

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT PHYSIQUE

N° : ...../2020.....



DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : Physique

OPTION : Physique Énergétique et  
Energie renouvelable

**Mémoire présenté pour l'obtention**

**Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

KHOUNI Soumia

BENSEIDI Aicha

**Intitulé**

**Modélisation numérique et théorique du  
transfert thermique au sein de matériaux  
hétérogènes**

**Soutenu le 27/09 /2020 devant le jury composé de:**

Dr. TAHROUR Farouk	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Président
Dr. BENMANSOUR Nadia	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Rapporteur
Dr. HADDAD Zakaria	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2019/2020**



## ***Remerciements***

*Nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir accordé volonté et patience dans l'accomplissement de ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, **Dr. Nadia Benmansour** maitre de conférence de l'université de M'sila, pour l'intérêt qu'elle a portée à ce travail et pour ses orientations, ses conseils au long de réalisée de ce projet de fin d'étude.*

*Nous tenons aussi remercier tout les membres du jury qui ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes parents, vous qui vous avez cru en moi, trouvez ici tout mon affection et  
ma reconnaissance.*

*Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.*

*A mes frères : Saad et Khaled et Fayçal.*

*A mes sœurs : Khadra et Hayat et Nadjoua.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours soutenue et encouragée, Aicha, Fattoume,  
Hadjer, Salima, Imane, Maria, Naima, Selma.*

*A tous ceux qui m'aiment.*

***Soumia***



## ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail*

*Au propriétaire d'une biographie parfumée et d'une pensée éclairée, car il avait le premier crédit en atteignant l'enseignement supérieur (mon père bien-aimé), que Dieu prolonge sa vie.*

*A ceux qui m'ont mis sur le chemin de la vie, m'ont calmé et ont pris soin de moi jusqu'à ce que je devienne vieux (ma chère mère), que Dieu bénisse son âme.*

*A mes frères, ceux qui ont eu un grand impact sur de nombreux obstacles et difficultés.*

*A tous mes honorables professeurs, qui n'ont pas hésité à me tendre la main.*

*A tous les amis et proches qui marchent avec nous sur les chemins de la vie.*

***Aicha***



# Sommaire

Sommaire .....	I
Liste des figures .....	III
Liste des tableaux .....	IV
Nomenclature .....	V
Introduction .....	1

## *Chapitre 1 : Matériaux hétérogènes*

1.1- Matériau hétérogène .....	4
1.1.1- Matrice .....	4
1.1.2- Renfort .....	5
1.1.3- Interface .....	6
2.1- Classification des composites .....	6
2.1.1- Composites à fibres .....	6
2.1.2- Composites à particules .....	6
3.1- Domaine d'application .....	7
3.1.1- Construction aéronautique .....	7
3.1.2- Construction automobile .....	7
3.1.3- Secteur du bâtiment .....	8
3.1.4- Loisirs et sports .....	8
3.1.5- Autres domaines d'utilisation des composites .....	8
3.1.6- Voies d'un développement durable .....	9
4.1- Propriétés thermiques des composites .....	9
4.1.1- Conduction .....	10
4.1.2- La conductivité thermique .....	10
4.1.3- La diffusivité thermique .....	11
4.1.4- Effusivité thermique .....	12
4.1.5- Capacité calorifique .....	12

4.1.6- La résistance de contact thermique .....	13
---	----

**Chapitre 2 : Modèles de prédiction de la conductivité thermique effective des composites**

1.1- Modèles théoriques .....	15
1.1.1- Modèle de Lewis-Nielsen .....	15
1.1.2- Modèle de Hasselman et Johnson .....	16
1.1.3- Modèle de Maxwell.....	17
1.1.4- Modèle de Bruggeman.....	17
1.1.5- Modèle de Topper .....	18
1.1.6- Modèle de Hatta et Taya .....	19
1.1.7- Modèle de Hashin et Shtrikman.....	19
2.1- Modèles numériques .....	20
2.1.1 - Méthode des éléments finis (M.E.F).....	20
2.1.1 - Modélisation numérique en trois dimensions (3D).....	21

**Chapitre 3 : Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les composites**

1.1-Prédiction de la conductivité thermique des composites (EVA/S5000S2M, EVA/SiO <sub>2</sub> )	26
1.1.1- Modélisation numérique .....	26
1.1.2- Propriétés de la matrice et de la charge .....	26
1.1.3- Hypothèses .....	26
1.1.4- Cellule élémentaire et grandeurs réduites .....	27
1.1.5- Résolution des équations de calcul de la conductivité effective .....	29
1.1.6- Etapes de modélisation .....	29
2.1- Résultats et discussion .....	33
2.1.1- Conductivité thermique effective .....	33
2.1.2- Comparaison entre les résultats numériques, les mesures expérimentales et les modèles analytiques .....	39

Conclusion .....	43
Bibliographies .....	...44

## Liste des figures

### *Figure Chapitre 1*

Figure 1.1: Constituants d'un matériau composite .....	4
Figure 1.2: Différentes familles de matrices .....	5
Figure 1.3: Les différents types de renfort de base .....	6
Figure 1.4: Schéma du transfert de chaleur conductif .....	10

### *Figure Chapitre 2*

Figure 2.1: Comparaison entre les résultats numériques, résultats expérimentaux et les modèles théoriques de prédiction de k du composites EVA/BaTiO <sub>3</sub> .....	22
Figure 2.2 : Comparaison entre les résultats numériques, résultats expérimentaux et les modèles théoriques de prédiction de k du composites PP/Cu.....	22

### *Figure Chapitre 3*

Figure 3.1: (a) modèle cubique simple, (b) cellule cubique simple (SC), (c) cellule cubique centrée (BCC).....	27
Figure 3.2: choix du modèle.....	30
Figures 3.3: Géométries étudiée (a) SC, (b) BCC .....	29
Figure 3.4: Définition des propriétés des sous domaines.....	30
Figure 3.5: Définition des conditions aux limites.....	31
Figure 3.6: Maillage de la géométrie (modèle SC).....	32
Figure 3.7: Grandeurs physiques calculées (modèle SC).....	33
Figure 3.8: Conductivité thermique effective en fonction de la concentration (modèle SC pour le composite EVA/SiO <sub>2</sub> ).....	34
Figure 3.9: Conductivité thermique effective en fonction de la concentration (modèle BCC pour le composite EVA/SiO <sub>2</sub> ).....	34
Figure 3.10: Conductivité thermique effective en fonction de la concentration (modèle SC pour le composite EVA/S5000S2M).....	35

Figure 3.11: Conductivité thermique effective E en fonction des paramètres C et D, modèle SC, EVA/SiO<sub>2</sub> ( $\varphi = 3.2\%$ ).....36

Figure 3.12: Conductivité thermique effective E en fonction des paramètres C et D, modèle BCC, EVA/SiO<sub>2</sub> ( $\varphi = 3.2\%$ ).....37

Figure 3.13: Conductivité thermique effective en fonction de B et C, modèle SC, EVA/SiO<sub>2</sub>.....37.

Figure 3.14: Conductivité thermique effective en fonction de B et C, modèle BCC, EVA/SiO<sub>2</sub>.....38.

Figure 3.15: Conductivité thermique effective en fonction de la concentration, et comparaison avec les mesures expérimentales, pour le modèle SC (EVA/S5000S2M).....39

Figure 3.16: Conductivité thermique effective en fonction de la concentration, et comparaison avec les mesures expérimentales, et les modèles analytiques (EVA/SiO<sub>2</sub>).....40

## Liste des tableaux

<b><i>Tableaux Chapitre 2</i></b>
-----------------------------------

Tableau 2.1: Valeurs de A pour différents types d'inclusion ..... 16

<b><i>Tableaux Chapitre 3</i></b>
-----------------------------------

Tableau 3.1: Propriétés de la matrice et de la charge .....26

## Nomenclature

A	Coefficient de forme	-
a	Rayon	m
2a	Longueur de volume élémentaire représentatif (V.E.R)	
B	Distance entre la charge et la matrice sans dimension	
-		
b	Dimension	-
C	Résistance contact sans dimension	-
$C_p$	Capacité calorifique	J/Kg.K
D	Diffusivité thermique	$m^2/s$
D	Rapport entre les conductivités thermiques	-
E	Conductivité thermique effective sans dimension	-
e	Effusivité thermique	$J/m^2.K.s^{\frac{1}{2}}$
h	Largeur	m
$h_c$	Conductivité thermique limite	$W/m.K$
K	Conductivité thermique	$W/m.K$
$K_{ch}$	Conductivité thermique de la charge	$W/m.K$
$K_m$	Conductivité thermique de la matrice	$W/m.K$
$K_{eff}$	Conductivité thermique effective	$W/m.K$
$K_1$	Conductivité thermique de charge	$W/m.K$
m	Masse	Kg
Q	Flux de chaleur	W
q	Densité de flux thermique	$W/m$
dQ	Quantité de chaleur	J
R	Facteur lié à la géométrie des inclusions	-

r	rayon	m
$r_c$	Résistance de contact	$K.m^2/w$
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	m
S	Températures de la charge et de la matrice	K ou $C^\circ$
s	Dimension maximal	-
T	Températures	K ou $C^\circ$
T	Températures de la charge et de la matrice	K ou $C^\circ$
t	Temps	s
$\Delta T$	Gradient température	K ou $C^\circ$
dT	Températures	K ou $C^\circ$
x	Variable d'espace dans la direction du flux	-
x	Distance	m
X, Y, Z	Dimensions adimensionnelles	-
x, y, z	Coordonnées	m

### **Symboles grecs**

$\Phi$	Puissance transférée	W
$\lambda$	Conductivité thermique	$W/m.K$
$\Delta$	Gradient	-
$\rho$	Masse volumique	$Kg/m^3$
$\phi$	Fraction volumique de la charge	-
$\phi_m$	Volume maximal de la charge fraction	-
$\theta, \tau$	Température	K
$\phi$	Concentration volumique	-

## **Abréviations**

CTE	Conductivité thermique effective
EVA	Ethylène – acétate de vinyle
MEF	Méthode éléments finis
VER	Volume élémentaire représentatif
SC	Cubique simple
BCC	Cubique centrée
FCC	Cubique à faces centrées

## **Indices**

c	contacte
te	transverse effective
m	matrice
ch	charge
eff	effective

# *Introduction*



## Introduction

De nos jours, les matériaux composites ont connu une évolution très remarquable. Ils ne cessent d'évoluer et gagner une importance [1]. Ils sont largement utilisés aujourd'hui dans de nombreuses applications structurelles, non structurelles et fonctionnelles dans de nombreux secteurs de l'ingénierie. L'un des facteurs les plus importants qui font des composites de plus en plus attrayants est la possibilité d'une gestion immobilière par le biais d'une conception constitutionnelle [2]. En outre, les matériaux composites sont largement utilisés dans les applications de transfert de chaleur et de la gestion thermique des équipements.

La conductivité thermique effective est l'une des principales propriétés thermophysiques utilisées pour quantifier le comportement thermique de ces matériaux hétérogènes. En effet, l'information sur la conductivité thermique des matériaux est nécessaire pour déterminer les conditions optimales pendant le traitement des matériaux, ainsi que pour analyser le transport de chaleur dans les matériaux pendant les applications pratiques. La modélisation de la conductivité thermique effective de matériaux hétérogènes est d'un grand intérêt dans de nombreuses applications de transfert de chaleur. Pour cela, des différents modèles analytiques et numériques ont été utilisés pour déterminer la conductivité thermique des composites [3, 4].

D'une manière générale, la conductivité thermique effective de composites dépend de très nombreux facteurs d'une part liés au matériau composite comme conductivités des deux phases, taux de charge, microstructure, concentration,...) et d'autre part liés au procédé de fabrication des pièces en composite. Seuls les facteurs liés à l'effet du matériau composite seront considérés dans cette étude.

De ce fait, l'objectif de ce mémoire est de réaliser une modélisation numérique et théorique de la conductivité thermique de composites de polymère d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) avec des charges de poudre de verre ( $\text{SiO}_2$ ) et des charges de verre argenté (S-5000-S3).

Dans ce contexte, ce mémoire est scindé donc en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous présentons une étude bibliographique sur les matériaux hétérogènes. On s'intéresse à la définition des composites et leurs classification. Ainsi, leurs applications, et leurs propriétés thermiques.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des modèles numérique et théorique utilisés pour déterminer la conductivité thermique des matériaux hétérogènes; Il est composé

de deux parties, la première partie est dédiée à la présentation des modèles numériques, ainsi qu'une discussion des modélisations numériques de plusieurs auteurs, sera présentée. Dans la Deuxième partie, on s'intéresse aux quelques modèles théoriques qui permettent la prédiction de la conductivité thermique des composites.

Le but de troisième chapitre est d'illustrer l'approche numérique suivie pour la détermination de la conductivité thermique des composites (EVA/ SiO<sub>2</sub>- EVA/S-5000-S3) en utilisant le logiciel Comsol, ainsi que la démarche à suivre pour la modélisation numérique. Enfin, les résultats obtenus dans ce travail sont présentés.

# **Chapitre 1**

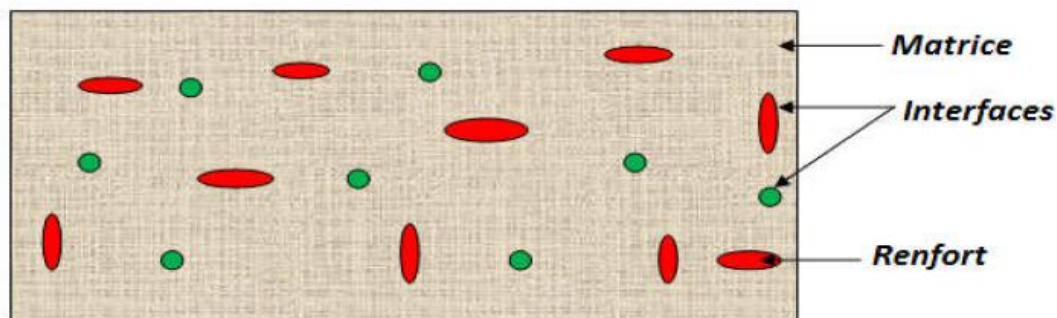
## **Matériaux hétérogènes**



## 1.1- Matériau hétérogène

Un matériau composite peut être défini comme une association d'au moins deux matériaux non miscibles. Le nouveau matériau ainsi obtenu possède des propriétés que les matériaux seuls ne possèdent pas. Ceci permet d'améliorer la qualité des produits face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, conductivité, ...etc ) [5].

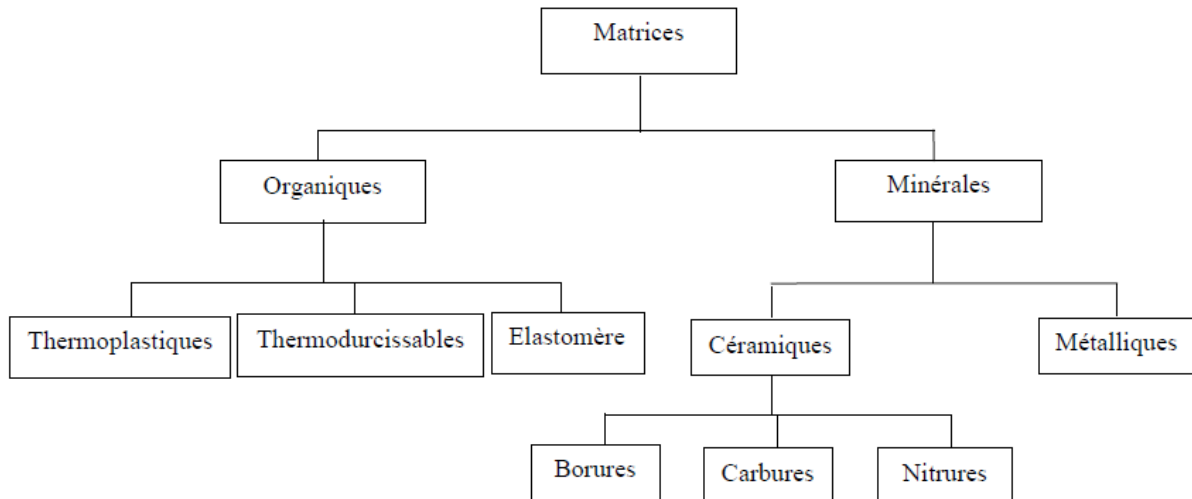
Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice [6]. Entre le renfort et la matrice existe une zone de liaison appelée interface (interphase) [5].



**Figure 1.1:** Constituants d'un matériau composite.

### 1.1.1- Matrice

La matrice est, avec les renforts, l'un des deux principaux constituants des matériaux composites. C'est le constituant qui permet de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transmission des efforts mécaniques vers les renforts. La matrice est généralement homogène et isotrope ; on distingue les matrices céramiques, les matrices métalliques, les matrices minérales et les matrices organiques [5]. On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices [7].



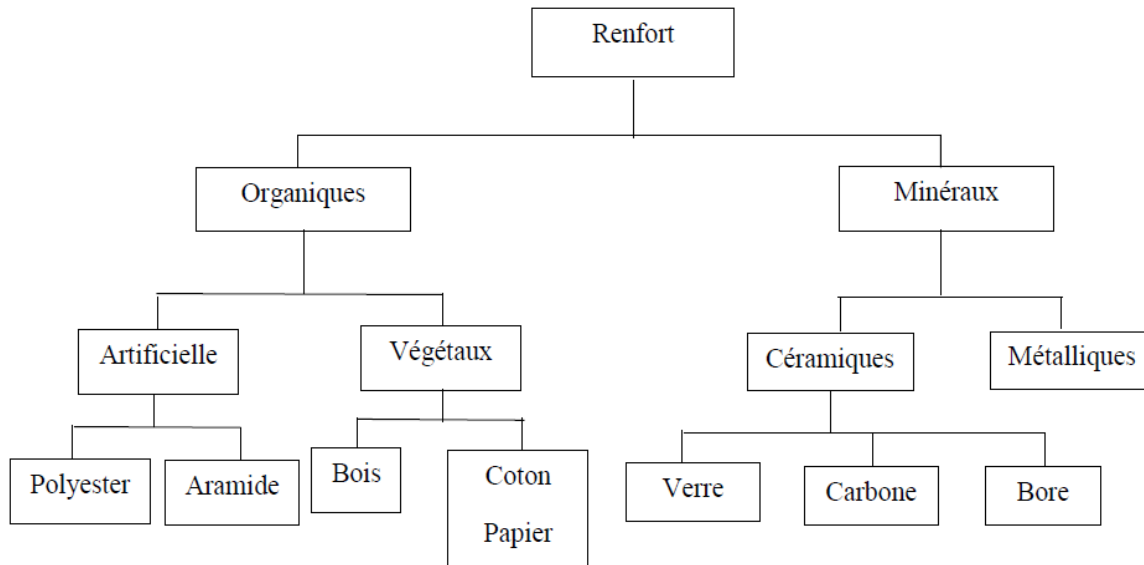
**Figure 1.2:** Différentes familles de matrices.

### 1.1.2- Renfort

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la matrice ; son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction, et qui se présente le plus souvent sous forme fibreuse ou filamenteuse :

- fibres longues unidirectionnelles (Carbonne, verre)
- fibres longues tissées,
- fibres courtes réparties aléatoirement sans directions privilégiées (mat) [6].

Les différents types de renforts sont cités dans l'organigramme suivant [7]:



**Figure 1.3:** Les différents types de renfort de base.

### 1.1.3- Interface

Entre le renfort et la matrice existe une zone de liaison appelée interface (interphase) qui se forme spontanément lorsque deux phases sont mises en contact l'une de l'autre au moment de l'élaboration du matériau et qui se maintient entre ces deux phases pendant toute la vie du matériau [5].

## 2.1- Classification des composites

En fonction de la forme des renforts, on distingue deux types de composites :

### 2.1.1- Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibre si le renfort est sous forme de fibres. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues (fibres longues), soit sous forme de fibres discontinues (fibres courtes, coupées, etc.) [5]. Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes et anisotropes [6].

### 2.1.2- Composites à particules

Un matériau composite est dit à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres ne possède pas de dimension privilégiée.

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion. Les particules peuvent être classées suivant leur forme géométrique ; particules sphérique et particules non sphériques [6].

### **3.1- Domaine d'application**

Les composites sont largement utilisés dans l'industrie, parce qu'ils présentent de bonnes caractéristiques telles la rigidité, légèreté et résistance à des contraintes d'origine mécanique ainsi qu'à celles d'origine thermique [8].

#### **3.1.1- Construction aéronautique**

Les premières pièces composites ont été introduites sur les satellites à la fin des années 1970. Les premiers matériaux composites ont été introduits sur les missiles balistiques dans le milieu des années 1960 par l'utilisation de structures bobinées fibres de verre/résine époxyde.

L'utilisation des matériaux composites dans les constructions aéronautiques entraîne un gain de poids substantiel. Leur emploi permet, à performances égales, des gains de masse variant de 10% à 20%. Le poids de l'avion moyen-courrier Boeing 767 a été réduit, par l'emploi des composites, de 921 kilogrammes par rapport à la solution conventionnelle. Les matériaux composites sont essentiellement utilisés pour la conception et réalisation des propulseurs à poudre des lanceurs de satellites et de leur tuyère d'éjection des gaz de propulsion, obtenue par bobinage de fibres de verre, de kevlar ou de carbone, afin de résister à la pression interne résultant de la combustion du propergol solide et aux efforts de lancement qui, dans certain cas, se traduisent par des chocs et des vibrations. Sur les avions commerciaux, les premiers appareils produits industriellement en grande série utilisaient essentiellement des alliages d'aluminium, de l'acier et du titane, aujourd'hui ; les avions commerciaux les plus récents utilisent en masse encore 54% d'alliage d'aluminium, mais 20% de matériaux composites ont été introduits dans la structure, 13% d'acier, 6% de titane et 7% de matériaux divers.

#### **3.1.2- Construction automobile**

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, chez les grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) pour développer des coffres et hayons. La société LOHEAC de transports routiers, a pu réduire substantiellement sa consommation de carburant grâce à l'économie de poids obtenue en remplaçant les cabines conventionnelles de ses

tracteurs par de nouveaux éléments moulés en une seule pièce renforcés de fibre à haute résistance. Les composites sont choisis pour la conception de ressorts à lames. Ce sont des pièces de suspension routières très sollicitées, utilisées par les véhicules de gros tonnage et dont la lame secondaire.

### **3.1.3- Secteur du bâtiment**

Les composites ont relativement utilisé dans le secteur du bâtiment, notamment du fait :

- d'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels,
- d'une relative méconnaissance des architectes et bureaux d'études vis-à-vis de composites,
- d'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).

Les qualités des composites (légèreté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique), permettent de prévoir un développement prometteur.

### **3.1.4- Loisirs et sports**

De part leur légèreté, leur bonne tenue à la fatigue statique et dynamique et leur stabilité dimensionnelle, les matériaux composites sont des matériaux idéaux pour la fabrication et la conception de très nombreux articles de sports et de loisirs tel que les raquettes de tennis, les cannes à pêche et de hockey....

Les constructeurs de matériels de sport et loisirs ont depuis longtemps adopté les composites, développés notamment par Shape Technique et Ems Chimie (Suisse) ; ces nouveaux matériaux leur ont permis de faire preuve d'une grande créativité, tout en présentant des propriétés mécaniques intéressantes qui ont, dans une large mesure, été à l'origine du développement récent des sports de glisse modernes. (Skis moulés et non stratifiés).

### **3.1.5 - Autres domaines d'utilisation des composites**

L'équipement industriel (boîtes de stockage, isolation) et l'équipement électronique, représentent déjà 26% du marché des composites à matrice organique. En électronique, les boîtiers céramiques pour microprocesseurs d'Agide, récemment introduits au Nouveau Marché, sont utilisés dans le monde entier.

Les composites jouent un rôle croissant dans le secteur dentaire (implants) et biomédical (matériaux prothétiques), en dépit de fortes contraintes de biocompatibilité, ainsi que dans la réalisation d'instruments de musique (pianos, clavecins, violons et mêmes accordéons).

### **3.1.6 - Voies d'un développement durable**

Les composites devraient se développer dans les prochaines années. Cependant, pour y parvenir, l'industrie des matériaux composites devra intégrer les contraintes d'un développement durable.

Ainsi, à partir de 2004, 85 % du poids des véhicules hors d'usage devront être recyclés. Actuellement, il n'existe pas de solution technique pleinement opérationnelle et économiquement viable pour recycler les composites utilisés dans le secteur de l'automobile. Ces composites sont, pour l'essentiel, thermodurcissables. Quelques initiatives industrielles se développent en Europe, notamment Mielec Composites et Recyclage en France, opérateur de la seule usine de recyclage de composites, et Eurocom en Allemagne.

Techniquement, la valorisation des matériaux thermodurcissables peut passer par le broyage et l'utilisation des granulats obtenus sous forme de charges à très faible valeur ajoutée pour résines, bitumes et ciments. Mais les impératifs de recyclage devraient favoriser l'utilisation de composites thermoplastiques, que l'on peut plus facilement retraiter.

Afin que les bureaux d'études utilisent davantage les matériaux composites, il faudra dans l'avenir mieux les caractériser. Cela permettra aux concepteurs de développer une analyse fonctionnelle qui intègre tous leurs apports. En effet, ces matériaux souffrent d'un défaut de modélisation et de normalisation face à des matériaux traditionnels comme l'acier, qui font l'objet de normes nationales ou européennes. Pour caractériser efficacement ces matériaux, des logiciels de conception et de modélisation doivent faire l'objet d'un développement plus large qu'aujourd'hui.

## **4.1- Propriétés thermiques des composites**

La chaleur est une représentation thermodynamique du transport d'énergie via une différence de température entre deux substances. Elle peut être transportée par conduction, convection ou par rayonnement [5].

Dans ce travail seulement le transfert par conduction est pris en compte. Le sujet de transfert thermique dans les matériaux composites est l'un des problèmes classiques. Récemment, il a reçu une attention considérable en raison de l'importante croissance des systèmes à haute température, comme dans l'automobile, les structures spatiales,...etc.

Les propriétés thermophysiques d'un matériau caractérisent son comportement et sa réaction face à un gradient de température. Les mesures de flux de chaleur, de densités de flux et de

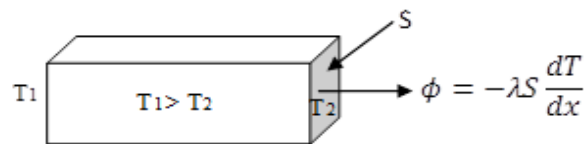
propriétés thermophysiques telles que la conductivité ou la diffusivité thermique sont essentielles dans l'étude des procédés thermiques. Elles permettent de prévoir la manière avec laquelle le matériau va réagir face à un environnement donné.

L'information sur la conductivité thermique des matériaux est nécessaire pour déterminer les conditions optimales pendant le traitement des matériaux, ainsi que pour analyser le transport de chaleur dans les matériaux pendant les applications pratiques.

#### 4.1.1- Conduction

Le transfert de chaleur par conduction correspond à un transfert d'énergie interne dû aux interactions entre les particules qui constituent le système thermodynamique. Il est présent dans tous les corps, quel que soit leur état (solide, liquide ou gaz).

Joseph Fourier a trouvé expérimentalement, en 1822, la relation entre le flux de chaleur et le champ de température (loi de Fourier):



**Figure 1.4:** Schéma du transfert de chaleur conductif.

$$\Phi = -\lambda \cdot S \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

$\Phi$ : Puissance transférée (W)

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m<sup>2</sup>)

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux

Le signe (-) dans l'équation est dû au fait que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température.

$\lambda$  : Conductivité thermique du matériau,

#### 4.1.2- La conductivité thermique

En physique la conductivité thermique est la grandeur introduite pour mesurer la capacité d'une substance à conduire la chaleur. Elle intervient dans la formulation de la loi de Fourier pour la conduction de la chaleur.

La conductivité thermique dépend de [9]:

- La nature physico-chimique du matériau
- La nature de la phase considérée (solide, liquide, gaz)
- La température
- L'orientation dans les matériaux anisotrope

L'importance de la conductivité thermique des polymères et des composites à matrice polymère n'a cessé d'augmenter ces dernières années. Il est également important de connaître la conductivité thermique des inclusions afin d'analyser le procédé de transfert de chaleur pendant la modélisation.

#### 4.1.3- La diffusivité thermique

La diffusivité thermique est définie comme la vitesse à laquelle un matériau répond à un changement de température. La diffusivité thermique notée  $D$  est définie par l'équation :

$$D = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (1.2)$$

Avec  $\lambda$  la conductivité thermique,  $C_p$  la capacité calorifique à pression constante et  $\rho$  la masse volumique.  $D$  est exprimé en  $m^2/s$ . Pour un matériau avec une diffusivité thermique élevée, la propagation de la chaleur est plus rapide.

La diffusivité thermique est évaluée à partir de l'évolution température - temps en utilisant un schéma différentiel unidirectionnel (c'est-à-dire en limitant le calcul de donnée à une seule direction  $x$ ), ce qui permet d'évaluer les pertes radiatives de surfaces. Le calcul de la diffusivité à partir de cette méthode devient :

$$\frac{dT}{dt} = D \frac{d^2T}{dx^2} \quad (1.3)$$

Où  $t$  est le temps,  $D$  la diffusivité thermique,  $x$  la distance comprise entre 0 et  $L$  (épaisseur) et  $T$  la température [10].

#### 4.1.4 - Effusivité thermique

Notée  $e$ , elle s'exprime en  $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot K^{-1}$ . Elle traduit l'aptitude d'un matériau à absorber de la chaleur du milieu environnant. C'est donc la contribution de deux phénomènes à savoir d'une part la conduction thermique  $\lambda$  et d'autre part le stockage de l'énergie  $C_p$  : plus la conductivité thermique est grande, plus l'apport de chaleur du milieu environnant vers le matériau sera important. En outre, plus la capacité thermique à pression constante est grande, moins la chaleur emmagasinée contribuera à l'élévation de la température et laissera la possibilité d'en accumuler d'autant plus l'effusivité thermique s'exprime alors de la façon suivante :

$$e = \sqrt{\lambda \times (\rho \times C_p)} \quad (1.4)$$

Ce paramètre intervient notamment lors de la mise en contact de deux matériaux ayant des températures différentes. La température dite « de contact » s'exprime directement en fonction de la température des deux corps et de leur effusivité respective [11].

#### 4.1.5- Capacité calorifique

La capacité calorifique ou thermique massique ou molaire est aussi appelée chaleur massique ou chaleur spécifique. Elle est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'un système. C'est donc une grandeur intensive qui ne dépend pas de la masse du système étudié.

Son unité en système international est le  $[J/Kg \cdot K]$  si elle massique ou bien  $[J/mol \cdot K]$  si elle est molaire [12].

Considérons un solide de masse  $m$ . S'il reçoit une quantité de chaleur  $dQ$ , sa température s'élève de  $dT$  telle que:

$$dQ = -m \cdot C \cdot dT \quad (1.5)$$

$C$ : désigne la chaleur massique (ou spécifique) du solide

#### 4.1.6 - La résistance thermique de contact

On utilise la notion de résistance thermique pour décrire les transferts de chaleur entre deux solides en contact mutuel. En effet, une surface solide possède une rugosité qui peut aller de quelques dixièmes à quelques centaines de microns. La conséquence est que la surface réelle de contact entre les deux solides ne représente que quelques pourcent de la surface totale [5].

Or, l'espace disponible entre les points de contact est occupé par un fluide (par exemple de l'air) qui peut avoir une conductivité thermique plus faible que celle des deux solides. À l'échelle macroscopique (c'est à dire à une échelle spatiale très supérieure à la rugosité des surfaces), cela entraîne une discontinuité de la température lorsque l'on passe d'un solide à l'autre. Par définition, la résistance de contact  $r_c$  relie le «saut» de température  $(T_{P1} - T_{P2})$  à la densité de flux thermique  $q$  qui traverse le contact :

$$T_{P1} - T_{P2} = r_c \cdot q \quad (1.6)$$

Une résistance de contact dépend d'un grand nombre de paramètres : nature des solides et du fluide interstitiel, défauts géométriques et rugosité des surfaces, pression de contact, etc. Il est très difficile de prédire par le calcul sa valeur dans une situation donnée. L'ordre de grandeur vaut typiquement  $10^{-3}$  à  $10^{-6}$  K.m<sup>2</sup> .W<sup>-1</sup>.

# **Chapitre 2 : Modèles de prédiction de la conductivité thermique effective des composites**



## 1.1- Modèles théoriques

Les études théoriques sur la conductivité thermique effective des composites ont été poursuivies pendant plus de 100 ans. De nombreuses corrélations théoriques et empiriques ont été indiquées dans la littérature pour prédire la conductivité thermique des composites. Les modèles théoriques de prédiction de la conductivité thermique se divisent en trois parties: les modèles avec interface parfaite, modèles avec interface imparfaite et modélisation par les méthodes d'homogénéisation. Cette classification a été développée pour des matériaux composites définis comme des matériaux à deux phases (solide-solide) comportant des inclusions (phase 2) dispersées dans la matrice (phase 1). Le gradient de température ainsi que le flux thermique dans le matériau sont isotropes. Dans ce travail, seulement quelques modèles de prédictions de la conductivité thermique seront présentés [13].

### 1.1.1- Modèle de Lewis-Nielsen

Ce modèle empirique est assez populaire dans la littérature et donne des résultats relativement bons. Il a été créé pour un volume de remplissage modéré fractions (jusqu'à 40%). Pour des valeurs plus élevées, il devient instable.

Les avantages du modèle Lewis-Nielsen sont sa simplicité et la couverture d'un large éventail de formes de particules et motifs. La conductivité thermique effective d'un composite selon le modèle de Lewis-Nielsen est donné comme [14]:

$$k_{eff} = k_m \left( \frac{1 + AB\phi}{1 - B\Psi\phi} \right) \quad (2.6)$$

où

$$B = \left( \frac{k_1/k_m - 1}{k_1/k_m + A} \right) \quad (2.7)$$

$$\Psi = 1 + \left( \frac{1 - \phi_m}{\phi_m^2} \right) \phi \quad (2.8)$$

Dans les équations (6, 7, 8),  $k_m$  est la conductivité thermique de la matrice,  $k_1$  la conductivité thermique de la charge,  $\phi$  est la fraction volumique de la charge,  $\phi_m$  est le volume maximal

de la charge fraction et A est coefficient de forme pour les particules de charge. Le Tableau 1 représente quelques valeurs de A [13] :

Type d'inclusion	allongement	A
Cubes	1	2.0
Spheres	1	1.5
Fibresaléatoires	2	1.58
Fibresaléatoires	4	2.08
Fibreunidirectionnelle Orientée	–	0.5

**Tableau 2.1:** Valeurs de A pour différents types d'inclusion

### 1.1.2- Modèle de Hasselman et Johnson

Hasselman et Johnson ont souligné que pour un composite avec une forme d'inclusion donnée, l'efficace thermique la conductivité dépend non seulement du volume de remplissage fraction, mais aussi la taille des particules. De plus, ils ont examiné l'influence des espaces interraciaux entre la charge et matrice sur la diffusivité thermique et la conductivité du Ni-glass matériaux composites. Ils ont relié ces observations avec la présence d'une résistance thermique interraciale. Prochainement après, ils ont proposé une simple modification de l'original Modèles Maxwell et Rayleigh pour dériver les premières expressions pour une conductivité thermique effective des matériaux composites avec une résistance thermique interraciale non nulle.

La nouveauté dans les formules Hasselman-Johnson est la dépendance de la conductivité thermique effective sur le rayon des particules  $a$  et la conductivité limite  $h_c$  [W / (m<sup>2</sup> K)] qui est l'inverse de la thermique interfaciale résistance. Les auteurs ont dérivé des expressions pour une continuité phase de matrice avec des concentrations diluées de dispersions avec plaque sphérique, cylindrique et plate géométrie. Les expressions et sont équivalentes à Résultat de Maxwell pour les sphères et résultat de Rayleigh pour cylindres perpendiculaires

au flux de chaleur. Expression est destinée aux dispersions de plaques plates orientées perpendiculairement au flux de chaleur [14].

$$k_{eff} = k_m \frac{\left[ 2 \left( \frac{k_1}{k_m} - \frac{k_1}{ah_c} - 1 \right) \phi + \frac{k_1}{k_m} + \frac{2k_1}{ah_c} + 2 \right]}{\left[ \left( 1 - \frac{k_1}{k_m} + \frac{k_1}{ah_c} \right) \phi + \frac{k_1}{k_m} + \frac{2k_1}{ah_c} + 2 \right]} \quad (2.9)$$

$$k_{eff} = k_m \frac{\left[ \left( \frac{k_1}{k_m} - \frac{k_1}{ah_c} - 1 \right) \phi + \left( 1 + \frac{k_1}{k_m} + \frac{k_1}{ah_c} \right) \right]}{\left[ \left( 1 - \frac{k_1}{k_m} + \frac{k_1}{ah_c} \right) \phi + \left( 1 - \frac{k_1}{k_m} + \frac{k_1}{ah_c} \right) \right]} \quad (2.10)$$

$$k_{eff} = \frac{k_1}{\left[ \left( 1 - \frac{k_1}{k_m} + \frac{2k_1}{ah_c} \right) \phi + \frac{k_1}{k_m} \right]} \quad (2.11)$$

### 1.1.3- Modèle de Maxwell

L'approche de Maxwell suppose que le composite est constitué de sphères dispersées dans un milieu continu. La conductivité thermique effective est alors donnée par [13]:

$$k = k_m \frac{2k_m + k_{ch} - 2(k_m - k_{ch})\phi}{2k_m + k_{ch} + 2(k_m - k_{ch})\phi} \quad (2.12)$$

### 1.1.4- Modèle de Bruggeman

Le modèle de Bruggeman est l'un des corrélations utilisées pour la prédiction de la conductivité thermique effective [15]. Ce modèle est basé sur les suppositions de Maxwell [16] et présenté par l'équation suivante:

$$1 - \phi = \frac{k - k_{ch}}{k_m - k_{ch}} \left( \frac{k_m}{k} \right)^{\left( \frac{1}{1+x} \right)} \quad (2.13)$$

Ou  $k$ ,  $k_m$  et  $k_{ch}$  sont respectivement la conductivité thermique du composite, de la matrice et des charges ;  $\phi$  la concentration volumique en charges et  $x$  constante qui dépend de la

géométrie des inclusions (x=2 pour les inclusions sphériques, x=1 pour les inclusions cylindriques).

### 1.1.5- Modèle de Topper

Ce modèle utilise un modèle d'énergie série parallèle pour un système de vides cubiques dans une matrice ordonnée. La conductivité thermique équivalente est donnée par [17]:

$$\frac{1}{k_{eff}} = \left[ \frac{1 - \Phi^{\frac{1}{3}}}{k_c} + \frac{\Phi^{\frac{1}{3}}}{k_d \Phi^{\frac{2}{3}} + k_c \left(1 - \Phi^{\frac{2}{3}}\right)} \right] \quad (2.14)$$

Pour les sphères réparties dans un simple réseau cubique:

$$\frac{1}{k_{eff}} = \left\{ \frac{1 - 2 \left( \frac{3\Phi}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}}}{k_c} + \frac{\left[ \frac{\tan^{-1} \left( \frac{\left( \frac{3\Phi}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}}}{\left( \frac{k_c}{\pi(k_c - k_d)} - \left[ \frac{3\Phi}{4\pi} \right]^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{2}} \right)}{\pi(k_c - k_d) \left( \frac{k_c}{\pi(k_c - k_d)} - \left[ \frac{3\Phi}{4\pi} \right]^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{2}}} \right]}{\pi(k_c - k_d) \left( \frac{k_c}{\pi(k_c - k_d)} - \left[ \frac{3\Phi}{4\pi} \right]^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (2.15)$$

Avec :

$k_{eff}$  : conductivité thermique du composite.

$k_c$  : conductivité thermique de la phase continue (matrice).  $k_d$  : conductivité thermique de la phase discrète (charge).  $\phi$  : fraction volumique de la charge. Le transfert radiatif est négligeable dans ce modèle

### 1.1.6- Modèle de Hatta et Taya

En 1985, Hatta et Taya développent une méthode de prédiction de la conductivité thermique effective pour des fibres courtes de différentes orientations. Cette approche prend en compte la forme et les interactions entre les fibres de différentes orientations. L'équation de Hatta et Taya est donnée par [13]:

$$k = k_m \left[ 1 - \frac{\varphi_{ch} (k_{ch} - k_m) [(k_{ch} - k_m)(2S_{33} + S_{11}) + 3k_m]}{3(k_{ch} - k_m)^2 (1 + \varphi) S_{11} S_{33} + k_m (k_{ch} - k_m) R + 3(k_m^2)} \right] \quad (2.16)$$

Où  $R$  facteur lié à la géométrie des inclusions.

$$R = 3(S_{11} + S_{33}) - \varphi_{ch}(2S_{11} + S_{33}) \quad (2.17)$$

Si les inclusions sont sphériques, alors  $S_{11} = S_{22} = S_{33} = 1/3$  et l'équation (2.16) se réduit à

$$k = k_m \left[ \frac{\varphi_{ch}}{\frac{(1 - \varphi_{ch})}{3} + \frac{k_m}{k_{ch} - k_m}} \right] \quad (2.18)$$

### 1.1.7- Modèle de Hashin et Shtrikman

Hashin et Shtrikman développent un modèle de prédiction de la conductivité thermique effective pour les matériaux composites macroscopiquement homogène, isotrope et constitués de deux phases [18]. Selon Hashin et Shtrikman la conductivité s'exprime par la relation suivante

$$\frac{k}{k_m} = \frac{1 + (d-1)\varphi_{ch}\beta}{1 - \varphi_{ch}\beta} \quad (2.19)$$

et

$$\beta = \frac{k_{ch} - k_m}{k_{ch} + (d-1)k_m}$$

$d$  est un paramètre qui représente la dimension du système et définit la forme des charges. Dans le cas d'une inclusion sphérique ( $x=y=z$ )  $d=3$ , pour les cylindres  $d=2$ .

## **2.1- Modèles numérique**

La simulation numérique consiste à reproduire sur un ordinateur un phénomène physique par l'utilisation de calculs. En effet certaines expériences complexes ne peuvent pas être réalisées et surtout analysées en grandeur réelle, d'où l'emploi de la simulation qui permet d'étudier plusieurs phénomènes différents indépendamment ou simultanément. Cette approche est limitée par la puissance du calculateur. Le problème est en général simplifié soit géométriquement soit en limitant les phénomènes étudiés ou en limitant le nombre de variables. Lors d'une étude numérique, un problème mathématique continu est approché par un problème discret (matriciel) revenant à limiter l'étude à un nombre fini d'éléments de comportement simple. En réalité, la subdivision en éléments devrait être infinie pour approcher exactement la solution du problème. Chaque méthode implique une approximation qui permet de s'approcher au mieux de la solution du problème continu.

Parmi les méthodes numériques les plus connues et les plus répandues pour la résolution des équations différentielles, décrivant des phénomènes ou des structures électromagnétiques, on peut citer la méthode des éléments finis (MEF), la méthode des différences finis (MDF), la méthode des équations intégrales de frontière (MEIF), la méthode des différences finies dans le domaine des temps (FDTD) [19].

Au cours de ces dernières années, la méthode des éléments finis (MEF) a été souvent utilisée pour étudier le transfert de chaleur dans les matériaux composites [20].

### **2.1.1 - Méthode des éléments finis (M.E.F)**

Cette méthode peut être définie comme « une méthode générale de discrétisation de problèmes continus posés en termes mathématiques bien définis ». Elle a été choisie pour résoudre le problème de la conductivité thermique par calcul matriciel. Une fois les lois physiques thermiques et les lois mathématiques associées sélectionnées, il faut procéder aux étapes suivantes :

- la construction : construire la géométrie ou une géométrie représentative simplifiée du domaine étudié, pour laquelle le phénomène sera simulé. Ce volume, lorsqu'il est de taille minimum, de telle sorte à représenter tout de même l'échantillon dans sa globalité, est appelé VER (Volume Elémentaire Représentatif).

- le maillage : la discrétisation du milieu continu en éléments finis de formes simples et adéquates sur lesquels porte l'approximation.
- l'approximation nodale et la construction des matrices élémentaires pour chaque élément : l'approximation du problème continu est faite aux nœuds et points d'intégration et est posée sous forme matricielle.
- l'assemblage des matrices élémentaires : il est nécessaire pour assurer la continuité entre les éléments. Il tient compte des conditions aux limites.
- la définition des conditions initiales et aux limites du volume étudié.
- la résolution numérique : la méthode des éléments finis étant une approximation de la solution exacte d'un problème mathématique, il existe donc une erreur entre cette valeur exacte et celle issue du calcul numérique. Le type de maillage doit être choisi en fonction de la géométrie et l'erreur sera d'autant plus faible que le maillage sera fin ou raffiné. Enfin le choix de la géométrie de calcul doit être représentatif dans le cas d'une simplification du matériau réel à une géométrie simple [17]

### **2.1.2 - Modélisation numérique en trois dimensions (3D)**

M. Chikhi et al. [21] ont étudié la conductivité thermique effective de plusieurs séries de matériaux composites de polymère constituant deux matrices polymériques: éthylèneacétate de vinyle (EVA) rempli des particules de baryum de titanate ( $BaTiO_3$ ) et le polypropylène (PP) rempli avec des particules de cuivre (Cu). Le logiciel COMSOL 3.5a, basé sur la méthode des éléments finis, a été utilisé pour modéliser le transfert de chaleur thermique pour une cellule élémentaire afin d'évaluer la conductivité thermique effective des composites. L'effet des concentrations de charge et la nature des particules sur la conductivité thermique effective, a été également discuté. Ils ont comparé les valeurs calculées et mesurées de la conductivité thermique pour différents échantillons.

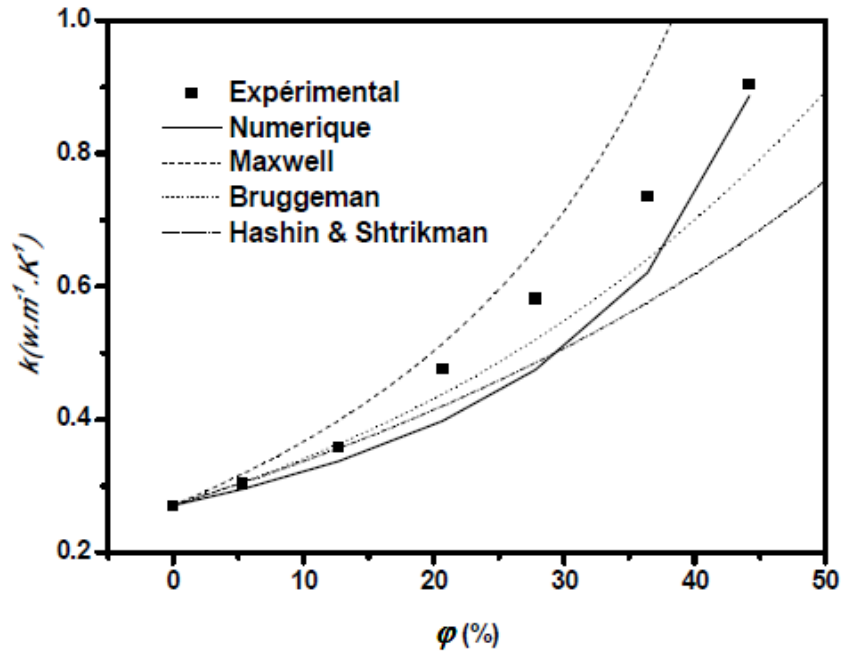


Figure 2.1: Comparaison entre les résultats numériques, résultats expérimentaux et les modèles théoriques de prédiction de  $k$  du composites EVA/BaTiO<sub>3</sub>.

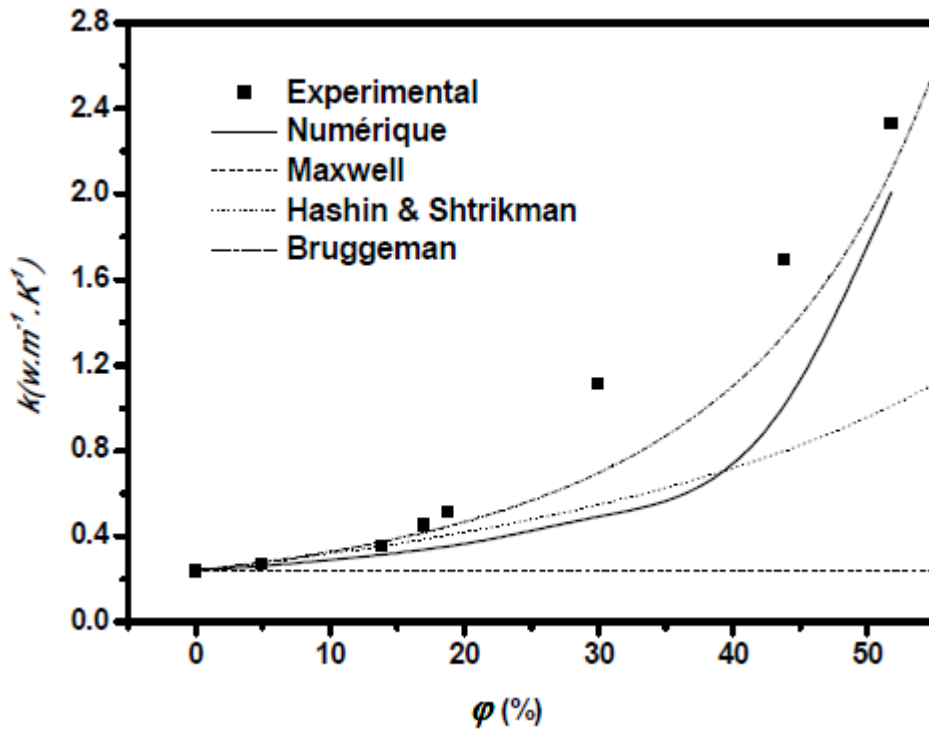


Figure 2.2 : Comparaison entre les résultats numériques, résultats expérimentaux et les modèles théoriques de prédiction de  $k$  du composites PP/Cu.

Les résultats obtenus montrent qu'en dessous de la concentration de 20% (vol%) de charges, le modèle numérique développé dans leur étude prédit assez bien la conductivité thermique des composites. Au dessus de 20% (vol%) de charges, les résultats numériques divergent des résultats expérimentaux. Il a été constaté aussi que, l'effet de la compatibilité entre la matrice et la charge sur la conductivité thermique effective des composite est plus significative que le type de charges.

M. Haddadi et al. [22] ont étudié le comportement thermique des particules conductrices creuses remplies de résine époxy en utilisant le calcul par éléments finis 3D. L'effet de la concentration de la charge associée à la résistance de contact particule/matrice sur la conductivité thermique effective des composites, a été examiné. La relation entre l'épaisseur de la paroi des particules creuses et le rapport des conductivités thermiques de la charge à la matière de matrice, a été également prise en compte. Les résultats numériques montrent une augmentation de la conductivité thermique effective avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi de la particule creuse. Cependant, pour une grande résistance de contact et / ou pour une conductivité thermique effective élevée, il est démontré que la résistance de contact a une influence dominante sur la conductivité thermique effective du composite. Les résultats numériques ont été également comparés à certains modèles connus de la conductivité thermique effective. Ils ont noté que la conductivité thermique augmente en fonction de l'augmentation de la concentration volumique des charges. L'influence de la résistance de contact sur la conductivité thermique est importante pour les fortes valeurs de C. Ils ont aussi constaté que les modèles théoriques donnent une bonne estimation de la conductivité thermique.

N. Benmansour et al. [23] ont effectué une analyse numérique tridimensionnelle (3D) en utilisant le logiciel Comsol, pour déterminer la conductivité thermique effective des sphères de verre argentées dispersées dans une matrice d'éthylène-acétate de vinyle. La modélisation a été établie pour trois cellules élémentaires; cubique simple (SC), cubique centré (BCC), et cubique à faces centrés (FCC). L'effet de la résistance thermique de contact d'inclusion/matrice et le rapport entre la conductivité thermique de la charge et celle de la matrice ont été pris en considération. Il a été constaté d'après leurs études que la résistance de contact (C), et la distance entre les inclusions (B) ont un effet important sur la conductivité thermique. En outre, les valeurs numériques de la conductivité thermique des modèles (FCC, BCC, SC) ont été trouvées en bon accord avec des modèles analytiques pour faible concentration de charges.

M. Karkri [24] a étudié propriétés thermiques de composite de résine époxy renforcé des sphères en laiton numériquement et expérimentalement. Dans l'étude numérique, la méthode des éléments finis est utilisée à l'aide du logiciel COMSOL 3.5b, pour calculer la conductivité thermique effective du composite pour trois cellules élémentaires, telles que le simple cube (SC), le centre cubique (BCC) et face-centre cubique (FCC). L'effet des concentrations de charge, le rapport des conductivités thermiques de la charge à la matrice ( $D$ ) et la résistance du contact (inclusion / matrice)  $C$ , et la distance entre les sphères ( $B$ ), sur la conductivité effective a été étudiée. Une comparaison entre les conductivités thermiques calculées numériquement, mesurées et analytiques pour divers échantillons est effectuée. Son étude montre que le paramètre  $B$  joue un rôle important dans le transfert de chaleur composite. Il a montré aussi que tous les modèles théoriques et empiriques ne permettent pas de prédire la conductivité thermique des composites dans toute la gamme des teneurs en charges. Comme le montre son étude, quelques modèles ; comme le modèle de Lewis et Nielson, prédisent assez bien les valeurs de conductivité thermique jusqu'à 30% par volume de sphères en laiton alors qu'au-delà de 30% de contenu d'inclusion, tous les modèles sous-estiment conductivité thermique du composite

# **Chapitre 3**

## **Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les composites**



## 1.1- Modélisation numérique

### 1.1.1- Prédiction de la conductivité thermique des composites (EVA/S5000S2M, EVA/SiO<sub>2</sub>)

Ce chapitre est consacré à l'étude numérique de la conductivité thermique de composites constitués de poudre de verre argentée et de poudre de verre non argentée dans une matrice d'éthylène-acétate de vinyle (EVA). La conductivité thermique effective est calculée en 3D en utilisant le logiciel Comsol pour deux arrangements élémentaires représentant le composite. L'influence du rapport entre les conductivités thermiques des deux phases, la distance entre les inclusions et la résistance de contact (inclusion/matrice) sur la conductivité thermique du composite est prise en compte dans les simulations numériques.

Le champ de température dans le matériau est défini en résolvant numériquement l'équation de Laplace à l'aide de la méthode des éléments finis avec les conditions aux limites suivantes:

- ✓ Les deux faces perpendiculaires à la direction de l'écoulement de la chaleur sont isothermes.
- ✓ Les faces latérales qui sont parallèles à la direction de l'écoulement de la chaleur sont adiabatiques.

### 1.1.2- Propriétés de la matrice et de la charge

Dans cette étude, comme nous avons mentionné précédemment, la résine de polymère d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) a été utilisée comme matrice avec des charges de poudre de verre non argentée (SiO<sub>2</sub>) et de poudre de verre argenté (S-5000-S3). Les propriétés des polymères et des charges sont présentées dans le Tableau 1:

**Tableau 3.1:** Propriétés de la matrice et de la charge.

	K (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	ρ (kg.m <sup>-3</sup> )	C <sub>p</sub> (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
EVA	0.271	930	2482
SiO <sub>2</sub>	1.2	2530	840
S-5000-S3	11.85	2700	704.48

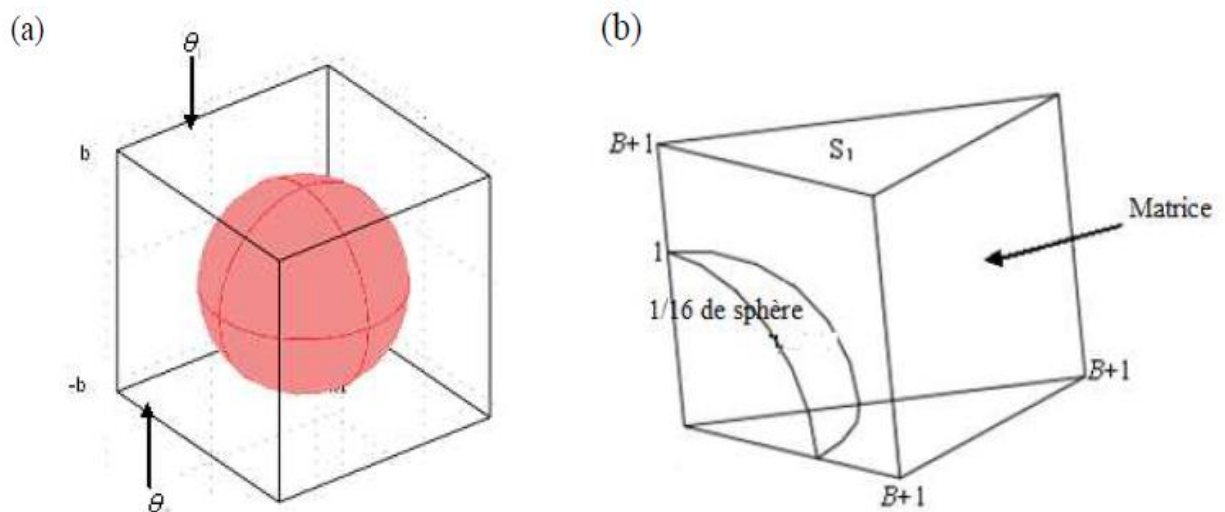
### 1.1.3- Hypothèses

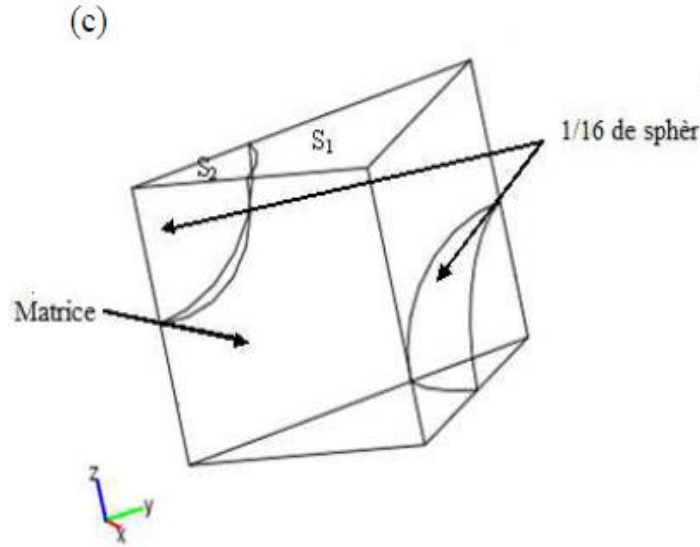
Pour simplifier les calculs, les hypothèses suivantes ont été adoptées :

- Les transferts de type radiatifs, convectifs sont négligeables.
- Les conductivités des matériaux sont indépendantes de la température, position ou direction.
- Le contact thermique entre inclusion et matrice peut être caractérisé par un seul paramètre : la résistance thermique de contact.
- Les inclusions sont des sphères de même en taille, la résistance de contacte inclusion/matrice étant la même en tout point de l'interface.
- Les sphères sont uniformément réparties dans un espace tridimensionnel.

### 1.1.4- Cellule élémentaire et grandeurs réduites

La cellule élémentaire est tétragonale et contient une sphère de rayon  $r$  centrée dans une cavité parallélépipédique de dimensions  $(2 \times b)^3$  (Figure 1a) avec  $b \geq a$ . Soient  $\theta$  et  $\tau$ , les températures respectivement dans l'inclusion et la matrice. Les faces inférieure ( $z=-b$ ) et supérieure ( $z=b$ ) sont isothermes avec des températures respectivement égales à  $\theta_2$  et  $\theta_1$ , les quatre faces latérales étant adiabatiques. En tenant compte des symétries, seulement  $1/16^{\text{ème}}$  de la cellule élémentaire nécessite d'être considéré pour les calculs (Figure 1b). Nous avons considéré deux cellules élémentaires correspondant à un arrangement tel que cubique simple (SC), cubique centrée (BCC) (Figure 1c).





**Figure 3.1:** (a) modèle cubique simple, (b) cellule cubique simple (SC), (c) cellule cubique centrée (BCC).

Soient  $K_{ch}$  et  $K_m$  les conductivités de la charge et de la matrice,  $r_c$  la résistance thermique de contact (inclusion/matrice) et  $K_{eff}$  la conductivité effective transversale (z-direction). Les grandeurs adimensionnelles ont été définies comme suivant :

$X = x/r$ ,  $Y = y/r$  et  $Z = z/r$ , pour les dimensions ;

$$S = \frac{2\tau - \theta_1 - \theta_2}{\theta_1 - \theta_2} ; T = \frac{2\theta - \theta_1 - \theta_2}{\theta_1 - \theta_2}, \text{ pour les températures de la charge et de la matrice,}$$

$$B = \frac{2b - 2r}{2r} , D = \frac{K_m}{K_{ch}}, \text{ pour la résistance conductivité relative } B \text{ (Distance entre la charge et}$$

la matrice) et  $D$  Le rapport entre les conductivités thermiques des deux phases (la matrice et la charge).

$$C = \frac{r_c K_m}{r} \text{ et } E = \frac{K_{eff}}{K_m}, \text{ pour la résistance de contact et la conductivité effective transversale,}$$

toutes deux en grandeur relative.

Finalement, l'adimensionnalisation des données géométriques et physiques permet d'exprimer  $E$  en fonction des seuls paramètres  $B$ ,  $C$ , et  $D$  :  $E = E(B, C, D)$ .

### 1.1.5- Résolution des équations de calcul de la conductivité effective

Le champ de température est gouverné par les équations de Laplace :

$\nabla^2 S = 0$ ,  $\nabla^2 T = 0$  et les conditions aux frontières (internes et externes) évoquées précédemment (Figure 1a) avec notamment pour les faces externes non adiabatiques les expressions suivantes :

$$S(X, Y, 0) = T(X, Y, 0) = 0 \text{ et } T(X, Y, B+1) = 1$$

#### ➤ Conductivité thermique effective pour SC

Le flux de chaleur  $Q$  (en grandeur réduite) suivant  $z$  et traversant la cellule élémentaire est calculé en intégrant le flux relatif défini en chaque point de la face supérieure ( $Z=B+1$ ) :

$$Q_{SC} = \int_0^{B+1} \left( \int_0^{Y=X} \frac{dT}{dZ} \Big|_{Z=B+1} dY \right) dX \quad (3.1)$$

La conductivité thermique effective et la concentration volumique sont donnés par :

$$E = 2Q/(1+B) ; \phi_{SC} = \pi/6(1+B)^3$$

#### ➤ Conductivité thermique effective pour BCC

Le flux thermique pour ce cas est calculé et la conductivité effective est déduite par la relation suivant :

$E = 2Q_{BCC}/(1+B)$ . La concentration volumique,  $\phi_{BCC} = \pi/3(1+B)^3$ , avec :

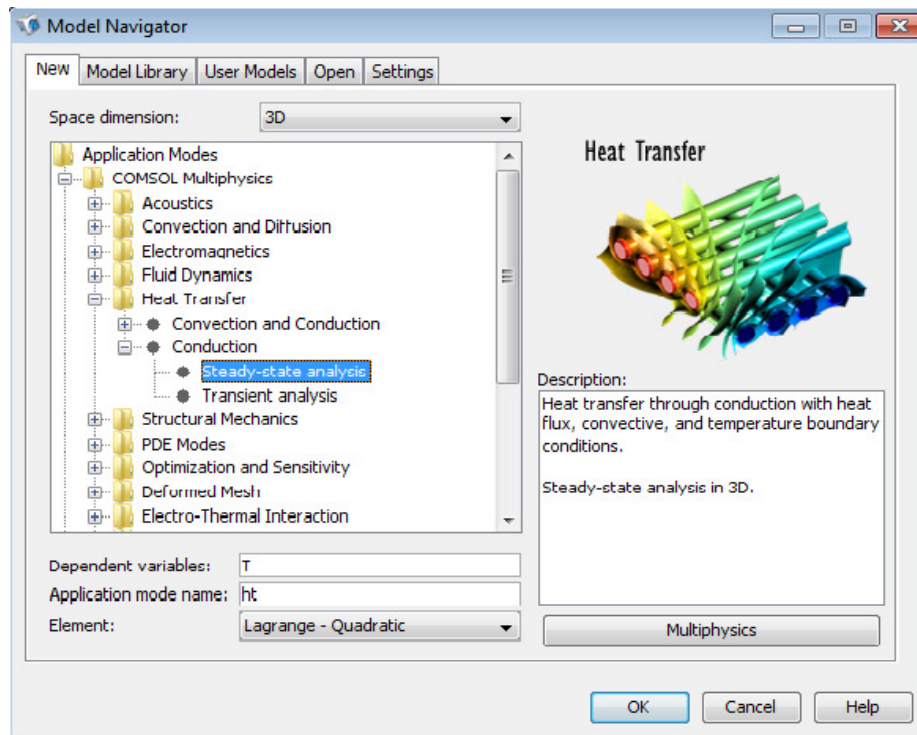
$$Q_{BCC} = \left[ \iint_{S_1} \frac{dT}{dZ} dS_1 + \frac{1}{D} \iint_{S_2} \frac{dS}{dZ} dS_2 \right] \quad (3.2)$$

Les démonstrations des équations (3.1) et (3.2) ont été présentées dans la référence [23].

### 1.1.6- Etapes de modélisation

Les différentes étapes permettant de simuler les propriétés d'un matériau sont détaillées ci-dessous :

- **choix du modèle:** dans notre cas c'est le transfert de chaleur par conduction en régime stationnaire (Figure 3.2)

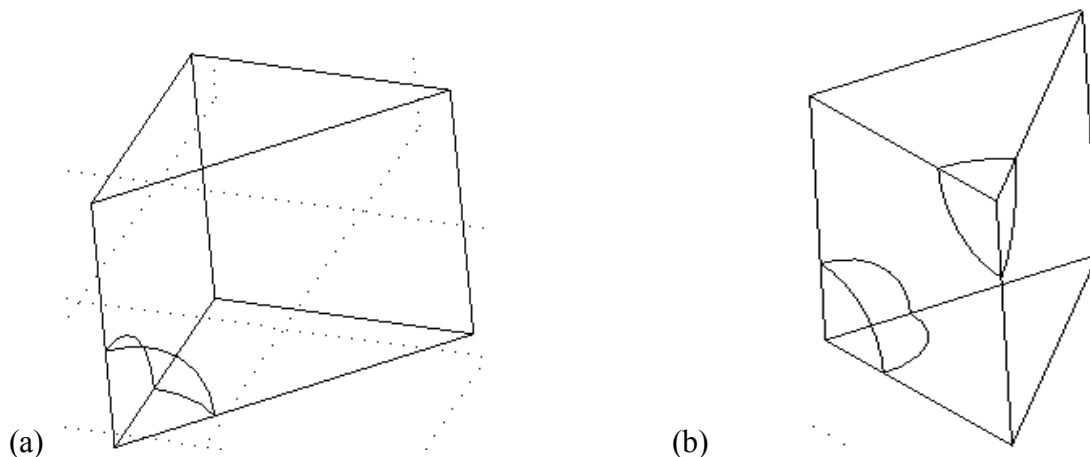


**Figure 3.2:** choix du modèle

➤ **Le choix d'un volume élémentaire :**

Il n'est pas possible de produire des géométries représentant la globalité de l'échantillon, il faut choisir un volume élémentaire représentatif de la totalité du matériau.

Donc, pour la géométrie, selon les symétries, seulement un seizième de la cellule élémentaire est étudié (Figure 3.3).



**Figures 3.3:** Géométries étudiée (a) SC, (b) BCC

➤ Définition des propriétés de chaque sous domaine

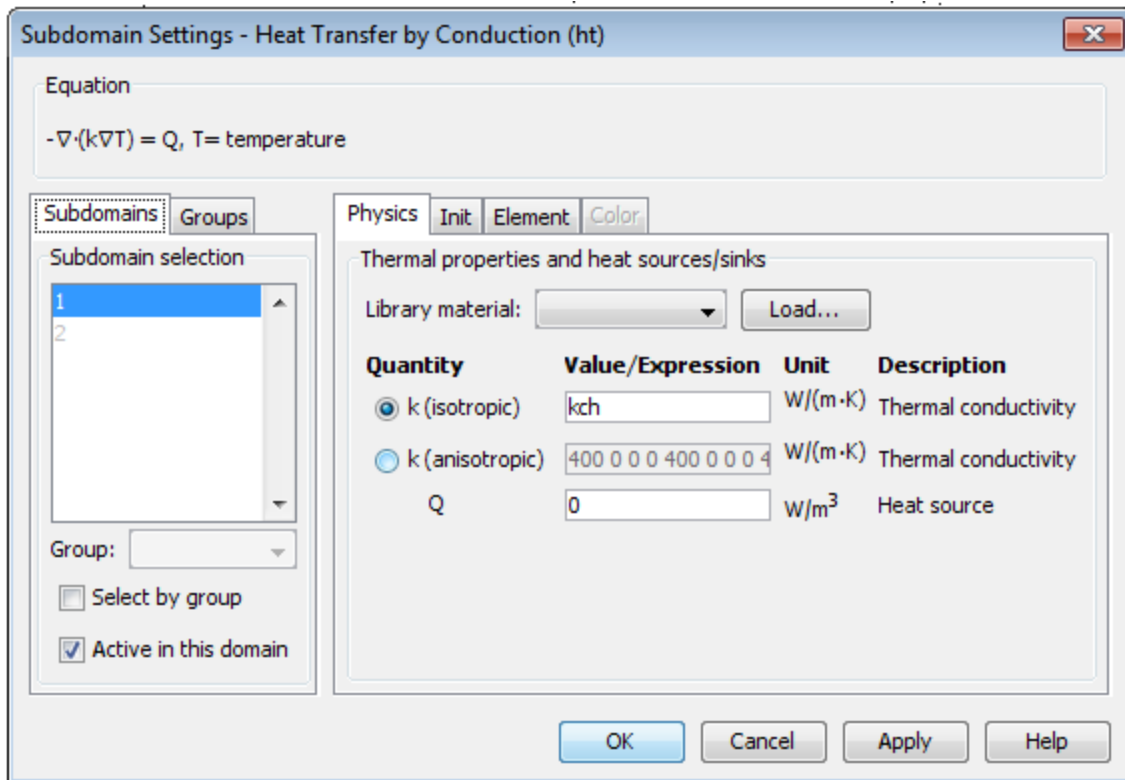


Figure 3.4: Définition des propriétés des sous domaines.

➤ Introduire les conditions aux limites :

- Le flux de chaleur

$$n \cdot (k \nabla T) = q_0 + h(T_{inf} - T) + C_{const}(T_{amb}^4 - T^4) \quad (3.3)$$

- Les autres faces sont isolées ( $n \cdot (k \nabla T) = 0$ ), pour produire un flux unidirectionnel.
- Introduire les températures de la surface supérieure et inférieure de la cellule.

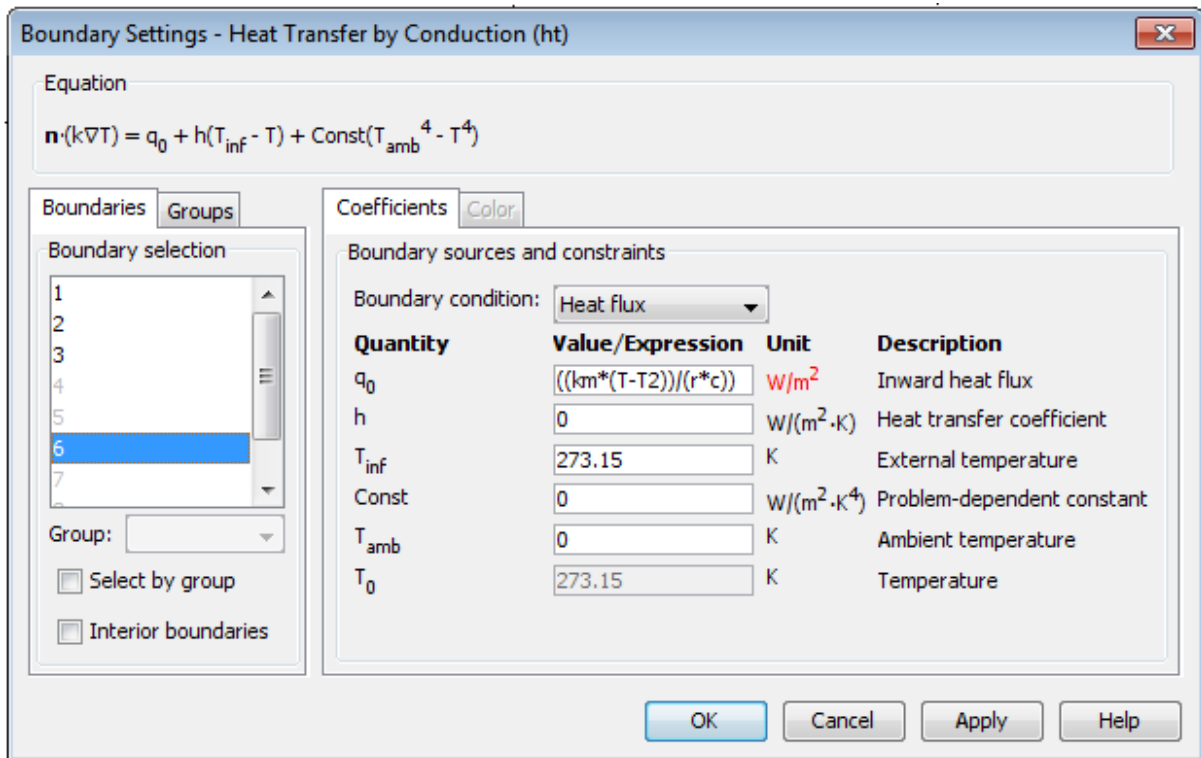


Figure 3.5: Définition des conditions aux limites.

- **Maillage de la géométrie :** Le maillage permet de diviser le milieu continu en un nombre fini d'éléments. Le nombre de nœuds dans le réseau d'élément finis peut atteindre 60000 nœuds.

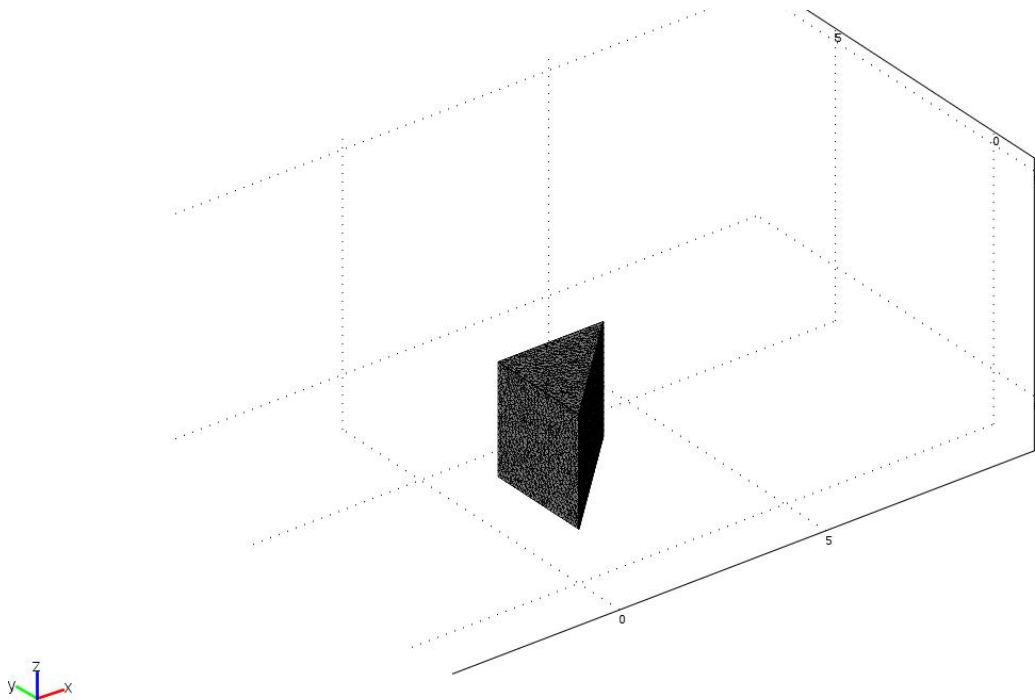
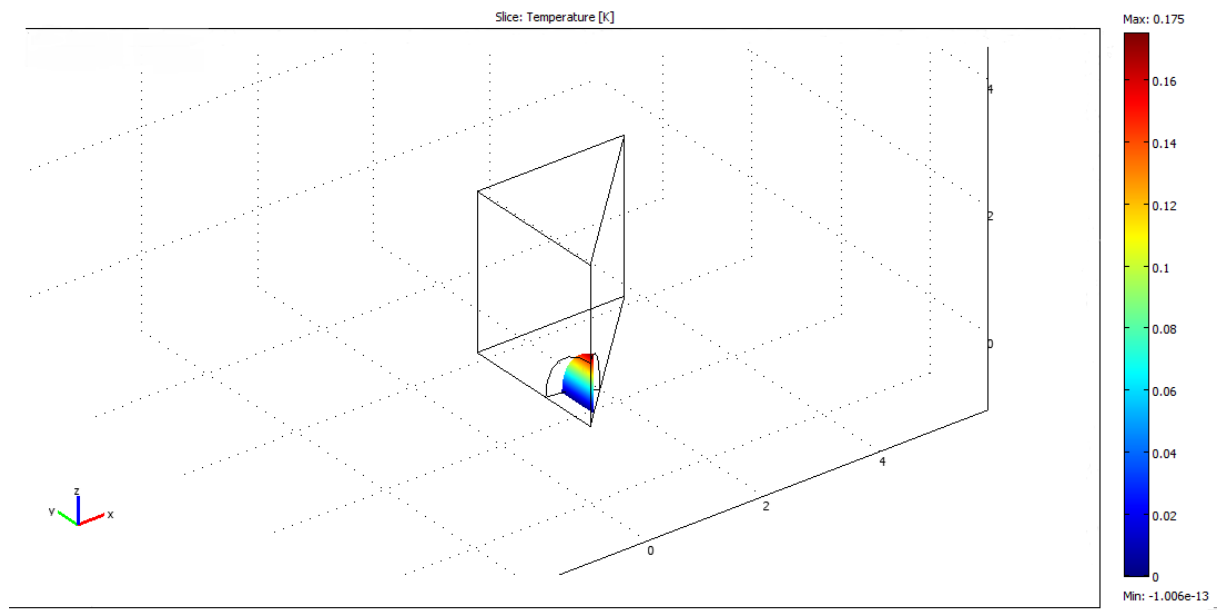


Figure 3.6: Maillage de la géométrie (modèle SC).

## ➤ Post-traitement des données calculées



**Figure 3.7:** Grandeurs physiques calculées (modèle SC).

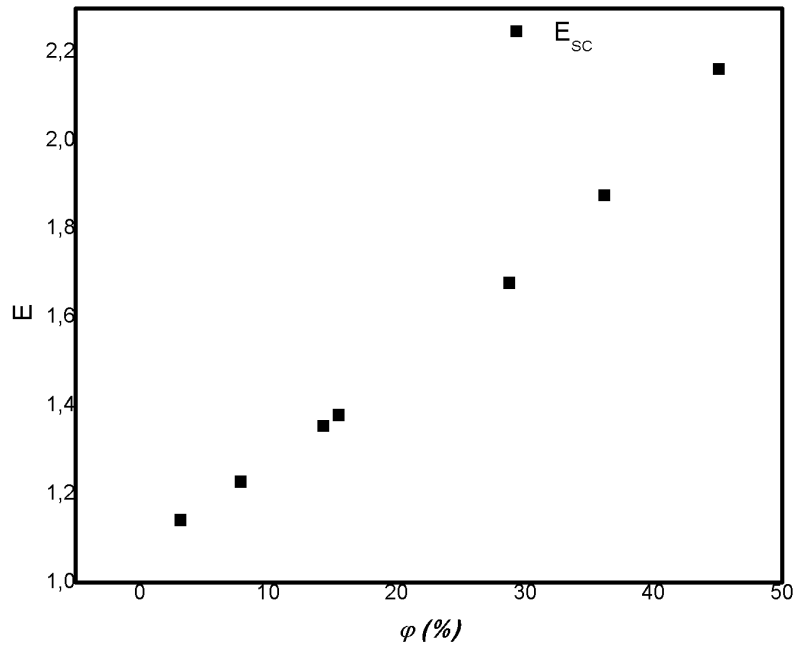
Cette dernière étape permet de donner la valeur de flux de la chaleur. A partir de cette valeur on peut calculer toutes les propriétés thermophysiques du composite.

## 2.1- Résultats et discussion

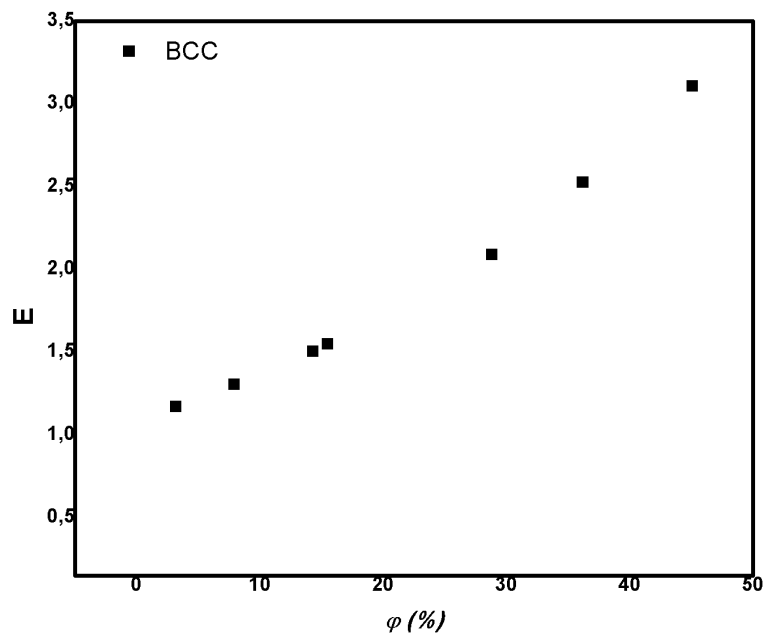
### 2.1.1- Conductivité thermique effective

#### ➤ Effet de la concentration

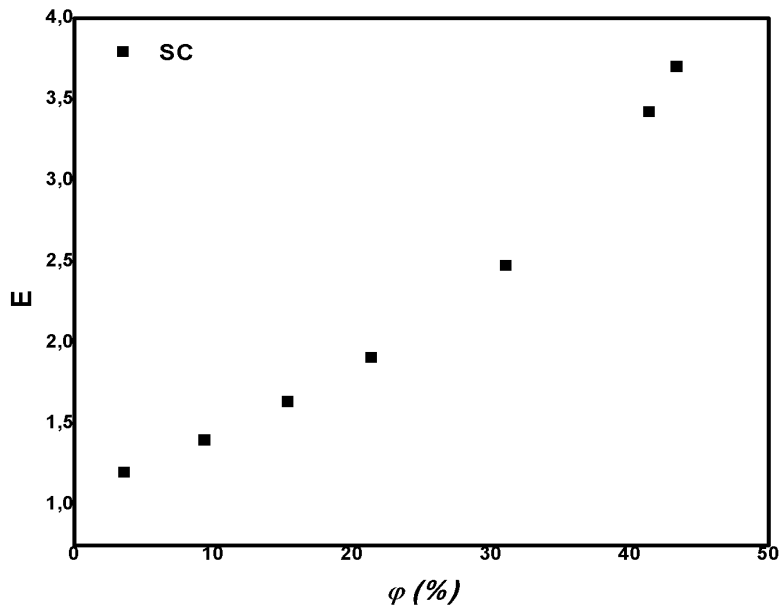
La variation de la conductivité thermique des composites EVA/S-5000-S3, EVA/SiO<sub>2</sub>, est présentée dans les figures (3.8-3.9-3.10) en fonction de la concentration volumique des charges.



**Figure 3.8:** Conductivité thermique effective en fonction de la concentration (modèle SC pour le composite EVA/SiO<sub>2</sub>)



**Figure 3.9:** Conductivité thermique effective en fonction de la concentration (modèle BCC pour le composite EVA/SiO<sub>2</sub>)



**Figure 3.10:** Conductivité thermique effective en fonction de la concentration (modèle SC pour le composite EVA/S5000S2M)

D'après les trois courbes 3(8, 9,10), une augmentation de la conductivité thermique effective avec l'augmentation de la teneur en charge a été observée, avec une évolution presque linéaire. Cette augmentation de la conductivité thermique effective peut s'expliquer par le fait que la charge a une conductivité thermique plus élevée que la matrice polymère.

On observe aussi d'après les trois courbes que pour les faibles concentrations en charges la différence entre les valeurs de la conductivité thermiques des composites est peu significative. A partir de 20% de concentration, la conductivité est plus élevée.

Pour le modèle SC, on peut voir que les valeurs numériques de la conductivité thermique effective pour le composite (EVA/poudre de verre argenté (S-5000-S3)) sont supérieures aux valeurs numériques de la conductivité thermique effective pour le composite (EVA/poudre de verre non argenté ( $\text{SiO}_2$ )), tel que, pour le composite (EVA/ $\text{SiO}_2$ ),  $k$  varie entre 1.14 et 2.16, tandis que, pour le composite (EVA/ S-5000-S3),  $k$  varie entre 1.197 et 3.675.

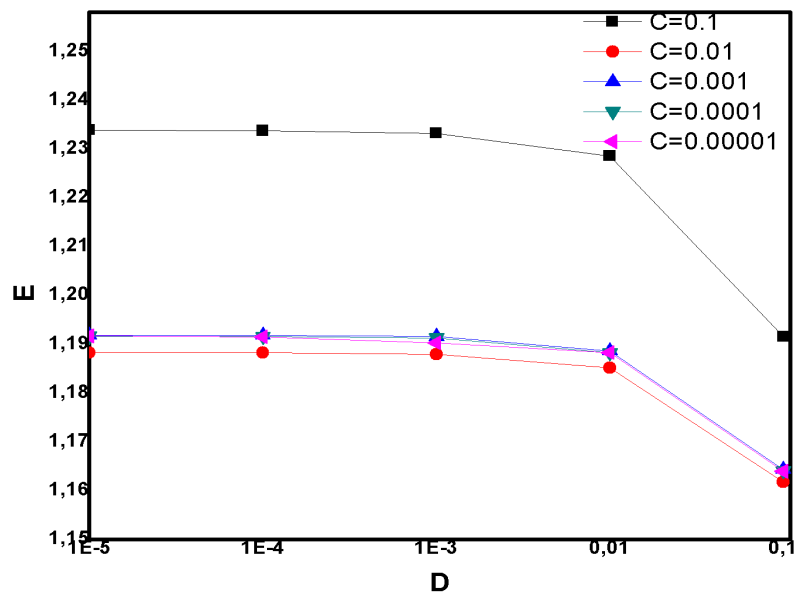
Ceci montre qu'une couche métallique déposée sur des charges isolantes (le verre) permet d'accroître significativement le transfert de chaleur.

➤ **Effet de la concentration volumique, des paramètres (C), (D) et (B)**

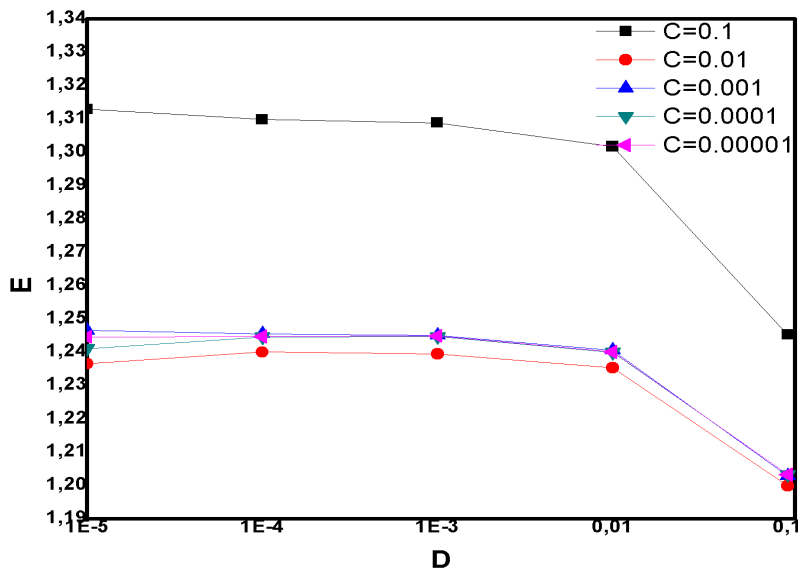
Dans les figures (3.11, 3.12), nous présentons les résultats numériques pour les deux modèles SC et BCC, pour la concentration volumique  $\varphi = 3.2\%$ , en fonction de la résistance de contact C et le rapport D, avec  $D = C = 10^a$ ,  $a = \{-5, -4, -3, -2, -1\}$ .

Comme la montre les figures, pour  $D \in [10^{-2}, 10^{-1}]$ , la conductivité thermique augmente très légèrement. Pour des valeurs inférieures de résistance interne ( $D \in [10^{-5}, 10^{-2}]$ ), la variation de la conductivité thermique effective est presque négligeable. D'autre part, une diminution significative de la conductivité thermique a été observée lorsque la résistance de contact C est diminuée de 0.1 à 0.01. Ainsi que, lorsque  $C \in [0,01- 0,0001]$ , E devient presque constante.

Par conséquent, l'effet de la résistance de contact (C) sur la conductivité thermique est important.

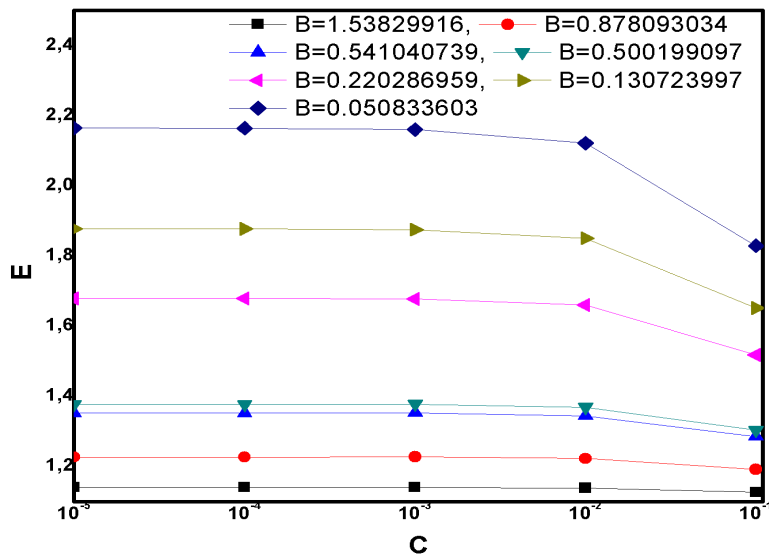


**Figure 3.11:** Conductivité thermique effective E en fonction des paramètres C et D, modèle SC, EVA/SiO<sub>2</sub> ( $\varphi = 3.2\%$ )

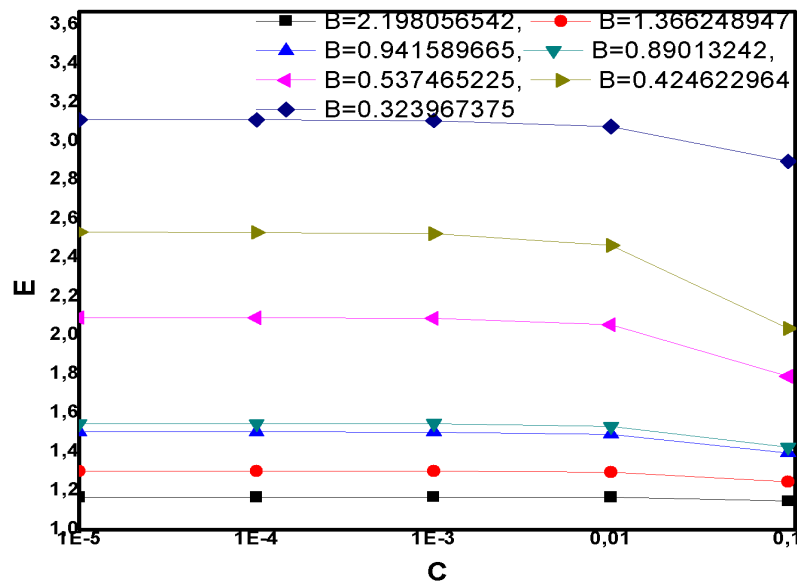


**Figure 3.12:** Conductivité thermique effective  $E$  en fonction des paramètres  $C$  et  $D$ , modèle BCC, EVA/SiO<sub>2</sub> ( $\varphi = 3.2\%$ )

Les Figures (3.13, 3.14) montrent l'effet de la distance entre la charge et la matrice ( $B$ ) sur la conductivité thermique effective.



**Figure 3.13:** Conductivité thermique effective en fonction de  $B$  et  $C$ , modèle SC, EVA/SiO<sub>2</sub>.



**Figure 3.14:** Conductivité thermique effective en fonction de B et C, modèle BCC, EVA/SiO<sub>2</sub>.

D'après les figures (3.13, 3.14), on observe une diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation du paramètre (B). Aux valeurs élevées du paramètre (B) (faible teneur en charge), la conductivité thermique effective augmente légèrement. Cela est dû à la présence d'une couche isolante très importante entre deux sphères consécutives, ce qui empêche le transfert de chaleur dans le composite.

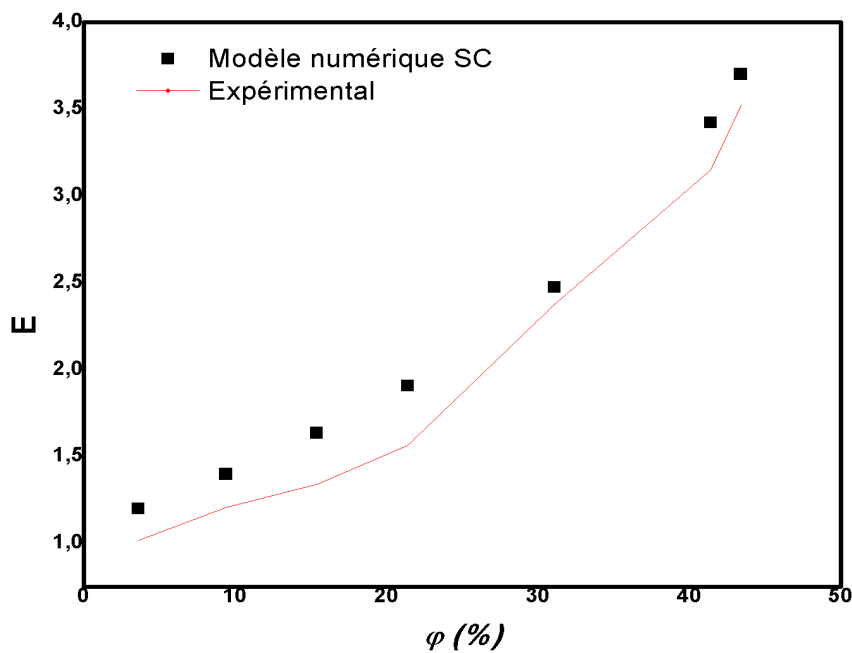
Cependant, une diminution du paramètre (B) conduit à une augmentation plus importante de la conductivité thermique effective ( $E$ ), et la valeur la plus élevée de la conductivité thermique est obtenue pour ce que  $B = 0.050833603$  et  $B = 0.323967375$ . Cela est dû au fait qu'il y a une couche petite isolante entre les sphères, ce qui favorise le transfert de chaleur dans le composite.

Il est intéressant donc de constater que le paramètre (B) apparaît comme une grandeur essentielle. Elle contribue au transfert de chaleur entre la matrice et les inclusions et influence significativement sur la valeur de la conductivité thermique effective de composite.

Par ailleurs, pour des faibles valeurs de la résistance de contact  $C = [10^{-5}, 10^{-2}]$ , le paramètre (B) a un effet prédominant sur le transfert de chaleur entre la matrice et la charge.

### 2.1.2- Comparaison entre les résultats numériques, les mesures expérimentales et les modèles analytiques

Pour illustrer la différence entre les résultats numériques, les mesures expérimentales et les modèles analytiques, y compris l'effet de la teneur en charge sur la conductivité thermique effective, nous avons tracé dans les figures (3.15) et (3.16), la conductivité thermique effective ( $E$ ) en fonction de la concentration volumique  $\varphi$ , pour le composite (EVA/S5000S2M)



**Figure 3.15:** Conductivité thermique effective en fonction de la concentration, et comparaison avec les mesures expérimentales, pour le modèle SC (EVA/S5000S2M).

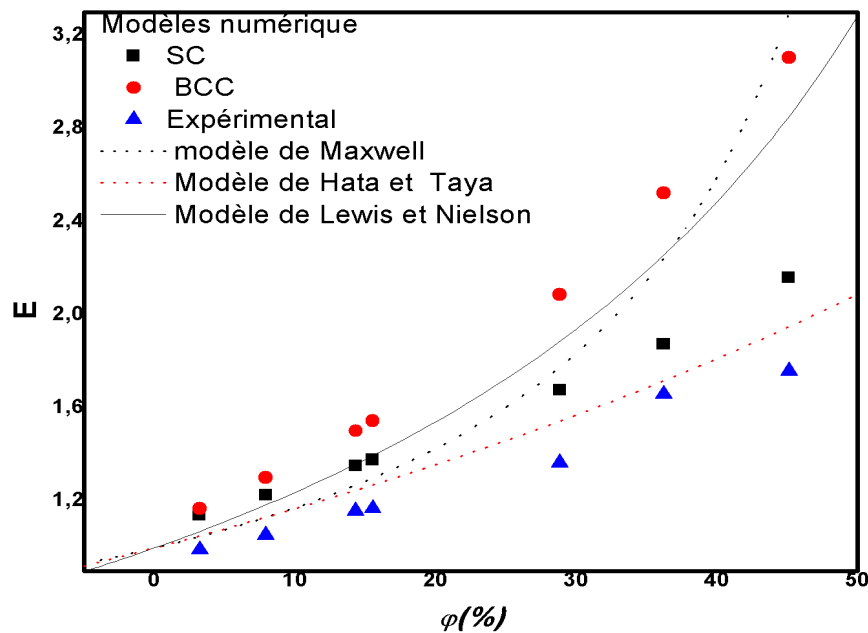
La Figure (3.15) présente une comparaison entre les valeurs expérimentales et numériques de la conductivité thermique de composite (EVA/S5000S2M).

Une augmentation significative de la conductivité thermique effective ( $E$ ) avec l'augmentation de la teneur en charge a été observée, avec une évolution non linéaire. Cette augmentation était prévue, car la charge a une conductivité thermique significativement plus élevée que celle de la matrice polymère.

On remarque ainsi, d'après cette figure que les valeurs numériques de la conductivité thermique effective sont en bon accord avec les valeurs expérimentales. Cependant, elles

restent inférieures pour les faibles concentrations. Cette est peut-être due à la répartition des charges et à l'effet du paramètre B (la distance entre la charge et la matrice).

Ce résultat montre aussi que le polymère EVA n'a pas d'influence sur le comportement thermique du composite.



**Figure 3.16:** Conductivité thermique effective en fonction de la concentration, et comparaison avec les mesures expérimentales, et les modèles analytiques (EVA/SiO<sub>2</sub>)

Dans la Figure (3.16), les valeurs de la conductivité thermique obtenues à partir de l'étude numérique pour modèles (BCC et SC) sont comparées aux résultats expérimentaux, et certains modèles théoriques (Lewis et Nielson, Hata et Taya, Maxwell).

Une augmentation significative de la conductivité thermique ( $E$ ) avec l'augmentation de la teneur en charge a été observée. Cette augmentation était prévue, car la charge a une conductivité thermique significativement plus élevée que celle de la matrice polymère.

Pour  $\phi < 20\%$ , on peut observer que les valeurs calculées de conductivité thermique concordent bien avec les mesures, en particulier pour le modèle SC. Ainsi, la différence entre les valeurs numériques et expérimentales augmente avec l'augmentation de la concentration de charge, ce résultat a également été rapporté par Karkri [24].

Pour  $\phi > 20\%$ , il y a une divergence entre les valeurs numériques de conductivité thermique et les résultats expérimentaux.

En outre, il apparaît que les modèles analytiques sont relativement en bon accord avec les valeurs calculées et expérimentales à faible teneur en charge. Ceci indique que les sphères ne sont pas en interaction les uns avec les autres. Il est utile de rappeler que ces modèles ne prennent pas en compte ni l'influence de la taille des particules ou des interactions entre les composants du composite. Au-dessus des fractions volumiques de 20%, le modèle de Lewis et Nielsen et modèle de Maxwell ne donne pas une bonne estimation de la conductivité thermique. Le modèle de Hata et Taya semble donner une meilleure estimation des valeurs expérimentales que le modèle de Lewis et Nielsen et modèle de Maxwell. Cette différence peut être expliquée par le fait que le modèle de Lewis et Nielsen prend en compte l'effet de la forme, la distribution des particules sur la conductivité thermique (E), et le modèle de Maxwell ne tient pas en compte l'effet de la résistance de contact entre la matrice et les charges.

# Conclusion



## Conclusion

Les travaux menés dans ce mémoire ont été initialement consacrés au travail d'une synthèse bibliographique sur les composites, les propriétés thermophysiques, et une étude bibliographique des principaux modèles de prédictions de la conductivité thermique des composites a été présentée. En fait, il n'y a pas de modèle théorique permettant de prédire avec précision la conductivité thermique de matériaux hétérogènes, ce qui fait de la modélisation numérique un moyen principal de vérification des modèles théoriques. Donc, c'était fait une étude numérique du comportement thermique de composites de polymère d'éthylène acétate de vinyle renforcé avec des charges de verre non argentées ( $\text{SiO}_2$ ) et des charges de verre argenté (S-5000-S3), à l'aide du logiciel COMSOL qui est basé sur la méthode des éléments finis pour déterminer la conductivité thermique effective de ces composites.

En effet, cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Pour le composite (EVA / $\text{SiO}_2$ ), Deux modèles de géométries (SC, BCC) ont été étudiés. On peut conclure que la résistance de contact (C), et la distance entre les inclusions (B) ont un effet important sur la conductivité thermique.

Par ailleurs, les valeurs numériques de la conductivité thermique des modèles (BCC, SC) ont été trouvées en bon accord avec des modèles analytiques pour faible concentration de charge.

En outre, les valeurs calculées de la conductivité thermique sont en bon accord avec les mesures pour les faibles concentrations volumiques de charges, en particulier pour le Modèle SC.

Concernant le composite (EVA/S-5000-S3), le modèle de géométrie (SC) a été étudié. Il est conclu que le modèle numérique prédit bien la conductivité thermique effective de composite ; il y a un bon accord entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques de la conductivité thermique effective.

D'autre part, la couche métallique (l'argent) déposée sur des charges isolantes (le verre) permet d'accroître significativement le transfert de chaleur.

## Bibliographies

- [1] A Hicham and S Abdessalam, "Caractérisations et laboration d'un matériau composite jute (Déches) polyster," Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2018/2019, pp. 56.
- [2] Yibin Xu and K. Yagi, "Automatic FEM model generation for evaluating thermal conductivity of composite with random materials arrangement," *Computational Materials Science*, vol. 30, pp. 242-250, 2004.
- [3] K Hadjer, "Modélisation numérique de comportement thermophysiques de composite de mortier à base des fibres de palmier dattier," Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2016/2017, pp. 47.
- [4] N. Benmansour, "Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat ,," Thèse de Doctorat, université EL Hadj lakhdar- Batna, 201 ,5PP.146.
- [5] M. Ghebrid Nassima, "Etude des problèmes de conduction thermique dans un matériau composite à matrice polymère pigmenté de dioxyde de Titane," Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif 1, 2018, pp. 137.
- [6] Guérira Belhi, "Etude du delaminage en mode I des matériaux composites stratifiés par la méthode des éléments finis," Thèse de magistère, Université Mohamed KHIDER de Biskra, 2005, pp. 68.
- [7] Manel haddadi, "Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère," Mémoire de Master, Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2010-2011, pp. 91.
- [8] Laarej Merad, "Etude par spectroscopie raman et modélisation d'une résine composite RTM," Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr BELKAID de Tlemcen, 2010, pp. 130.
- [9] Tayeb Ouksel, "Cours: Transfert Thermique, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi," 2016-2017, pp.61.
- [10] M. Coulson, "Conductivité, diffusivité, émissivité thermiques de composites Poly (EtherKetoneKetone / (Charges Carbonées : Fibres continues et particules," Thèse de doctorat, L'université de Toulouse., 2018, pp. 132.
- [11] Sébastien Gauthier, "Caractérisation thermique de la matière par la méthode 3w," Thèse de Doctorat, Université montpellier II, 2012 ,pp. 168.
- [12] Rachida OUARGLI-SAKER, "Cours de Thermodynamique, Université des Sciences et de la Technologie D'Oran," 2015-2016.
- [13] Radia benganem, "Etude théorique de la conductivité thermique des composites, Mémoire de Master," Université Mohamed Boudiaf -M'SILA, 2017, pp. 67.
- [14] Karol Pietrak and T. S. Wisniewski, " A review of models for effective thermal conductivity of composite materials," *Journal of Power Technologies*, vol. 95, pp. 14-24, 2015.
- [15] A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, E. Gehin, and a. J.-C. Majeste, "Thermophysical Properties of Polypropylene/Aluminum Composites," *Journal of Polymer Sciences*, vol. 42, pp. 722-732, 2003.
- [16] R. C. Progelhof, J. L. Throne, and and R. R. Ruetsch, "Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite Systems," *Polymer Engineering and Science*, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [17] M. G. Nassima, "Etude des problèmes de conduction thermique dans un matériau composite à matrice polymère pigmenté de dioxyde de Titane," Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif 1, 2018, pp. 137.

- [18] J. K. Carson, S. J. Lovatt, D. J. Tanner, and a. A. C. Cleland, "Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 48, pp. 2150-2158, 2005.
- [19] H. Z. Liang, "Simulation of heat transfer in hollow-glass-bead-filled polypropylene composites by finite element method," *Polym. Test*, vol. 26, pp. 419-424, 2007.
- [20] K. Ramani and A. Vaidyanathan, "Finite element analysis of effective thermal conductivity of filled polymeric composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 29, pp. 1725-1740, 1995.
- [21] 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 Hadj Lakhdar Batna," 2013, pp. 163.
- [22] M. Haddadi, B. Agoudjil, A.Bouenne, and B. Garnier, " Analytical and Numerical Investigation on Effective Thermal Conductivity of Polymer Composites Filled with Conductive Hollow Particles," *Int. J. Thermophys*, vol. 34, pp. 101-112, 2013.
- [23] N. Benmansour, B. Agoudjil, A.Bouenne, and B. Garnier, "Numerical Investigation of Heat Transfer of Silver-Coated Glass Particles Dispersed in Ethylene Vinyl Acetate Matrix," *Int J Thermophys*, vol. 35, pp. 1803–1816, 2.014
- [24] M.Karkri, "Effective thermal conductivity of composite: Numerical and experimental study," *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris*.

## ملخص :

الهدف من هذه الأطروحة هو إجراء نمذجة عددية ونظرية للنقل الحراري لمركبات البوليمرات من أسيتات فينيل الإيثيلين (EVA) المقواة بجزيئات زجاجية ( $\text{SiO}_2$ ) وجزيئات زجاجية فضية (S3-5000-S). أجريت الدراسة العددية للتنبؤ بالناقلية الحرارية الفعالة لهذه المركبات ودراسة كيفية تأثرها بتغيرات العوامل C, D, B. أجريت الدراسة العددية باستخدام برنامج COMSOL الذي يعتمد على استخدام طريقة العناصر المحددة ، وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الناقلية الحرارية تزداد مع زيادة تركيز الجزيئات. بالإضافة إلى ذلك ، يتنبأ النموذج العددي جيداً بالتوصيل الحراري للمركبات المدروسة ، خاصة بالنسبة للتركيزات المنخفضة للجزيئات ، فإن مقاومة التلامس الحراري (C) والمسافة بين الجزيئات (B) لها تأثير مهم على التوصيل الحراري. كما أجريت مقارنة بين النتائج العددية والتجريبية والنماذج النظرية.

**الكلمات المفتاحية:** المواد المركبة ، النماذج العددية ، النماذج النظرية ؛ الناقلية الحرارية ، Comsol

## Abstract:

The aim of this thesis is to carry out a numerical and theoretical modeling of thermal transfer of composites of polymers of ethylene vinyl acetate (EVA) reinforced with glass particles ( $\text{SiO}_2$ ) and silver glass particles (S-5000- S3). The numerical study was carried out to predict the effective thermal conductivity of these composites and to study how they are affected by changes in several factors such as contact resistance, distance between inclusions and between them and the matrix, and the volume concentration of charges. The numerical study was carried out using the COMSOL software which relies on the use of the finite element method, and the results obtained showed that the thermal conductivity increases with increasing concentration of charges. As well as, the numerical model predicts well the thermal conductivity of the studied composites, especially for the low concentrations of charges, the contact resistance (C) and the distance between the impurities (B) have an important effect on the thermal conductivity. In addition, a comparison between the numerical, experimental results and the theoretical models was carried out.

**Keywords:** Composite materials, Numerical models, Theoretical models, Thermal conductivity, Comsol

## Résumé :

Le but de ce mémoire est de réaliser une modélisation numérique et théorique de transfert thermique des composites de polymères de l'éthylène acétate de vinyle (EVA) renforcés par des particules de verre ( $\text{SiO}_2$ ) et des particules de verre argenté (S-5000-S3).

L'étude numérique a été menée pour prédire la conductivité thermique effective de ces composites et étudier comment ils sont affectés par les changements de plusieurs facteurs tels que la résistance de contact, la distance entre les inclusions et entre ces derniers et la matrice, et la concentration volumique des charges. L'étude numérique a été faite à l'aide du programme COMSOL qui repose sur l'utilisation de la méthode des éléments finis, et les résultats obtenus ont montré que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la concentration des charges. Ainsi que, le modèle numérique prédit bien la conductivité thermique des composites étudiés, surtout pour les faibles concentrations de charges, la résistance de contact (C) et la distance entre les impuretés (B) ont un effet important sur la conductivité thermique. En plus, une comparaison entre les résultats numériques, expérimentales et les modèles théoriques a été réalisée.

**Mots clés :** Matériaux composites, modèles numériques, modèles théoriques, Conductivité thermique, Comsol