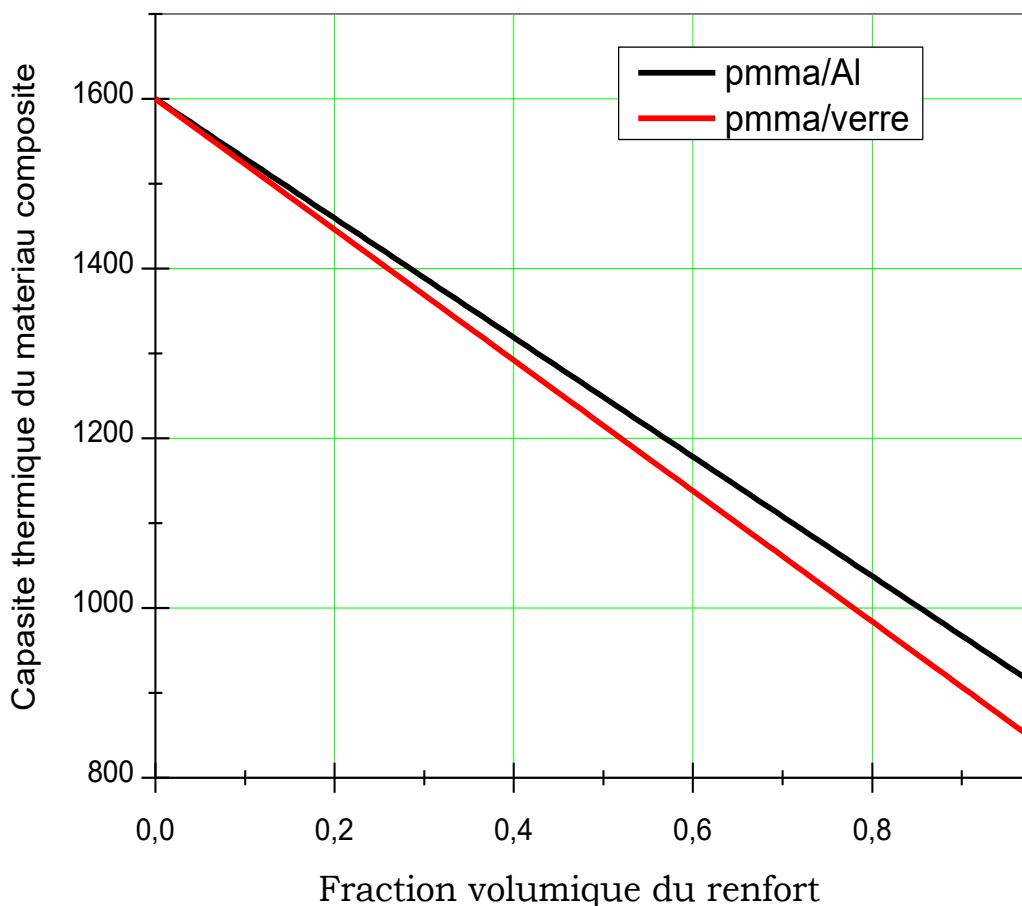


Fig. 18 : variation de la capacité thermique du (pmma/Al) et du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique de renfort

La figure 18 représente la variation de la capacité thermique de deux matériaux composites du (pmma/Al) et du (pmma/verre) en fonction de la fraction du renfort. L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique du renfort augmente la capacité thermique du matériau composite (pmma/verre) diminue plus rapidement que la capacité thermique du matériau composite (pmma/Al).

En effet, le poly (méthacrylate de méthyle) ($C_p=1600\text{j/kg.k}$) et l'aluminium ($C_p=897\text{j/kg.k}$) enmagasinent plus facilement la chaleur que le verre ($C_p=830\text{j/kg.k}$).

5.1.3.3. Masse volumique des matériaux composites : Pmma/Al et pmma/verre.

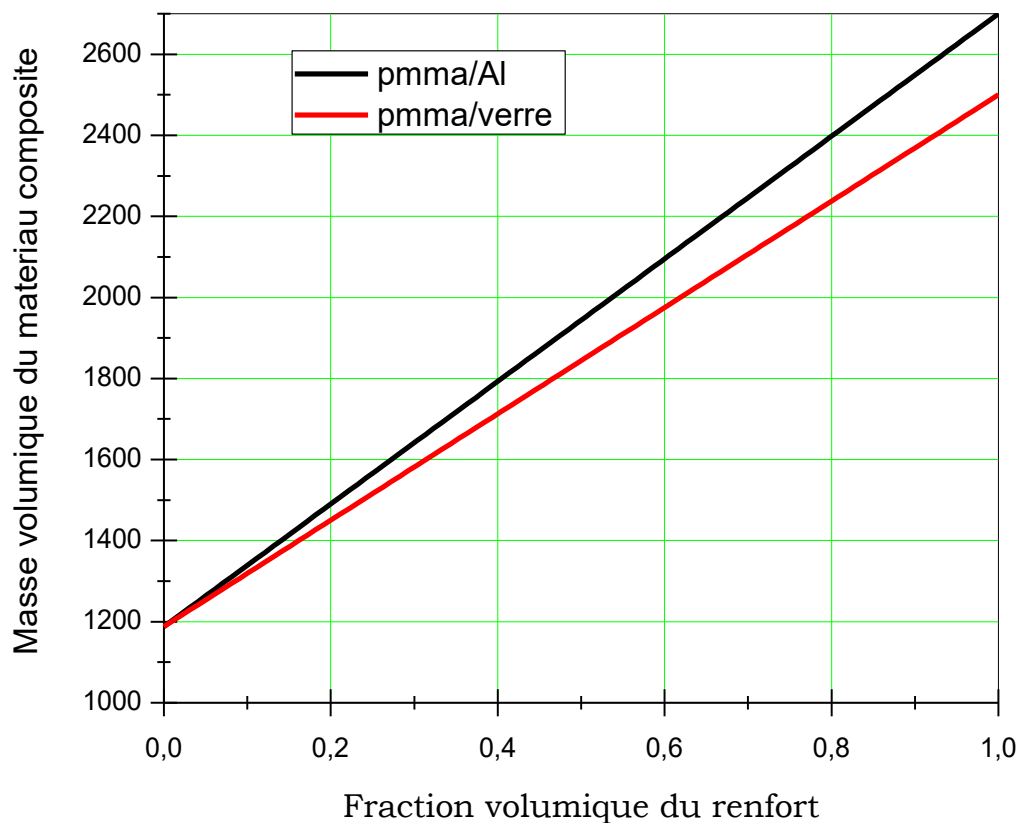


Fig. 19: variation de la masse volumique du (pmma/Al) et du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 19 représente la variation de la masse volumique de deux matériaux composites du (pmma/Al) et du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique des particules sphériques d'aluminium Φ_{Al} et de verre Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique du renfort (aluminium ou verre) augmente, la masse volumique du matériau composite (pmma/Al) augmente plus rapidement que celle du matériau composite (pmma/verre).

6.1.3.4. Diffusivité thermique des matériaux composites:

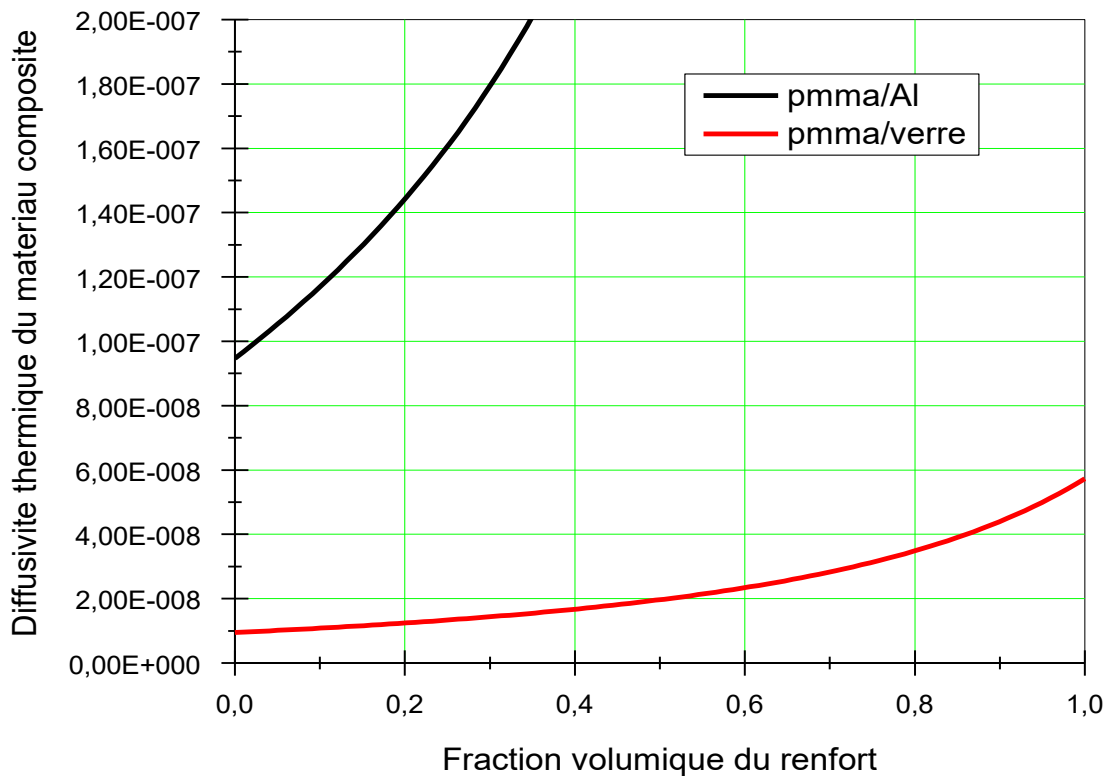


Fig. 20 : variation de la diffusivité thermique du (pmma/Al) et du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique

La figure 20 représente les variations respectives de la diffusivité thermique **a** des matériaux composites (pmma/Al) et (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique des particules sphériques d'aluminium et de verre Φ_{Al} et Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique du renfort croît, la diffusivité thermique **a** varie dans le même sens que la

conductivité thermique λ , résultat prédit par la formule de définition $a=\lambda/(\rho \cdot C)$. Pour les mêmes raisons évoquées précédemment lors de l'examen de la variation de la conductivité thermique, la diffusivité thermique $a_{\text{pmma-Al}}$ croît plus rapidement que $a_{\text{pmma-verre}}$.

6.1.3.5. Conductivité thermique des matériaux composites hybrides : (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al.

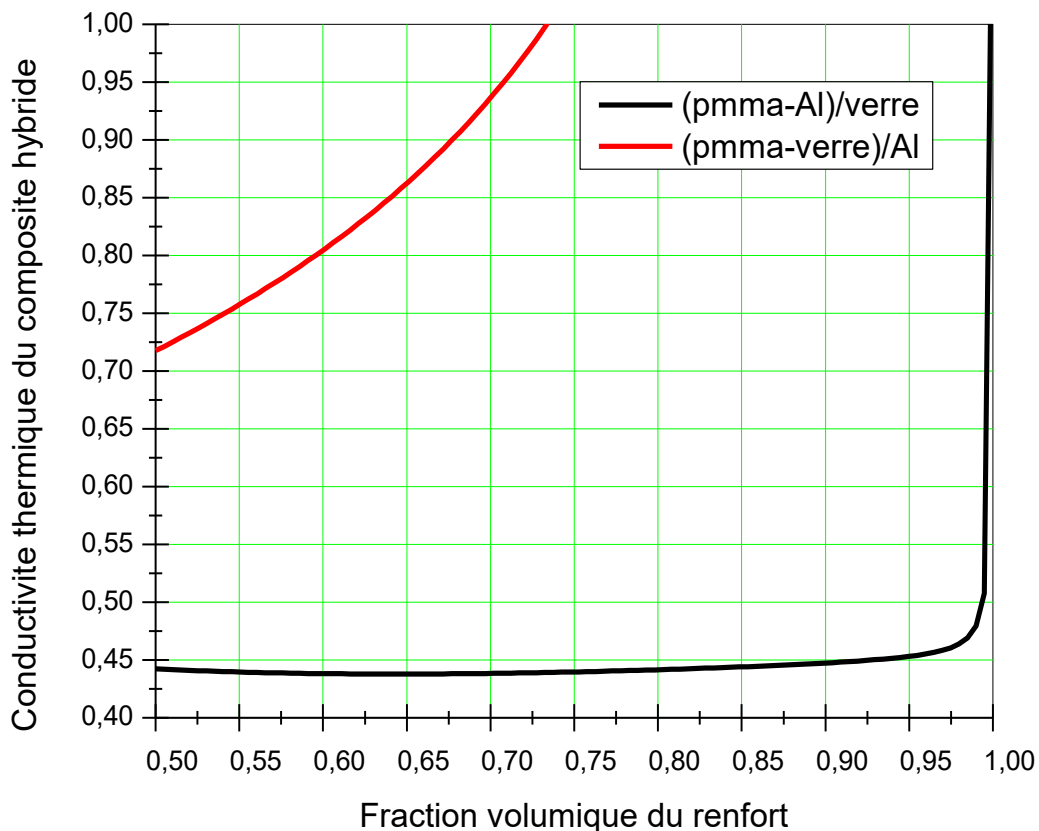


Fig. 21 : variation de la conductivité thermique du (pmma-Al)/verre et du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 21 représente les variations de la conductivité thermique λ des deux matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al en fonction des fractions volumiques des particules Φ_{Al} et Φ_{verre} . Les lois de variation des conductivités thermiques $\lambda_{\text{(pmma-Al)/verre}}$ et $\lambda_{\text{(pmma-verre)/Al}}$ des deux composites hybrides obtenues s'expriment en fonction des fractions volumiques Φ_{Al} et Φ_{verre} . A l'origine, le modèle développé par Hashin et Shtrikman donne la loi de variation de la conductivité thermique d'un

matériau composite en fonction de la conductivité thermique de la matrice polymère λ_m , de celle λ_r de l'unique renfort présent dans le composite précurseur et de sa fraction volumique Φ_r . Pour transposer le modèle de Hashin et Shtrikman aux matériaux composites hybrides contenant deux types de renfort (Al + verre), nous avons remplacé, selon le cas, la matrice polymère en pmma par l'une des matrices composites pmma-Al ou pmma-verre.

6.1.3.6. Capacité thermique des matériaux composites hybrides :(pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al.

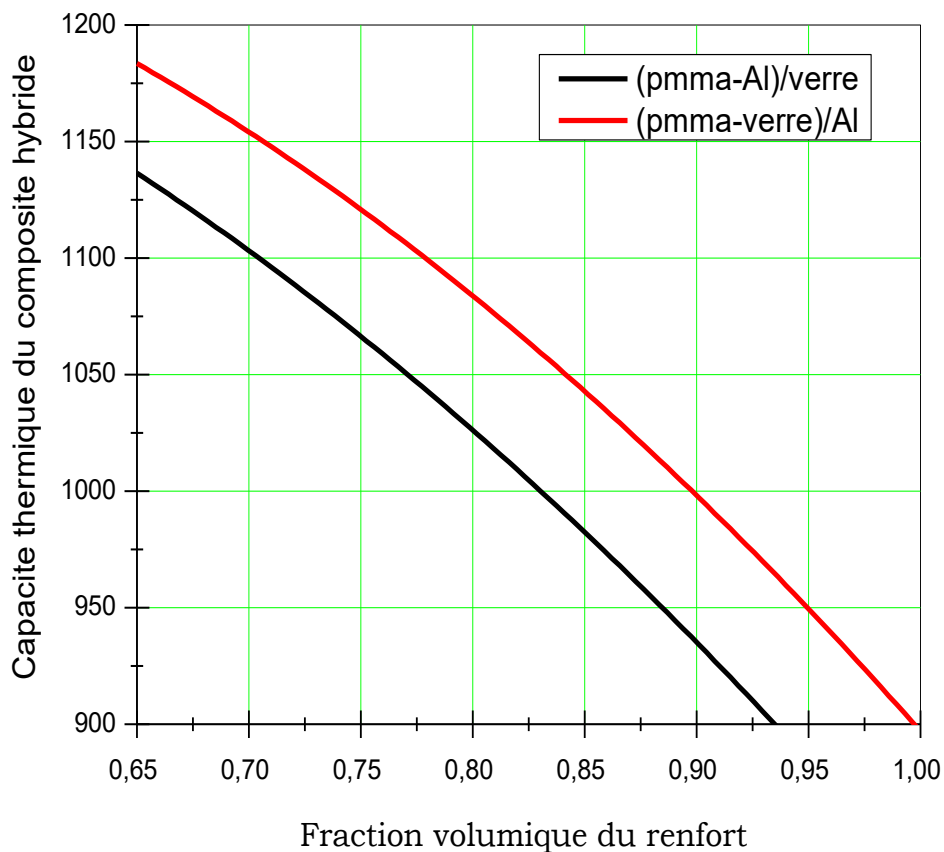


Fig.22 : variation de la capacité thermique du (pmma-Al)/verre et du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 22 représente la variation de la capacité thermique des deux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du renfort (aluminium ou verre). L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique des particules sphériques du

renfort augmente, la capacité thermique du matériau composite hybride de (pmma-Al)/verre décroît plus rapidement que celle du (pmma-verre)/Al.

6.1.3.7. Masse volumique des matériaux composites hybrides :(pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al.

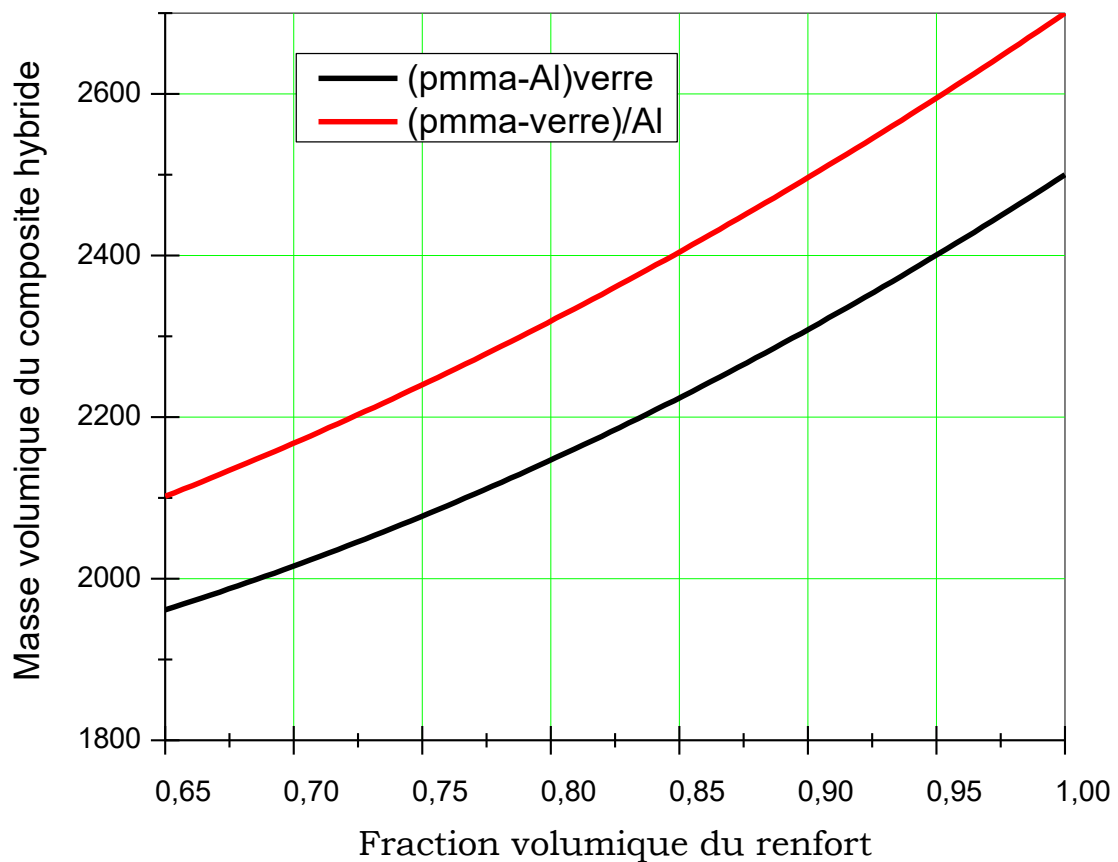


Fig. 23 : variation de la masse volumique du (pmma-Al)/verre et du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 23 représente la variation de la masse volumique du (pmma-Al)/verre et du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du renfort. L'examen de cette figure montre que la masse volumique des matériaux composites hybrides augmente avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort. La masse volumique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al augmente plus rapidement que la masse volumique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre.

6.1.3.8. Diffusivité thermique des matériaux composites hybrides : (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al.

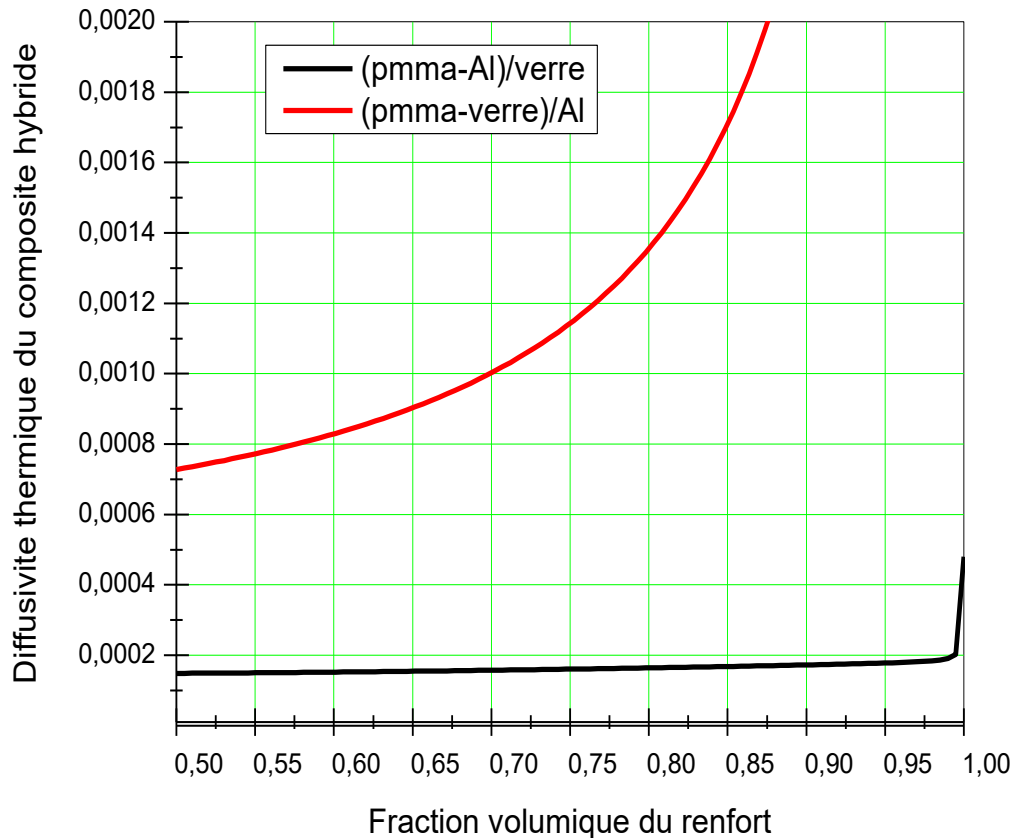


Fig. 24 : variation de la diffusivité thermique du (pmma-Al)/verre et du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 24 représente les variations respectives de la diffusivité thermique **a** des deux matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al en fonction des fractions volumiques des particules sphériques Φ_{Al} et Φ_{verre} . L'examen de cette figure montre que lorsque les fractions volumiques des renforts augmentent, la diffusivité thermique **a** des matériaux composites hybrides varie dans le même sens que la conductivité thermique résultat prédit par la formule de définition $a = \lambda / \rho \cdot C$.

6.2. Influence de la forme géométrique du renfort sur le comportement thermique des matériaux composites hybrides à matrice polymère (pmm-Al)/verre, (pmma-verre)/Al et de leurs composites précurseurs (pmma/Al) et (pmma/verre).

6.2.1. Cas du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre et de son composite précurseur (pmma/Al) à particules de renfort cylindriques.

Dans cette deuxième partie de notre travail, nous examinons l'influence de la forme géométrique des particules de renfort sur le comportement thermique des matériaux composites hybrides et de leurs matériaux composites précurseurs.

Par matériau composite hybride, nous entendons un matériau composite constitué de deux phases discontinues (renforts) de natures différentes dispersées dans une phase continue (matrice).

Dans notre cas, il s'agit d'une matrice thermoplastique en poly (méthacrylate de méthyle) dans laquelle sont dispersées des particules de verre et des particules d'aluminium.

Pour effectuer cette partie de notre travail, nous nous appuyons sur le modèle théorique de Hashin et Shtrikman pour examiner les effets du passage de la forme sphérique à la forme cylindrique des particules de renfort sur la conductivité thermique λ et la diffusivité thermique a des deux matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre, (pmma-verre)/Al et de leurs composites précurseurs respectifs pmma/Al et pmma/verre.

Pour ce faire, nous choisissons des particules de renfort de formes sphérique ($d=3$) et cylindrique ($d=2$). Ces particules de renfort sphériques et cylindriques ont le même volume : $V_s=V_c=\frac{4}{3}\pi r^3$, ce qui détermine les dimensions des particules cylindriques comme suit : $r_c=r_s/\sqrt{3}$ et $h=4.r_s$.

Avec cette hypothèse, deux particules de formes sphérique et cylindrique faites dans le même matériau génèrent, lorsqu'elles sont exposées à un même flux thermique, la même chaleur volumique : $\gamma = \rho \cdot C$.

1. Matériau composite pmma/Al :

Les particules du renfort sont de forme cylindriques ($d=2$).

1.1. Conductivité thermique :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{pmma}} \cdot \frac{1+(d-1) \Phi_{\text{Al}} \cdot \beta}{1-\Phi_{\text{Al}} \cdot \beta} \quad (61)$$

$$\text{Avec } \beta = \frac{\lambda_{\text{Al}} - \lambda_{\text{pmma}}}{\lambda_{\text{Al}} + (d-1) \cdot \lambda_{\text{pmma}}} \quad (62)$$

Soit :

$$\beta=0.99848421654 \quad (63)$$

La loi de variation de la conductivité thermique du matériau composite pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium s'écrit :

$$\lambda_{\text{pmma/Al}} = \frac{0.18(1+0.998482165 \cdot \Phi_{\text{Al}})}{(1-0.998482165 \cdot \Phi_{\text{Al}})} \quad (64)$$

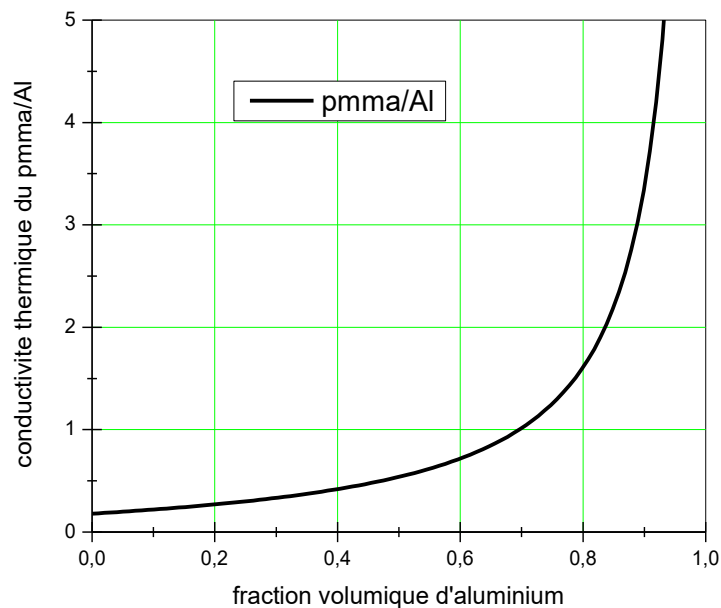


Fig. 25 : variation de la conductivité thermique du (pmma/Al) en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 25 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite (pmma/Al) à particules de renfort cylindriques en fonction de la fraction volumique d'aluminium Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique des particules cylindriques d'aluminium provoque une augmentation de la conductivité thermique du matériau composite (pmma/Al).

En effet, les particules cylindriques d'aluminium sont plus conductrice de la chaleur ($\lambda_{\text{Al}}=237\text{w/m.k}$) que la matrice en poly (méthacrylate de méthyle) ($\lambda_{\text{pmma}}=0.18\text{w/m.k}$).

1.2. Diffusivite thermique :

$$a_{\text{composite}} = \frac{\lambda_{\text{composite}}}{\rho_{\text{composite}} \cdot C_{\text{composite}}} \quad (65)$$

$$\text{Avec } C_{\text{pmma/Al}} = \Phi_{\text{Al}} \cdot C_{\text{Al}} + (1 - \Phi_{\text{Al}}) \cdot C_{\text{pmma}} \quad (66)$$

$$C_{\text{pmma/Al}} = -703\Phi_{\text{Al}} + 1600 \quad (67)$$

$$\text{Et } \rho_{\text{pmma/Al}} = \rho_{\text{pmma}} + (\rho_{\text{Al}} - \rho_{\text{pmma}}) \cdot \Phi_{\text{Al}} \quad (68)$$

$$\rho_{\text{pmma/Al}} = 1188 + 1512 \cdot \Phi_{\text{Al}} \quad (69)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium s'écrit :

$$a_{\text{pmma/Al}} = \frac{0.18 \cdot (1 + 0.998421654 \cdot \Phi_{\text{Al}})}{(1 - 0.998421654 \cdot \Phi_{\text{Al}})(-703 \cdot \Phi_{\text{Al}} + 1600)(1188 + 1512 \cdot \Phi_{\text{Al}})} \quad (70)$$

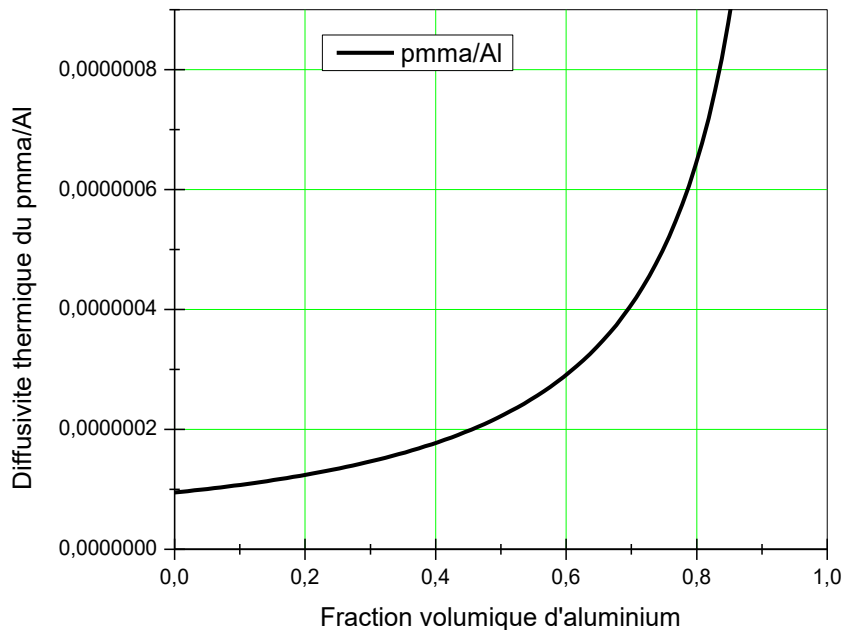


Fig. 26 : variation de la diffusivité thermique du pmma/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 26 représente la variation de la diffusivité thermique **a** du matériau composite (pmma/Al) en fonction de la fraction volumique des particules d'aluminium Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique d'aluminium croît la diffusivité thermique du matériau composite pmma/Al varie dans le même sens que la conductivité thermique du (pmma/Al), résultat prédit par la formule de définition de la diffusivité thermique : $a = \lambda / \rho C$.

2. Matériau composite hybride pmma-Al)/verre :

2.1. Conductivité thermique :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{pmma/Al}} \cdot \frac{1+(d-1) \Phi_{\text{verre}} \cdot \beta}{1-\Phi_{\text{verre}} \cdot \beta} \quad (71)$$

$$\text{Avec } \beta = \frac{\lambda_{\text{verre}} - \lambda_{\text{pmma/Al}}}{\lambda_{\text{verre}} + (d-1) \cdot \lambda_{\text{pmma/Al}}} \quad (72)$$

$$\beta = \frac{-8.500 \cdot 10^{10} + 1.148 \cdot 10^{11} \Phi_{Al}}{-1.150 \cdot 10^{11} + 8.487 \cdot 10^{10} \Phi_{Al}} \quad (73)$$

La variation de la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction des deux fractions volumiques des deux renforts s'écrit :

$$\lambda(\text{pmma} - \text{Al})/\text{verre} = \frac{0.180((-1.15 \cdot 10^{11} + 8.48 \cdot 10^{10} \Phi_{Al} - 8.50 \cdot 10^{10} \Phi_{\text{verre}} + 1.14 \cdot 10^{11} \Phi_{\text{verre}} \Phi_{Al}) (5 \cdot 10^9 + 4.99 \cdot 10^9 \Phi_{Al})}{((-5 \cdot 10^9 + 4.99 \cdot 10^9 \Phi_{Al})(1.15 \cdot 10^{11} - 8.48 \cdot 10^{10} \Phi_{Al} - 8.50 \cdot 10^{10} \Phi_{\text{verre}} + 1.14 \cdot 10^{11} \Phi_{\text{verre}} \Phi_{Al}))} \quad (74)$$

Dans le cas du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre, les fractions volumiques doivent vérifier la relation suivante :

$$\Phi_{\text{pmma}} + \Phi_{Al} + \Phi_{\text{verre}} = 1 \quad (75)$$

En réservant une fraction volumique du 50% à la matrice en pmma, nous avons :

$$\Phi_{Al} + \Phi_{verre} = 0.5 \quad (76)$$

Soit :

$$\Phi_{Al} = 0.5 - \Phi_{verre} \quad (77)$$

La variation de la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du verre s'écrit :

$$\lambda(\text{pmma-Al})/\text{verre} = \frac{(0.18(7.25 \cdot 10^9 + 1.12 \cdot 10^{10} \Phi_{verre} + 1.14 \cdot 10^{10} \Phi_{verre}^2))}{(-7.49 \cdot 10^9 + 5 \cdot 10^9 \Phi_{verre})} \quad (78)$$

$$\frac{((2.50 \cdot 10^9 + 5 \cdot 10^9 \Phi_{verre})(-7.25 \cdot 10^9 - 5.73 \cdot 10^9 \Phi_{verre} + 1.14 \cdot 10^9 \Phi_{verre}^2))$$

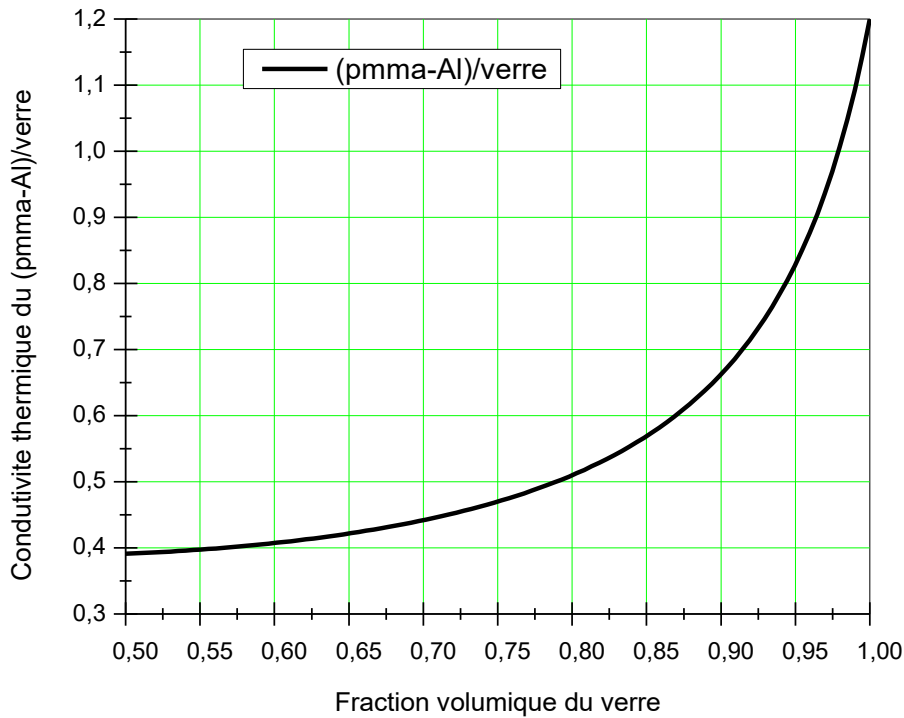


Fig. 27 : variation de la conductivité thermique du (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 27 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du verre. Cette figure montre que la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des particules du verre.

2.2. Diffusivité thermique :

$$a_{(pmma-Al)/verre} = \frac{\lambda_{(pmma-Al)/verre}}{\rho_{(pmma-Al)/verre} \cdot C_{(pmma-Al)/verre}} \quad (79)$$

Avec

$$C_{(pmma-Al)/verre} = -770 \cdot \Phi_{verre} - 703 \cdot \Phi_{Al} + 703 \Phi_{Al} \Phi_{verre} \quad (80)$$

$$C_{(pmma-verre)/Al} = 284.5 \cdot \Phi_{verre} + 1248.5 - 703 \cdot \Phi_{verre}^2 \quad (81)$$

$$\rho_{(pmma-Al)/verre} = 1188 + 1512 \cdot \Phi_{Al} + (1312 \cdot \Phi_{verre} - 1512 \cdot \Phi_{Al}) \Phi_{verre} \quad (82)$$

$$\rho_{(pmma-Al)/verre} = 1944 - 956 \cdot \Phi_{verre} + 1512 \cdot \Phi_{verre}^2 \quad (83)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction des deux fractions volumiques Φ_{Al} et Φ_{verre} des deux matériaux de renfort s'écrit :

$$a_{(pmma-Al)/verre} = \frac{(0.18(-5.75 \cdot 10^9 + 4.24 \cdot 10^9 \Phi_{Al} - 4.25 \cdot 10^9 \Phi_{verre} + 5.74 \cdot 10^9 \Phi_{Al} \Phi_{verre}))}{(5.10^9 + 4.99 \cdot 10^9 \Phi_{Al})} \quad (84)$$

$$\frac{((-5.10^9 + 5.10^9 \Phi_{Al})(5.75 \cdot 10^9 - 4.24 \cdot 10^9 \Phi_{Al} - 4.25 \cdot 10^9 \Phi_{verre} + 5.74 \cdot 10^9 \Phi_{verre} \Phi_{Al}) - 770 \Phi_{verre} (1188 + 1512 \Phi_{Al} + 1312 \Phi_{verre}^2 - 1512 \Phi_{Al} \Phi_{verre}) - 703 \Phi_{Al} (1512 \Phi_{Al} + 1188 + 1312 \Phi_{verre}^2 - 1512 \Phi_{Al} \Phi_{verre}) + 703 \Phi_{verre} (1512 \Phi_{Al} + 1188 + 1312 \Phi_{verre}^2 - 1512 \Phi_{Al} \Phi_{verre}) \Phi_{Al} (1512 \Phi_{Al} + 1188 + 1312 \Phi_{verre}^2 - 1512 \Phi_{Al} \Phi_{verre}))}{(5.10^9 + 4.99 \cdot 10^9 \Phi_{Al})}$$

Avec :

$$\Phi_{Al} = 0.5 - \Phi_{verre} \quad (85)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique du verre devient :

$$a_{(pmma-Al)/verre} = \frac{(0.18(7.25 \cdot 10^9 + 1.12 \cdot 10^{10} \Phi_{verre} + 1.14 \cdot 10^{10} \Phi_{verre}^2)(-7.49 \cdot 10^9 + 5.10^9 \Phi_{verre}))}{((2.50 \cdot 10^9 + 4.99 \cdot 10^9 \Phi_{verre})(-7.25 \cdot 10^9 - 5.73 \cdot 10^9 \Phi_{verre} + 1.14 \cdot 10^{10} \Phi_{verre}^2) + 1512 \Phi_{verre} (1248.5 + 248.5 \Phi_{verre} - 703 \Phi_{verre}^2) + 1512 \Phi_{verre} (1248.5 + 248.5 \Phi_{verre} - 703 \Phi_{verre}^2) \Phi_{verre})} \quad (86)$$

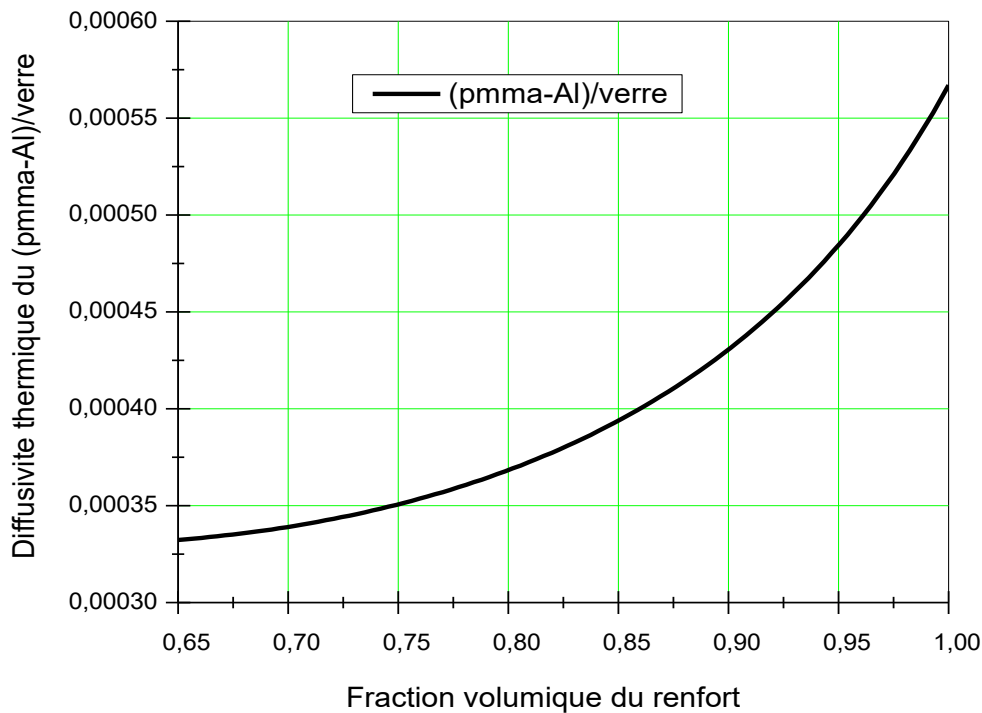


Fig. 28 : variation de la diffusivité thermique du (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 28 représente la variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique des particules cylindriques du renfort. L'examen de cette figure montre que la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre varie dans le même sens que la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre, lorsque la fraction volumique du renfort augmente. Ce résultat est prédit par la formule de définition de la diffusivité thermique : $a = \lambda / \rho C$.

**6.2.2. Cas du matériau composite hybride (pmma-
verre)/Al et de son composite précurseur
(pmma/verre) à particules de renfort cylindriques**

1. Matériau composite pmma/verre :

1.1. Conductivité thermique :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{pmma}} \cdot \frac{1+(d-1) \Phi_{\text{verre}} \cdot \beta}{1-\Phi_{\text{verre}} \cdot \beta} \quad (87)$$

$$\text{Avec } \beta = \frac{\lambda_{\text{verre}} - \lambda_{\text{pmma}}}{\lambda_{\text{verre}} + (d-1) \cdot \lambda_{\text{pmma}}} \quad (88)$$

$$\beta = 0.7391304348 \quad (89)$$

La loi de variation de la conductivité thermique du matériau composite pmma/verre en fonction de la fraction volumique du verre s'écrit :

$$\lambda_{\text{pmma/verre}} = \frac{0.18(1+0.7391304348 \cdot \Phi_{\text{verre}})}{(1-0.7391304348 \cdot \Phi_{\text{verre}})} \quad (90)$$

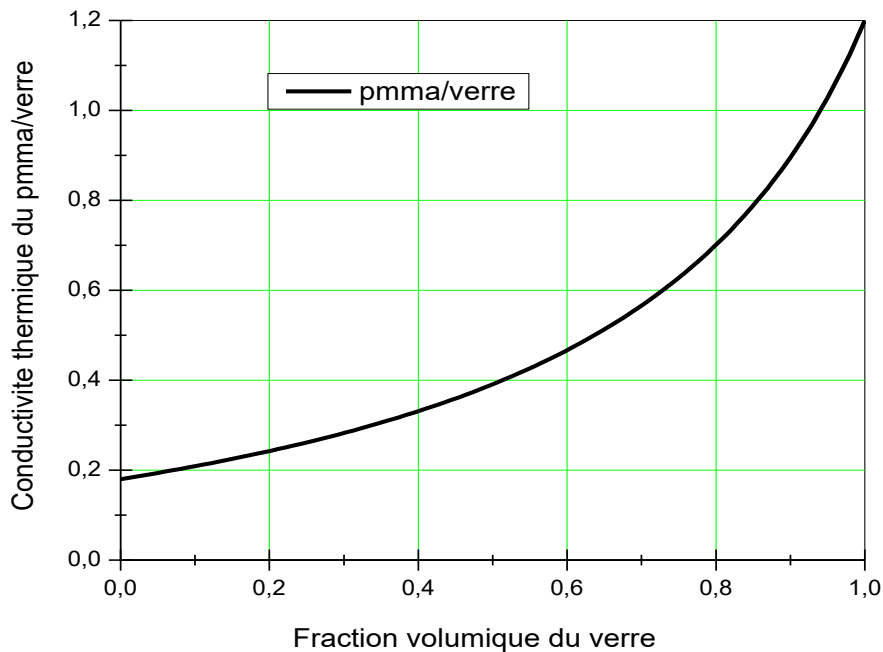


Fig. 29 : variation de la conductivité thermique du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 29 représente la variation de la conductivité thermique du matériau composite (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du

verre. L'examen de cette figure montre que la conductivité thermique du matériau composite (pmma/verre) augmente avec l'augmentation de la fraction volumique du verre.

1.2. Diffusivité thermique :

$$a_{\text{pmma/verre}} = \frac{\lambda_{\text{pmma/verre}}}{\rho_{\text{pmma/verre}} \cdot C_{\text{pmma/verre}}} \quad (91)$$

Avec

$$C_{\text{pmma/verre}} = -770 \Phi_{\text{verre}} + 1600 \quad (92)$$

Et

$$\rho_{\text{pmma/verre}} = 1188 + 1312 \cdot \Phi_{\text{verre}} \quad (93)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite pmma/verre en fonction de la fraction volumique du verre s'écrit :

$$a_{\text{pmma/verre}} = \frac{0.18(1+0.739130448 \Phi_{\text{verre}})}{(1-0.739130448 \Phi_{\text{verre}})(-770\Phi_{\text{verre}}+1600)(1188+1312 \cdot \Phi_{\text{verre}})} \quad (94)$$

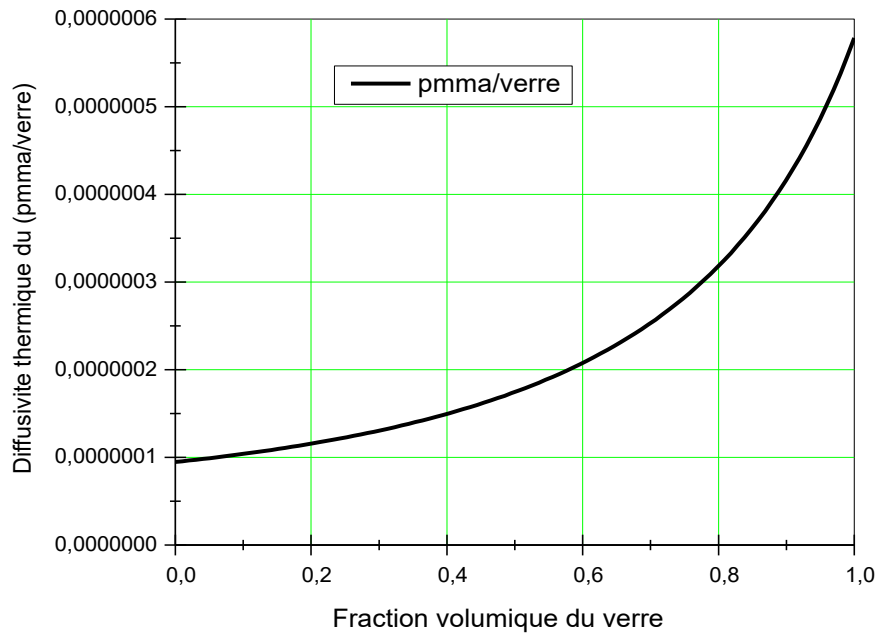


Fig. 30 : variation de la diffusivité thermique du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 30 représente la variation de la diffusivité thermique du matériau composite (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique du verre. L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique du verre croît la diffusivité thermique du matériau composite (pmma/verre) varie dans le même sens que la conductivité thermique du (pmma/verre), résultat prédit par la formule de définition de la diffusivité thermique $a = \lambda / \rho C$.

2. Matériau composite hybride pmma-verre)/Al :

2.1. Conductivité thermique :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{pmma/verre}} \cdot \frac{1 + (d-1) \Phi_{\text{Al}} \cdot \beta}{1 - \Phi_{\text{Al}} \cdot \beta} \quad (95)$$

Avec
$$\beta = \frac{\lambda_{\text{Al}} - \lambda_{\text{pmma/verre}}}{\lambda_{\text{Al}} + (d-1) \cdot \lambda_{\text{pmma/verre}}} \quad (96)$$

Soit

$$\beta = \frac{-9.8675 \cdot 10^{12} + 7.3044 \cdot 10^{12} \Phi_{\text{verre}}}{-9.882 \cdot 10^{12} + 7.2933 \cdot 10^{12} \Phi_{\text{verre}}} \quad (97)$$

La variation de la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction des deux fractions volumiques des deux matériaux de renfort s'écrit :

$$\lambda(\text{pmma} - \text{verre})/\text{Al} = \frac{0.180((-9.88.10^9 + 7.29.48.10^9 \Phi_{\text{verre}} - 9.86.10^9 \Phi_{\text{Al}} + 7.30.10^9 \Phi_{\text{verre}} \Phi_{\text{Al}}) (2.5.10^9 + 1.8410^9 \Phi_{\text{verre}})}{((9.88.10^9 - 7.29.48.10^9 \Phi_{\text{verre}} - 9.86.10^9 \Phi_{\text{Al}} + 7.30.10^9 \Phi_{\text{verre}} \Phi_{\text{Al}}) (-2.5.10^9 + 1.8410^9 \Phi_{\text{verre}}))} \quad (98)$$

Avec :

$$\Phi_{\text{verre}} = 0.5 - \Phi_{\text{Al}} \quad (99)$$

La variation de la conductivité thermique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique d'aluminium devient :

$$\lambda(\text{pmma} - \text{verre})/\text{Al} = \frac{(0.27(6.23.10^9 + 1.35.10^{10} \Phi_{\text{Al}} + 7.304.10^9 \Phi_{\text{Al}}^2)(-1.14.10^9 + 6.15.10^8 \Phi_{\text{Al}}))}{((1.57.10^9 + 1.84.10^9 \Phi_{\text{Al}})(-3.11.10^9 - 5.39.10^8 \Phi_{\text{Al}} + 3.65.10^9 \Phi_{\text{Al}}^2))} \quad (100)$$

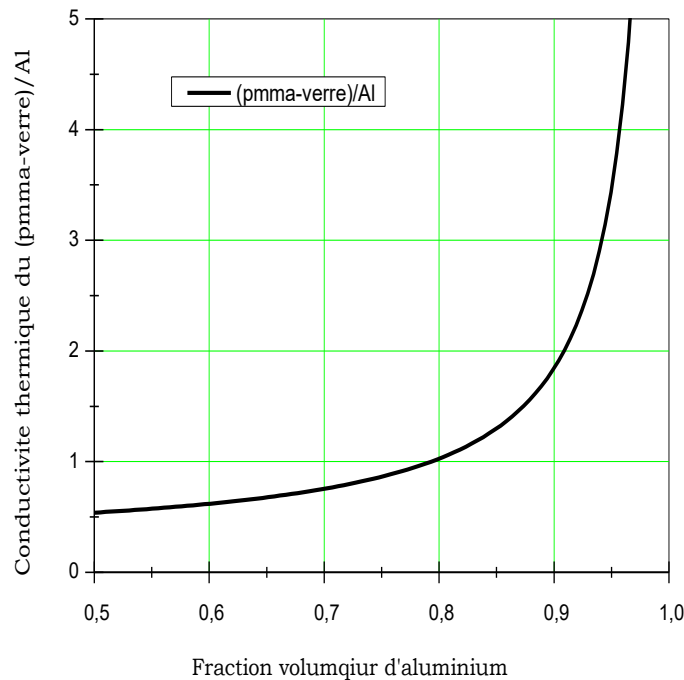


Fig. 31 : variation de la conductivité thermique du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 31 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique des particules cylindriques du renfort Φ_{Al} . L'examen de cette

figure montre que la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al augmente avec l'augmentation de la fraction volumique d'aluminium.

2.2. Diffusivite thermique :

$$a_{(pmma-verre)/Al} = \frac{\lambda_{(pmma-verre)/Al}}{\rho_{(pmma-verre)/Al} \cdot C_{(pmma-verre)/Al}} \quad (101)$$

Avec

$$C_{(pmma-verre)/Al} = 452\Phi_{Al} + 1215 - 770\Phi_{Al}^2 \quad (102)$$

$$\rho_{(pmma-verre)/Al} = 1844 - 456\Phi_{Al} + 1312\Phi_{Al}^2 \quad (103)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction des deux fractions volumiques des deux matériaux de renfort s'écrit :

$$a_{(pmma-verre)/Al} = \frac{-(0.045(-9.88 \cdot 10^9 + 7.29 \cdot 10^9 \Phi_{verre} - 9.86 \cdot 10^9 \Phi_{Al} + 7.30 \cdot 10^9 \Phi_{Al} \Phi_{verre}))}{(2.50 \cdot 10^9 + 1.84 \cdot 10^9 \Phi_{verre})} \quad (104)$$

$$\frac{(((-2.5 \cdot 10^9 + 1.84 \cdot 10^9 \Phi_{verre})(9.88 \cdot 10^9 - 7.29 \cdot 10^9 \Phi_{verre} - 9.86 \cdot 10^9 \Phi_{Al} + 7.30 \cdot 10^9 \Phi_{verre} \Phi_{Al}) - 297 - 328 \Phi_{verre}(-703 \Phi_{Al} - 770 \Phi_{verre} + 1600 + 770 \Phi_{Al} \Phi_{verre}) - 328 \Phi_{Al}(-703 \Phi_{Al} - 770 \Phi_{verre} + 1600 + 770 \Phi_{Al} \Phi_{verre}) + 328 \Phi_{Al}(-703 \Phi_{Al} - 770 \Phi_{verre} + 1600 + 770 \Phi_{Al} \Phi_{verre}) \Phi_{verre} - 703 \Phi_{Al} - 770 \Phi_{verre} + 1600 + 770 \Phi_{Al} \Phi_{verre}))}{(1215 + 452 \Phi_{Al} - 770 \Phi_{Al}^2)^2}}$$

Avec :

$$\Phi_{verre} = 0.5 - \Phi_{Al} \quad (105)$$

La variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride en fonction de la fraction volumique d'aluminium devient :

$$a_{(pmma-verre)/Al} = \frac{(0.27(6.23 \cdot 10^9 + 1.35 \cdot 10^{10} \Phi_{Al} + 7.30 \cdot 10^9 \Phi_{Al}^2)(-1.14 \cdot 10^9 + 6.15 \cdot 10^8 \Phi_{Al}))}{((1.57 \cdot 10^9 + 1.84 \cdot 10^9 \Phi_{Al})(-3.11 \cdot 10^9 - 5.39 \cdot 10^8 \Phi_{Al} + 3.65 \cdot 10^9 \Phi_{Al}^2) + (1844 - 456 \Phi_{Al}(1215 + 452 \Phi_{Al} - 770 \Phi_{Al}^2) + 1312 \Phi_{Al}(1215 + 452 \Phi_{Al} - 770 \Phi_{Al}^2)^2))} \quad (106)$$

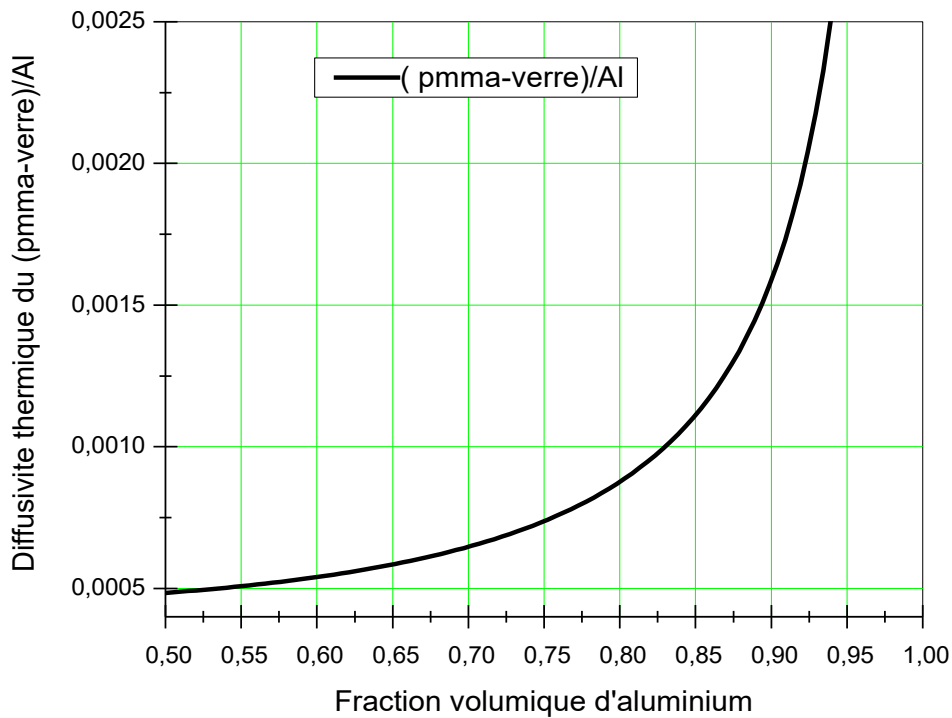


Fig. 32 : variation de la diffusivité thermique de (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique d'aluminium

La figure 32 représente la variation de la diffusivité thermique a du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique des particules d'aluminium Φ_{Al} . L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique des particules cylindriques de renfort augmente la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al varie dans le même sens que la conductivité thermique du (pmma-verre)/Al. Ce résultat est prédit par la formule de définition de la diffusivité thermique $a = \lambda / \rho C$.

6.2.3. Etude comparative du comportement thermique des matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al à particules sphériques et cylindriques

Dans cette partie de notre travail, nous comparons les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, diffusivité thermique) du matériau composite hybride (poly (méthacrylate de méthyle)-Aluminium)/verre et de son composite précurseur (poly (méthacrylate de méthyle)-Aluminium) à celles du matériau composite hybride (poly (méthacrylate de méthyle)-verre)/Aluminium et de son composite précurseur poly (méthacrylate de méthyle)-verre) pour des particules de renfort sphériques et cylindriques.

6.2.3.1. Conductivité thermique du matériau composite (pmma/Al)

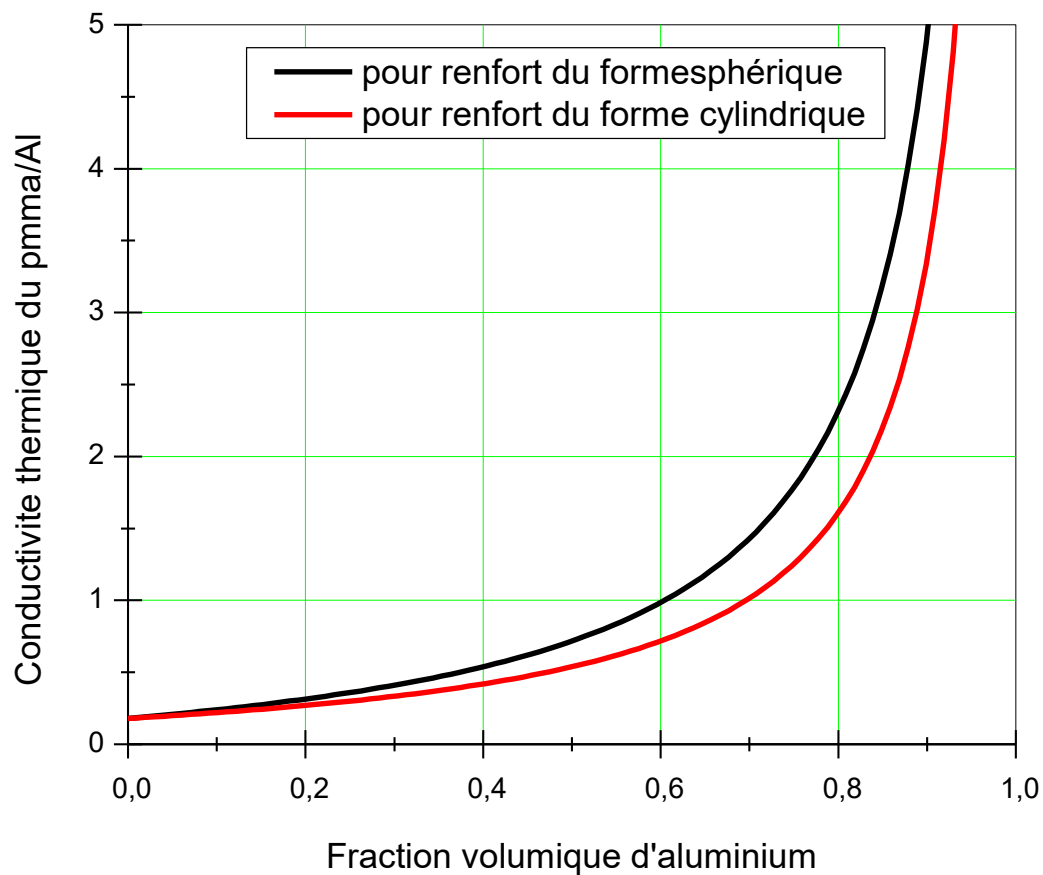


Fig. 33 : variation de la conductivité thermique du (pmma/Al) en fonction de la fraction volumique des particules d'aluminium sphériques et cylindriques

La figure 33 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite (pmma/Al) en fonction de la fraction volumique des particules d'aluminium Φ_{Al} sphériques et cylindriques. Cette figure montre que les conductivités thermiques du matériau composite (pmma/Al) à

particules d'aluminium sphériques et cylindriques augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique d'aluminium.

Cependant, la conductivité thermique du matériau composite (pmma/Al) à particules sphériques d'aluminium augmente plus rapidement que celle du matériau composite (pmma/Al) à particules cylindriques d'aluminium.

Ceci est dû au fait que la surface d'échange des particules cylindriques est supérieure à celle des particules sphériques.

Cette différence traduit, à travers le modèle théorique de Hashin et Shtrikman, l'effet de la forme géométrique d'aluminium sur leurs propriétés thermophysiques.

6.2.3.2. Conductivité thermique du matériau composite (pmma/verre) :

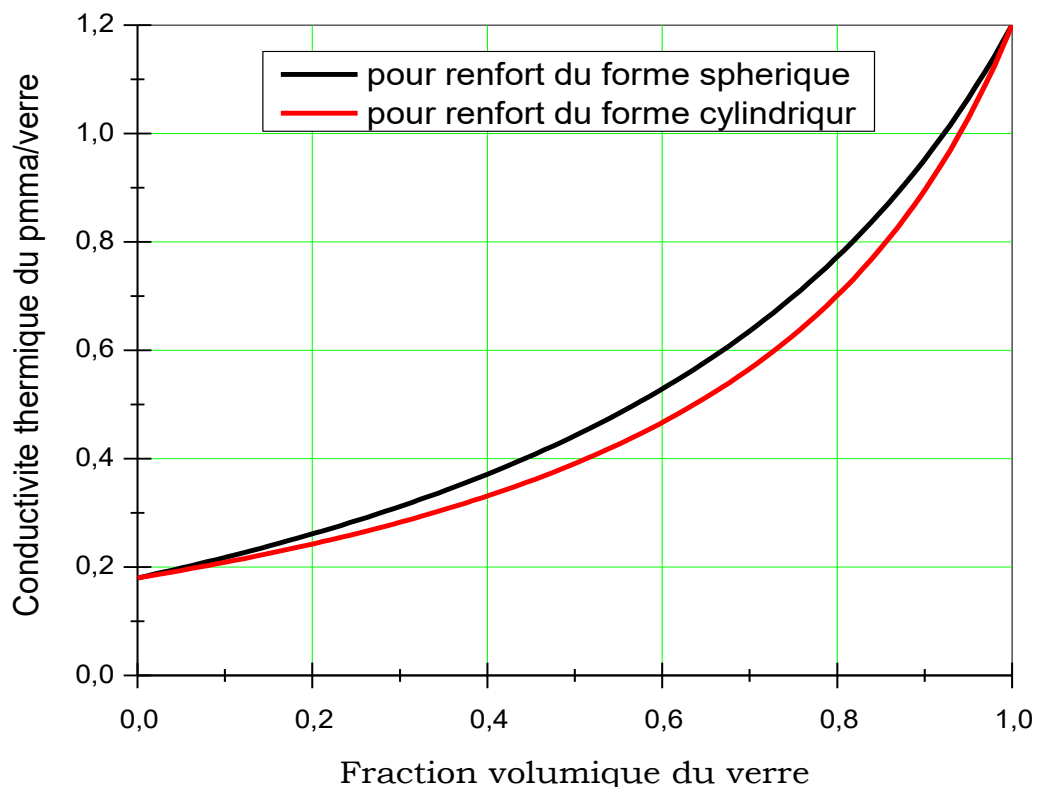


Fig. 34 : variation de la conductivité thermique du pmma/verre en fonction de la fraction volumique des particules de verre sphériques et cylindriques

La figure 34 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique des particules de verre Φ_{verre} sphériques et cylindriques. Cette figure montre que lorsque les fractions volumiques des particules sphériques et cylindriques du

verre augmentent, les conductivités thermiques du matériau composite (pmma/verre) à particules sphériques et cylindriques augmentent.

La conductivité thermique du matériau composite pmma/verre à particules sphériques de verre croît plus rapidement que la conductivité thermique du matériau composite (pmma/verre) à particules cylindriques de verre. Cette différence traduit à travers le modèle théorique de Hashin et Shtrikman, l'effet de la forme géométrique des particules du verre sur leurs propriétés thermophysiques

6.2.3.3. Conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al/verre) :

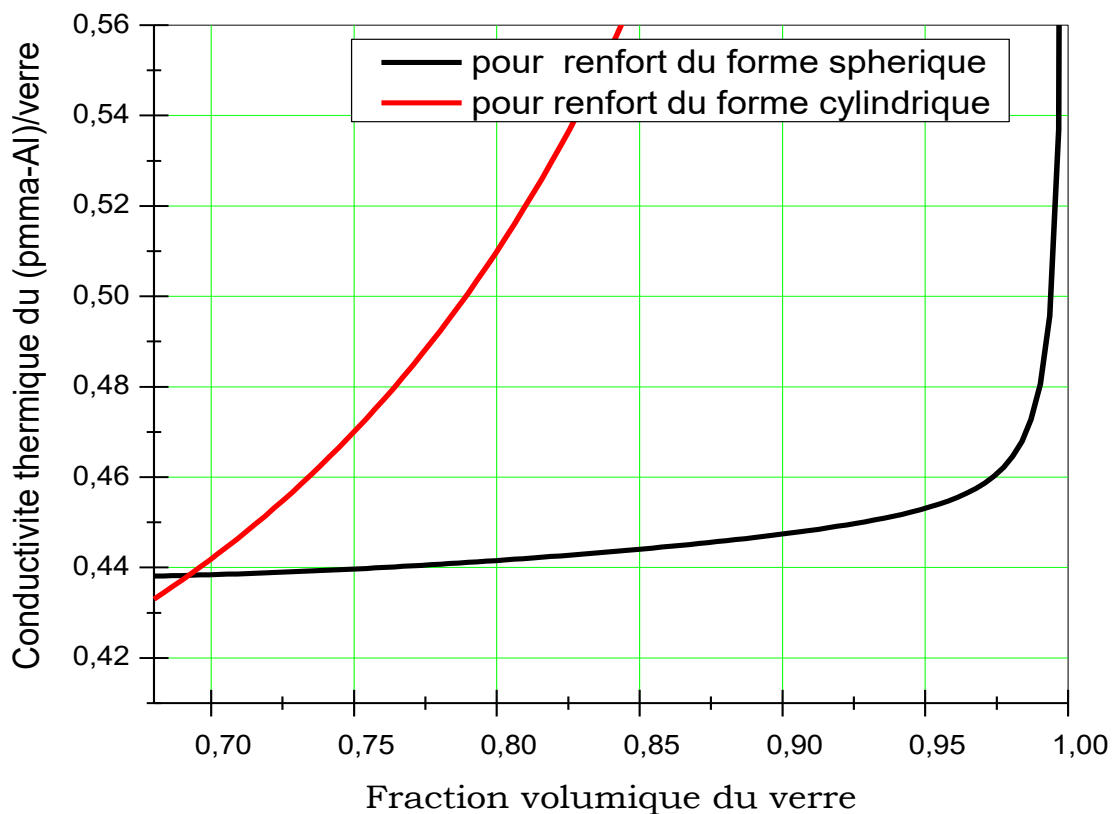


Fig. 35 : variation de la conductivité thermique du (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique des particules de verre sphériques et cylindriques

La figure 35 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction des fractions volumiques des particules sphériques et cylindriques du verre Φ_{verre} . Cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique des particules

sphériques ou cylindriques du verre provoque une augmentation de la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre . La conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre à particules sphériques de verre est supérieure à celle du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre à particules cylindriques. Cette différence traduit à travers le modèle théorique de Hashin et Shtrikman, l'effet de la forme géométrique des particules du verre sur leurs propriétés thermophysiques

6.2.3.4. Conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al :

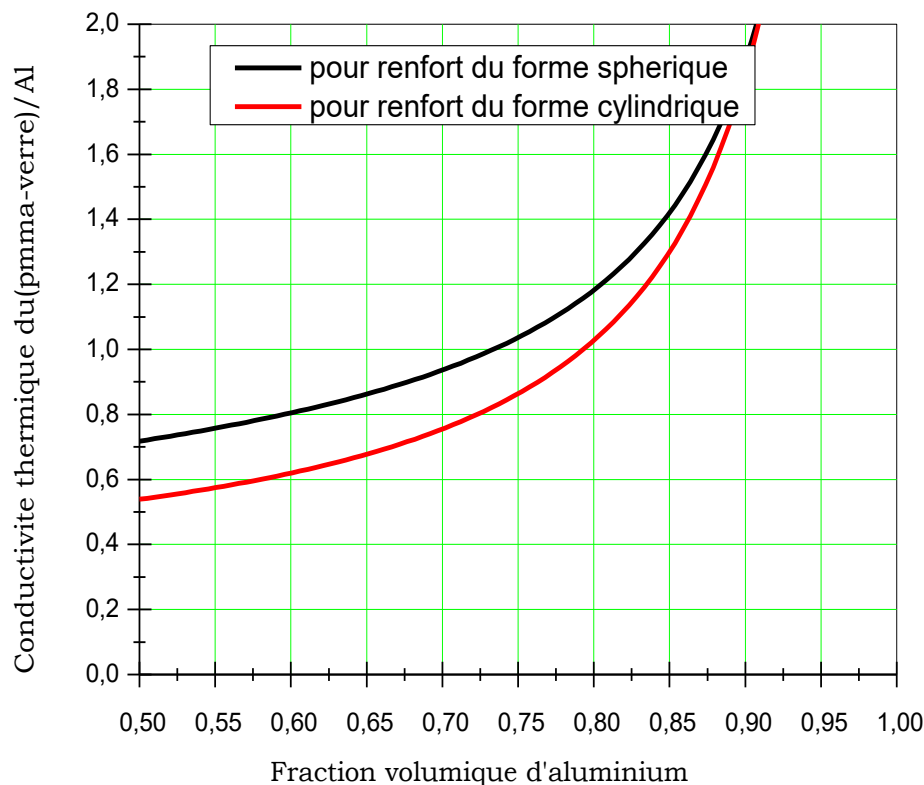


Fig. 36 : variation de la conductivité thermique du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique des particules d'aluminium sphériques et cylindriques

La figure 36 représente la variation de la conductivité thermique λ du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique des particules d'aluminium Φ_{Al} sphériques et cylindriques. Cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique des particules

d'aluminium sphériques ou cylindriques provoque une augmentation de la conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al.

La conductivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al à particules de renfort sphériques est croit plus rapidement que celle du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al à particules cylindriques. Cette différence traduit, à travers le modèle de Hashin et Shtrikman, l'effet de la forme géométrique des particules d'aluminium sur le comportement thermique de ce matériau composite hybride.

6.2.3.5. Diffusivité thermique du matériau composite (pmma/Al) :

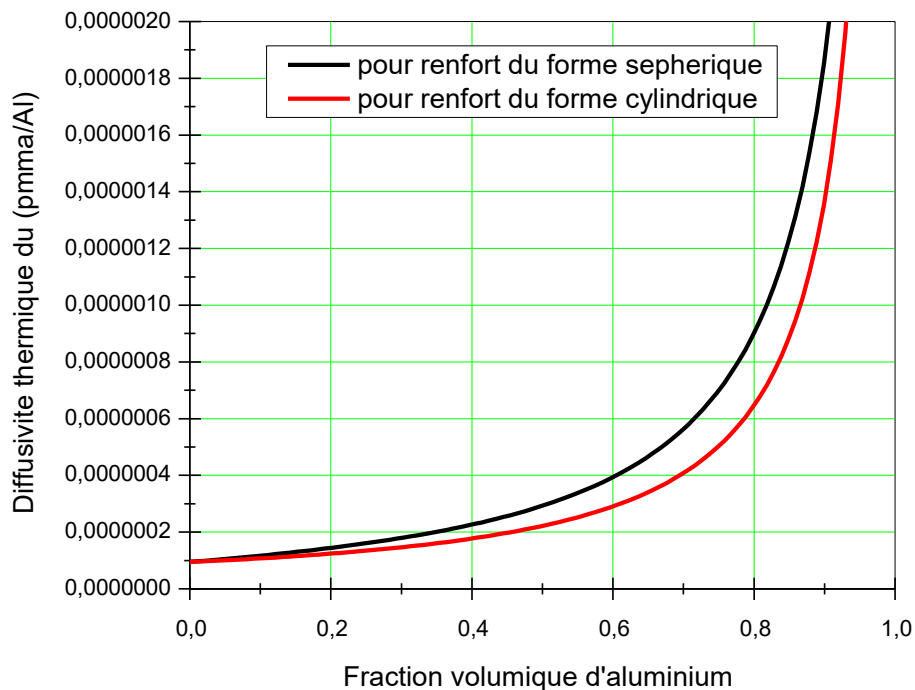


Fig. 37 : variation de la diffusivité thermique du (pmma/Al) en fonction de la fraction volumique des particules d'aluminium sphériques et cylindriques

La figure 37 représente la variation de la diffusivité thermique du matériau composite (pmma/Al) pour des particules d'aluminium sphériques et cylindriques. L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique des particules d'aluminium sphériques ou cylindriques croit, les diffusivités thermiques du matériau composite (pmma/Al) à particules

sphériques et celle du (pmma/Al) à particules cylindriques varient dans le même sens. Ce résultat prédit également par la formule de définition de la diffusivité thermique $a = \lambda / \rho C$.

Pour les mêmes raisons évoquées précédemment, la diffusivité thermique du pmma/Al à particules d'aluminium sphériques croît plus rapidement que la diffusivité thermique du matériau composite (pmma/Al) à particules d'aluminium cylindriques.

6.2.3.6 Diffusivité thermique du matériau composite (pmma/verre)

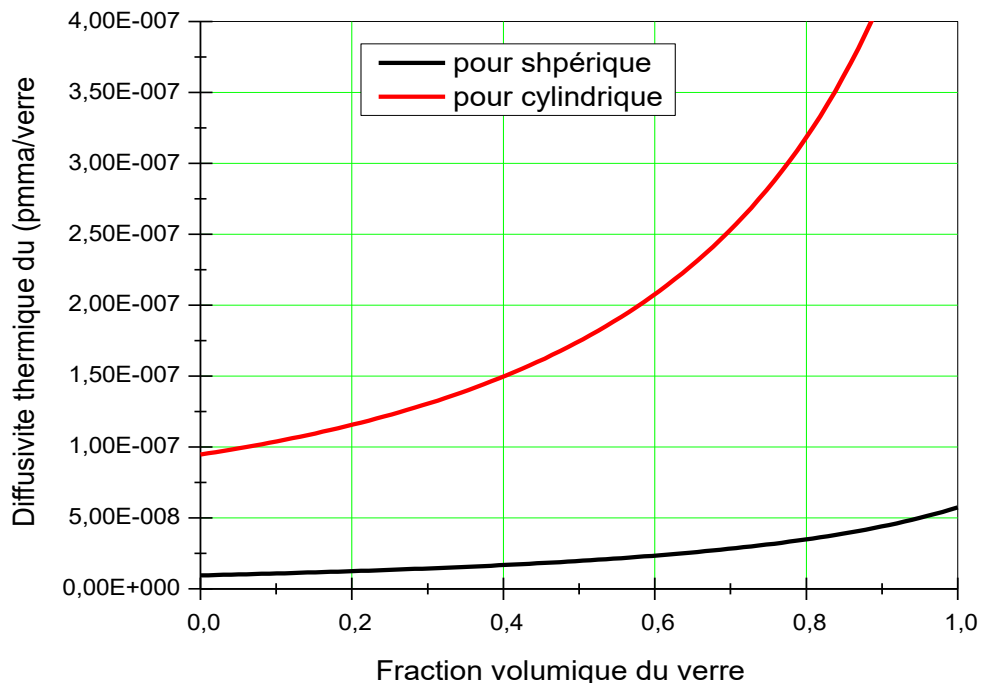


Fig. 38 : variation de la diffusivité thermique du (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique des particules de verre sphériques et cylindriques

La figure 38 représente la variation de la diffusivité thermique du matériau composite (pmma/verre) en fonction de la fraction volumique des particules de verre sphériques ou cylindriques. La figure montre que lorsque la fraction volumique des particules sphériques ou cylindriques de verre augmente la diffusivité thermique du matériau composite (pmma/verre) à particules sphériques et celle du (pmma/verre) à particules cylindriques varient dans la

même sens que la conductivité thermique du (pmma/verre) à particules sphériques ou cylindriques.

Cependant, le fait que la diffusivité thermique du matériau composite (pmma/verre) à particules cylindriques de verre soit largement supérieures que la diffusivité thermique du (pmma/verre) à particules sphériques de verre. Cette différence traduit, à travers le modèle théorique de Hashin et Shtrikman, l'effet de la forme géométrique du verre sur leurs propriétés thermophysique.

6.2.3.6. Diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre :

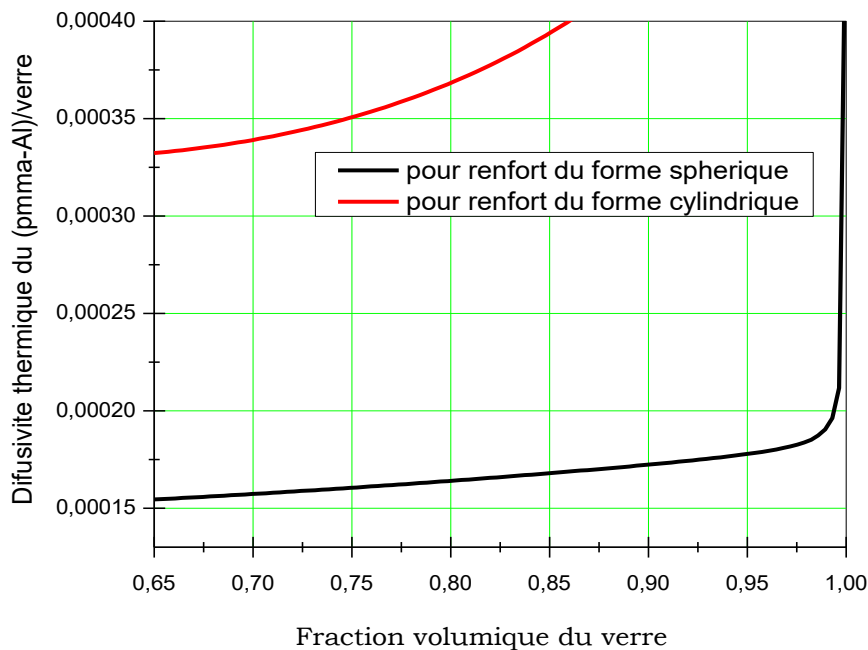


Fig. 39 : variation de la diffusivité thermique du (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique des particules du verre sphériques et cylindriques

La figure 39 représente la variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre en fonction de la fraction volumique de verre à particules sphériques ou cylindriques. L'examen de cette figure montre que lorsque la fraction volumique des particules sphériques et celle des particules cylindriques de verre augmentent, la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre à particules sphériques et à

particules cylindriques de verre varie dans le même sens que la conductivité thermique du (pmma-Al)/verre à particules sphériques ou cylindriques .

Pour les mêmes raisons évoquées précédemment la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-Al)/verre à particules cylindriques de verre croit plus rapidement que la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma/Al) à particules spheriques.

6.2.3.7. Diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al :

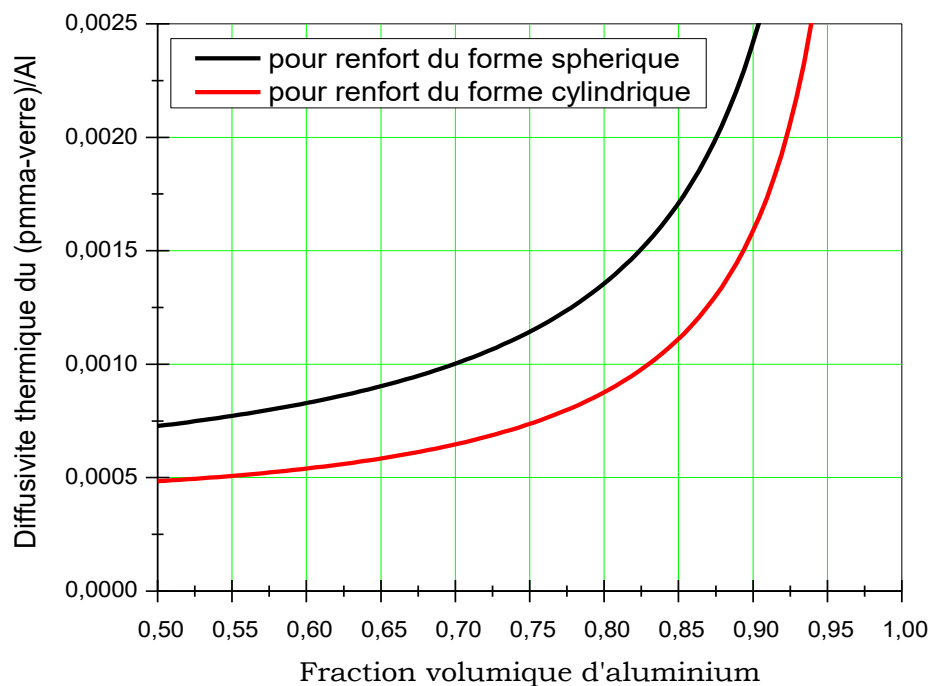


Fig. 40 : variation de la diffusivité thermique du (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique des particules d'aluminium sphériques et cylindriques

La figure 40 représente la variation de la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al en fonction de la fraction volumique des particules sphériques ou cylindriques d'aluminium. Cette figure montre que lorsque la fraction volumique des particules sphériques et celle des particules cylindriques d'aluminium augmentent, la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al à particules sphériques et celle à particules cylindriques d'aluminium varient dans le même sens que celle des composites précurseurs respectifs.

En effet, la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al à particules sphériques de renfort croît plus rapidement que la diffusivité thermique du matériau composite hybride (pmma-verre)/Al à particules cylindriques d'aluminium. Ce résultat explique, à travers le modèle théorique de Hashin et Shtrikman, l'effet de la forme géométrique d'aluminium sur leurs propriétés thermophysiques.

Conclusions :

Ce travail constitue une étude comparative. Il porte, essentiellement, sur la prédiction du comportement thermique de deux matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al et de leurs composites précurseurs (pmma/Al) et (pmma/verre). Cette étude est, essentiellement, consacrée à l'examen de la conductivité thermique et la diffusivité thermique de ces matériaux composites hybrides et de leurs composites précurseurs. Elle nous a permis d'avoir une idée sur l'influence de la nature du renfort et celle de la forme géométrique des particules de renfort sur le comportement thermique des deux matériaux composites hybrides et de leurs composites précurseurs . L'accomplissement de ce travail nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Prémière conclusion :

L'application du modèle théorique de Hashin et Shtrikman à la prédiction des propriétés thermophysiques des deux matériaux composites hybrides à matrice polymère (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al et de leurs matériaux précurseurs (pmma/Al) et (pmma/verre) nous a montré, après avoir choisi pour renforts un métal non ferreux (l'aluminium) et un matériau minéral (le verre) que la conductivité thermique et la diffusivité thermique d'un matériau composite hybride à matrice polymère sont essentiellement dues aux quatre contributions suivantes :

- a) La contribution thermophysique de la matrice polymère
- b) La contribution thermophysique des matériaux de renfort
- c) La contribution de la nature des particules de renfort
- d) La contribution de la forme des particules de renfort.

Cependant, la conductivité thermique des particules de renfort en aluminium étant largement supérieure aux conductivités thermiques de la matrice en poly (méthacrylate de méthyle) et du renfort en verre, la contribution de celles-ci est prépondérante. Ceci dénote le rôle important joué par la nature du renfort dans le comportement thermique des matériaux composites hybrides et de leurs précurseurs .

Deuxième conclusion :

Nous avons constaté que les valeurs prises par la conductivité thermique et la diffusivité thermique des matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al à particules de renfort sphériques étaient supérieures à celles prises par les matériaux composites hybrides (pmma-Al)/verre et (pmma-verre)/Al à particules de renfort cylindriques. Ceci s'explique par le fait que la surface d'échange des particules cylindriques soit supérieure à celle des particules sphérique.

Troisième conclusion :

A constituants identiques, les résultats obtenus montrent, à travers les valeurs prises par la conductivité thermique et la diffusivité thermique, que le transfert de la chaleur s'effectue plus facilement au sien des matériaux composites hybrides et de leurs composites précurseurs à particules de renfort sphériques.

Quatrième conclusion :

Ce travail a fait l'objet d'une communication orale et d'une communication par affiche (Poster) à la conférence internationale sur les matériaux polymères et leurs composites CIMPC 17. qui s'est déroulée à Tlemcen en Avril 2017, sur l'égide du laboratoire de recherche sur les macromolucules.

