

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
N° : .....



DOMAINE : Sciences de la matière  
FILIERE : Physique  
OPTION : L'Énergie Solaire

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par: Benghanem Radhia**

**Intitulé**

***Etude théorique de la conductivité thermique  
des composites***

**Soutenu le 24 / 05 /2017 devant le jury composé de:**

Dr. Mohamed Salmi	Université de M'sila	Président
Dr. Nadia Benmansour	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. Hichem Boulechfar	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2016/2017**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

*Je veux tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui j'ai donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, Je veux à remercier mon encadreur M'elle :*

***Benmansour Nadia**, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon recherche en acceptant d'examiner mon travail Et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Enfin, Mes vifs remerciements à tous les enseignants qui ont participé dans notre formation du primaire, jusqu'à l'université, Merci infiniment.*

# *Sommaire*

## *Sommaire*

<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
--------------------------	----------

### *Chapitre I : Matériaux composites*

I. Introduction .....	5
II. Matériaux composites.....	5
II.1.Constituants des matériaux composites.....	5
II.1.1. Matrice.....	6
II.1.2. Renforts.....	6
II.2. Classification des matériaux composites.....	7
II.2.1. Composite à matrice polymère.....	7
II.2.2. Composite à matrice minéral.....	8
III. Mise en forme des matériaux composites.....	8
IV. Conductivité thermique des composites.....	11
V. Conclusion.....	12
Référence .....	13

### *Chapitre II : Modèles théoriques pour la prédiction de la conductivité thermique des matériaux composites*

I. Introduction.....	17
II. Modèles de prédictions de la conductivité thermique effective.....	17
II. 1.Modèles avec interface parfaite.....	17
II.1. 1 Modèle du premier ordre.....	17
II.1.2 Modèles de second Ordre.....	19
II.1.2.1 Modèle de Maxwell.....	19
II.1.2.2 Modèle de Lewis et Nielson.....	19
II.1.2.3 Modèle d'Agari .....	20
II.1.2 .4 Modèle de Bruggeman .....	21
II.1.2.5 Modèle de Hatta et Taya .....	21

II.1.2.6 Modèle de Cheng et Vachon .....	22
II.1.2.7 Modèle de Hamilton-Crosser .....	23
II.1. 3 Modèles de troisième et quatrième ordre .....	23
II.2.Modèles avec interface imparfaite .....	26
II.2.1 Modèles de Benveniste .....	26
II.3. Modélisation – Méthodes d’homogénéisation .....	30
II.3.1.Modèle de Hashin et Shtrikman .....	30
II.3.2. Modèle d'auto-cohérente (HAC) .....	32
III .3. Modèle de Mori-Tanaka.....	35
IV .Conclusion.....	36
Référence.....	37

***Chapitre III : Modélisation théorique de la conductivité thermique des composites***

I. Introduction.....	42
II. Travaux réalisés pour déterminer la conductivité thermique des composites par les modèles théoriques .....	42
III. Modélisation théorique de la conductivité thermique de composite mortier/bois de palmier dattier .....	53
IV. Conclusion .....	54
Référence.....	55
<b><i>Conclusion général</i></b> .....	58

# *Introduction*

## *Introduction*

---

De nos jours, l'usage des matériaux composites dans différents domaines technologiques (microélectronique, aéronautique, transports...) croît de plus en plus. Une telle augmentation vient du fait qu'il est possible de développer de nouveaux matériaux avec des propriétés adaptées à une application bien précise. Ces matériaux permettent de combiner les propriétés physiques des différents matériaux utilisés pour leur fabrication. En général, les composites sont réalisés pour subir de nombreuses contraintes physiques qu'ils doivent supporter sans modification de leurs propriétés au cours de leur utilisation[1].

Les matériaux composites sont largement utilisés dans les applications de transfert de chaleur et de la gestion thermique des équipements. De ce fait, la conductivité thermique effective est l'une des principales propriétés thermo-physique utilisées pour quantifier le comportement thermique de ces matériaux hétérogènes. Cette propriété est fortement affectée par la composition et la structure de ces matériaux[2]. De nombreuses approches théoriques et semi-empiriques ont été développées pour déterminer la conductivité thermique des composites [3]. Ces modèles donnent une meilleure estimation pour les faibles concentrations en charges. D'autre part les résultats obtenus divergent pour les fortes concentrations [4].

La modélisation du comportement thermique d'un composite constitué de deux phases distinctes (une phase discontinue dispersée dans une phase continue) fait l'objet de nombreuses recherches depuis plus d'un siècle, comme en témoignent les travaux de Maxwell sur les transferts de chaleur dans les milieux hétérogènes dès 1873 [5]. De nombreux modèles surestiment ou sous-estiment la conductivité thermique des matériaux composites. Cela est dû à la difficulté de modéliser la propagation de la chaleur dans des milieux hétérogènes. Cependant de nombreux modèles ont été développés s'approchant de plus en plus de résultats expérimentaux[6].

Ce travail a pour but de présenter une étude bibliographique sur les composites, les différents modèles théoriques, et de l'estimation de la conductivité thermique de matériau composite mortier/fibres de palmier dattier.

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

Le premier chapitre s'intéresse à la définition des composites et leurs classification, à savoir : les composites à matrice polymère, et les composites à matrice minérale. Ensuite, on se focalisera sur quelques méthodes de mise en œuvre des matériaux composites et l'intérêt de la détermination de la conductivité thermique des composites.

## *Introduction*

---

Nous présentons dans le deuxième chapitre les différents modèles théoriques qui permettent la prédiction de la conductivité thermique des composites.

Enfin, le troisième chapitre est consacré à l'étude des travaux réalisés pour déterminer la conductivité thermique des composites en utilisant les modèles théoriques. Ensuite, on se focalisera sur une application de quelques modèles pour déterminer la conductivité thermique de composite mortier/bois de palmier dattier avec une comparaison aux résultats expérimentaux.

### **Références**

- [1] A. Boudenne, "Etude experimentale et theorique des proprietes thermophysiques de materiaux composites a matrice polymere," Aris XII VAL de MARNE, 2003.
- [2] J. Wang, J. K. Carson, M. F. North, and a. 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.
- [3] D. Kumlutas, I. H. Tavman, and a. M. T. Coban, "Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials", vol. 63, 2003.
- [4] D. M. Bigg, "Thermal Conductivity of Heterophase Polymer Compositions", vol. 119, 1995.
- [5] J. C. Maxwell., "A treatise on electricity and magnetism", vol. 1, 1873.
- [6] B. Reine, "Etude et simulation de la conductivité thermique de matériaux composites à matrice organique chargée et renforcée de fibres de carbone PITCH," toulouse, 2014.

# **Chapitre I**

## **Matériaux composites**

**I. Introduction**

L'objectif de ce chapitre est de présenter une étude bibliographique sur les matériaux composites. On s'intéresse à la définition des composites et leurs classification. Ainsi que à l'intérêt de la détermination de la conductivité thermique des composites.

**II. Matériaux composites**

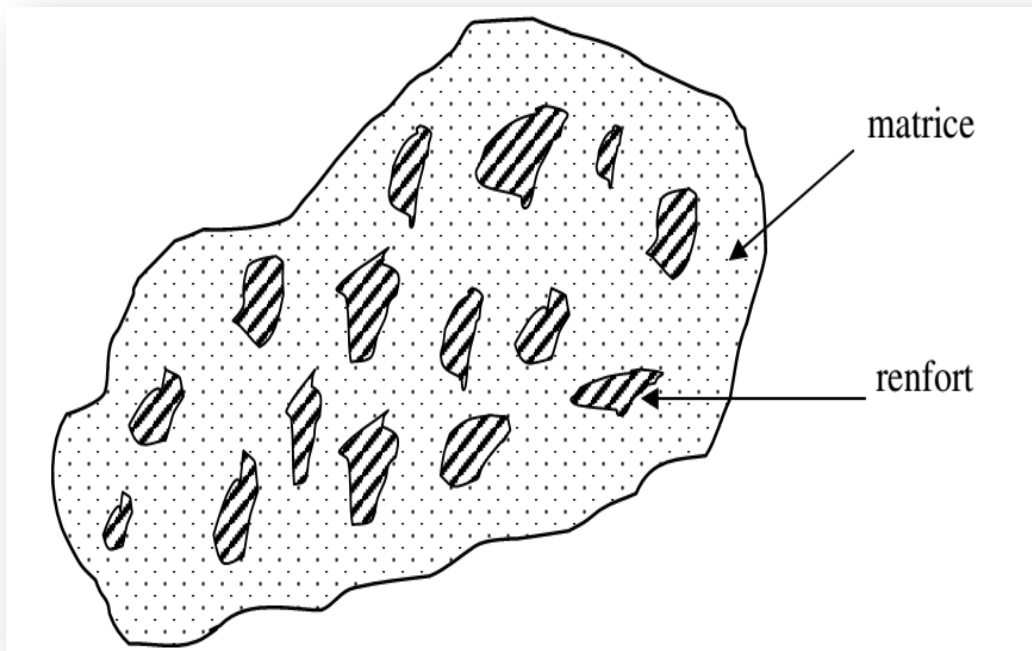
Les matériaux composites sont généralement des matériaux solides constitués à l'échelle microscopique par l'association de deux ou plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires. Cette association leur confère à l'échelle macroscopique un ensemble de propriétés physiques, que chacun des constituants pris isolément ne possède pas. Ces propriétés sont liées aux propriétés des matériaux qui les constituent, à leur distribution géométrique et à leurs interactions mutuelles. La phase discontinue du composite est habituellement plus dure avec des propriétés physiques différentes de celles de la phase continue. Cette dernière est appelée la *matrice*; la phase discontinue est appelée *charge* ou *matériau renforçant* [1].

**II.1. Constituants des matériaux composites**

Les matériaux composites sont constitués principalement:

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composite des charges.
- D'un renfort.

Les composites peuvent être classés selon la forme ou la nature des composants [1].



**Figure I. 1:** Matériaux composites

### II.1.1. Matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). Généralement, c'est un polymère ou une résine organique. Les résines les plus utilisées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques [2].

### II.1.2. Renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet de résistance orientée [2].

De ce fait, un des constituants peut remplir la fonction de matrice tandis que l'autre, immergé dans le premier, joue un rôle de renfort. Dans ce type de composite, la matrice (organique ou inorganique) est continue et enrobe une phase distincte, le renfort, qui se présente sous forme de particules ou de fibres plus ou moins longues [1, 3].

Le but de la fabrication d'un matériau composite est de profiter des propriétés reconnues de chaque composant afin d'en constituer un qui sera mieux adapté à certaines applications. Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien, maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et à leur faible masse volumique [4].

## **II.2. Classification des matériaux composites**

Les matériaux composites peuvent être classés en deux groupes essentiels; à savoir : Les composites à matrice polymère, et les composites à matrice minéral.

### **II.2.1. Composite à matrice polymère**

Les composites à matrice polymérique (CMP) sont généralement constitués d'une matrice de polymère et d'un renfort de fibres. Les matrices communément utilisées dans l'élaboration de composites à fibres naturelles sont les thermoplastiques, tel que le polypropylène et le polyéthylène [5-7], ou les thermodurcissables tel que le polyester [5, 8]. Plusieurs études dans le passé ont tenté de modifier les propriétés de surface des fibres de cellulose afin d'améliorer leur adhésion avec une matrice polymérique. Les fibres naturelles possèdent donc un fort potentiel de développement comme agent de renfort dans les matrices polymères [9-11]. L'ensemble de ces études montre également que l'adhésion entre les fibres et la matrice polymère joue un rôle primordial sur les propriétés mécaniques du composite [12].

D'après la littérature, on peut citer deux types des polymères :

#### **➤ Les résines thermoplastiques**

Les résines thermoplastiques sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (force de van der Waals, liaisons d'hydrogène) et mis en forme par chauffage et refroidissement [13]. Des polymères thermoplastiques (polypropylène, par exemple) renforcés par des fibres naturelles végétales ont été développés pour être utilisés dans différents domaines (cosmétique, automobile, horticulture, électroménager, mobilier urbain, outillage, ...etc.) [12].

➤ **Les résines thermodurcissables**

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois [14]. Il s'agit d'une matière formée d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Cette structure peut être rigide (par exemple polyester) ou souple (par exemple polyuréthane).

**Polyester** : usage courant (mise en œuvre aisée et coût d'achat bas)

**Polyuréthane** : densité et dureté variables

### **II.2.2. Composite à matrice minéral**

Une des applications techniques les plus réussies dans le Génie Civil est le renforcement du béton par l'acier. En effet, le béton armé est un matériau composite constitué d'une matrice cimentaire additionnée à un renfort par barres d'acier. Les nouveaux composites utilisables dans l'industrie de la construction doivent allier performances mécaniques et liberté architecturale tout en diminuant l'impact environnemental lors du processus de transformation. Les composites à matrice minérale constituent une solution envisageable afin de répondre à ces critères [15]. Dans le domaine de l'habitat, le torchis est considéré comme le premier matériau composite de l'histoire. Il est composé d'une matrice (terre) et de renforts (fibres végétales). C'était le matériau de construction des habitations dès le néolithique. Les Celtes ont utilisé pour construire les murs de leurs maisons [12].

Les fibres végétales comme le sisal, le jute, le lin, le chanvre ou encore le bambou, et les fibres de bois ont été utilisées comme renforts des matrices cimentaires dans les pays en voie de développement, dans le secteur du bâtiment. La résistance en flexion de ces matrices fragiles, telles les mortiers ou les pâtes de ciment, peut être considérablement améliorée grâce aux propriétés mécaniques des fibres (résistance en traction élevée) [16-18].

### **III. Mise en œuvre des matériaux composites:**

Les procédés de mise en œuvre de matériaux composites satisfont pleinement aux exigences des industries et des clients, dès lors que les cadences de production restent limitées à quelques pièces par jour. Il y a trois opérations qui sont indispensables [19]:

1. Imprégnation du renfort par le système résineux.
2. Mise en forme à la géométrie de la pièce.
3. Durcissement du système:
  - Soit par polycondensation, et réticulation pour les matrices thermodurcissables.
  - Soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Il existe différentes techniques mais la plus utilisée est par moulage.

Le cycle de vie d'un matériau composite est présenté sur la **Figure. I.2:**

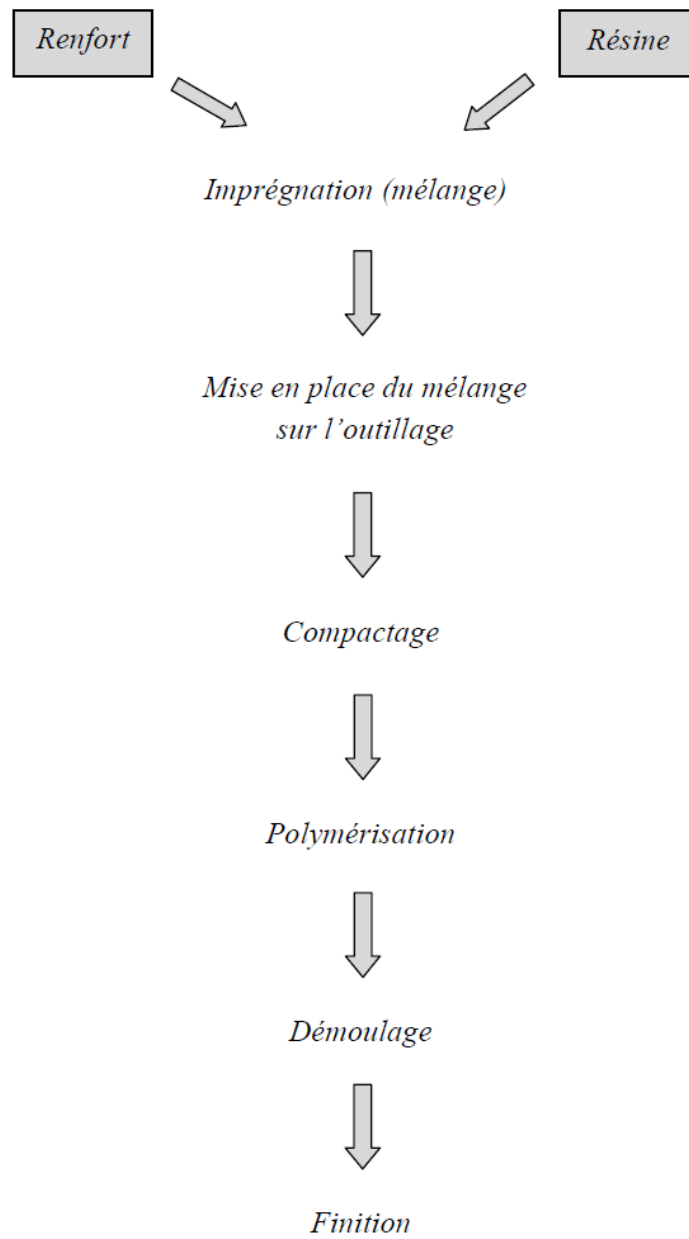


Figure. I.2 : Cycle de vie d'un matériau composite [20].

Les procédés les plus importants sont :

a. **Moulage au contact** : consiste à disposition successivement sur un moule et à réaliser l'imprégnation du renfort par une opération manuelle à l'aide d'un rouleau[21].

b. **Moulage par projection simultanée** : est une évolution de procédé de moulage au contact et est particulièrement adaptée aux pièces de moyennes et grandes dimensions [21].

c. **Injection thermodurcissable BMC** (BulkMolding Compound, ou pré-imprégnée vrac) : Les renforts sont mis en place entre le moule et le contre moule. La résine est injectée. La pression de moulage est faible [20].

d. **Compression thermodurcissable** : Il s'agit de moulage par compression et les moules sont très proches, par leur conception, de ceux utilisés lors de la mise en œuvre d'autres matières thermodurcissables[22].

e. **Pultrusion** : dans ce cas, les renforts passent dans un bain de résine catalysé où sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine. Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables [23].

f. **Enroulement filamentaire (ou bobinage)**: le renfort imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation. Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces [23].

#### **IV. Conductivité thermique des composites**

La conductivité thermique  $k$  ( $\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) est une grandeur physique importante qui caractérise la capacité isolante d'un matériau. Plus le coefficient  $k$  est faible, plus le pouvoir isolant du matériau est grand. Sa valeur dépend de plusieurs facteurs. La conductivité thermique  $k$  des matériaux est la propriété la plus couramment étudiée car elle dépend uniquement de la structure du matériau et de ses composants, contrairement à la convection qui intègre l'environnement immédiat du matériau. La modélisation de la conductivité thermique des composites est d'un intérêt important dans les applications de transfert de chaleur. Ce paramètre est fortement affecté par la composition et la structure des matériaux hétérogènes[24].

L'importance de la conductivité thermique des polymères et des composites à matrices polymères a augmenté ces dernières années. Il est également important de savoir la conductivité thermique des inclusions afin d'analyser le procédé de transfert de chaleur pendant la modélisation [25]. Le problème de la détermination des valeurs de la conductivité thermique des matériaux composites a fait l'objet de nombreuses études bibliographiques [26, 27]. La valeur de la conductivité thermique  $k$  pour des matériaux isotropes et homogènes est constante dans toutes les directions et en chaque point du matériau ; par contre elle varie localement dans le cas des matériaux composites en raison de l'existence de deux phases. L'une des particularités du composite est qu'il peut être assimilé à un bloc avec des propriétés globalement homogènes.

## **V. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les matériaux composites. Ces derniers peuvent être classés en deux groupes essentiels; matériaux composites à matrice polymère et à matrice minéral. Ainsi, l'étude bibliographique présentée montre l'importance de la modélisation de la conductivité thermique des composites. De ce fait, le chapitre suivant est consacré à la présentation des différents modèles théoriques pour la prédiction de la conductivité thermique des matériaux composites hétérogènes.

**Références**

- [1] D. Gay, "Matériaux Composites", Hermès ed. Paris, 1987.
- [2] B. d. Maillard. L. Berreur, and S. Nsperger, "L'industrie française des matériaux composites", 2002.
- [3] G. Aliprandi, "Matériaux réfractaires et céramiques techniques", Septima ed. Paris, France, 1989.
- [4] B. E, and H. LY, "Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose," 2008.
- [5] Lin. Ye. Yan. Li and Yiu-Wing Mai, "Sisal fiber and its composites: a review of recent developments", vol.60, pp:2037–2055, 2000.
- [6] T. Budtova. N. Le Moigne, "A statistical analysis of fibre size and shape distribution after compounding in composites reinforced by natural fibres", 2011.
- [7] R.S.Mukherjee. R. Satyana, C. Pavithran & S. G.and K. Piuai, "Natural Fibre-Polymer Composite", 1990.
- [8] K. Bledzki, "Composites reinforced with cellulose based fibres", 1999.
- [9] P. Herrera-Franco. M. Cazaurang-Martinez, I. Gonzales-Chi et M. Aguilar-Vega, "Physically and mechanical properties of henequen fibers," Journal of Applied Polymer Science, pp.749-756, 1991.
- [10] S. Thomas. K. Joseph, C. Pavithran et M. Brahmakumar, "Tensile properties of short-sisal fiber-reinforced polyethylene composites", Journal of Applied Polymer Science, pp. 1731-1739, 1993.
- [11] A.Valadez-Gonzale.M.Cervantes-UP.Herrera-Franco, "Development and characterization of a HDPE-sand-natural fiber composite ",Composites Part B, vol. 28, pp. 331-343, 1997.
- [12] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite", Docteur de l'Université de Limoges, 2007.

- [13] M. Manuelian and R. Campbell, "Thermal Diffusivity, Specific Heat, and Thermal conductivity Measurement Using NETZSCH LFA 447 Nanoflash", 2008.
- [14] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Fundamentals of heat and mass transfer", fifth ed, 2002.
- [15] A. Gabor, G. Promis, P. Hamelin, "Behavior of beams made in textile reinforced mineral matrix composites", *Composites structures*, vol.92, pp. 2565-2572, 2009.
- [16] M. R. De Souza, E. Y. A. Okino, A. E. Santana, M. V. S. Alves, M. E. De Sousa et D. E. Teixeira, "Cement bonded wood particleboard with a mixture of eucalyptus and rubberwood", *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, pp. 729-734, 2004.
- [17] P. G. Warden, R. S. P. Coutts, J. H. Savastano, "Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites", 2000.
- [18] Y. W. Mai, B. Cotterill, R. Andonian, "Strength and fracture properties of cellulose fiber reinforced cement composites", *Journal of Cement Composites*, pp. 151-158, 1979.
- [19] H. Manel, "Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère.", *Mémoire de master, Université de Batna*, P.99, 2010/2011.
- [20] D. Gay, "Matériaux composites", 5<sup>ème</sup> ed, 2005.
- [21] F. Berbain and A. Chevalier, "Mise en œuvre des composites", vol. 3 720.
- [22] P. Jacquinet, "Moulage par compression des SMC polyesters et phénoliques", vol. 3 727.
- [23] J.-M. Berthelot, "Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures", 1999.
- [24] J. K. Carson, J. Wang, M. F. North, and D. J. Cleland, "A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 3075-3083, 2006.
- [25] D. M. Bigg, "Thermal Conductivity of heterophase Polymer Compositions", vol. 119, 1995.

- [26] J.wiley. and. S. Ltd."Encyclopedia of polymer science and engineering", 2 ed. New York, 1989.
- [27] G. H.Stickford. S. G. and M. D. Bigg, "Talbert,ApplicationsofPolymericMaterialsforCondensingHeat Exchangers",Polymer Engineering and Science, vol. 29, 1989.

# **Chapitre II :**

**Modèles de prédiction de la  
conductivité thermique des composites**

### **I. Introduction**

Le but de ce deuxième chapitre est de présenter les différents modèles théoriques utilisés pour estimer la conductivité thermique des matériaux composites.

### **II. Modèles de prédiction de la conductivité thermique effective**

Les études théoriques sur la conductivité thermique effective des composites ont été poursuivies pendant plus de 100 ans[1]. De nombreuses corrélations théoriques et empiriques ont été indiquées dans la littérature pour prédire la conductivité thermique des composites [2]. 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[3]. Dans ce travail, seulement quelques modèles de prédictions de la conductivité thermique seront présentés.

#### **II. 1. Modèles avec interface parfaite**

Dans le cadre des modèles considérant une interface parfaite, les deux premiers modèles les plus connus et les plus basiques sont ceux définissant les bornes de Wiener. Ces modèles sont basés sur l'analogie électrique et la loi des mélanges [3]. Ce sont des modèles de premier ordre.

##### **II.1. 1. Modèle du premier ordre**

D'après cette approche, on peut supposer deux modèles extrêmes. L'un est un système en série où tous les blocs sont alignés en série par rapport au flux thermique. L'autre est parallèle au flux (**Figure .II.1**)[4, 5]. Ce modèle a été proposé par Wiener en 1912, qui lui a appliqué une analogie électrique au problème du transfert de chaleur dans les matériaux hétérogènes [6]. Les deux phases sont supposées arrangées parallèlement l'une à l'autre. La conductivité thermique effective est alors bornée par les deux valeurs  $k_{inf}$  et  $k_{sup}$ .

Flux thermique

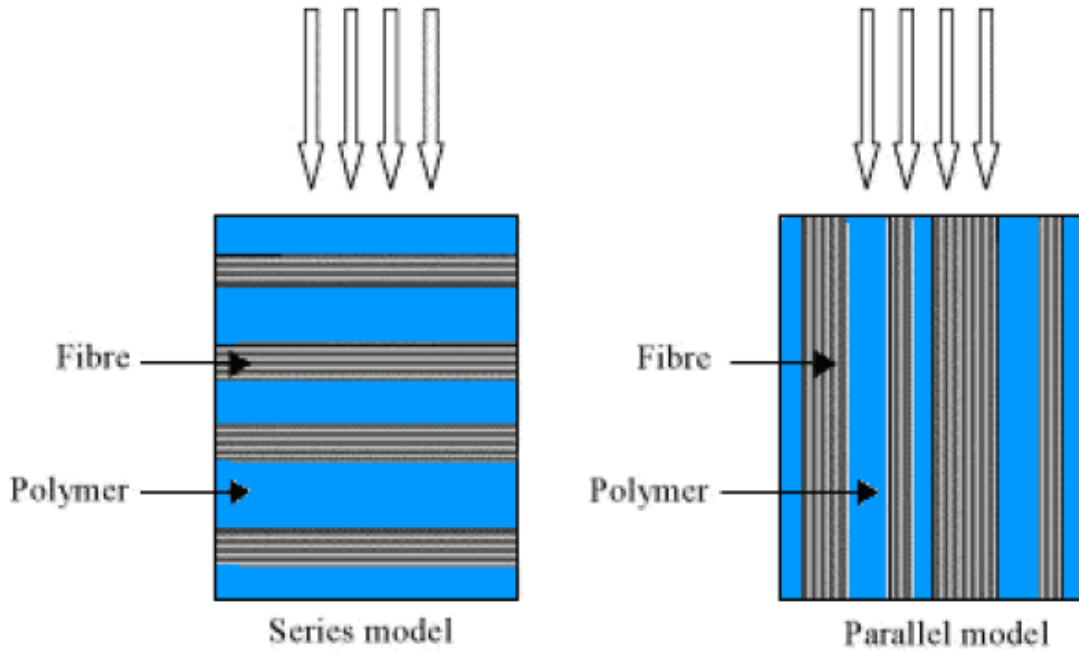


Figure. II.1 : Modèle du premier ordre [7]

$$\frac{k_{\text{inf}}}{k_m} = \frac{1}{\frac{\varphi_m}{k_m} + \frac{\varphi_{ch}}{k_{ch}}} \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{k_{\text{sup}}}{k_m} = \varphi_m + \frac{k_{ch}}{k_m} \varphi_{ch} \quad (\text{II.2})$$

Où  $k_{\text{inf}}$ ,  $k_{\text{sup}}$  représentent les conductivités de la borne inférieure et supérieure,  $k_m$  : la conductivité thermique de la matrice,  $k_{ch}$  la conductivité thermique de la charge,  $\varphi_m$  la concentration volumique de la matrice,  $\varphi_{ch}$  la concentration volumique de la charge.

$$\varphi_m = 1 - \varphi_{ch} \quad (\text{II.3})$$

### II.1.2 Modèles de second ordre

Le modèle de second ordre prend en compte quant à lui la perturbation entre les phases du composite et la géométrie des inclusions (sphère, cylindre, fibre,...) et introduit dans les modèles un facteur relatif à la géométrie.

#### II.1.2.1. Modèle de Maxwell

L'approche de Maxwell suppose que le composite est constitué de sphères dispersées dans un milieu continu [8]. La conductivité thermique effective est alors donnée par :

$$k = k_m \frac{2k_m + k_{ch} - 2(k_m - k_{ch})\varphi}{2k_m + k_{ch} + 2(k_m - k_{ch})\varphi} \quad (\text{II.4})$$

#### II.1.2.2. Modèle de Lewis et Nielson

Lewis et Nielson ont modifié et ont adapté l'équation de Halpin-Tsai pour les modules élastiques des matériaux composites à la conductivité thermique des composites remplis par des inclusions[9]. L'équation de Lewis et de Nielson est donnée par [10] :

$$k = k_m \left( \frac{1 + AB\varphi}{1 - B\varphi\omega} \right) \quad (\text{II.5})$$

Avec

$$B = \frac{\frac{k_{ch}}{k_m}}{\frac{k_{ch}}{k_m} + A} \quad (\text{II.6})$$

et

$$\omega = 1 + \left( \frac{1 - \varphi_{\max}}{\varphi_{\max}^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

## **Chapitre II Modèles de prédiction de la conductivité thermique des composites**

Où  $\varphi_{\max}$  : la fraction volumique d'empilement maximum des inclusions, A constante qui dépend de la forme et de l'orientation des inclusions dans le composite [11]. Le Tableau 1 représente quelques valeurs de A:

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

**TableauII.1** : Valeurs de A pour différents types d'inclusion [12]

### **II.1.2.3. Modèle d'Agari**

Agari a développé un modèle basé sur la généralisation des modèles série et parallèle [13]. Cette approche semi-empirique a été proposée pour la prédiction de la conductivité thermique effective de tous les types d'inclusions [14]. L'équation logarithmique d'Agari est donnée par :

$$\log k = \varphi c_2 \log k_{ch} + (1 - \varphi) \log(c_1 k_m) \quad \text{II.8)}$$

Où  $C_1$  facteur d'effet sur la cristallinité de la matrice, L'affinement du terme  $C_1$  ne sera plus utile; nous considérons que  $C_1 \cong 1$ ,  $C_2$  facteur intervenant lors de la formation de chaîne conductrice de particule [15, 16]. Le paramètre  $C_2$ , est compris dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Si la formation de chaînes

conductrices au sein du composite est obtenue facilement, la conductivité thermique de ce matériau composite peut changer elle aussi facilement. Dans ce cas, la valeur de  $C_2$  avoisinent 1.

### **II.1.2.4. Modèle de Bruggeman**

Le modèle de Bruggeman est l'un des corrélations utilisées pour la prédiction de la

Conductivité thermique effective [14]. Ce modèle est basé sur les suppositions de Maxwell [17] et présenté par l'équation suivante :

$$1 - \varphi = \frac{k - k_{ch}}{k_m - k_{ch}} \times \left( \frac{k_m}{k} \right)^{\left( \frac{1}{1-x} \right)} \quad (\text{II.9})$$

Où  $k$ ,  $k_m$  et  $k_{ch}$  sont respectivement la conductivité thermique du composite, de la matrice et des charges ;  $\varphi$  la concentration volumique en charges et  $x$  constante qui dépend de la géométrie des inclusions ( $x=2$  pour les inclusions sphérique,  $x=1$  pour les inclusions cylindriques).

### **II.1.2.5 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 [18]. L'équation de Hatta et Taya est donnée par :

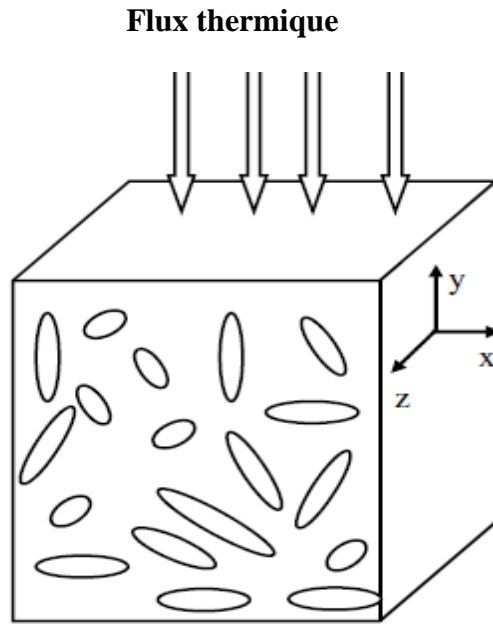
$$k = k_m \left[ 1 - \frac{\varphi_{ch} (k_{ch} - k_m) [(k_{ch} - k_m)(2s_{33} + s_{11}) + 3k_m]}{3(k_{ch} - k_m)^2 (1 - \varphi_{ch}) s_{11} s_{33} + k_m (k_{ch} - k_m) R + 3k_m^2} \right] \quad (\text{II.10})$$

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

$$R = 3(s_{11} + s_{33}) - \varphi_{ch} (2s_{11} + s_{33}) \quad (\text{II.11})$$

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

$$k = k_m \left[ 1 + \frac{\varphi_{ch}}{\frac{(1 - \varphi_{ch})}{3} + \frac{k_m}{k_{ch} - k_m}} \right] \quad (II.12)$$



**Figure II .2** : Distribution de fibres courtes orientées  
Dans différentes directions dans la matrice [18].

### II.1.2.6 Modèle de Cheng et Vachon

En se basant sur le modèle de Tsao, Cheng et Vachon supposent une distribution parabolique de la phase discontinue [17]. La conductivité thermique effective est donnée par [19] :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\sqrt{c(k_m - k_{ch})} [k_m + B(k_{ch} - k_m)]} \ln \frac{\sqrt{[k_m + B(k_{ch} - k_m)] + \frac{B}{2} \sqrt{c(k_m - k_{ch})}}}{\sqrt{[k_m + B(k_{ch} - k_m)] - \frac{B}{2} \sqrt{c(k_m - k_{ch})}}} + \frac{1 - B}{k_m} \quad (II.13)$$

Où:

$$B = \sqrt{\frac{3\varphi_{ch}}{2}} \text{ et } c = -4\sqrt{\frac{2}{3\varphi_{ch}}} \quad (\text{II.14})$$

### II.1.2.7 Modèle de Hamilton-Crosser

Le modèle de Hamilton et Crosser [20-22] définit par l'équation (II.15) fait intervenir une constante empirique  $n$ . Cette constante prend en compte la morphologie des particules. Il a été constaté que si le rapport des conductivités des deux phases en présence,  $\frac{k_{ch}}{k_m}$  est supérieur à 100,

la constante  $n$  est défini par l'équation (II.16) sinon  $n = 3$ .

$$k = k_m \left[ \frac{k_{ch} + (n-1)k_m - (n-1)\varphi_{ch}(k_m - k_{ch})}{k_{ch} + (n-1)k_m + \varphi_{ch}(k_m - k_{ch})} \right] \quad (\text{II.15})$$

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (\text{II.16})$$

Ainsi, si la particule est une sphère,  $\psi = 1$ .

### II.1. 3. Modèles de troisième et quatrième ordre

Le modèle de troisième et quatrième ordre prend lui aussi en compte la perturbation entre les phases du composite et la géométrie des inclusions. Ils font apparaître un terme supplémentaire relatif à une fonction statistique de répartition [18, 23, 24]. Il développe un modèle plus général que celui de Hashin et Shtrikman. Pour le calcul moyen de la conductivité thermique du matériau composite, il introduit un paramètre qui tient compte de la statistique de perturbation autour de chaque particule [23, 25, 26]. Torquato utilise l'expression de perturbation de la conductivité électrique pour chacune des deux phases du composite avec une valeur dimensionnelle,  $d = 3$  dans le cas des sphères. Une expression théorique plus générale de la conductivité thermique effective pour des dispersions tridimensionnelles est alors établie et elle est donnée par:

$$\frac{k_{eff}}{k_j} = \frac{1 + \left[ (d-1)\phi_i - \left( \frac{\gamma_i}{\varepsilon_i} \right) \right] \beta_{ij} + (1-d) \left[ \phi_i \varepsilon_i - \phi_i \left( \frac{\gamma_i}{\varepsilon_i} \right) \right] \beta_{ij}^2}{1 - \left[ \phi_i - \left( \frac{\gamma_i}{\varepsilon_i} \right) \right] \beta_{ij} + \left[ (1-d)\phi_j \varepsilon_i - \phi_i \left( \frac{\gamma_i}{\varepsilon_i} \right) \right] \beta_{ij}^2} \quad (\text{II.17})$$

Où  $i$  et  $j$  sont les indices relatifs aux deux phases du composite (avec  $i \neq j$ ).

Les paramètres macro structuraux  $\varepsilon_i$ ,  $\gamma_i$  sont représentés par les relations suivantes :

$$\varepsilon_i = \frac{A3^{(i)}}{\phi_i \phi_j (d-1)} \quad (\text{II.18})$$

Et

$$\gamma_i = \frac{A4^{(i)}}{\phi_i \phi_j (d-1)} \quad (\text{II.19})$$

Où  $A3(i)$  et  $A4(i)$  sont des coefficients d'interaction sur un ensemble de  $n$  points de la fonction de probabilité. De plus, on a :

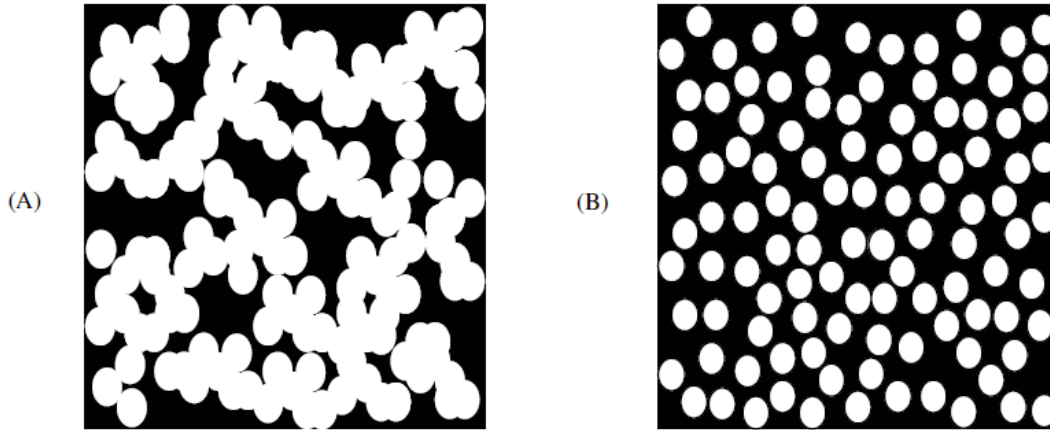
$$\beta_{ij} = \frac{k_i - k_j}{k_i + (d-1)k_j} \quad (\text{II.20})$$

$-1 \leq \frac{\gamma_i}{\varepsilon_j} \leq 1 - 2\varepsilon_i$ , le rapport  $\frac{\gamma_i}{\varepsilon_i}$  peut tendre vers 0.

Pour le cas de dispersions d'inclusions sphériques l'équation II.17 devient :

$$\frac{k_{eff}}{k_1} = \frac{1 + \phi_2 \beta_{12} - \phi_1 \varepsilon_1 \beta_{12}^2}{1 - \phi_2 \beta_{12} - \phi_1 \varepsilon_1 \beta_{12}^2} \quad (\text{II.21})$$

Avec  $0 < \xi_i < 1$ . Les valeurs de  $\xi_i$  sont données par le tableau II.1 pour différentes formes d'inclusions sphériques de même taille qui sont pénétrables ou de distribution aléatoire impénétrable [27]. Les différentes configurations du matériau composite sont représentées dans la figure II.3. Les valeurs de la fraction maximale de remplissage  $\phi_{max}$  sont données dans le tableau II.2 [27].



**Figure II.3** : Distribution de la phase dispersée de sphères dans la matrice :

(A) sphères qui se pénètrent et (B) sphères impénétrables [27].

Fraction volumique de particules sphériques $\phi_2$	Valeurs de $\xi_1$ pour des sphères totalement pénétrables	Valeurs de $\xi_1$ pour des sphères aléatoirement impénétrables
0,10	0,056	0,021
0,10	0,114	0,040
0,20	0,171	0,059
0,30	0,230	0,084
0,40	0,290	0,141
0,50	0,351	0,328
0,60	---	---
0,65	0,415	---
0,70		
0,80	0,483	---
0,90	0,558	---

**Tableau II.2** : Valeurs de  $\xi_1$  pour des inclusions sphériques

en fonction de la fraction volumique des inclusions[27].

Charges	Formes	Remplissages	$\phi_{\max}$
Générique	Sphères	Hexagonal	0,74
Générique	Sphères	Cubique centré	0,60
Générique	Sphères	Cubique simple	0,52
Générique	Sphères	Aléatoire écarté	0,60
Générique	Sphères	Aléatoire proche	0,64
Générique	Irrégulières	Aléatoire proche	0,64
Talc	Flocons	Aléatoire 3D	0,40-0,56
Mica	Flocons	Aléatoire 3D	0,38-0,45
Amiante	Fibres	Aléatoire 3D	0,60

**Tableau II.3** : Fraction volumique maximale de dopant  $\phi_{\max}$

Pour des inclusions sphériques [26].

### II.2. Modèles avec interface imparfaite

Les modèles présentés section (II.1) considèrent une interface parfaite entre les constituants, autrement dit un contact parfait entre les inclusions et la matrice. Il a été mis en évidence que ces modèles ne définissaient pas forcément bien le comportement thermique des matériaux composites étudiés, car ils ne reflètent pas la réalité du contact entre les particules et la matrice [28, 29]. Mais ce n'est que dans les années 80, que des études théoriques prenant en compte la résistance de Kapitza dans la détermination de la conductivité thermique effective des matériaux composites, notamment avec les travaux de Benveniste et Miloh [28, 30] et de Hasselman et Johnson [29], sont publiées.

#### II.2.1 Modèles de Benveniste

Benveniste et Miloh [28] ont développé un modèle dans le cas d'une matrice faiblement chargée en particules. Ils ont défini 3 cas :

- un composite avec des sphéroïdes allongés alignés
- un composite avec des sphéroïdes aplatis alignés
- un composite avec des sphéroïdes allongés ou aplatis et orientés aléatoirement

## Chapitre II Modèles de prédiction de la conductivité thermique des composites

Les deux premiers cas sont considérés isotropes transverses, ils ont donc deux conductivités thermiques effectives : une parallèle à l'axe de symétrie des inclusions (cas longitudinal) et une perpendiculaire à l'axe de symétrie (cas transverse). Le dernier cas est quant à lui considéré isotrope et est déduit des deux précédents cas. Ce modèle se place dans le cas dilué, c'est-à-dire que les particules sont suffisamment éloignées les unes des autres pour négliger les interactions entre elles.

### a) Cas longitudinal

➤ Cas de sphéroïde allongés

$$K_i = k_m \left[ 1 + \nu\rho(1 + \lambda B_1) f(\xi_0) \right] \quad (II.22)$$

Avec

$$f(\xi_0) = \left( \frac{1}{2} \xi_0 (\xi_0^2 - 1) \ln \left( \frac{\xi_0 + 1}{\xi_0 - 1} \right) - \xi_0^2 \right)^{-1} \text{ et } \lambda = \frac{k_{ch}}{k_m}$$

Avec  $\xi_0$  l'inverse de l'excentricité du sphéroïde et  $\nu\rho$  la fraction volumique des particules. Elle est définie telle que  $\frac{a^3}{b^3} = \nu\rho$ , où  $a$  est le rayon de la particule et  $b$  le rayon extérieur de la matrice entourant la particule.

➤ Cas de sphéroïdes aplatis

$$K_i = k_m \left[ 1 + \nu\rho(1 + \lambda B_1 f(i\xi_0)) \right] \quad (II.23)$$

Avec

$$f(i\xi_0) = - \left[ \xi_0 (\xi_0^2 + 1) \cot^{-1} \xi_0 - \xi_0^2 \right]^{-1}$$

Le paramètre  $B_1$  est fonction du type d'interface particule/matrice.

Si, dans un premier temps, nous considérons une interface parfaite c'est-à-dire qu'il y a continuité de température à l'interface particule/matrice, le paramètre  $B_1$  s'exprime

Suivant l'équation(II.24):

$$B_1 = -\left[1 - (1 - \lambda) \left(\frac{\xi^2}{\xi_0^2}\right)_1 Q_1(\xi_0)\right]^{-1} \quad (\text{II.24})$$

Les équations (II.22) et (II.23) deviennent donc :

$$k_l = k_m \left[1 - \frac{\nu\rho(1 - \lambda)}{1 - (1 - \lambda) \left(\frac{\xi^2}{\xi_0^2} - 1\right) Q_1(\xi_0)}\right] \quad (\text{II.25})$$

Avec

$$Q_1(\xi_0) = \frac{\xi_0}{2} \ln\left(\frac{\xi_0 + 1}{\xi_0 - 1}\right) - 1 \quad (\text{II.26})$$

**b) Cas transverse**

➤ Cas de sphéroïdes allongés

$$k_t = k_m \left[1 + \nu\rho(1 + \lambda D_1) g(\xi_0)\right] \quad (\text{II.27})$$

Avec

$$g(\xi_0) = -2 \left[ \frac{\xi_0}{2} \left(\frac{\xi^2}{\xi_0^2} - 1\right) \ln\left(\frac{\xi_0 + 1}{\xi_0 - 1}\right) - \xi_0^2 + 1 \right]^{-1}$$

➤ Cas de sphéroïdes aplatis

$$k_t = k_m \left[1 + \nu\rho(1 + \lambda D_1) g(i\xi_0)\right] \quad (\text{II.28})$$

Avec

$$g(i\xi_0) = -2 \left[ -\xi_0 \left(\frac{\xi^2}{\xi_0^2} + 1\right) \cot^{-1} \xi_0 + 2 + \xi_0^2 \right]^{-1}$$

Le paramètre  $D_1$  est fonction du type d'interface particule/matrice.

## Chapitre II Modèles de prédiction de la conductivité thermique des composites

Si, dans un premier temps, nous considérons une interface parfaite, c'est-à-dire qu'il y a continuité de température à l'interface particule/matrice, le paramètre  $D_1$  s'exprime suivant l'équation (II.29):

$$D_1 = \frac{-2}{2 + \xi_0(1-\lambda)(\xi_0^2 - 1)^{\frac{1}{2}} Q_1^1(\xi_0)} \quad (\text{II.29})$$

Les équations (II.27) et (II.28) deviennent donc :

$$k_t = k_m \left[ 1 - \frac{\nu\rho(1-\lambda)}{1 + \frac{\xi_0}{2}(\xi_0^2 - 1)^{\frac{1}{2}} Q_1^1(\xi_0)} \right] \quad (\text{II.30})$$

$$Q_1^1(\xi_0) = \frac{1}{2}(\xi_0^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \ln\left(\frac{\xi_0 + 1}{\xi_0 - 1}\right) - \frac{\xi_0}{(\xi_0^2 - 1)^{\frac{1}{2}}}$$

$$k_t = k_m \left[ 1 - \frac{\nu\rho(1-\lambda)}{1 - \frac{\xi_0}{2}(1-\lambda)(\xi_0^2 + 1) \left[ \cot^{-1} \xi_0 - \left( \frac{\xi_0}{1 + \xi_0^2} \right) \right]} \right] \quad (\text{II.31})$$

Ces cas ont aussi été dérivés pour des particules sphériques de rayon  $a$ . Dans ce cas

$\xi_0 \rightarrow \infty$  et  $Q_1^1(\xi_0) \rightarrow \frac{1}{3}\xi_0^2$  et les équations (II.22), (II.23), (II.27) et (II.28) aboutissent à l'équation (II.31) :

$$k = k_m \left[ 1 - \frac{3\nu\rho(1-\lambda)}{2 + \lambda} \right] \quad (\text{II.32})$$

### c) Distribution aléatoire

Benveniste et Miloh[31] ont cependant défini un modèle, donné par l'équation (II.30) considérant des particules sphéroïdales allongées ou aplaties réparties aléatoirement dans une matrice isotrope. Le comportement effectif de ce composite peut être considéré comme isotrope également.

$$k = \frac{2}{3}k_t + \frac{1}{3}k_l \quad (\text{II.33})$$

La conductivité thermique effective du composite est ici définie en fonction des conductivités thermiques longitudinale et transverse définies dans les cas précédents. Ce modèle est donc difficilement exploitable par la suite.

### II.3. Modélisation par les méthodes d'homogénéisation

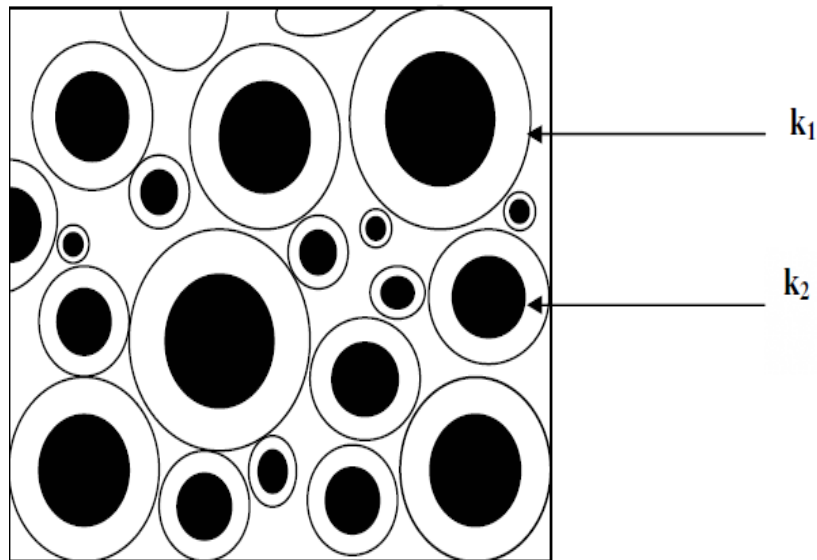
#### II.3.1. Modèle de Hashin et Shtrikman

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 [32]. Selon Hashin et Shtrikman la conductivité s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{k}{k_m} = \frac{1 + (d-1)\varphi_{ch}\beta}{1 - \varphi_{ch}\beta} \quad (\text{II.34})$$

Et

$$\beta = \frac{k_{ch} - k_m}{k_{ch} + (d-1)k_m} \quad (\text{II.35})$$



**Figure II .4:** Assemblage de sphères ou de cylindres dans un composite

Selon Hashin pour  $k_2 > k_1$ . La matrice est représentée en blanc

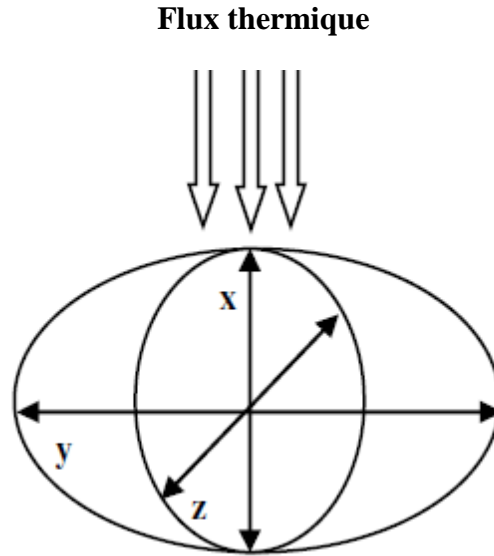
et la phase dispersée en noir [27, 33, 34].

$d$  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

$d = 2$  et donnée par l'équation (36) dans le cas d'une ellipse [2].

$$d = \frac{\left(\frac{1}{x}\right) + \left(\frac{1}{y}\right) + \left(\frac{1}{z}\right)}{\left(\frac{1}{x}\right)} \quad (\text{II.36})$$



**Figure II.5:** Propagation du flux dans cas d'une ellipse [27] .

Où  $x, y, z$  représentent les axes de la particule ellipsoïdale.

### II.3.2. Modèle d'auto-cohérente (HAC)

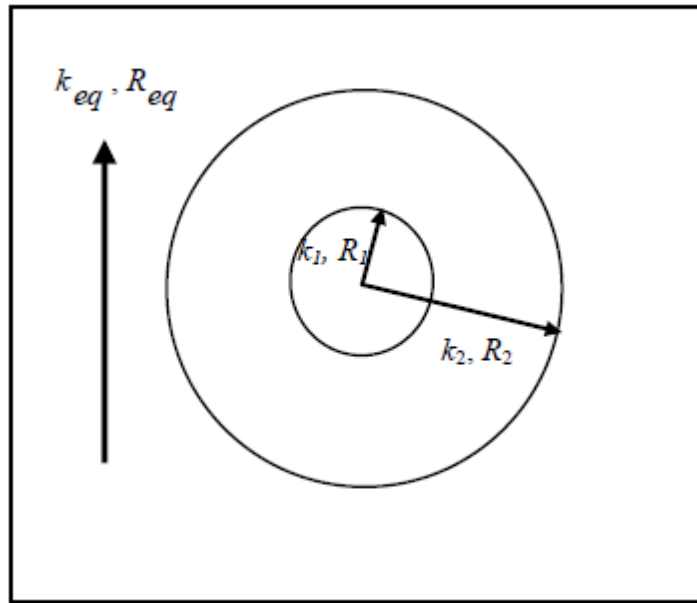
Le matériau homogène est assimilé à un ensemble d'inclusions composites sphériques de taille variable [35, 36]. Cette approche a été développée pour la caractérisation mécanique (élasticité et élastoplasticité) de matériaux hétérogènes et a été utilisée par Arnaud et al. [37] sur le chanvre en vrac, les bétons de chanvre et la laine de chanvre.

#### ➤ Cas de HAC avec des inclusions bicomposites

Dans ce cas, le matériau composite est composé de deux constituants, un constituant 1

Modélisé par une sphère de rayon  $R_1$ , de conductivité  $k_m$ , et de masse volumique,  $\rho_1$ , entouré d'un constituant 2 de caractéristiques  $R_2, k_{ch}, \rho_2$ . Cette inclusion biocomposite est entourée d'une matrice de matériau homogène équivalent inclusions simples :

- Le milieu est soumis à un gradient de température uniforme unitaire  $\mathbf{G}$  à l'infini.



**Figure II.6 :** Schéma de la cellule avec deux composants

La conductivité thermique équivalente est donnée par la relation [35], [36]:

$$k_{eq} = k_{ch} \left( 1 + \frac{\varphi}{1 - \varphi + \frac{1}{\frac{k_m}{k_{ch}} + 1}} \right) \quad (\text{II. 37})$$

$\varphi$  : C'est la concentration volumique du constituant "1"

➤ **Cas de HAC avec des inclusions tricomposites**

Dans le cas d'un matériau hétérogène composé de trois constituants, le modèle est constitué d'une sphère interne d'air ( $k_m, \rho_1$ ), entourée d'une cellule sphérique de renfort ( $k_{ch}, \rho_2$ ), et elle aussi entourée par une enveloppe de la matrice ( $k_3, \rho_3$ ), le tout étant plongé dans le matériau composite homogène équivalent dont les propriétés sont recherchées (voir **Figure II.7**)

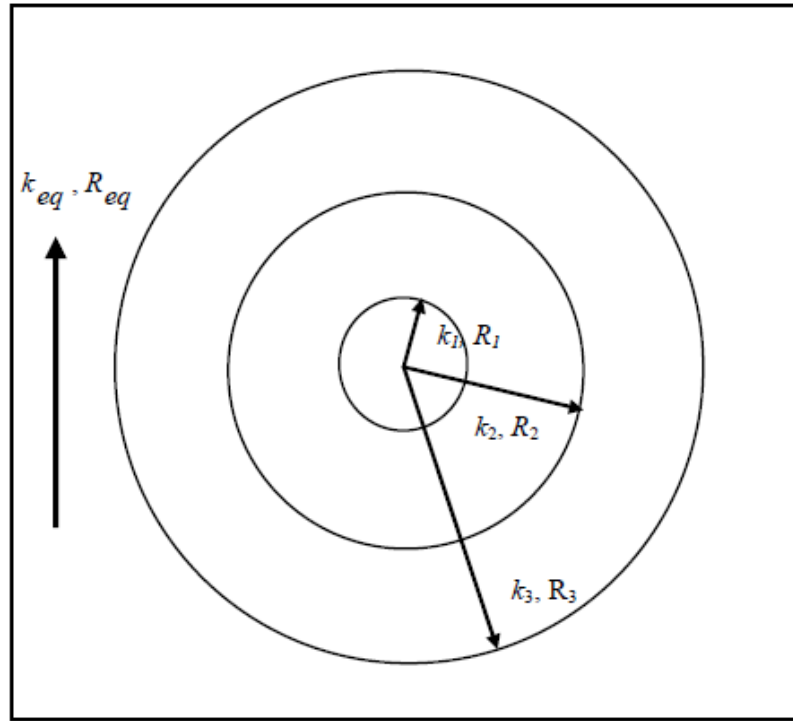


Figure II .7: Schéma de la cellule tri-composite

Dans le cas d'une inclusion sphérique tricomposite avec les phases 1, 2, et 3, la conductivité thermique équivalente  $k_{eq}$  du composite de la masse volumique  $\rho_{eq}$  est donnée par [35]:

$$\frac{k_{eq}}{k_3} = \frac{\varphi}{\left(\frac{1-\varphi}{3}\right) + \frac{1 + \frac{\delta}{3} \left(\frac{k_m}{k_{ch}} - 1\right)}{\frac{k_m}{k_3} - 1 + \frac{\delta}{3} \left(\frac{k_m}{k_{ch}} - 1\right) \left(\frac{2k_{ch}}{k_3} + 1\right)}} \quad (II.38)$$

Avec,  $\varphi$ , et  $\delta$  sont les concentrations volumiques de renfort et de la matrice respectivement

### ➤ Cas de HAC avec des inclusions elliptiques

L'hypothèse forte de ce modèle consiste à supposer que chaque inclusion est entourée par un milieu continu équivalent dont la conductivité est égale à la conductivité thermique effective  $k$  inconnue[39]. L'estimation de la conductivité thermique effective est donc :

$$k = k_m + v_f (k_f - k_m) A_f \quad (\text{II.39})$$

Où le tenseur de concentration  $A_f$  est donné par :

$$A_f = [I + (k_f - k_m) P_f]^{-1} \quad (\text{II.40})$$

Avec  $I$  est le tenseur unitaire et  $P_f$  est le tenseur de Hill qui dépend du rapport de forme de l'inclusion ( $r = \frac{1}{d}$ ) et de la conductivité thermique de la matrice. Le tenseur des conductivités thermiques  $K$  de la matrice entourant les particules de chènevotte n'est pas connu. Il est à noter que le tenseur de Hill  $P_f$  doit être recalculé à chaque itération, sauf dans le cas où la matrice a un comportement isotrope transverse[40].

### III .4. Modèle de Mori-Tanaka

Le principe de ce modèle est de considérer un ellipsoïde immergé dans une matrice solide et soumis à un gradient thermique fictif. La solution du problème permet d'écrire le tenseur de concentration de la chènevotte:

$$A_{f_1} = A_f [(1 - v_f) I + v_f A_f]^{-1} \quad (\text{II.41})$$

L'estimation du tenseur des conductivités thermiques homogénéisées du composite par l'approche de Mori-Tanaka[40] s'exprime par :

$$k = k_m + v_f (k_f - k_m) A_{f_1} \quad (\text{II.42})$$

### **IV. Conclusion**

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté une étude bibliographique sur les principaux modèles de prédictions de la conductivité thermique effective des matériaux composites. En effet, aucun modèle théorique ne permet la prédiction de la conductivité thermique des matériaux hétérogènes avec précision, ce qui rend la modélisation numérique un moyen indispensable pour valider les modèles théoriques.

### **Références**

- [1] Y. Xu and. K. Yagi, "Automatic FEM model generation for evaluating thermal Conductivity of composite with random materials arrangement ", vol. 30, 2004.
- [2] A. Boudenne, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère", Université Paris XII Val de Marne.2003, pp. 163.
- [3] G. S. Springer and. S. W. Tsai., "Thermal conductivities of unidirectional materials". "Journal of Composite Materials ", pp. 1(2):166–173, 1967.
- [4] Y. Agari, M. Tanaka, and S. Nagai, "Thermal Conductivity of a Polymer Composite Filled with Mixtures of Particles". "Journal of Applied Polymer Science ". vol. 34, pp. 1429-1437, 1987.
- [5] I. Krupa, A. Boudenne, and a. L. Ibos, "Thermophysical properties of polyethylene filled with metal coated polyamide particles", " European Polymer Journal ", vol. 43, pp. 2443-2452, 2007.
- [6] J. T. Mottram and. R. Taylor, "Thermal transport properties ", 1991.
- [7] K. Bourai, " Etude du comportement thermique d'un composite Bois -polymère pour une application en rotomoulage", Université Laval, 2010.
- [8] J. Flourey, J. Carson, and Q. T. Pham, "Modeling Thermal Conductivity in Heterogeneous Media with finite Element Method ".2007.
- [9] R. Pal, "On the Lewis-Nielson model for thermal/electrical conductivity of composites ", vol. 39, 2008.
- [10] B. Agoudjil, L. Ibos, J. C. Majesté, Y. Candau, and a. Y. P. Mamunya, "Correlation between transport properties of Ethylene Vinyl Acetate/glass, silver-coated glass spheres composites ", vol. 39, 2008.
- [11] Y. S. Song and. J. R. Youn, "Evaluation of effective thermal conductivity for carbon nanotube/polymer composites using control volume finite element method ", vol. 44, 2005.

- [12] D. M. Bigg, "Thermally Conductive Polymer Compositions", vol. 7, June, 1986.
- [13] Y. Agari, A. Ueda, and S. Nagai, "Thermal Conductivity of a Polymer Composite", "Journal of Applied Polymer Science", vol. 49, pp. 1625-1634, 1993.
- [14] 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.
- [15] Y. Agari, A. Ueda, M. Tanaka, and a. S. Nagai, "Thermal Conductivity of a Polymer Filled with Particles in the Wide Range from Low to Super-High Volume Content," "Journal of Applied Polymer Science", vol. 40, pp. 929-941, 1990.
- [16] H. He, R. Fu, Y. Han, Y. Shen, and X. Song, "Thermal conductivity of ceramic Particle filled polymer composites and theoretical predictions", 2007, pp. 6749-6754.
- [17] R. C. Progelhof, J. L. Throne, and R. R. Ruetsch, "Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite Systems", vol. 16, 1976.
- [18] H. Hatta and a. M. Taya, "Effective thermal conductivity of a misoriented short fiber composite", 1985.
- [19] S. C. Cheng and R. I. Vachon, "a Technique for Predicting the Thermal Conductivity of Suspensions", "Emulsions and Porous Materials", 1970.
- [20] D. M. Bigg and R. G. Barry. "Thermal conductivity of heterophase polymer compositions Advances in Polymer Science", 1995.
- [21] R. C. Progelhof, J. L. Throne, and R. R. Ruetsch., "Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems:A review". 1976.
- [22] R. L. Hamilton and O. K. Crosser. "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems". 1962.
- [23] J. Wiley and S. Ltd., "Encyclopedia of polymer science and engineering", vol.16, 2 ed. New York, 1989.
- [24] S. Torquato and. "Gstell.J. Chem", vol. 78, 1983.
- [25] S. Torquato and J. Mec, "Solids.Phys", 1997.

- [26] Y. K. Godovsky and V. P. Privalko, "Thermal and electrical conductivity of polymer materials: springer-verlag berlin", 1995.
- [27] J. T. Mottram and R. Taylor, "Thermal Transport Properties, International Encycopaedia of Composite", vol. 5. New York, 1991.
- [28] Y. Benveniste and T. Miloh, "The effective conductivity of composites with imperfect thermal contact at constituent interface", "International Journal of Engineering Science ", pp. 24(9):1537–1552, 1986.
- [29] D. P. H. Hasselman and L. F. Johnson, "Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance". "Journal of Composite Materials ", pp. 21(6):508–515, 1987.
- [30] Y. Benveniste, "Effective thermal conductivity of composites with a thermal contact resistance between the constituents: Nondilute case", "Journal of Applied Physics ", pp. 61(8):2840–2843, 1987.
- [31] B. Reine, "Eude et simulation de la conductivité thermique de matériaux composites à matrice organique chargée et renforcée de fibres de carbone PITCH", Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2014.
- [32] J. K. Carson, S. J. Lovatt, D. J. Tanner, and A. C. Cleland, "Thermal conductivity bounds for isotropic ", porous materials, vol. 48, 2005.
- [33] Z. Hashin and S. Shtrikman, "J. Appl. Physic ", vol. 33, 1962.
- [34] Z. Hashin, F. W. Wendt, H. Liebowitz, and N. Perronne, "Proceedings of the fifth symposium on naval structural mechanics ", 1970.
- [35] V. Cerezo, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique", 2005, pp. 225.
- [36] M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M. M. Khenfer, A. Bali, and M. Quéneudec, "Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modellin ", vol. 21, 2007.

## ***Chapitre II Modèles de prédiction de la conductivité thermique des composites***

---

- [37] L. Arnaud, H. Monnet, C. Cordier, and F.Sallet, "Modélisation par homogénéisation autocohérente de la conductivité thermique de béton et laines de chanvre", 15-17 mai 2000.
- [38] A. Brini, "Modélisation multi-échelles du comportement et du vieillissement des mousses syntactiques immergées", " Pierre et Marie Curie", 2004, pp. 217.
- [39] R. Hill, "A self-consistent mechanics of composite materials", " Journal of Mechanics and Physics of Solids ", vol. 13, pp. 213–222, 1965.
- [40] Chambéry and Savoie, "Etude expérimentale et numérique de la conductivité thermique d'un composite chaux–chanvre", pp. 6, 2012.

# **Chapitre III**

## **Modélisation théorique de la conductivité thermique des composites**

### **I. Introduction**

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des travaux réalisés pour déterminer la conductivité thermique des composites en utilisant les modèles théoriques. Ensuite, on se focalisera sur une application de quelques modèles pour déterminer la conductivité thermique de composite mortier/bois de palmier dattier.

### **II. Travaux réalisés pour déterminer la conductivité thermique des composites par les modèles théoriques**

La modélisation de la conductivité thermique effective de matériaux hétérogènes est d'un grand intérêt dans de nombreuses applications de transfert de chaleur. Progelhof *et al.*[1] et Carson *et al.*[2] ont fourni des synthèses sur les méthodes théoriques les plus pertinentes. Il n'existe pas de modèle unique qui est applicable à tous les types de structure[3].

Les premiers travaux relatifs au transfert macroscopique en milieu hétérogène avec contact parfait entre phases et auxquels se réfèrent encore de nombreux auteurs aujourd'hui, sont dus à Maxwell (1873) et Rayleigh (1892) [4].

L'approche de Maxwell, initialement associée à un problème de conduction électrique dans un milieu hétérogène constitué de sphères dispersées dans un milieu continu, a abouti à la formulation de la conductivité effective d'un milieu homogène équivalent [5]. Garnier *et al.*[6] rapportent que la modélisation théorique des propriétés des matériaux polymères chargés en particules métalliques est une tâche très difficile et demande la connaissance de plusieurs paramètres qui sont parfois difficile à obtenir (paramètres liés à la microstructure, la résistance thermique de contact, ...).

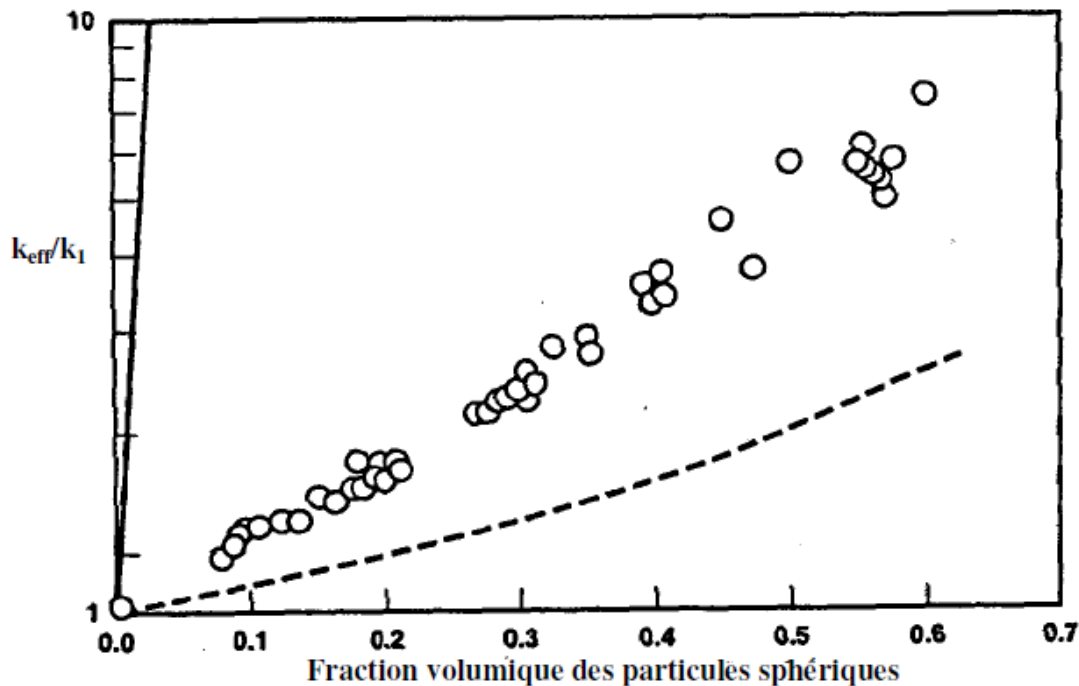
D'autres travaux de la modélisation mathématique, de la caractérisation expérimentale à l'échelle microscopique ainsi que l'analyse microstructurale peuvent améliorer le modèle de prédiction des propriétés des polymères chargés par des particules métalliques.

Depuis quelques années, Big et al, Mottram et Taylor ainsi que d'autres auteurs, montrent les limites des modèles théoriques pour la prédiction de la conductivité thermique des composites[7-10]. Ces études sont basées sur la comparaison entre les valeurs de  $k_{eff}$  prédites par les modèles et celles mesurées expérimentalement. Pour composites à charges métalliques sphériques,

composites à charges sphériques non métalliques et Composites à charges métalliques de formes irrégulières:

➤ *Composites à charges métalliques sphériques*

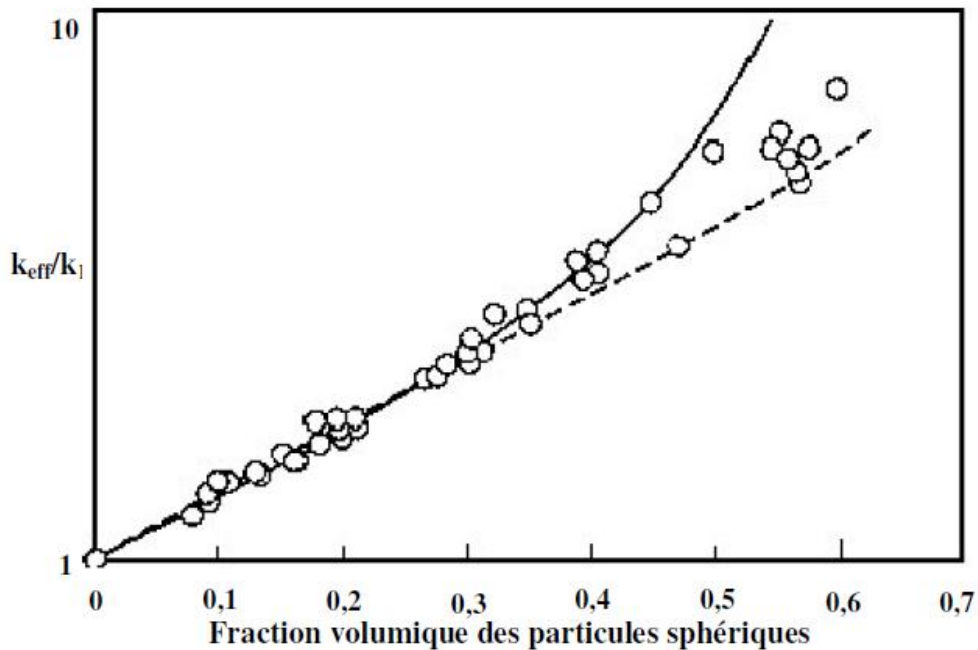
La **figure III-1** montre des valeurs expérimentales et théoriques données par le modèle de premier ordre pour la conductivité thermique d'un composite en fonction de la fraction volumique de particules sphériques[8, 11, 12]. On remarque clairement d'après cette figure que les valeurs données par le modèle de premier ordre ne sont pas en accord avec les mesures. Par contre la solution (les valeurs mesurées) se trouve entre les deux bornes (supérieure et inférieure). Ce désaccord est noté dans d'autres travaux et pour d'autres types de composites chargés avec des particules de très faible conductivité thermique [13].



**Figure III.1** : Valeurs expérimentale et théorique de la conductivité thermique effective donnée par le modèle de premier ordre en fonction de la fraction volumique de particules métalliques[8].

La **figure III-2** représente une comparaison des valeurs de la conductivité thermique effective entre les modèles du second ordre (Hatta et Taya et shtrikman) et celui de Nielsen à partir des valeurs qui proviennent de plusieurs travaux expérimentaux[8, 11, 12]. Les matériaux représentés dans cette étude sont des composites à matrice polymère chargés à l'aide de particules sphérique.

On remarque sur la **figure III-2** que tous les modèles sont en accord pour des concentrations inférieures à 0,3. Aucune variation entre le modèle de Nielsen et les autres n'est obtenue pour une fraction volumique inférieure à 0,36. Au-delà de cette concentration, les valeurs de la conductivité  $k_{eff}$  du composite prédites par Nielsen divergent des autres modèles ainsi que celles des mesures, et donnent des valeurs plus importantes. Il en résulte que le modèle de Nielsen surestime la valeur de  $k_{eff}$  du composite pour des concentrations proches de la valeur de  $\phi_{max} = 0.637$  et ceci pour le cas de particules sphériques. De ce fait, les auteurs de ce travail ont constaté que le modèle de Nielsen ainsi que les autres modèles de deuxième ordre donnent des résultats acceptables aux faibles concentrations en charges. D' autre part, pour les fortes et moyennes concentrations, la prédiction de la conductivité thermique du composite n'est pas totalement en accord avec les valeurs mesurées. Ce désaccord a été noté par Kumlutas et al pour des composites constitués de particules d' aluminium et d' une matrice de polyéthylène [9]

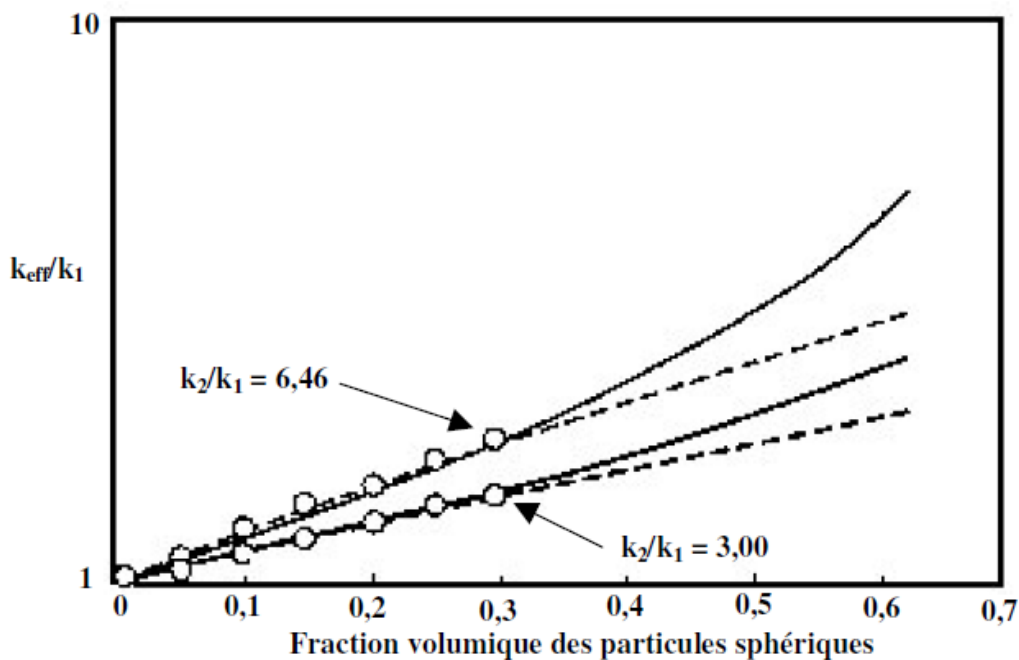


**Figure III-2:** Variation expérimentale et théorique de la conductivité thermique effective en fonction de la fraction volumique des particules sphériques[8].

Avec  $k_2/k_1 > 1000$ ; (—) Nielsen, (---) Hashin & Shtrikman et Hatta. & Taya

### ➤ Composites à charges sphériques non métalliques

La figure III-3 montre une variation du rapport ( $k_{eff}/k_1$ ) en fonction du rapport de conductivité des deux constituants ( $k_2/k_1$ )  $\ll 100$  pour un composite constitué de particules de verres sphériques. Dans le cas où la concentration en phase dispersée avoisine 30% (avant la formation d'un réseau de particules au sein de la matrice), le modèle de Nielsen est en parfait accord avec les autres modèles et avec les mesures expérimentales[8].



**Figure III-3:** Variation expérimentale et théorique de la conductivité thermique effective en fonction de la fraction volumique des particules sphérique [8].

Avec  $k_2/k_1 = 6,45$ ; (—) Nielsen, (---) Hashin & Shtrikman et Hatta. &Taya

Avec  $k_2/k_1 = 3,00$ ; (—) Nielsen, (---) Hashin & Shtrikman et Hatta. &Taya

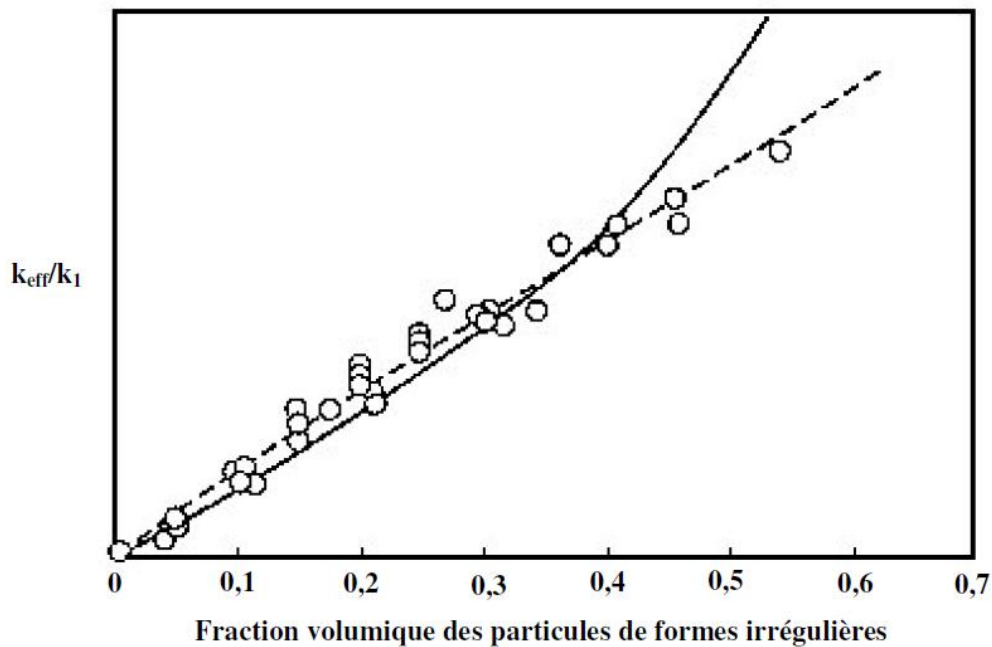
### ➤ Composites à charges métalliques de formes irrégulières

Des mesures expérimentales sont représentées dans la figure III.4[4], et illustrent le cas où les inclusions ne se présentent pas toutes sous forme sphérique. La variation de ( $k_{eff}/k_1$ ) en fonction de la fraction volumique des particules qui possèdent des formes irrégulières sont représentées

## Chapitre III Modélisation théorique de la conductivité thermique des composites

dans la **figure III-4** pour un rapport  $(k_1/k_2) \geq 100$ . Les mesures expérimentales sont comparées à des modèles de prédiction du deuxième ordre et aussi au modèle de Nielsen. Ce dernier, utilise dans ce cas une valeur de  $A = 2,5$  et une fraction volumique maximale  $\phi_{\max} = 0,637$ . Le coefficient de Hatta et Taya  $S_{ij} = 0,25$  ; tan dis que celui de Hashin et Shtrikman  $d = 4$ .

Les valeurs fournies par les modèles de Hatta et Hashin donnent des valeurs très proches de celles de Nielsen pour des concentrations allant jusqu' à 40% en particules. Ceci est satisfaisant selon Godovsky[8], car les prédictions sont en accord avec les mesures et cela pour une concentration qui n'a pas été observée dans le cas des dispersions sphériques. Pour une concentration d'inclusion supérieure à 40%, le modèle de Nielsen tend à surestimer la valeur de la conductivité  $k_{\text{eff}}$  du composite par comparaison aux autres modèles et aux mesures.

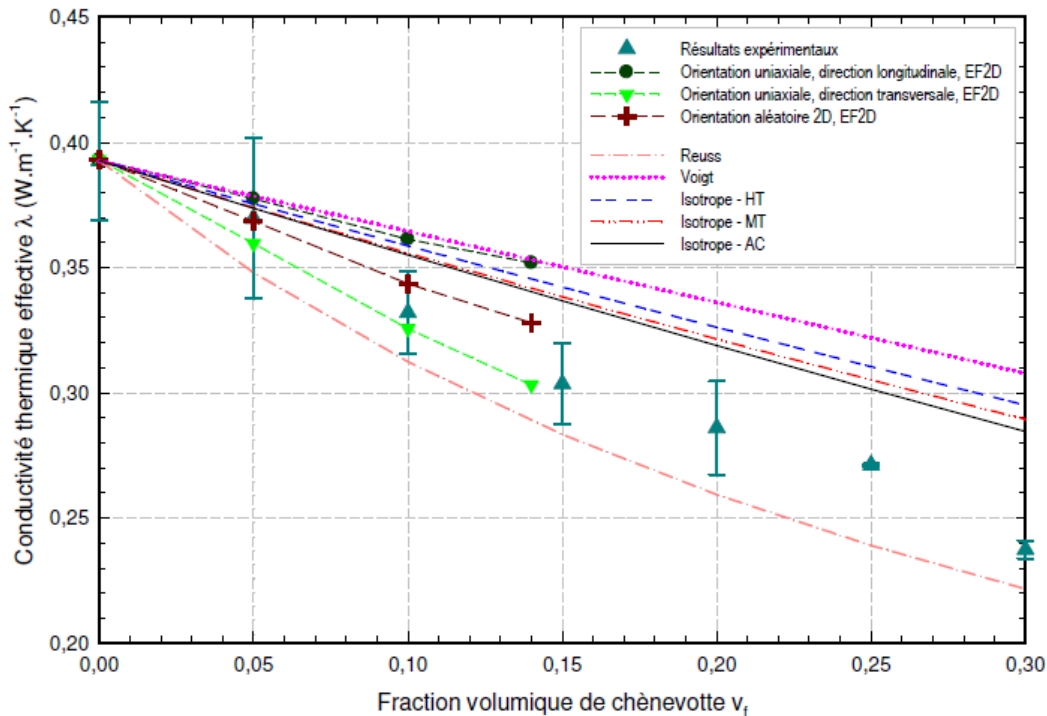


**Figure III-4:** Variation expérimentale et théorique de la conductivité thermique effective en fonction de la fraction volumique des particules de forme irrégulière [8]

Avec  $k_2/k_1 \geq 100$  ; (—) Nielsen, (---) Hashin & Shtrikman et Hatta.&Taya

Thanh Hung Pham et *al.*[15] ont appliqués les modèles Mori-Tanaka, auto-cohérente, de Halpin-Tsai, ainsi que les bornes de Voigt et Reuss pour des bétons de chanvre.

La Figure III-5 présente les résultats obtenus d'après leurs études. Ils ont observés que les données expérimentales sont bien comprises entre les bornes de Voigt et Reuss. Dans son ensemble, les méthodes d'homogénéisation surestiment les conductivités thermiques du béton de chanvre mesurées.



**Figure III.5.** Prédictions des conductivités thermiques du béton de chanvre en fonction de la fraction volumique de chanvre

Les différentes méthodes d'homogénéisation utilisées, Mori-Tanaka, auto cohérente et Halpin-Tsai, surestiment les valeurs de conductivité thermique du béton de chanvre. L'approche auto-cohérente avec une orientation isotrope des particules est la moins éloignée des mesures expérimentales.

Dilek Kılıç et al [16] ont étudié numériquement et expérimentalement la conductivité thermique d'un composite à matrice polymère (HDPE) chargée de sphères métalliques (Sn). L'étude numérique a été réalisée en utilisant la méthode des éléments finis sous le programme ANSYS. Dans ce même travail, les auteurs ont comparés les résultats obtenus avec les modèles de prédiction théoriques. Ils ont montré aussi que pour les faibles concentrations en charges

l'estimation numérique est en bon accord avec les résultats expérimentaux et avec les modèles théoriques (Figure III. 6).

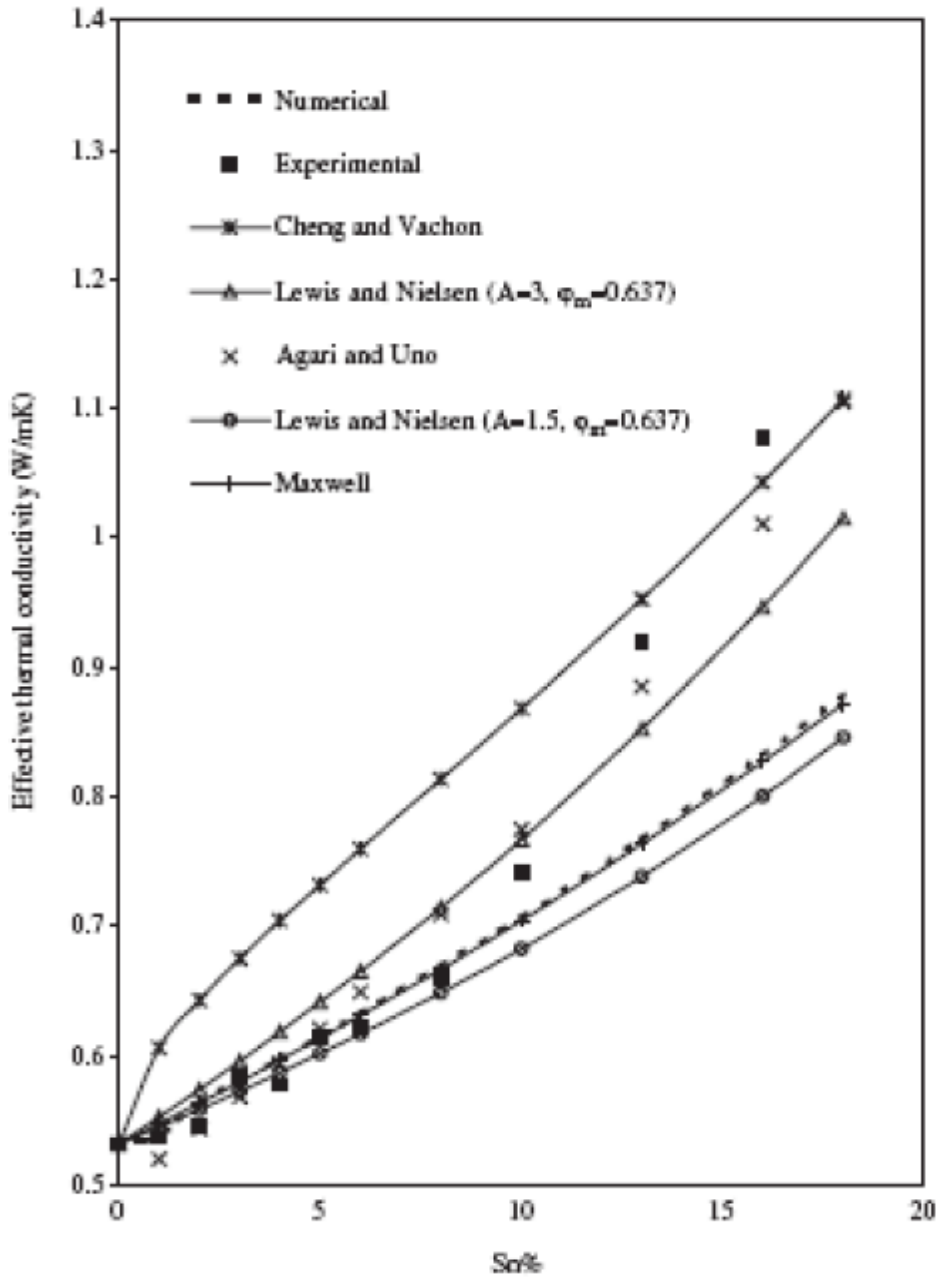
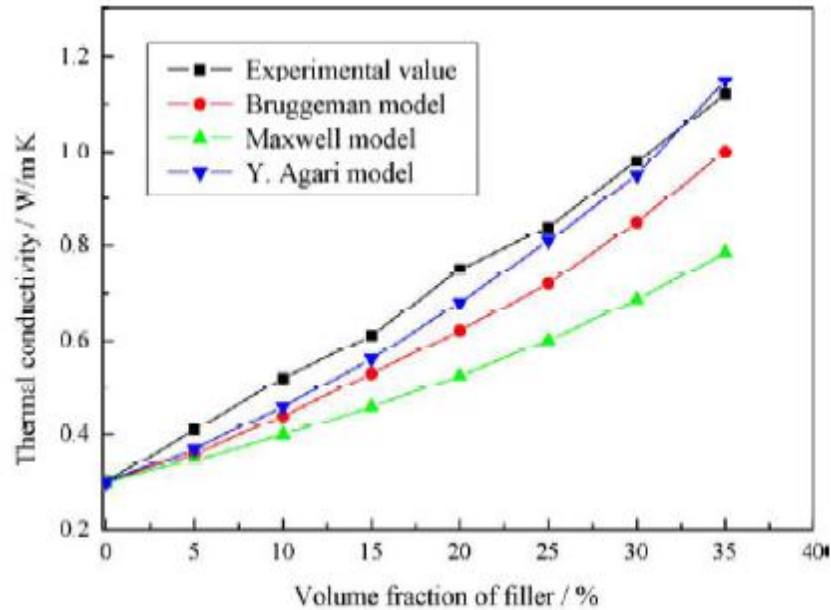


Figure III.6 : Comparaison des résultats numériques, expérimentaux et théoriques de la conductivité thermique[16]

Dans un autre travail, Weening Zhou *et al* [17] ont appliqués les modèles: Bruggeman, Maxwell, gari pour étudier le comportement de la conductivité thermique du composite Polyéthylène/BoronNitrure pour différentes concentration en charges. Les résultats sont présentés dans la **figure III.7**.



**Figure III-7** : Variation de la conductivité thermique en fonction de la concentration

[17]

Haddadi *et al.*[18] ont appliqués les modèles, Hata et Taya, Bruggeman, pour prédire la conductivité thermique de composites BaTiO<sub>3</sub> (1) et BaTiO<sub>3</sub> (2) en fonction de la concentration en charges. Ils ont comparés des valeurs expérimentales et numériques avec ces modèles. Les résultats obtenus avec la méthode des éléments finis sur Les **figures III.8-III.9**, elles présentent l'évolution de la conductivité thermique numérique, expérimentale et théorique.

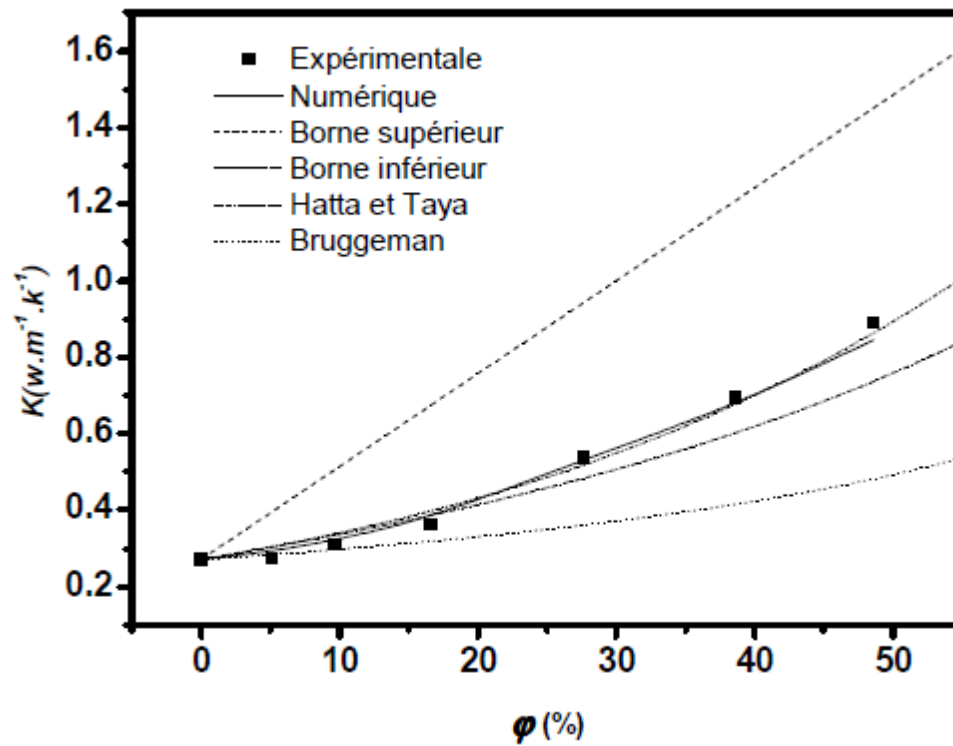


Figure III .8 : Comparaison de la conductivité thermique du composite BaTiO3(1) aux modèles théoriques et aux valeurs expérimentales[18]

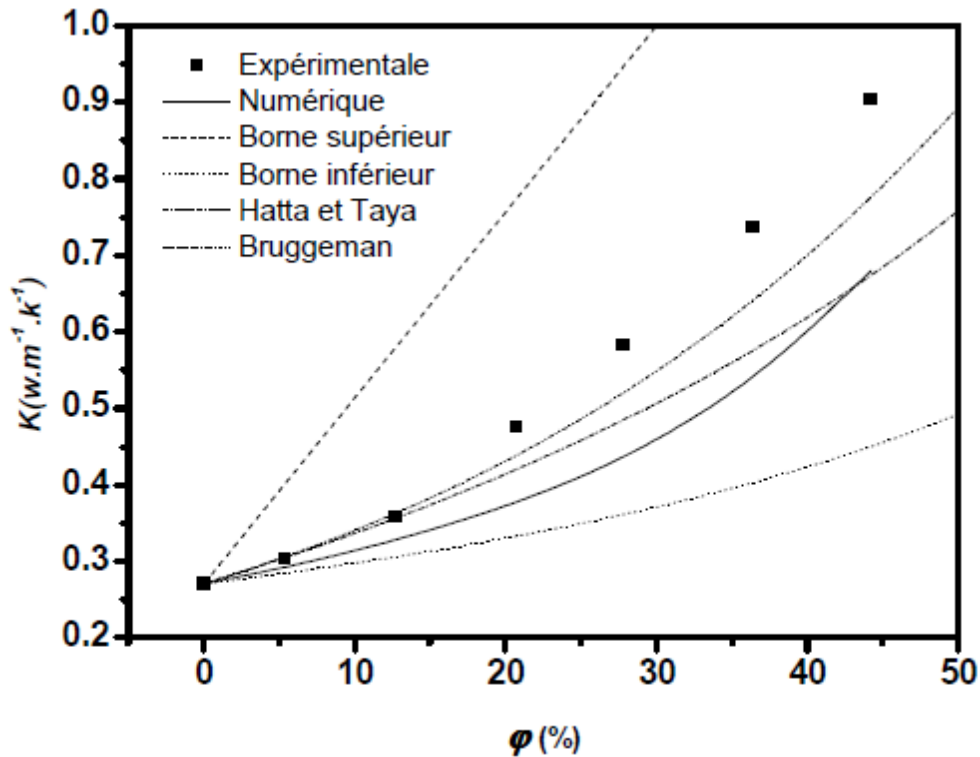


Figure III.9 : Comparaison de la conductivité thermique du composite  $BaTiO_3(2)$  aux modèles théoriques et aux valeurs expérimentales[18]

D'après ces figures, pour les faibles concentrations en charges ( $\phi < 10\%$ ) tous les modèles de prédiction ainsi que les valeurs numériques donnent une bonne estimation de la conductivité thermique pour tous les composites. Le modèle de Hata et Taya est en accord avec les résultats numériques pour les faibles concentrations en charges ( $\phi < 30\%$ ). Au-delà de cette dernière valeurs le modèle ne prédit pas correctement la conductivité thermique des composites. Par ailleurs, modèle de Bruggeman est le modèle qui donne la meilleure estimation de la conductivité thermique des composites par rapport aux autres prédictions données par les autres modèles théoriques. De plus les valeurs de la conductivité thermique obtenue par le modèle numérique développé pour cette étude sont en bon accord avec les valeurs expérimentales. Toutefois, ces valeurs numériques restent inférieur aux valeurs expérimentales, ceci est peut être due à la distribution des charges dans le composite.

Karkari et al[19] ont appliqués le modèle Lewis et Nielson pour prédire la conductivité thermique de composites pour trois modèles numériques (BCC, FCC, et SC),ils ont comparés des

valeurs expérimentales et numériques avec ces modèles. Il est constaté que les modèles analytiques prédisent les mêmes tendances et représente un relativement bon accord avec les résultats numériques. Cependant, un écart par rapport aux résultats numériques est observé lorsque le pourcentage d'inclusions est plus grand 40% et un meilleur accord est atteint avec  $f_{\max} = 74\%$ .

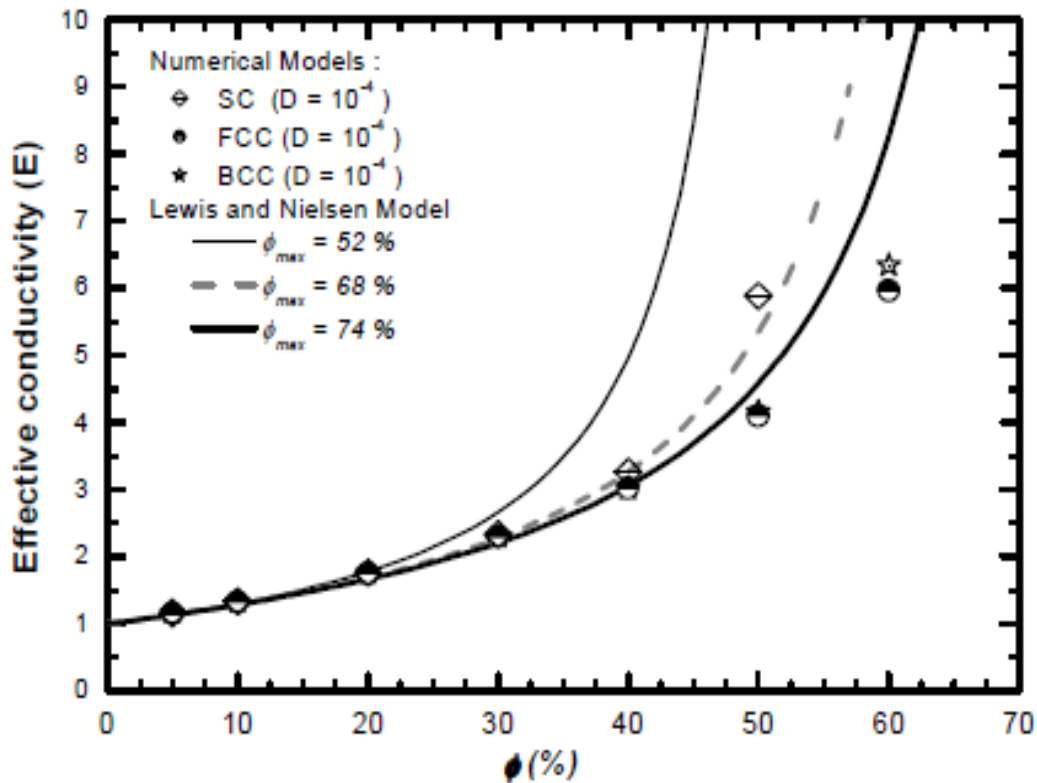


Figure III-13: Comparaison entre le modèle de Nielsen et le modèle numérique

Selon la littérature[20], plusieurs facteurs peuvent affecter la conductivité thermique des composites :

- La résistance thermique de contact entre la matrice et les inclusions;
- La taille et la forme des charges;
- L'orientation des fibres.

### III. Modélisation théorique de la conductivité thermique de composite mortier/bois de palmier dattier

Dans cette partie, nous avons appliqué quelques approches théoriques parmi les approches décrites précédemment pour déterminer la conductivité thermique de composite mortier/bois de palmier. Les résultats sont revus dans la **figure III.14**, elle présente les valeurs expérimentales de la conductivité thermique déterminée par N. Benmansour et al[22]. Nous avons comparés ces valeurs à plusieurs modèles de prédiction théorique.

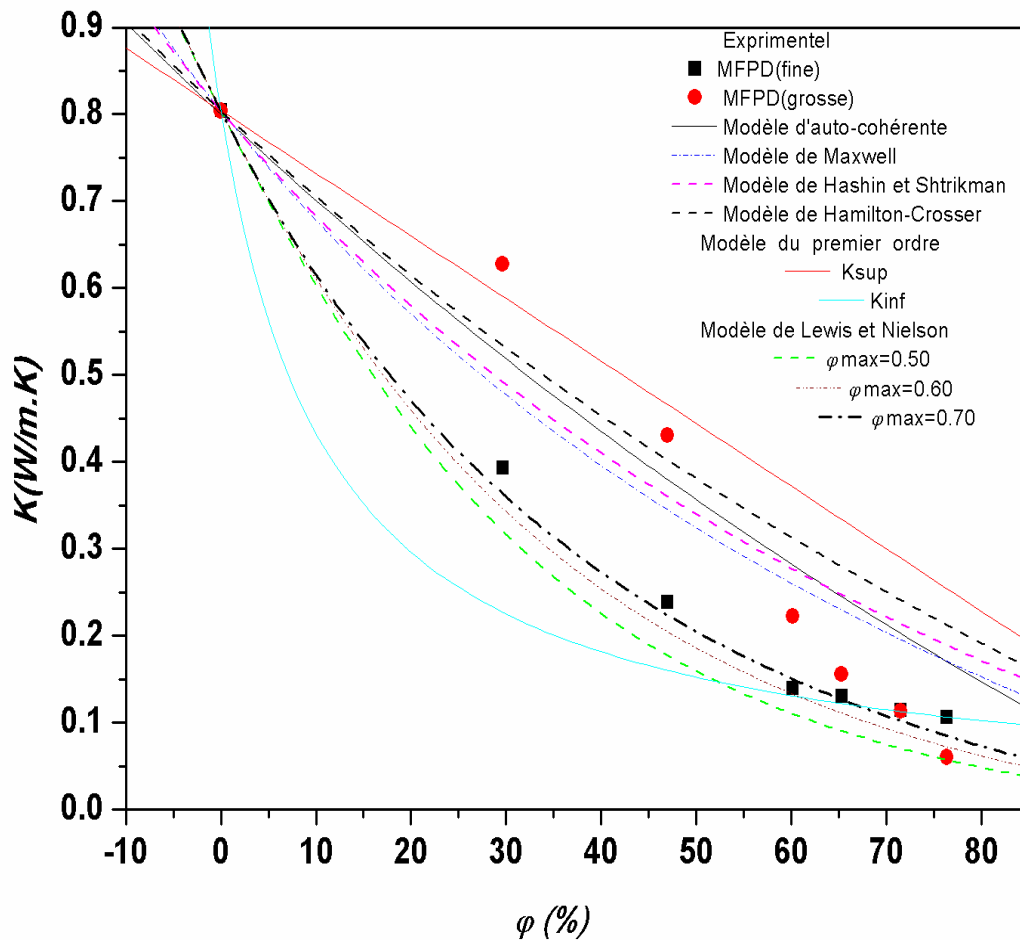


Figure III.14: Comparaison entre les résultats expérimentaux de la conductivité thermique et les modèles théoriques.

## **Chapitre III Modélisation théorique de la conductivité thermique des composites**

---

En comparant les résultats expérimentaux aux modèles théoriques. On remarque que le modèle de Lewis et Nielson est en bon régularité avec les valeurs expérimentales de la conductivité thermique de composite renforcé par les fibres fines, pour toutes les concentrations de fibres, à  $\varphi_{\max} = 0.75$ . En outre, il est en accord avec les valeurs expérimentales de composite à fibres grosses pour les concentrations supérieures à 50%. Il est clair que le modèle de Lewis et Nielson donne une bonne estimation de la conductivité thermique par rapport aux autres modèles théoriques.

Pour le modèle de premier ordre, il est observé que les valeurs expérimentales sont bien comprises entre les bornes  $k_{\text{sup}}$  et  $k_{\text{inf}}$ .

Par ailleurs, on observe que le modèle auto cohérente, modèle de Hashin et Shtrikman et modèle de Maxwell ne sont prédit pas bien les valeurs expérimentales du composite; il y a une grande différence entre les mesures expérimentale et les modèles.

En outre, on remarque que le modèle de Hamilton-Crosser est en accord avec les valeurs expérimentales de la conductivité thermique de composite à fibres grosses, pour la concertation 50%.

### **IV. Conclusion**

Dans cette étude, nous avons comparés les valeurs expérimentales de la conductivité thermique aux quelques modèles théoriques pour le composite mortier/bois de palmier dattier. Le modèle de Lewis et Nielson est le modèle qui estime le mieux les valeurs de la conductivité thermique. En revanche, ce modèle ne tient pas compte de la taille des charges. Enfin, aucun modèle théorique est complet pour prédire la conductivité thermique des composites avec précision.

### Références

- [1] R.C. Progelhof and R. R. Reusch, "Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: a review", 1976.
- [2] J.K. Carson, D.J. Tanner, and A. C. Cleland, "Predicting the effective thermal conductivity of unfrozen", porous foods, vol. 75.2006 ,
- [3] J. Wang, "A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials", vol. 49, pp. 3075-3083, 2006.
- [4] A. Boudenne, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère", Paris XII Val de Marne, 2003.
- [5] D. Kumlutas and I. H. Tavman, "A numerical and experimental study on thermal Conductivity of particle filled polymer composites", vol. 19, 2006.
- [6] B. Garnier, B; Agoudjil, and A. Boudenne, "Metallic particlefilled polymer micro composites", vol. 1, 2012.
- [7] J. T. Mottram and. R., "Thermal Transport Properties, International Encyclopaedia of Composite", vol. 5. New York, 1991.
- [8] Y. K. Godovsky and V. P. Privalko, "Thermal and electrical conductivity of polymer materials". springer-verlag : Berlin, 1995.
- [9] D. Kumlutas, I. H. Tavman, and. M, "Turhan /oban, *Compo. Sci. Technol*", vol. 63, 2003.
- [10] S. Torquato. "*Appl. Mech. Rev.*", vol. 44, 1991.
- [11] R. L. Hamilton and. O. K. Crosser, "*Ind. Engr. Chem. Fund*", 1962.
- [12] A. L. De Vera and. W. Streider. "*J. Phys. Chem*", 1977.
- [13] A. Boudenne and. S. Khaldi. "*J. Appl. Polym. Sci.*", 2003.
- [14] D. A and. G. Bruggeman., "*Ann., Phy*", vol. 24, 1935.
- [15] Thanh Hung Pham, Julien Férec, Vincent Picandet, Pierre, Tronet, Jean Costa, and P. Pilvin, "Etude expérimentale et numérique de la conductivité thermique d'un composite chaux–chanvre," pp. 8-9, 6 au 8 juin 2012.

- [16] D. Kumlutas and. I. H. Tavman., "A Numerical and Experimental Study on Thermal Conductivity of Particle Filled Polymer Composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials* ", vol. 19, pp. 441-455, 2006.
- [17] W. Zhou, S. Qi, Q. An, H. Zhao, and. N. Liu., "Thermal conductivity of boron nitride reinforced polyethylene composites ", 2007.
- [18] H. Manel, "Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère", 2010/2011, pp. 68-72.
- [19] M. Karkri1, "Effective thermal conductivity of composite: Numerical and experimental study", 2010.
- [20] A. Boudenne, L. Ibosa, M. Fois, J. C. Majeste, and a. E. Gehin., "Electrical and thermal behavior of polypropylene filled with copper particles ", *Composites: Part A*, 2005.
- [21] L. Huang and. L.-S. Liu. "Simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of food and agricultural materials using a transient plane-source method", *Journal of Food Engineering*", vol. 95, pp. 179–185, 2009.
- [22] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. G., A. Kareche, and A. Boudenneb, "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building", *Energy and Buildings*, 2014.

# *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

---

### **Conclusion générale**

Le travail réalisé dans ce mémoire a été consacré dans un premier temps à faire une synthèse bibliographique sur les matériaux composites. Ces derniers peuvent être classés en deux groupes essentiels; matériaux composites à matrice polymère et à matrice minéral. Ainsi, l'étude bibliographique présentée montre l'importance de la modélisation de la conductivité thermique des composites. La deuxième partie est une étude bibliographique sur les principaux modèles de prédictions de la conductivité thermique effective des matériaux composites. Plusieurs facteurs peuvent affecter la modélisation de la conductivité thermique des composites, comme la résistance de contact entre la matrice et les inclusions, la taille et la forme des charges, l'orientation des fibres, et la distribution des charges.

Enfin, on termine par une comparaison des valeurs expérimentales de la conductivité thermique aux quelques modèles théoriques pour le composite mortier/bois de palmier dattier.

Cette comparaison nous a permis de conclure que le modèle de Lewis et Nielson donne une bonne estimation de la conductivité thermique par rapport aux autres modèles théoriques.

En effet, aucun modèle théorique ne permet la prédiction de la conductivité thermique des matériaux hétérogènes avec précision, ce qui rend la modélisation numérique un moyen indispensable pour valider les modèles théoriques.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Résumé

L'objectif principal de ce travail consiste à présenter une étude bibliographique sur les composites, les différents modèles théoriques, et de l'estimation de la conductivité thermique de matériau composite mortier/fibres de palmier dattier.

Ce mémoire porte donc sur l'étude théorique incluant deux étapes ;les Modèles de prédiction de la conductivité thermique effective. Ainsi que, dans cette étude, nous présentons plusieurs modèles. En outre, une modélisation théorique de la conductivité thermique de composite mortier/fibres de palmier dattier a été réalisée. Les résultats obtenus montrent que le modèle de Lewis et Nielson est le modèle qui estime mieux les valeurs de la conductivité thermique.

**Mots-clés:** Composites, mortier, fibres de palmier dattier, modèles théoriques, conductivité thermique.

## Abstract:

The main objective of this work is to present a bibliographic study on composites, different theoretical models, and estimation of the thermal conductivity of composite mortar / date palm fibers.

This paper therefore deals with the theoretical study including two stages; the models of prediction of the effective thermal conductivity. Thus, in this study we present several models. In addition, theoretical modeling of the thermal conductivity of composite mortar / fibers of date palm was carried out. The results obtained show that the model of Lewis and Nielson is the model that best estimates the values of thermal conductivity.

**Keywords:** Composites, mortar, date palm fibers, theoretical models, thermal conductivity.

## ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تقديم دراسة ببليوغرافية على المركبة، ومختلف النماذج النظرية، وتقدير التوصيل الحراري من ألياف النخيل هاون / تاريخ مركب. لذا يركز هذا الموجز على الدراسة النظرية من بينهم اثنان من مراحل، ونماذج التنبؤ التوصيل الحراري الفعال. و هكذا، في هذه الدراسة، فإننا نقدم العديد من النماذج. وعلاوة على ذلك، تم إجراء النمذجة النظرية من التوصيل الحراري بها للهاون مركب / ألياف النخيل. وأظهرت النتائج أن نموذج لويس ونيلسون هو النموذج الأفضل أن تقديرات قيم التوصيل الحراري

**كلمات البحث:** المركبات ومدافع الهاون، وتاريخ ألياف النخيل، والنماذج النظرية، والتوصيل الحراري .