

THESE

Présentée à l'Université Hadj Lakhdar de Batna
Département des sciences de la matière
Faculté des sciences
Laboratoire de Physique Energétique Appliquée (LPEA)
En vue de l'obtention du titre de

Thèse de Doctorat LMD

Spécialité: Physique Energétique

Option : Energie et Développement Durable

Par

Manel HADDADI

**PROPRIETES DE TRANSPORT DES MATERIAUX HETEROGENES A
RENFORT NATUREL: APPROCHE EXPERIMENTAL ET
MODELISATION NUMERIQUE**

Soutenu le 27/09/2015

devant les membres de jury :

A. Soudani	PR	Université de Batna	Président
B. Agoudjil	PR	Université de Batna	Rapporteur
A. Boudenne	MC. HDR	Université de Paris-Est France	Co-rapporteur
H. Satha	PR	Université de Guelma	Examineur
B. Adouane	PR	Université de Batna	Examineur

Université Hadj Lakhdar Batna, 1, rue Boukhrouf Med El Hadi, 05000 Batna, Algérie.

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé au sein du laboratoire de physique énergétique appliquée à l'Université El-Hadj Lakhdar de Batna. Je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'achèvement de cette thèse.

Je tiens à remercier en premier lieu le professeur Boudjemaa AGOUDJIL de m'avoir accueilli dans son laboratoire, outre sa disponibilité et sa patience, j'ai beaucoup apprécié son sens de l'analyse, sa vision très large et approfondie sur le projet, ainsi que les membres de son groupe de recherche pour leur aide et leur collaboration.

Je tiens aussi à remercier mon co-directeur, Abderrahim BOUDENNE pour avoir accepté de codiriger le projet. Sa disponibilité, ses compétences scientifiques ont été précieuses pour mener à terme cette étude.

Mes remerciements vont également à Monsieur Bertrand GARNIER, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et dont les remarques et les suggestions m'ont permis d'améliorer le présent manuscrit.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Abdelkader GHERABLI, pour son aide précieux.

Je tiens aussi à remercier le Pr. Azzedine Soudani qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse et aussi le Pr. Hamid Satha et le Pr. Belkacem Adouane, d'avoir accepté de participer au jury, pour leur lecture critique et éclairante sur le sujet et de m'avoir suggéré de nombreux conseils.

J'adresse mes remerciements à mes collègues qui m'ont offert leur soutien tout au long de cette période.

Enfin, j'exprime mes profonds remerciements à mes parents, à mon mari et à toute ma famille.

A mon adorable petite fille

Melina....

Sommaire

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites à matrice polymère/fibres naturelles	
I. Introduction.....	9
II. Fibres naturelles.....	10
II.1 Structure des fibres naturelles.....	10
II.2 Composition chimique des fibres naturelles.....	12
II.2.1 Cellulose	12
II.2.2 Hémicellulose	12
II.2.3 Lignine	13
II.3 Propriétés du bois.....	14
II.4 Avantage et inconvénient des fibres naturelles.....	15
II.5 Traitement chimique des fibres naturelles.....	16
II.5.1 Traitement alcalin	16
II.5.2 Traitement au silane	17
II.5.3 Benzoylation.....	17
II.6 Conductivité thermique du bois.....	18
II.7 Bois de palmier dattier.....	19
II.7.1 Morphologie des fibres de palmier dattier	20
II.7.2 Propriétés thermophysiques des fibres de palmier dattier	21
III. Polymères.....	22
III.1 Polymères thermodurcissable.....	22
III.2 Polymères thermoplastique.....	23
IV. Matériaux composites.....	24
IV.1 Composite à matrice polymère/fibres naturelles.....	25
IV.2 Procédés de fabrication des composites.....	26
IV.2.1 Matrice thermodurcissable/fibre naturelle	26
IV.2.2 Matrice thermoplastique/fibre naturelle	26
IV.3 Domaine d'utilisation des composites bois/polymère.....	27
V. Synthèse bibliographique des travaux réalisés sur les composites renforcés par des fibres naturelles.....	27

VI. Modèles de prédiction de la conductivité thermique des composites.....	33
VI.1 Modèle de Maxwell.....	34
VI.2 Modèle de Hashin et Shtrikman.....	34
VI.3 Modèle de Hata et Taya.....	35
VI.4 Modèle de Hasselman.....	36
VII. Conclusion.....	37
VIII. Références.....	38

**Chapitre II : Procédé de mise en forme et technique de caractérisation thermophysiques
des composites polymère/fibre naturelle**

I. Introduction.....	45
II. Matériaux utilisés.....	45
II.1 Résine.....	45
II.2 Fibres de bois de palmier dattier.....	45
III. Broyage mécanique.....	46
IV. Analyse granulométrique.....	47
V. Préparation des composites.....	49
V.1 Calcul des masses des composants.....	49
V.2 Mise en œuvre des échantillons.....	50
VI. Méthode expérimentale.....	51
VI.1 Analyse morphologique.....	51
VI.2 Absorption d'eau.....	52
VI.3 Méthode de mesure de la conductivité thermique.....	53
VI.3.1 Dispositif expérimental pour la mesure de la conductivité thermique	55
VI.3.1.1 Principe de la mesure	56
VI.3.1.2 Le dispositif expérimental	56
VII. Conclusion.....	59
VIII. Références.....	60

Chapitre III : Etude expérimentale du comportement de polymère thermodurcissable renforcé de fibres naturelles

I. Introduction.....	62
II. Analyse morphologique.....	62
III. Absorption d'eau.....	65
IV. Propriétés thermophysiques.....	69
IV.1 Conductivité thermique.....	69
IV.2 Comparaison entre les résultats expérimentales et les modèles théorique.....	72
IV.3 Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique.....	75
V. Performances thermiques du composite CB/FPB	77
V.1. Caractéristiques des isolants	77
V.1.1 Conductivité thermique	78
V.1.2 Résistance thermique	78
V.1.3 Coefficient de transmission thermique	79
V.2. Résistance thermique du composites CB/FPB	79
V.3 Coefficient de transmission thermique du composite CB/FPB.....	82
V.4 Coefficient de transmission d'une paroi en forme de pente	83
VI. Conclusion.....	87
VII. Références.....	89

Chapitre IV: Méthode numérique de détermination de la conductivité thermique des composites à matrice polymère

I. Introduction.....	93
II. Modélisation des composites à base de fibres.....	93
III. Etude de l'effet de la dispersion de taille sur la conductivité thermique.....	97
IV. Conductivité thermique de composites chargés de sphères creuses.....	101
V. Conclusion.....	106
VI. Références.....	107

Chapitre V: Etude numérique du comportement de la conductivité thermique des matériaux composites

I. Introduction.....	109
II. Propriétés thermophysiques.....	109
II.1 Conductivité thermique.....	109
II.2 Effet de la résistance de contact.....	114
III. Influence du diamètre des fibres et du paramètre alpha.....	115
IV. Effet des niveaux de taille.....	117
V. Conductivité thermique effective de composites chargés de sphères creuses.....	119
V.1 Influence de l'épaisseur de la paroi.....	119
V.2 Influence de la résistance de contact.....	121
V.3 Influence du rapport de conductivité.....	123
V.4 Comparaison avec les modèles de prédictions théoriques.....	124
VI. Conclusion.....	127
VII. Références.....	128
Conclusions	130

Introduction

Introduction

La part importante de la consommation d'énergie pour le chauffage ou la climatisation des bâtiments a mené des chercheurs à se pencher sur le problème des échanges de chaleur entre les locaux et l'environnement. Ce problème très vaste et complexe dépend de plusieurs paramètres tels que [1]:

- La nature des matériaux de construction,
- La forme des bâtiments qui influe sur l'interception de l'énergie solaire,
- L'environnement climatique dans lequel se trouve le bâtiment,
- L'interaction bâtiment sol.

Dans de nombreux pays, la courbe de consommation d'énergie continue d'augmenter. La diminution de gaz brûlés, de suie et de poussière par des économies d'énergie correspond à une contribution directe à la protection de l'environnement, et l'isolation thermique est un facteur déterminant à cet égard. L'isolation thermique des parois, sols et plafonds est aussi une constituante de la qualité de vie. Un climat ambiant sain et confortable n'est toute fois possible que dans des locaux où la température et l'humidité de l'air ne varient que dans les limites acceptables. Dans ce cas l'isolation thermique permet en l'occurrence de créer un climat ambiant confortable [1].

Une grande partie des déperditions de chaleur s'effectue par les murs. Les matériaux isolants ralentissent le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment. La qualité de l'isolation à prévoir dépend du climat, de l'exposition des murs et aussi des matériaux employés pour la construction. Le choix d'un matériau utilisé comme isolant dépend naturellement de sa disponibilité et de son cout [1].

En raison de leur résistance élevée et leur module spécifique, les composites à matrice polymère sont devenus populaires pour une variété d'applications.

Traditionnellement, les matériaux composites se sont appuyés sur l'utilisation des fibres artificielles comme renfort. Le recyclage ou la réutilisation de ces composites n'est souvent pas facile à réaliser en raison de la nature des différents matériaux constituant le composite [2].

Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles représentent l'un des secteurs les plus dynamiques aujourd'hui. Les fibres naturelles ont divers avantages comme: faible cout,

faible densité, haute ténacité, résistance spécifique acceptable, facilité de séparation et la biodégradabilité par rapport à des fibres classiques comme les fibres de verre ou de carbone [3, 4]. La prise de conscience de l'environnement a également augmenté l'utilisation des fibres naturelles comme renfort. Ces matériaux sont plus compatibles avec l'environnement par rapport aux autres renforts [5]. La combinaison de tous ces résultats a incité un certain nombre de secteurs industriels, notamment l'industrie automobile, de considérer les fibres naturelles comme alternative aux fibres de verre dans divers produits [6].

L'utilisation des fibres naturelles présentent de nombreux avantages. Par exemple, ils sont issus d'une ressource renouvelable, ils nécessitent peu d'énergie dans leur fabrication, et ils peuvent facilement être éliminés à la fin de leur cycle de vie par compostage ou par récupération de leur pouvoir calorifique. Cependant, les fibres naturelles présentent également certaines caractéristiques indésirables, absorption d'humidité élevée, une faible résistance thermique et des propriétés fortement anisotropes [2].

Les fibres naturelles sont hydrophiles car elles sont composées de lignocellulose, qui contient des groupes hydroxyles. Ces fibres sont donc incompatibles avec les thermoplastiques hydrophobes, tels que les polyoléfines et ont une faible résistance à l'humidité. Ces deux facteurs caractéristiques sont des points faibles pour l'utilisation des fibres végétales comme renfort de polymère. Il est alors nécessaire de les améliorer de façon à ne pas pénaliser leurs propriétés. Un autre facteur important pour l'obtention de bonnes propriétés est la dispersion des fibres. Une mauvaise dispersion des fibres dans le matériau conduit à la formation d'amas de fibres ayant un potentiel de renforcement plus faible qu'une fibre seule [7].

Les matériaux composites à matrice polymère renforcée de fibres naturelles sont considérés comme un candidat prometteur de substitution aux composites classiques. Les propriétés thermiques de ces biomatériaux sont en général beaucoup plus faibles que celles des métaux ou de composites à fibre de carbone. Par conséquent, il est plus difficile de dissiper la chaleur qui peut être un facteur majeur dans certaines situations. L'interaction de l'énergie thermique avec des atomes qui constituent un matériau détermine certaines propriétés physiques les plus importantes de la matière. Les propriétés décrivant cette interaction au niveau le plus fondamentale sont souvent appelées propriétés thermophysiques incluant en majeure partie la capacité thermique, la diffusivité et la conductivité thermique. Une caractérisation thermique complète des matériaux nécessite en partie la détermination de la conductivité thermique [8, 9].

La modélisation de la conductivité thermique des matériaux composites peut être nécessaire pour le contrôle du processus de fabrication, de même que pour de nombreuses applications de transfert de chaleur. Plusieurs modèles théoriques, empiriques et semi-empiriques ont été indiqués dans la littérature pour décrire les propriétés thermiques des matériaux composites [10-12]. Proglof *et al* [13], Carson *et al* [11] et Bigg [14] ont fourni une synthèse sur les méthodes théoriques les plus pertinentes. En outre, la plupart des modèles théoriques ne permettent pas une estimation correcte de la conductivité thermique des composites pour les fortes concentrations volumiques du renfort [15].

La modélisation numérique de la conductivité thermique constitue une autre façon pour étudier ces systèmes complexes. Dans de nombreux cas, les systèmes physiques n'admettent pas une solution analytique. Ainsi, la modélisation numérique peut être un outil utile dans cette situation. Les techniques numériques tels que la méthode des éléments finis semble être un moyen intéressant pour étudier la conductivité thermique des composites en fonction de la géométrie, la concentration du renfort, la taille et la distribution des charges.

Ce travail de thèse est avant tous, une étude exploratoire qui s'inscrit dans le cadre d'un projet global intitulé *Matériaux et Thermique de l'Habitat (MTH)*. Il vise la conception et le développement de nouveaux matériaux composites principalement adaptés à l'isolation thermique dans différents secteurs, notamment dans le domaine lié aux bâtiments durables de demain. Les matériaux naturels visés sont renouvelables et abondants en Algérie. Il s'agit du bois de palmier dattier comme renfort et de plusieurs matrices potentielles comme le ciment, le gypse, la bentonite, la kaolinite et la dolomite ainsi que quelques polymères. La matrice utilisée dans cette thèse est une colle blanche vinylique.

Dans ce contexte, ce travail s'articule autour de cinq chapitres:

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres naturelles et la connaissance de la structure et de la composition chimique des fibres. Nous présentons aussi dans ce chapitre les différentes techniques de fabrication des composites. Nous présentons également les différents modèles de prédictions de la conductivité thermique des composites.

Le second chapitre présente la démarche expérimentale utilisée pour l'élaboration et la caractérisation thermophysique des matériaux composites. On présente par la suite la méthode suivie pour l'obtention des fibres de bois de palmier dattier.

L'objectif du troisième chapitre est l'étude du comportement thermophysique du composite polymère/fibres de bois de palmier dattier et l'étude des performances thermiques du composite CB/FPB. Une étude de la résistance thermique de ces composites en fonction de l'épaisseur des échantillons sera présentée. Nous présentons aussi dans ce chapitre la variation du coefficient de transmission thermique du composite CB/FPB en fonction de l'épaisseur des échantillons.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation de l'approche numérique utilisée pour la détermination de la conductivité thermique en utilisant le logiciel COMSOL.

Le dernier chapitre porte sur une présentation des résultats obtenus par simulation numérique. Une étude comparative entre les résultats numériques, expérimentaux et théorique sera aussi présentée. Nous présentons aussi dans ce chapitre l'influence de la résistance de contact sur la conductivité thermique des composites.

Références

- [1] P. Meukam, "Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment," Université Cergy Pontoise, 2004.
- [2] A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi, and A. Hammami, "Date Palm Fibers as Polymeric Matrix Reinforcement: Fiber Characterization," *Polymer Composites*, pp. 486-497, 2005.
- [3] A. K. Mohanty, M. Misra, and G. Hinrichsen, "Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview," *Macromol. Mater. Eng.*, pp. 1-24, 2000.
- [4] A. Terenzi, M. J. Kenny, and S. E. Barbosa, "Natural Fiber suspensions in thermoplastic polymers. 1. Analysis of fiber damage during processing," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 103, pp. 2501-2506, 2007.
- [5] J. George, M. S. Sreekala, and S. Thomas, "A review on interface modifications and characterization of natural fiber reinforced plastic composites," *Polymer Engineering and Science*, vol. 41, pp. 1471-1485, 2001.
- [6] S. S. Nair, S. Wang, and D. Hurley, "Evaluation of Interphase Properties in Fiber Reinforced Polymer Composite Using Contact Resonance Force Microscopy," *Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology*, pp. 1-9, 2008.
- [7] D. T. V. Vi, "Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non," Université de Grenoble, 2011.
- [8] R. Mangal, N. S. Saxena, M. S. Sreekala, S. Thomas, and K. Singh, "Thermal properties of pineapple leaf fiber reinforced composites," *Materials Science and Engineering*, vol. A339, pp. 281-285, 2003.
- [9] X. Li, L. G. Tabil, I. N. Oguocha, and S. Panigrahi, "Thermal diffusivity, thermal conductivity, and specific heat of flax fiber–HDPE biocomposites at processing temperatures," *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 1753–1758, 2008.
- [10] M. Chikhi, B. Agoudjil, M. Haddadi, and A. Boudenne, "Numerical modelling of the effective thermal conductivity of heterogeneous materials," *J Thermop Compos Mater*, vol. 26, pp. 336-345, 2011.
- [11] J. K. Carson, S. J. Lovatt, D. J. Tanner, and A. C. Cleland, "Predicting the effective thermal conductivity of unfrozen, porous foods," *J. Food Eng.*, vol. 75, pp. 297-307, 2006.

- [12] R. Pal, "On the Lewis-Nielsen model for thermal/electrical conductivity of composites," *Compos Appl Sci Manuf*, vol. 39, pp. 718-726, 2008.
- [13] R. C. Progelhof, J. L. Throne, and R. R. Reusch, "Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: a review," *Polym Eng Sci*, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [14] D. Bigg, "Thermal conductivity of heterophase polymer compositions in thermal and electrical conductivity of polymer materials," *Adv Polym Sci*, vol. 119, pp. 1-30, 1995.
- [15] J. Wang, "A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials," *Int J Heat Mass Tran*, vol. 49, pp. 3075-3083, 2006.

Chapitre I: Généralités sur les matériaux composites à matrice polymère/fibres naturelles

I. Introduction

Ce chapitre présente une description des matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres naturelles. La connaissance de la structure et de la composition chimique de chaque constituant est nécessaire pour l'étude des interactions entre les fibres et la matrice. Dans cette étude, nous présentons une description des fibres naturelles, leurs compositions chimiques et les propriétés du bois. Nous présentons aussi une description des différentes méthodes de modification de surface du renfort fibreux et la conductivité thermique du bois. Par ailleurs, une présentation de la morphologie des fibres de bois de palmier dattier et des propriétés thermophysiques sera effectuée. On s'intéresse aussi dans cette étude bibliographique à la présentation des matériaux composites à fibres naturelles. Les différentes techniques de fabrication seront ensuite explicitées et mises en relation avec les types de matériaux utilisés. Une présentation des modèles de prédiction de la conductivité thermique sera effectuée.

L'utilisation des ressources renouvelables (ressources provenant de la biomasse) dans les matériaux composites devient de plus en plus fréquente de nos jours. Les marchés sont de plus en plus axés vers une demande en produits plus respectueux de l'environnement. Pour y répondre, des recherches sont menées dans de nombreux laboratoires à l'échelle internationale. Des matériaux nommés souvent éco-matériaux, biocomposites, matériaux éco-conçus, etc. ont ainsi vu le jour.

Les marchés actuels et les prévisions laissent à penser que l'importance économique des matériaux composites sera en augmentation constante dans les années qui viennent. Une grande diversité de matériaux est concernée, depuis les produits composites dits «de grande diffusion» jusqu'aux composants aérospatiaux à hautes performances mécaniques et thermomécaniques [1].

Le secteur du bâtiment est un grand consommateur de ressources (matériaux et énergie), très polluant (émission de CO₂) et un générateur de résidus. Par conséquent, les nouvelles approches de l'efficacité énergétique ont des objectifs à réaliser une faible consommation d'énergie et appliquer des matériaux de construction naturels et locaux. Au cours des dernières années, plusieurs axes de recherche ont été initiés vers la substitution des matériaux synthétiques tels que le verre par des matériaux naturels en raison de leur biodégradabilité et leur faible coût [2-4].

II. Fibres naturelles

Les ressources renouvelables issues des produits agricoles ou forestiers constituent une base pour les nouveaux produits industriels. Les fibres végétales sont utilisées dans de nombreuses applications comme: les textiles, les cordes, matériaux isolants et comme renfort pour les polymères.

Les fibres lignocellulosiques présentent plusieurs avantages par rapport aux fibres synthétiques. Les recherches consacrées à l'étude des matériaux composites à base de fibres naturelles ont augmenté aussi bien au niveau industriel qu'au niveau académique [5].

Cependant, comparées aux fibres artificielles, la distinction des fibres naturelles pose un problème pour les applications industrielles. Parmi les sources de fibres naturelles, très peu de travaux ont été réalisés sur les fibres de palmier dattier [6].

Les fibres naturelles sont de compositions biologiques particulièrement composées de cellulose, hémicellulose et de lignine. Dans une proportion beaucoup plus faible elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques. Les fibres dures forment un groupe à part entière qui représente 90% de la production mondiale. Ce sont ces fibres dures ou rigides qui sont utilisées lors de la préparation des composites [7].

II.1 Structures des fibres naturelles

Une fibre comporte les parties suivantes (figure I.1)

- La lamelle mitoyenne M d'épaisseur de 0.5 à 2 μm en périmètre qui est commune aux cellules voisines. Elle est composée essentiellement de lignine (70%) associée à d'autres composés organiques tels que les hémicelluloses, la pectine, la cellulose. La lamelle mitoyenne soude les fibres les unes aux autres et leur confère une grande rigidité grâce à la présence de la lignine.
- La paroi primaire P, très mince (0.03 à 0.1 μm) est souvent associée avec la lamelle mitoyenne. Elle est constituée d'une structure fibrillaire recouverte par un mélange de lignine, de pectine et d'hémicellulose.
- La paroi secondaire, principale partie de la fibre qui comprend trois parties différentes :
 - La paroi externe S1 mince (0.1 à 0.2 μm) dans laquelle les fibrilles sont enroulées en hélices parallèles, de sens opposés (une couche dans un sens, l'autre couche croisée).

- La paroi centrale S2, beaucoup plus épaisse (0.5 à 8 μm). Les fibrilles sont disposées en hélices parallèles, la rigidité de la fibre dépend de l'épaisseur de cette paroi.
- La paroi interne S3 (appelée paroi tertiaire) mince (0.04 à 0.1 μm), voisine du lumen W. Entre les fibres, il existe des espaces qui sont partiellement composés de lignine et d'hémicellulose[8].

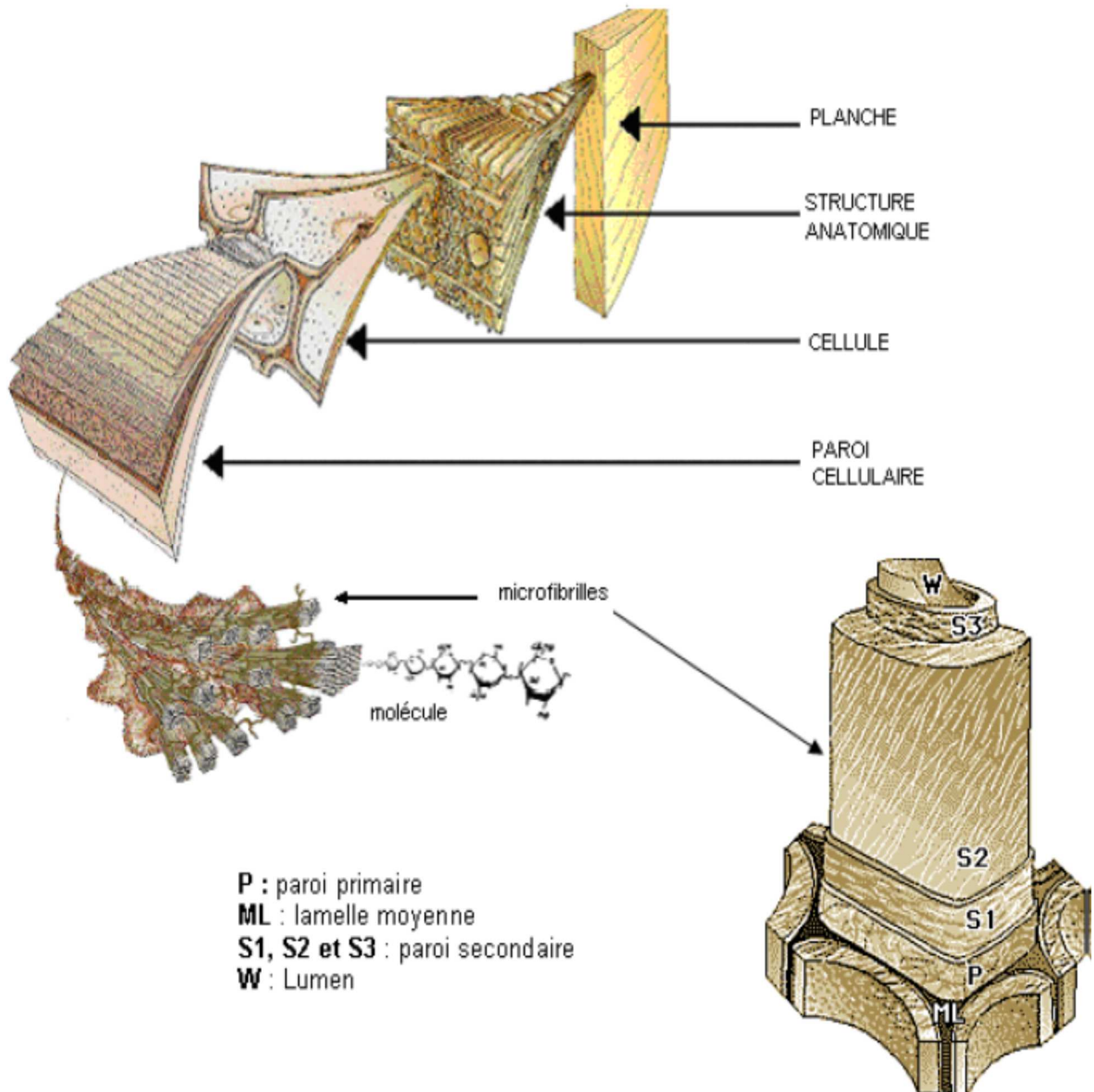


Figure I.1: Structure des fibres naturelles [8]

II.2 Composition chimique des fibres naturelles

La composition chimique des fibres naturelles change en fonction du type des fibres. Elles contiennent de la cellulose, l'hémicellulose, la pectine et la lignine. Les propriétés de chaque composant contribuent aux propriétés globales de la fibre. Par exemple, l'hémicellulose est responsable de la biodégradation, l'absorption d'humidité et la dégradation thermique des fibres. En générale, les fibres comportent de 60% à 80% de cellulose, de 5 à 20% de lignine et jusqu'à 20% d'humidité [9].

II.2.1 Cellulose

La cellulose, essentielle constituant des végétaux, est un homo-polysaccharide linéaire formé d'unités β -D-glycopyranose liées par des liaisons β (1-4) (Figure I.2)

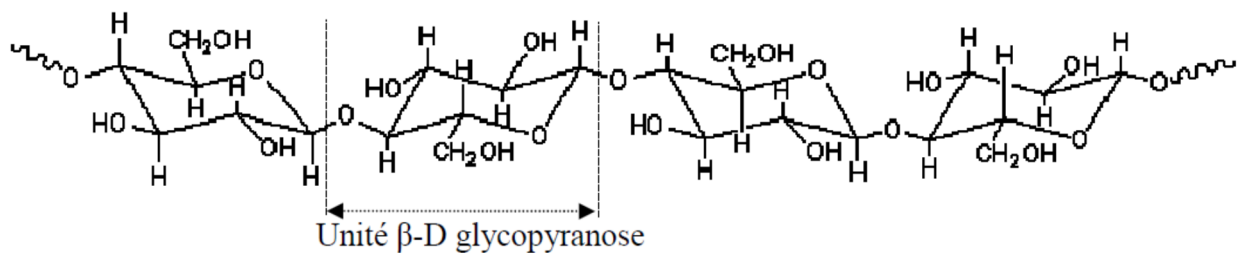


Figure I.2 : Structure de la cellulose [10]

Dans la paroi cellulaire, les grandes chaînes de cellulose forment par des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires des micros fibrilles partiellement cristallisées. La cellulose est insoluble dans l'eau mais elle peut être hydrolysée en milieu acide. La cellulose est également dégradable en milieu basique [10].

II.2.2 Hémicellulose

Les hémicelluloses sont des polysaccharides qui se trouvent dans tous les végétaux, déterminés par des masses moléculaires plus faibles que celles de la cellulose et par des agencements moins réguliers à la fois par la présence de différentes unités dans leurs chaînes. Le principal composant des hémicelluloses de feuillus est un copolymère constitué d'une chaîne linéaire d'unité xylose reliée entre elles par les liaisons β (1-4) et possédant une unité d'acide β -glucuronique en chaîne latérale, en moyenne toutes les dix unités xylose. Les deux composants sont partiellement acétylés. Leur degré de polymérisation moyen est de l'ordre de

100 à 200 et est caractérisé par une très large distribution. Les feuillus contiennent aussi des glucomannanes formés d'unités glucose et mannose dans un rapport de l'ordre de 1 à 2. Leur degré de polymérisation est de l'ordre de 60 à 70. Les hémicelluloses ont en général une masse molaire relativement faible et sont amorphes comme les copolymères statistiques de synthèse [11].

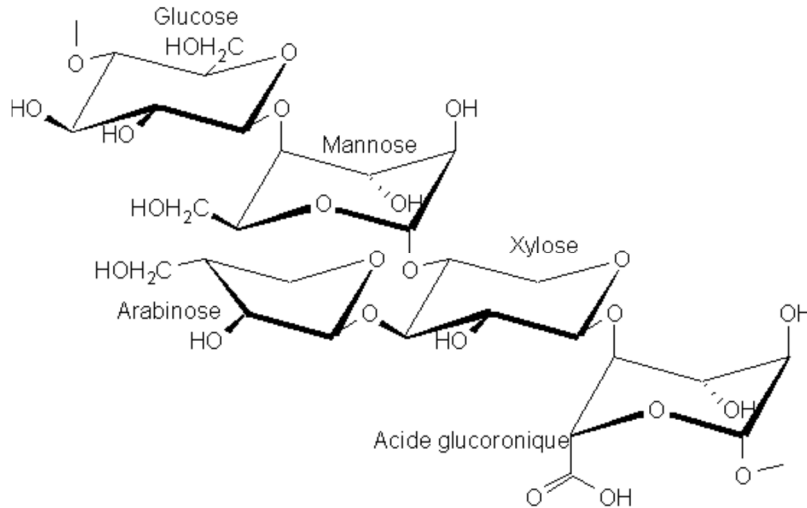


Figure I.3: Structure de l'hémicellulose [12]

II.2.3 Lignine

Les lignines ou « la lignine » sont des polymères tridimensionnels résultant de la polymérisation radicalaire de trois alcools phénylpropénoïques dont la composition dépendant de l'espèce végétal est indiquée sur la figure I.4: l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique.

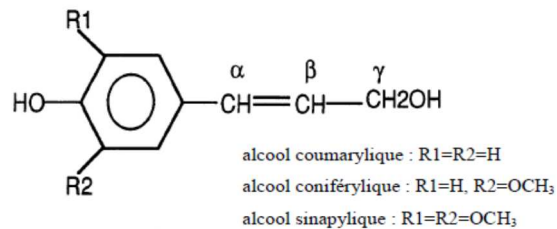


Figure I.4 Formule chimique de l'alcool coumarylique, coniférylique et sinapylique [13]

La structure de la lignine n'est pas encore complètement identifiée. La lignine contribue à la résistance mécanique des parois des cellules de la plante et confère une résistance aux agents

pathogènes. A cause de son caractère plutôt hydrophobe, la lignine entraîne une résistance à l'eau et contrôle aussi le transport des solutions ainsi que la teneur en eau des plantes. Enfin, elle participe à la cohésion des fibres dans la partie boisée [13].

Le tableau I.1 présente les différentes compositions chimiques de quelques fibres naturelles. Ce tableau montre que le coton présente une teneur maximale en cellulose allant de 85% à 95%.

Tableau I.1 : Composition chimique de quelques fibres naturelles[14]

Fibre	Cellulose	Lignine	Hémicellulose	Pectine	Wax	Teneur en humidité
	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)
Jute	61-71.5	12-13	13.6-20.4	0.4	0.5	12.6
Hemp	70.2-74.4	3.7-5.7	17.9-22.4	0.9	0.8	10
Kenaf	31-39	15-19	21.5	-	-	-
Flax	71	2.2	18.6-20.6	2.3	1.7	10
Sisal	67-78	8-11	10.0-14.2	10	2.0	11
Coton	82.7	-	5.7	-	0.6	-
Kapok	64	13	23	23	-	-

II.3 Propriétés du bois

A l'échelle microscopique, la structure des fibres est complexe. Selon Sedan [13], elles sont formées par des fibrilles, elles-mêmes formées par des chaînes de cellulose (figure I.5). Les chaînes de cellulose s'associent entre elles de façon parallèle par des liaisons hydrogène pour former des micro fibrilles dont la section (de l'ordre de quelques nm) est variable selon les espèces végétales. L'enchaînement des unités constitutives de la cellulose induit une raideur des chaînes qui, alliée à la grande régularité des enchaînements et au développement des liaisons hydrogènes inter et intra moléculaires, est principalement favorable à une cristallinité élevée. La formation de zones cristallines très cohésives est responsable de l'essentiel des propriétés physiques et chimiques de ce matériau.

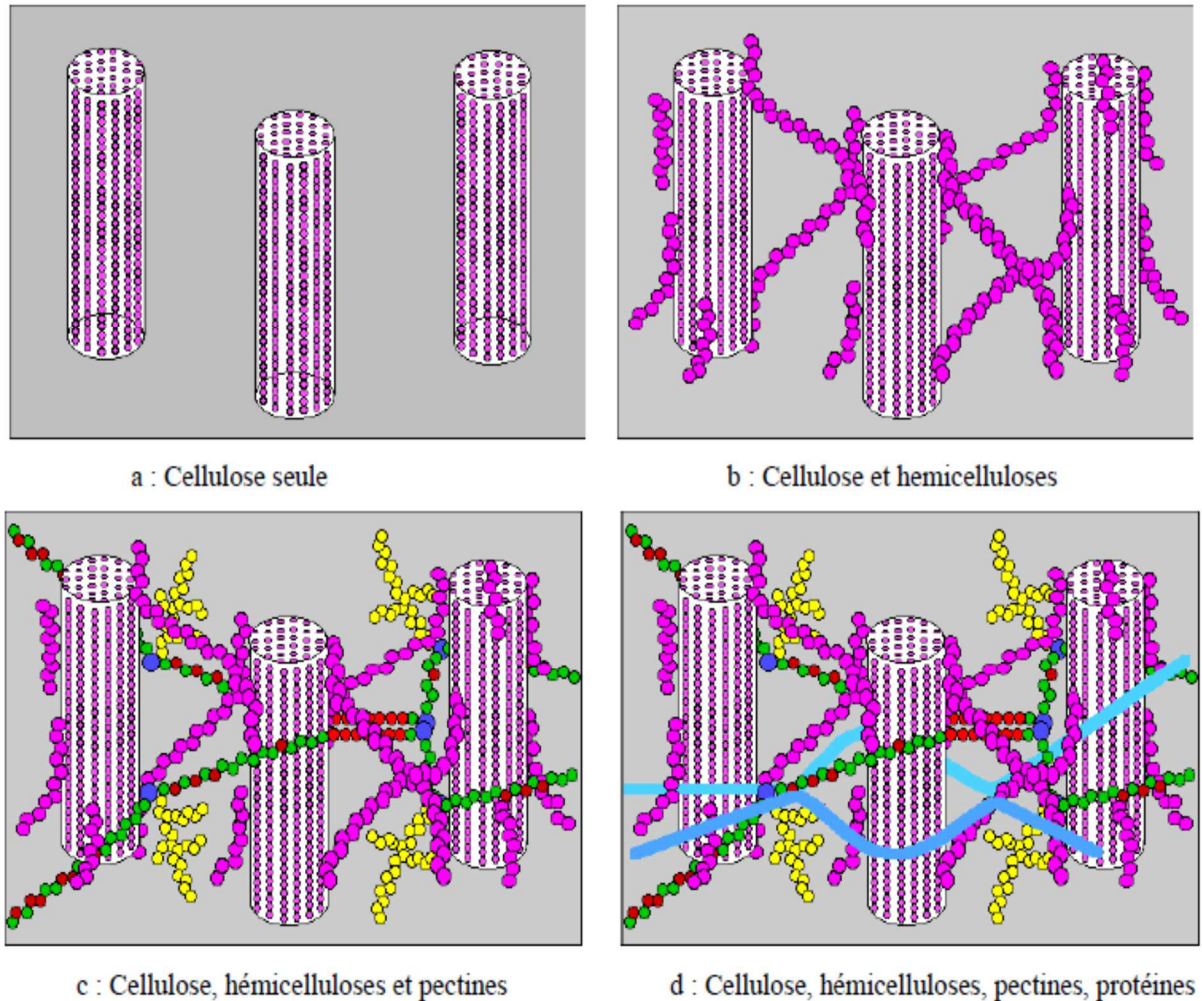


Figure I.5 : Agencement des différents composants des fibres de chanvre à l'échelle micrométrique [13]

II.4 Avantage et inconvénient des fibres naturelles

Une étude comparative des incidences environnementales du polypropylène (PP), du polyéthylène haute densité (HDPE), du polyuréthane (PU) et de celles des produits à base de fibres naturelles a été menée et les résultats obtenus, en vue d'identifier les mesures de suivi à prendre. Cette analyse a permis de conclure que la production de fibres naturelles requiert moins de 10% de l'énergie qui est employée pour produire des fibres de polypropylène (environ 90 Giga joule/tonne). Lorsque les calculs tenaient compte de l'utilisation d'engrais, les besoins énergétiques pour la production de fibres naturelles passaient alors à 15% environ de l'énergie nécessaire pour la fabrication des fibres de polypropylène.

D'autre part, l'impact des déchets produits (pollution de l'air, et de l'eau, ainsi que les déchets solides) s'est révélé supérieur pour les produits synthétiques. Il est apparu que la pollution de l'eau dérivant de la production des fibres naturelles était relativement importante, mais

constituée de composés biodégradables, contrairement aux rejets de produits chimiques persistants, notamment de métaux lourds, dans les effluents des usines chimiques. Le traitement des eaux usées résultant de la fabrication des fibres naturelles serait donc techniquement plus facile et moins coûteux. Au stade de la production des produits finis, il est aussi apparu que la demande d'énergie était plus élevée pour la transformation des fibres synthétiques, tandis qu'au niveau du fini et de la teinture, l'impact était équivalent. Dans le Tableau I.2, on présente une comparaison entre les avantages et les inconvénients des fibres naturelles comme renfort pour différents polymères [15].

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des fibres naturelles[15]

Avantages	Inconvénients
Cout plus faible	Mauvaise stabilité dimensionnelle
Biodégradable/Recyclable	Craquage/Fissuration
Pas d'émission de CO ₂ (absorption)	Faible résistance à l'humidité
Rigidité et insonorisation	Faible adhésion interfaciale
Faible besoin en énergie pour la production	Interaction hydrophiles/hydrophobes
Grande résistance à la rupture	Conditions d'opérations limitées en température
Renouvelables	Absorption de l'eau
Excellent module spécifique	Qualité variable
Abrasion réduite de l'outillage	Biodégradables

II.5 Traitement chimique des fibres naturelles

Atteindre une liaison forte entre les fibres et la matrice est l'un des enjeux majeurs de l'ingénierie composite. L'interaction fibre/matrice dans les composites renforcés par des fibres naturelles est assez différente de celle des composites renforcés par des fibres synthétiques, cela est due à la composition chimique des fibres naturelles. Afin d'améliorer l'adhérence fibre/matrice un traitement de surface des fibres est souvent nécessaire [16].

II.5.1 Traitement alcalin

Le traitement alcalin est l'un des traitements chimique des fibres naturelles le plus utilisé lorsque ces fibres sont utilisées comme renfort des polymères thermoplastiques et thermodurcissables. Le traitement alcalin conduit à une rupture de la liaison hydrogène dans la structure du réseau et augmente la rugosité de la surface. Ce traitement élimine une certaine quantité de lignine, la cire et les huiles couvrant la surface externe de la paroi cellulaire de la fibre. Ainsi le traitement alcalin influence directement la cellulose, le degré de polymérisation et l'extraction des composés de lignine et d'hémicellulose. Dans ce traitement, les fibres sont immergées dans une solution de NaOH pendant une période de temps donnée [17-20].

II.5.2 Traitement au silane

Le silane est un composé chimique de formule SiH_4 . Les silanes sont utilisés comme des agents de couplage pour améliorer l'adhérence entre les fibres et la matrice polymère. Les agents de couplage silane peuvent réduire le nombre de groupe hydroxyle de la cellulose dans l'interface fibre/matrice [21,22].

II.5.3 Benzoylation

La benzoylation est une transformation importante en synthèse organique. Le chlorure de benzoyle est le plus souvent utilisé dans le traitement de la surface des fibres [23].

Plusieurs chercheurs ont étudié la morphologie de la surface, les propriétés mécaniques et la dégradation des fibres traitées [24].

Pickering *et al.* [25] ont étudié l'effet de l'agent de couplage silane sur les fibres de pin pour augmenter l'interaction entre ces fibres et la matrice de polyéthylène. Les études ont montré l'efficacité du traitement à l'aide de l'agent de couplage.

Alawar *et al.* [26] ont aussi étudié l'influence du traitement chimique sur la morphologie, les propriétés mécaniques et la dégradation des fibres de palmier dattier. Le traitement a été fait par le NaOH à 100°C pendant 1h pour différentes concentrations.

La figure I.6 montre que le traitement avec l'hydroxyde de sodium augmente la résistance thermique des fibres de palmier dattier.

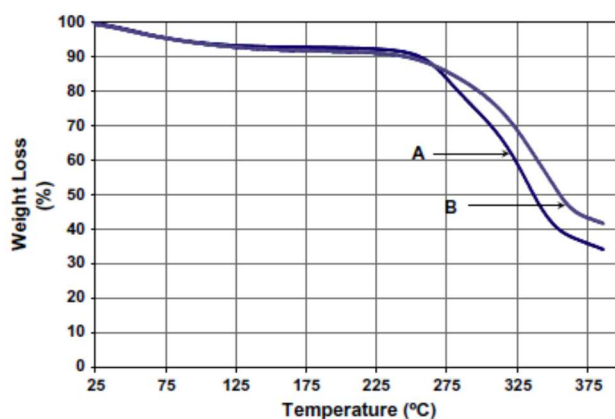


Figure I.6 : Analyse thermogravimétrique des fibres de palmier :
A non traité ; B traité avec le NaOH à 5% [26]

L'effet du traitement chimique sur les propriétés mécaniques des fibres de palmier a été aussi étudié par Alawar *et al* [26], les résultats obtenus sont présentés dans la figure I.7.

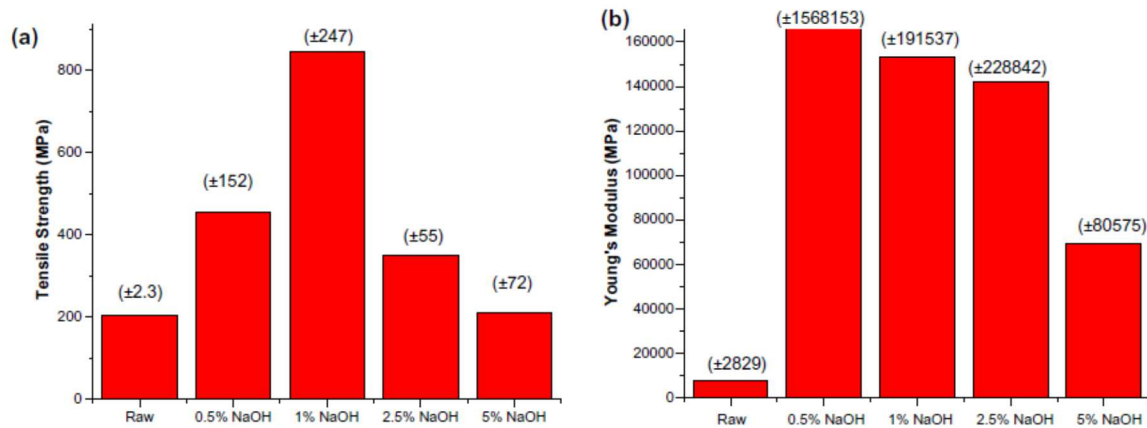


Figure I.7 : Effet du traitement chimique sur les propriétés mécaniques des fibres de palmier [26]

Les deux figures montrent que le traitement des fibres de palmier avec le NaOH entraîne une amélioration des propriétés mécaniques de ces fibres par rapport à celles non traitées.

Dans un autre travail, Sherey *et al.* [27] ont étudié l'influence du traitement chimique sur les propriétés thermophysiques du composite à matrice polymère renforcée par des fibres de banane. Ils ont montré que la conductivité et la diffusivité des composites à fibres traitées sont supérieures à celles des composites à fibres non traitées. Ils ont aussi montré que le traitement avec le chlorure de benzoyle et le NaOH (10%) présente une conductivité thermique supérieure.

II.6 Conductivité thermique du bois

La conductivité thermique du bois est très faible à cause de sa composition poreuse car dans le bois sec les cavités et les espaces intercellulaires et intracellulaires sont remplis d'air, ce dernier est un mauvais conducteur de chaleur. La conductivité thermique du bois est influencée par divers facteurs. Le bois avec une masse volumique élevée conduit mieux la chaleur que le bois de faible masse volumique à cause de la plus petite proportion d'espaces poreux. La teneur en humidité augmente la conductivité thermique car l'eau en comparaison avec l'air conduit mieux la chaleur. Le bois a un coefficient de conductivité thermique d'environ $0.35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ en direction longitudinale et $0.12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ en direction transversale, sans différence entre la direction tangentielle et la direction radiale. Plus la quantité d'extractible est élevée dans le bois, plus sa conductivité thermique est élevée. La conductivité

thermique du bois est influencée aussi par la température. Plus la température est élevée, plus la conductivité thermique est grande. Cependant, cette augmentation est trop faible pour être prise en compte. La faible conductivité thermique du bois en comparaison avec celle des autres matériaux donne au bois l'image d'être un matériau tiède et acceptable, ayant une grande valeur comme matériau isolant. Il est presque toujours agréable au toucher quelle que soit sa température, car il conduit peu la chaleur vers l'intérieur ou l'extérieur [28].

II.7 Bois de palmier dattier

Le palmier est une herbe immense de 20 à 30m de hauteur, au tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles, les feuilles sont pennées, divisées avec une longueur de 4 à 7m. Il porte des inflorescences mâles ou femelles [29].

Le bois de palmier dattier est constitué de plusieurs parties:

- **Le tronc**

Le palmier dattier a un tronc unique colonnaire sans branche appelé stipe. Le stipe se termine par un bourgeon terminal unique produisant des feuilles appelées palmes (frondes), il est généralement cylindrique. L'enveloppe extérieure, l'écorce, n'est qu'une expansion de la base des pétioles des feuilles. Les fibres des pétioles ne forment point un tissu comme dans le bois ordinaire. Ce tissu présente des couches assez semblables à des toiles d'araignées (ils sont placés sans ordre, les unes à côté des autres). Le tronc n'est composé que des fibres pétiolaires superposées les unes sur les autres de l'intérieur à l'extérieur. Ceci explique pourquoi le bois est plus dur à l'extérieur qu'à l'intérieur [29].

- **La couronne**

On appelle la couronne, l'ensemble des palmes vertes. Le nombre des palmes chez un palmier dattier adulte peut atteindre de 50 à 200 palmes. Elles sont émises par le bourgeon terminal ou «phyllophore» [29].

- **Palme**

La palme ou « Djérid » est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis qui s'étend au pétiole. Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. Le pétiole (Kornaf) est dur et relativement rigide. Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de bourgeon et perd un nombre similaire de palmes par des sèchements [29].

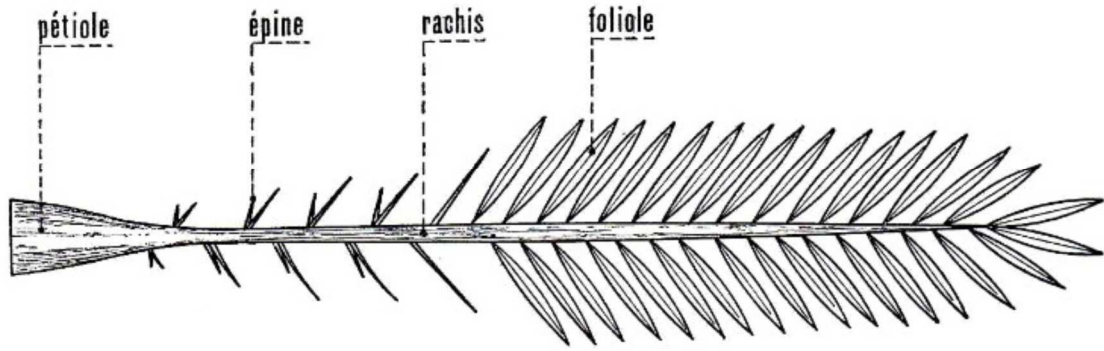


Figure I.8: Schéma d'une palme [29]

II.7.1 Morphologie des fibres de palmier dattier

Les fibres de bois de palmier dattier ont une forme cylindrique comme le montre la figure I.9a. L'analyse par microscopie électronique à balayage montre que la surface des fibres de palmier dattier est irrégulière avec plusieurs filaments et cellules et contient aussi des impuretés. Une coupe transversale d'une seule fibre (figure I.9b) montre un grand nombre de fibres creuses individuels collectées et liées par une couche primaire. Les fibres de palmier dattier sont une collection de fibres multicellulaires contenant chacune un vide central (lumen). Les fibres multicellulaires sont d'environ 2 à 5 μm de diamètre [30,31]. La structure et la forme des fibres de palmier dattier sont semblables à celles des fibres de coco. Selon des études morphologiques effectuées sur la fibre de coco, la couche extérieure est prévue pour la lignine [32].

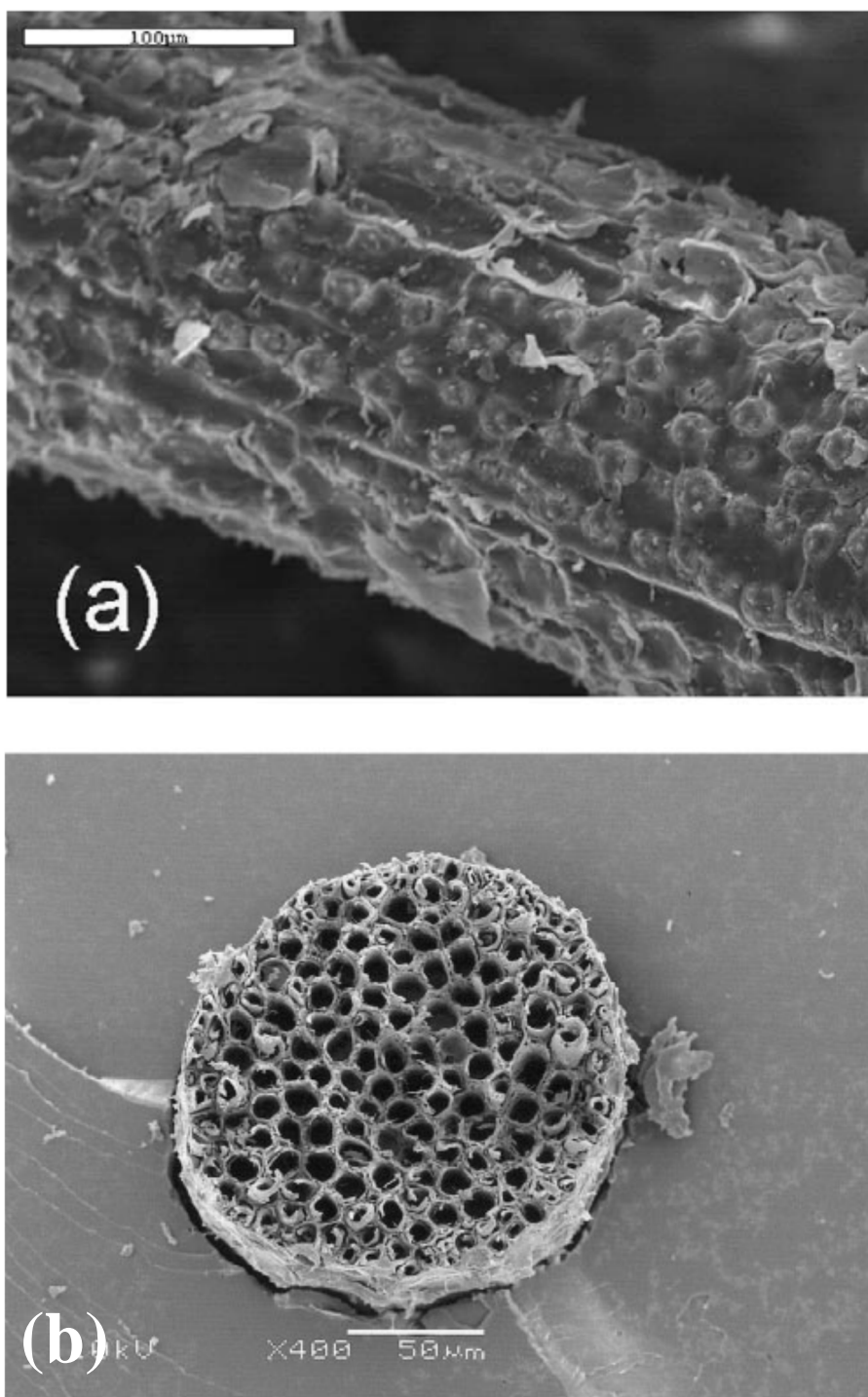


Figure I.9: Structure morphologique des fibres de palmier dattier [30,31]

II.7.2 Propriétés thermophysiques des fibres de palmier dattier

L'interaction de l'énergie thermique avec les atomes constituant un matériau permet de déterminer certaines propriétés physiques de la matière. Les propriétés décrivant cette interaction sont souvent appelées propriétés thermophysiques qui incluent la capacité

thermique, diffusivité thermique, la conductivité thermique, etc. Une caractérisation complète des propriétés thermiques des matériaux nécessite la détermination de la conductivité thermique et la diffusivité thermique. La conductivité thermique est une propriété qui exprime le flux de chaleur qui s'écoule à travers un matériau, s'il existe un gradient de température.

Agoudjil *et al* [31] ont étudié expérimentalement les propriétés thermophysiques, chimiques et diélectriques du bois de palmier dattier dans le but de réduire les pertes de chaleur dans le bâtiment.

Les résultats obtenus ont montré que l'effet de l'orientation des fibres, la variété du palmier dattier et les différentes parties du palmier dattier est significative pour la permittivité relative par rapport à la conductivité thermique. La conductivité thermique du palmier dattier mesurée sous vide représente la moitié de celle mesurée sous pression atmosphérique. Le bois de palmier dattier est un bon candidat pour le développement de nouveaux matériaux isolants efficaces par rapport aux matériaux naturels. La figure I.10 montre les résultats obtenus:

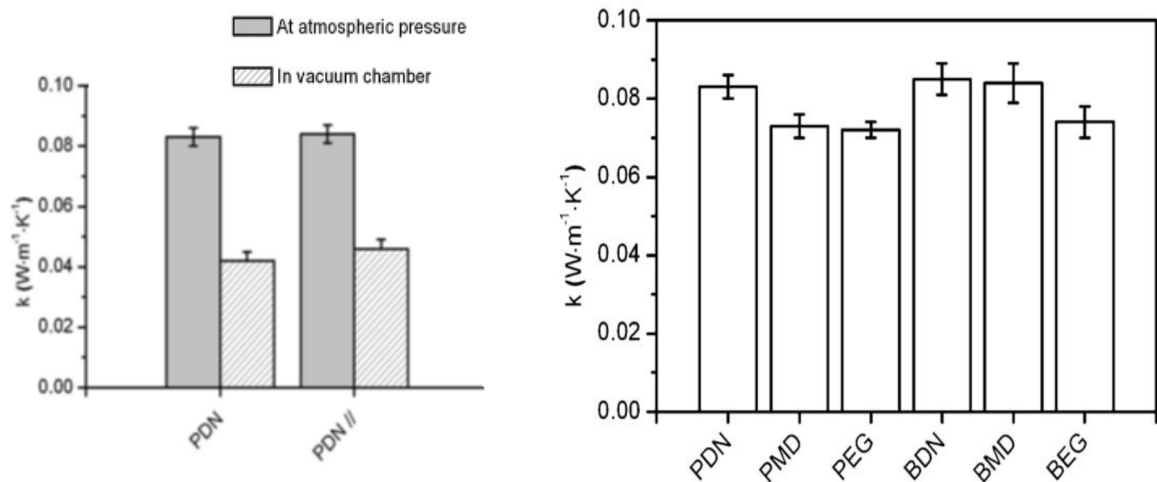


Figure I.10: Conductivité thermique du palmier dattier [31]

III. Polymères

III.1 Polymères thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se convertissent en des produits particulièrement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la spécificité de ne pouvoir être mises en forme

qu'une seule fois [33]. Le tableau I.3 présente les caractéristiques des résines thermodurcissables :

Tableau I.3 : Caractéristiques des résines thermodurcissables [7]

Résine	ρ (densité)	E (GPa)	G (MPa)	νPoisson	σ_r (MPa)	T_{max} (°C)	α_d (10 ⁻⁵ K ⁻¹)
Epoxyde	1.2	4.5	1600	0.4	130	90 – 200	0.3 – 1.6
Phénolique	1.3	3	1100	0.4	70	120– 200	1.0 – 2.3
Uréthane	1.1	0.7 – 7			30	100	-
Polyester	1.2	4	1400	0.4	80	60 – 200	0.4 – 1.6
UF	1.2 – 1.5	6 – 10	-	-	40 – 80	140	0.7 – 1.1
PF	1.1 – 1.3	3 – 4	-	0.36	35 – 60	80 – 300	-
pMDI	1.24	-	-	-	-	230	-

α_d : coefficient de dilatation thermique, T_{max} : température maximale d'utilisation

Les résines thermodurcissables représentent la grande majorité des résines adhésives. Les colles, ou polymères thermodurcissables sont largement utilisées pour l'adhésion du bois ou dans les composites à base de bois, en particulier ceux à base de fibres cellulosiques. Ces résines collaborent à la liaison des fibres entre elles dans les panneaux reconstitués afin d'assurer la cohésion de l'ensemble. L'essentiel des colles employées sont l'urée-formaldéhyde, les résines phénoliques (phénol formaldéhyde: PF) et les colles isocyanates [34].

III.2 Polymères thermoplastiques

Les résines thermoplastiques, en revanche, peuvent être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. De plus, ces résines présentent l'aptitude à l'état liquide de se mouler facilement par plasticité [33].

Tableau I.4 : Caractéristiques des résines thermoplastiques [7]

Polymère	T _g	T _f	Thermoformage	Densité	σ _t	Module élastique	α _d à 20°C
	(°C)	(°C)	(°C)		(MPa)	(GPa)	(10 ⁻⁵ K ⁻¹)
PP	5	165	150 – 195	0.92	30	1.2	9
HDPE	-100	134	130 – 205	0.95	28	1.1	3.4- 4.0
PVC	75- 105	160- 220	100 – 180	1.39	58	2.9	1.6- 7.7
PS	90- 100		130 – 155	1.05	55	3.2	1.8- 2.4
PET	70	255- 265	120 – 170	1.30	47	2.6	
ABS	90- 120		130 – 200	1.05	50	2.5	
PMMA	100		150 – 190	1.18	72 – 80	3.3	1.6- 2.8

PP : polypropylène à l'état semi cristallin **PET** : polyéthylène téréphtalique semi cristallin
HDPE : polyéthylène à haute densité **ABS** : acrylonitrile butadiène styrène à l'état amorphe
PVC : polychlorure de vinyle amorphe **PS** : polystyrène à l'état amorphe
PMMA : poly méthacrylate de méthyle à l'état amorphe

IV. Matériaux composites

Un matériau composite peut être assimilé à un arrangement de deux ou plusieurs composés. L'association de ces matériaux élémentaires (renforts et matrices) aux caractéristiques complémentaires permet d'attribuer au matériau composite un ensemble original de propriétés à l'échelle macroscopique. La figure I.11 présente une classification schématique des matériaux composites.

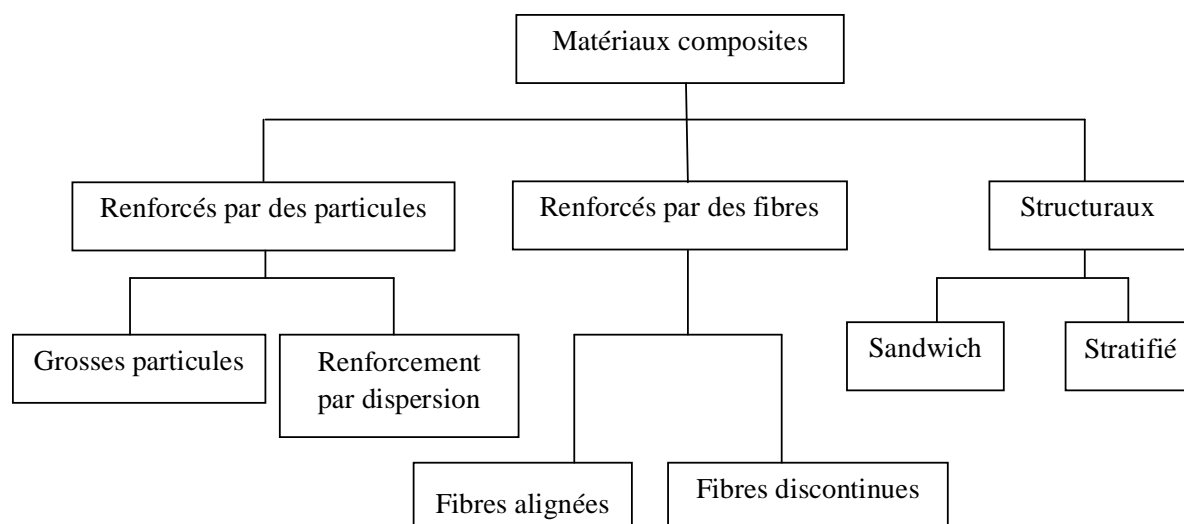


Figure I.11 : Classification schématique des différents types des composites

IV.1 Composites à matrice polymère/fibres naturelles

Plusieurs technologies modernes font appel à des matériaux composites dotés de propriétés que les matériaux traditionnels (métaux, céramiques et polymères) ne peuvent pas offrir. Ces technologies trouvent une application dans des domaines tels que l'industrie aérospatiale, la construction automobile, la fabrication d'appareils de plongée ou d'objet sportif, ou des matériaux de construction légers, robustes, rigides et capables de résister aux chocs, à l'abrasion et à la corrosion [13].

Le but de la fabrication d'un matériau composite est de bénéficier des propriétés reconnues de chaque élément afin d'en former un autre qui sera mieux adapté à certaines applications. Un composite est un matériau qui essaie de combiner les propriétés de ses composants (généralement une matrice polymérique et un renfort) pour permettre d'améliorer certaines caractéristiques comme la résistance à la rupture, ou la rigidité, pour des composites à usages mécaniques. Auparavant, les matériaux composites étaient le plus souvent des matrices thermoplastiques ou thermodurcissables renforcées de fibres de carbone, de verre, Toutefois, ces dernières années, les matériaux composites renforcés avec des fibres naturelles attirent l'attention des chercheurs parce qu'ils pourraient être une solution efficace pour résoudre les problèmes d'environnement, de biodégradabilité et d'épuisement du pétrole, tout en développant des composites à moindre prix [35,36].

Des études ont montré que les composites à base de fibres naturelles réduisent les émissions de CO₂ dans l'environnement par rapport aux fibres artificielles. Les composites à fibres naturelles utilisent, au cours de leur cycle de vie, 45% de moins d'énergie que les composites à fibre de verre, et conduisent à moins d'émission atmosphérique [37].

IV.2 Procédés de fabrication des composites

IV.2.1 Matrices thermodurcissable/fibres naturelles

Pour la mise en œuvre des résines thermodurcissables renforcées avec des fibres naturelles, il faut généralement sécher d'abord les fibres afin de minimiser le dégagement d'eau et de produits volatils lors du mélange.

Le procédé de fabrication des échantillons comporte quatre étapes:

1. Le mélange des résines, durcisseurs et fibres naturelles: les fibres sont donc mélangées à la résine et au durcisseur dans un bécher. Le durcisseur est incorporé premièrement, bien mélangé avec la résine et enfin on ajoute les fibres naturelles en mélangeant pour avoir un mélange le plus homogène possible.
2. Le moulage dans un moule rectangulaire. On verse le mélange de résine, durcisseur et fibres naturelles dans le moule jusqu'à ce qu'il soit rempli.
3. La cure du mélange se fait dans des conditions normales de température (22°C), de pression (1 atm) et de taux d'humidité (60%).

Le découpage des échantillons se fait à l'aide d'une presse hydraulique manuelle [15].

IV.2.2 Matrice thermoplastique/fibres naturelles

Les méthodes courantes de fabrication des composites à matrice thermoplastique sont par exemple extrusion, moulage par injection ou moulage par compression. À l'état fondu, les fibres sont ajoutées à une résine thermoplastique fondue et le mélange est effectué en utilisant un mélangeur à une température et vitesse spécifiées. Le mélange est ensuite retiré du mélangeur chaud et moulé en utilisant une machine de moulage par injection en barres longues et épaisses [38].

Selon la littérature [6,39-41], la résine thermoplastique est mélangée avec les fibres naturelles sèches à une température de 160°C-180°C dans un mélangeur avec différents pourcentages. La vitesse de mélange et le temps de mélange sont respectivement 50 tr/min et 10 min. Les mélanges résultants sont comprimés à l'aide d'une presse sous une force de 10 tonnes à une température de 100°C.

IV.3 Domaine d'utilisation des composites bois/polymère

Les composites bois-polymères sont utilisés dans différents secteurs:

- Matériaux de construction (planches, volets, châssis, portes et fenêtres),
- Matériels de consommation et industriels, (armoires, planchers, palettes, revêtement de sols),
- Véhicules automobiles (panneaux de portes, composants de coffres arrières, des vide-poches, des couvercles de pneus de rechange),
- Autres applications (bancs, tables de pique-nique, modules de jeux, ordures de jardin, ponts et pièces de bateaux).

Les principaux obstacles à la progression de ce type de produits par rapport aux applications du bois solide sont reliés à son prix de vente élevé, à son apparence «synthétique» et à sa résistance mécanique inférieure à celle du bois [34].

V. Synthèse bibliographique des travaux réalisés sur les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles

Behzad *et al* [42] ont étudié expérimentalement la conductivité thermique des composites à matrice polymère renforcée par des fibres de chanvre. Les matériaux utilisés dans cette étude sont un polymère qui est une solution aqueuse d'un acide polycarboxylique et d'un alcool polyhydride en tant qu'agent de réticulation et des fibres de chanvre. La conductivité thermique a été mesurée en fonction de la concentration des fibres. Les résultats obtenus ont montré que la conductivité thermique du composite diminue en fonction de l'augmentation de la concentration des fibres. Ils ont aussi montré que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la conductivité thermique. Les résultats expérimentaux de la conductivité thermique ont été aussi comparés au modèle théorique. Il a été montré qu'il y a un bon accord entre les valeurs expérimentales et le modèle théorique. La figure I.12 montre les résultats obtenus :

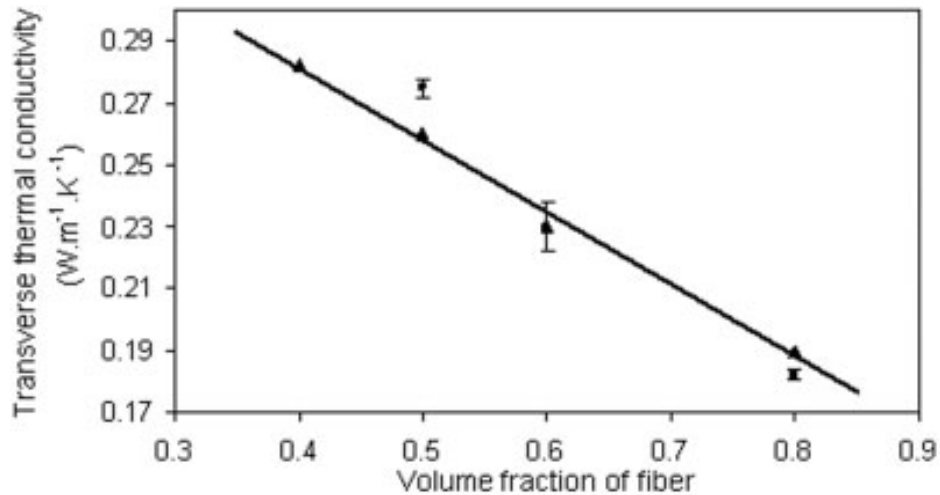


Figure I.12 : Conductivité thermique du composite en fonction de la concentration des fibres :■ expérimentale, ▲ théorique [42]

Mounika *et al* [43] ont déterminé expérimentalement la conductivité thermique des composites à matrice polyester renforcée par des fibres de bambou. La conductivité thermique a été mesurée en fonction de la concentration volumique des fibres, la température et l'orientation des fibres en utilisant la méthode de la plaque chaude gardée. Les échantillons utilisés sont de 50 mm de diamètre et 10 mm d'épaisseur. Il a été constaté que la conductivité thermique du composite diminue en fonction de l'augmentation de la concentration volumique des fibres. Les valeurs expérimentales ont été comparées aux modèles théoriques. Il a été montré que les modèles théoriques sous-estime la conductivité thermique des composites. Ils ont aussi montré que la conductivité thermique des échantillons augmente en fonction de l'augmentation de la température. Les figures I.13 et I.14 montrent les résultats obtenus :

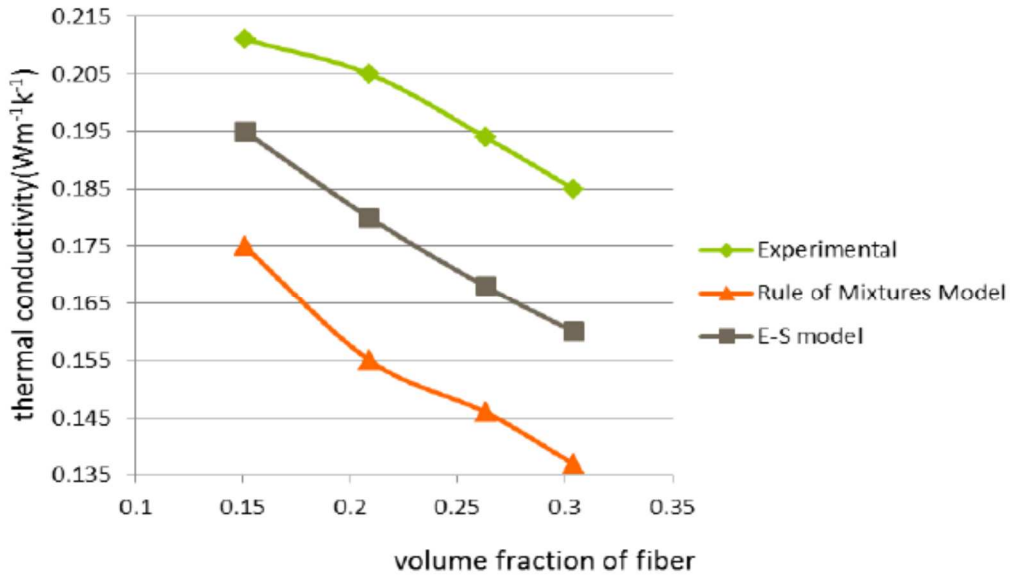


Figure I.13 : Conductivité thermique des composites en fonction de la concentration volumique [43]

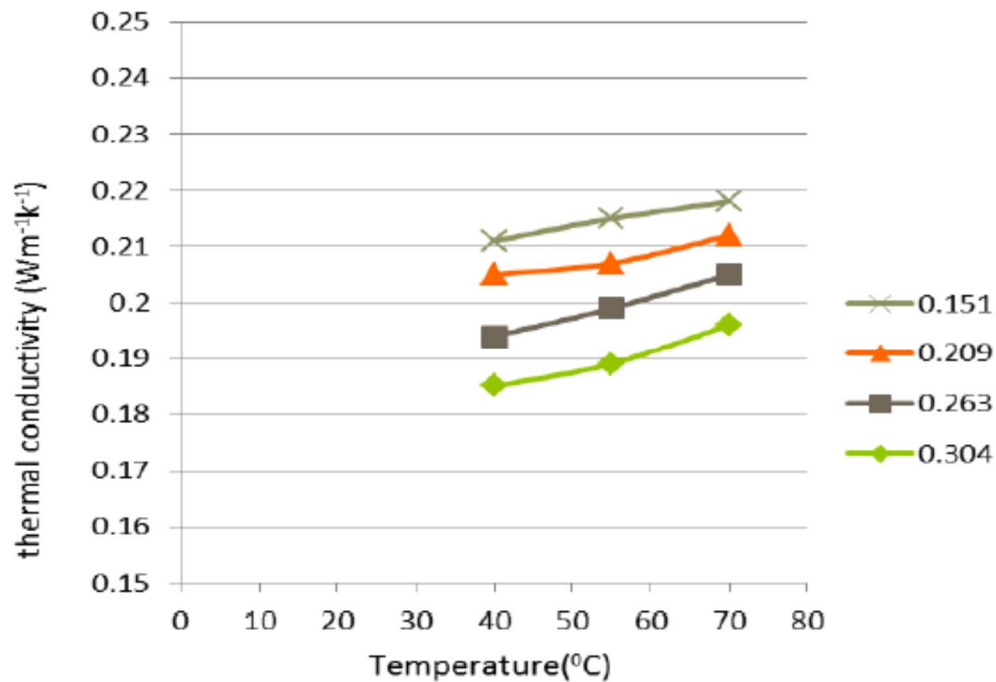


Figure I.14 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température [43]

Sherely *et al.* [27] ont étudié les propriétés thermophysiques du composite polypropylène chargé par des fibres de banane. Dans cette étude, une mesure simultanée de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique du composite polypropylène/fibres de banane a été réalisée à une température ambiante. Les effets du traitement chimique des fibres de banane sur la conductivité et la diffusivité thermique des composite ont été aussi étudiés.

Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la concentration des fibres de banane dans le composite conduit à une diminution significative de la conductivité et la diffusivité thermique du composite.

L'influence du traitement chimique sur les propriétés thermophysiques du composite a été également étudiée. Le tableau I.5 montre les résultats obtenus :

Tableau I.5 : Effet du traitement chimique sur les propriétés thermophysiques du composite[27]

Banana fibers loading and chemical treatments	k ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	a ($\times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	C_p ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	ρ (Kg.m^{-3})
PP+0.50 V_f	0.157±0.002	1.05±0.03	1522±72	982±35
0.50 V_f treated with benzoylated	0.182±0.002	1.31±0.07	1370±91	1012±38
0.50 V_f treated with KMnO₄	0.168±0.002	1.22±0.06	1265±77	1088±37
0.50 V_f treated with NaOH (2%)	0.163±0.003	1.19±0.05	1352±77	1013±34
0.50 V_f treated with NaOH (10%)	0.178±0.003	1.31±0.10	1305±114	1041±40
0.50 V_f treated with TEOS	0.160±0.005	1.13±0.09	1417±132	999±36

Le tableau I.5 montre que les valeurs de la conductivité et de la diffusivité thermique du composite à fibres traitées chimiquement sont plus élevées que celles du composite à fibres non traitées. Ce qui indique que le traitement chimique des fibres de banane augmente les propriétés thermophysiques indépendamment de la nature du traitement.

Dans un autre travail, Idicula *et al.*[44] ont aussi étudié les propriétés thermophysiques du composite polyester renforcé par des fibres naturelles. Dans ce travail les propriétés thermophysiques du composite ont été étudiées en fonction de la concentration des fibres et de la modification de la surface des fibres.

Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la concentration des fibres de banane et de sisal dans le composite conduit à une diminution significative de la conductivité thermique du composite.

L'influence du traitement chimique sur les propriétés thermophysiques du composite a été également étudiée. Le tableau I.6 montre les résultats obtenus :

Tableau I.6 : Effet du traitement chimique sur les propriétés thermophysiques du composite [44]

	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	a (×10 ⁻⁷ m ² s ⁻¹)	C_p (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (Kg.m ⁻³)
Polyester only	0.181±0.003	1.08±0.09	1408±123	1190±123
Polyester+0.20 V_f	0.153±0.002	1.25±0.09	1199±88	1021±88
Polyester+0.40 V_f	0.140±0.002	1.14±0.09	1246±103	986±103
Polyester+0.40 V_f treated with NaOH	0.201±0.003	1.37±0.10	1270±98	1155±98
Polyester+0.40 V_f treated with PSMA	0.213±0.002	1.43±0.25	1194±120	1248±77

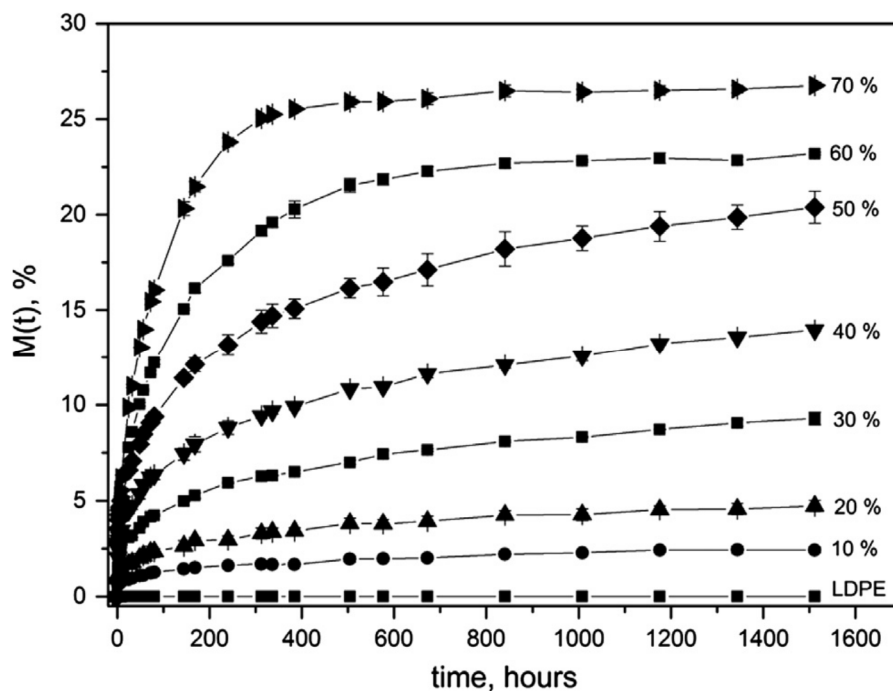
Le tableau I.6 montre que la conductivité thermique du composite à fibre traitée avec l'hydroxyde de sodium est de 43% plus élevée que celle du composite à fibre non traitée. Il a été aussi démontré que le traitement à la soude élimine pratiquement tous les composants non cellulosiques. Par la dissolution de la lignine par un alcali, des pores sont formés sur la surface de la fibre, ce qui améliore la zone de contact entre la fibre et la matrice.

Dans un autre travail, Alsina *et al* [45] ont étudié les propriétés thermophysiques des composites à matrice polyester renforcée par des fibres hybride. Les matériaux utilisés sont le polyester comme matrice et les fibres de sisal, la ramie et le jute comme renfort. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a une augmentation de la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité calorifique des composites par rapport à celle de la matrice. Le tableau I.7 montre les résultats obtenus :

Tableau I.7 : Propriétés thermophysiques des composites lignocellulosiques [45]

Material	Direction of the heat flux ^a	Thermal properties		
		Specific heat (J cm ⁻³ °C ⁻¹)	Thermal diffusivity (mm ² s ⁻¹)	Thermal conductivity (W m ⁻¹ °C ⁻¹)
Resin	–	0.987 ± 0.002	0.153 ± 0.0004	0.15
Sisal/cotton composite	Parallel	1.236 ± 0.007	0.200 ± 0.0006	0.25
	Perpendicular	1.065 ± 0.021	0.194 ± 0.002	0.213 ± 0.006
Ramie/cotton composite	Parallel	0.894 ± 0.005	0.251 ± 0.002	0.22
	Perpendicular	0.839 ± 0.01	0.220 ± 0.0007	0.19
Jute/cotton composite	Parallel	1.017 ± 0.017	0.231 ± 0.003	0.237 ± 0.006
	Perpendicular	0.869 ± 0.015	0.218 ± 0.003	0.19

Almaadeed *et al* [46] ont étudié les propriétés mécaniques et l'absorption d'eau des composites à matrice polyéthylène basse densité renforcée par des poudre de palmier dattier. Ils ont montré qu'il y a une forte tendance du composite pour l'absorption d'eau. Cette tendance augmente avec l'augmentation de la concentration des fibres. La figure I.15 montre les résultats obtenus :

**Figure I.15 : Absorption d'eau des composites en fonction du temps [46]**

Dans un autre travail, Tajvidi *et al* [47] ont étudié l'absorption d'eau et les propriétés mécaniques des composites polypropylène renforcés par des fibres naturelles. Ils ont montré que l'augmentation de la concentration des fibres augmente la quantité d'eau absorbée. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure I.16 :

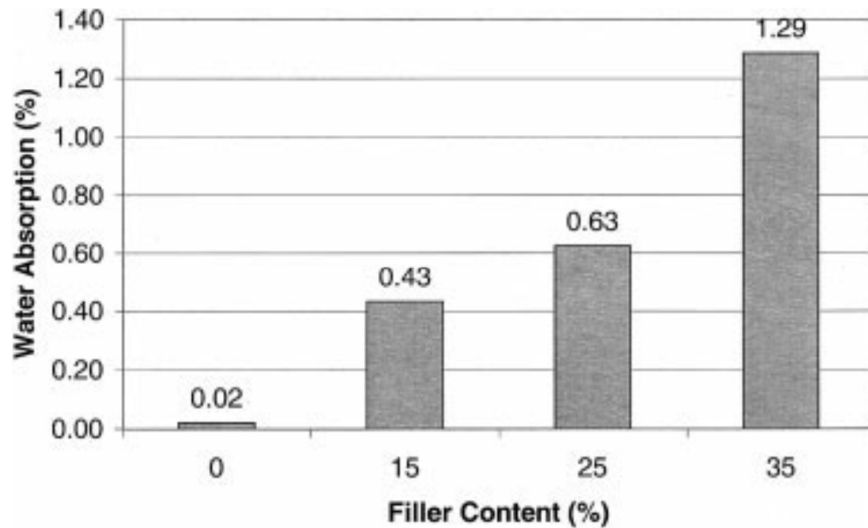


Figure I.16 : Absorption d'eau [47]

Najafi *et al* [48] ont étudié l'absorption d'eau des composites à matrice polyéthylène haute densité renforcée par des fibres lignocellulosiques. L'effet de l'absorption d'eau a été étudié en fonction du temps d'immersion. Les résultats obtenus ont montré que généralement l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation du temps d'immersion. La figure I.17 montre les résultats obtenus :

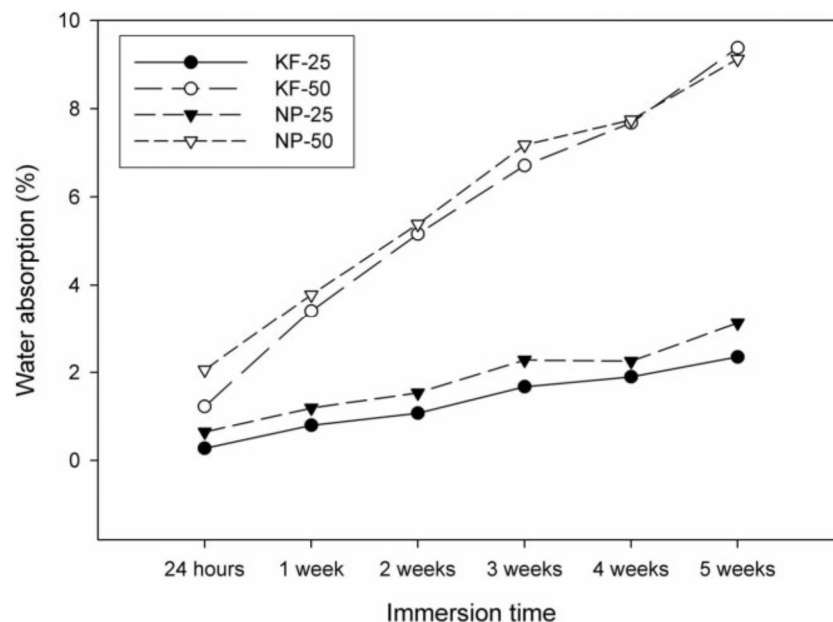


Figure I.17 : Absorption d'eau des composites en fonction du temps d'immersion [48]

En conclusion, la conductivité thermique des matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres naturelles diminue en fonction de l'augmentation de la concentration volumique des fibres. En conclue aussi que tous les traitements chimiques améliorent à la fois la conductivité thermique et la diffusivité thermique du composite considérablement à des degrés divers. Ceci indique que le traitement chimique permet un meilleur contact entre la fibre et la matrice et réduit considérablement la résistance de contact thermique. L'absorption d'eau des matériaux composites augmente avec l'augmentation du temps d'immersion et de la concentration volumique des fibres.

VI. Modèles de prédiction de la conductivité thermique des composites

La modélisation de la conductivité thermique effective des matériaux hétérogènes ou 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 [49].

Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature pour prédire la conductivité thermique des matériaux composites en fonction de la concentration volumique des charges. Une synthèse bibliographique de ces modèles de prédiction a été présentée par Goring et Churchill [50] et R. C. Progelhof [51]. De nombreux chercheurs ont comparés leurs résultats expérimentaux aux modèles théoriques. Cependant, seulement quelques modèles prennent en compte la taille des charges et la résistance de contact entre la matrice et le renfort [52-57].

Dans ce travail, seulement quelques modèles de prédictions de la conductivité thermique seront présentés.

VI.1 Modèle de Maxwell

L'approche de Maxwell est l'un des modèles couramment utilisés pour la prédiction de la conductivité thermique des matériaux composites. Initialement, ce modèle a été associé à un problème de la conduction électrique dans un matériau hétérogène constitué de sphères dispersées dans une matrice[57,58]. La conductivité est alors donnée par la relation:

$$k = k_m \frac{2k_m + k_f - 2\phi(k_m - k_f)}{2k_m + k_f + \phi(k_m - k_f)} \quad (1)$$

Où:

k_m , k_f conductivité thermique de la matrice est de la fibre respectivement, ϕ la concentration volumique des fibres

VI.2 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 [59]. Selon Hashin et Shtrikman la conductivité s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{k}{k_m} = \frac{1 + (d-1)\phi\beta}{1 - \phi\beta} \quad (2)$$

Et

$$\beta = \frac{k_f - k_m}{k_f + (d-1)k_m} \quad (3)$$

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 donné par l'équation (4) dans le cas d'une ellipse [60].

$$d = \frac{(1/x) + (1/y) + (1/z)}{(1/x)} \quad (4)$$

Une modification du modèle de Hashin et Shtrikman a été proposée afin de prendre en compte la résistance de contact [53]. La conductivité thermique effective du matériau composite est définie par:

$$E = \frac{1 + (d-1)\phi\bar{\beta}}{1 - \phi\bar{\beta}} \quad (5)$$

Avec

$$\bar{\beta} = \frac{\frac{1}{D} - \left(1 + \frac{C}{D}\right)}{\frac{1}{D} + (d-1)\left(1 + \frac{C}{D}\right)} \quad (6)$$

Où C représente la résistance de contact, D le rapport entre la conductivité de la matrice et de la fibre.

VI.3 Modèle de Hata et Taya

En 1985, Hata 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 [61,62]. L'équation de Hata et Taya est donnée par:

$$k = k_m \left(1 + \varphi \frac{(k_f - k_m)(2S_{33} + S_{11}) + 3k_m}{j} \right) \quad (7)$$

Où

$$J = 3(1 - \varphi)(k_f - k_m)S_{11}S_{33} + k_m(3(S_{11} + S_{33}) - \varphi(2S_{11} + S_{33})) + 3 \frac{k_m^2}{k_f - k_m} \quad (8)$$

Et

$$S_{11} = \frac{\frac{L}{D}}{2\left(\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1\right)^{3/2}} \left(\frac{L}{D} \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1} - \cosh^{-1}\left(\frac{L}{D}\right) \right) \quad (9)$$

Avec: L: longueur de la fibre, D: diamètre de la fibre

VI.4 Modèle de Hasselman

Hasselman et Johnson présentent également l'effet de l'interface entre la matrice et les fibres, et la taille des renforts qui peut être cylindrique ou sphérique dans le modèle de la conductivité thermique [55]. Ils obtiennent la relation suivante

$$k = k_m \frac{[k_f(1 + 2\zeta) + 2k_m] + 2\varphi[k_f(1 - \zeta) - k_m]}{[k_f(1 + 2\zeta) + 2k_m] - \varphi[k_f(1 - \zeta) - k_m]} \quad \text{Et} \quad \zeta = \frac{R_k k_m}{a} \quad (7)$$

Où R la résistance de contact et a variable d'espace

VII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés une synthèse bibliographique sur les matériaux composites. Les propriétés thermophysiques des fibres naturelles ont été également présentées dans ce chapitre. L'influence des traitements de surface des fibres sur les propriétés thermique des composites a été présentée. Une description des méthodes de modification de la surface des composés a également été effectuée. Nous avons aussi présenté et discuté les différents modèles de prédictions de la conductivité thermique des composites.

L'étude présentée dans ce chapitre montre que le renforcement des composites avec des fibres naturelles comme les fibres de bois, chanvre, lin, sisal et palmier dattier est un sujet particulièrement intéressant. Les caractéristiques thermophysiques des matériaux composites à base de fibres naturelles représentent de bonnes propriétés pour l'isolation thermique dans le bâtiment.

Une présentation du procédés d'élaboration des composites ainsi que le dispositif de mesure de la conductivité thermique fait l'objet du prochain chapitre.

VIII. Références

- [1] D. Gay, *Matériaux composites*, Edition Hermes ed, 1997.
- [2] T. Alsaeed, B. F. Yousif, and H. Ku, "The potential of using date palm fibres as reinforcement for polymeric composites," *Mater Design*, vol. 43, pp. 177-84, 2013.
- [3] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. Boudenne, and A. Gherabli, "Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation," *Energy Build*, vol. 66, pp. 267-73, 2013.
- [4] J. Zach, A. Korjenic, V. Petranek, J. Hroudova, and T. Bednar, " Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool," *Energy Build*, vol. 49, pp. 246-53, 2012.
- [5] A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, CRC Press ed, 2005.
- [6] B. F. Abu-Sharkh and H. Hamid, "Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 85, pp. 967e973, 2004.
- [7] F. Michaud, "Rhéologie De Panneaux Composites Bois/Thermoplastiques Sous Chargement Thermomécanique : Aptitude au postformage," in *Faculté De Foresterie Et De Géomatique: Université Laval*, 2003.
- [8] A. Sbiai, "Matériaux Composites à Matrice Epoxyde Chargée Par Des Fibres De Palmier Dattier : Effet De L'oxydation Au Tempo Sur Les Fibres," Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- [9] D. N. Saheb and J. P. JOG, "Natural Fiber Polymer Composites: A Review," *Advances in Polymer Technology*, vol. 18, pp. 351–363, 2009.
- [10] C. Y. A. Maxime, "Etude de la microstructure des composites bois/ciment par relaxométrie RMN du proton," Université Bordeaux 1, 2009.
- [11] H. Mellouk, "Extraction des volatiles a partir du bois par détente instantanée contrôlée (DIC): valorisation industrielle des extraits et des residus solides," Université de la Rochelle, 2007.
- [12] F. E. Arrakhiz, "Mise en oeuvre et caractérisation de Matériaux composites : Polymères thermoplastiques / fibres naturelles," Université Mohammed V-Agdal Rabat, 2012.

- [13] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite," Université de Limoges, 2007.
- [14] R. Malkapuram, V. Kumar, and Y. S. Negi, "Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 28, pp. 1169-1189, 2009.
- [15] P. C. Georgel, "Résines Epoxydes Renforcées Avec Des Fibres Naturelles," in *Département De Génie Chimique: Université Laval*, 2009.
- [16] E. S. Medeiros, L. H. C. Mattoso, P. A. Sreekumar, and K. Joseph, "Chapter 11: Role of interface in lignocellulosic fiber reinforced polymer composites," in *Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, 2009.
- [17] I. Van de Weyenberg, T. Chi Truong, B. Vangrimde, and I. Verpoest, "Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, pp. 1368-1376, 2006.
- [18] L. Y. Mwaikambo and M. P. Ansell, "The effect of chemical treatment on the properties of hemp, sisal, jute and kapok for composite reinforcement," *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, vol. 272, pp. 108–116, 1999.
- [19] D. F. Maschinenwesen, "Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices," 2006.
- [20] A. K. Bledzki and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 24, pp. 221–274, 1999.
- [21] M. J. John and R. D. Anandjiwala, "Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites," *Polymer Composites*, pp. 187-207, 2008.
- [22] M. M. B. Bump, "The Effect Of Chemistry And Networ Structure On Morphological And Mechanical Properties Of Diepoxide Precursors And Poly(Hydroxyethers)," Université Virginia, 2001.
- [23] X. Li, L. G. Tabil, and S. Panigrahi, "Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review," *J Polym Environ*, vol. 15, pp. 25–33, 2007.
- [24] Y. Li, Y.-W. Mai, and L. Ye, "Sisal fibre and its composites: a review of recent developments," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 2037±2055, 2000.

- [25] K. L. Pickeringa, A. Abdallaa, C. Jia, A. G. McDonaldb, and R. A. Franich, "The effect of silane coupling agents on radiata pine fibre for use in thermoplastic matrix composites," *34*, vol. Composites: Part A, pp. 915–926, 2003.
- [26] A. Alawar, A. M. Hamed, and K. Al-Kaabi, "Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement," *Composites: Part B*, vol. 40, 2009.
- [27] S. A. Paul, A. Boudenne, L. Ibos, Y. Candau, K. Joseph, and S. Thomas, "Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials," *Composites: Part A*, vol. 39, pp. 1582–1588, 2008.
- [28] R. E. HERRERA, "Panneaux En Gypse Et Particules De Bois Renforcés Avec Du Ciment Portland," in *Sciences Du Bois Et De La Foret*: Université Laval, 2009.
- [29] N. Benmansour, "Etude des performances de produits renouvelables et locaux adaptés aux applications de l'isolation thermique dans le bâtiment," Université de Batna, 2001.
- [30] A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi, and A. Hammami, "Date Palm Fibers as Polymeric Matrix Reinforcement: Fiber Characterization," *Polymer Composites*, pp. 486-497, 2005.
- [31] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491–497, 2011.
- [32] J. Rout, M. Misra, S. S. Tripathy, S. K. Nayak, and A. K. Mohanty, "Surface Modification of Coir Fibers. II. Cu(II)- IO₄ Initiated Graft Copolymerization of Acrylonitrile onto Chemically Modified Coir Fibers," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 84, pp. 75–82, 2002.
- [33] E. J. Jules, "Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis diélectrique," L'école Nationale Supérieure D'arts et Métiers Paris, 2001.
- [34] K. Bourai, "Etude Du Comportement Thermique D'un Composite Bois-Polymère Pour Une Application en Rotomoulage," Université Laval, 2010.
- [35] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M. N. Belgacem, and A. Dufresne, "Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading," *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 1627–1639, 2007.

- [36] A. Arbelaiz, B. Fernández, J. A. Ramos, and I. Mondragon, "Thermal and crystallization studies of short flax fibre reinforced polypropylene matrix composites: Effect of treatments," *Thermochimica Acta*, vol. 440, pp. 111–121, 2006.
- [37] S. V. Joshia, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and S. Arora, "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?," *Composites: Part A*, vol. 35, pp. 371–376, 2004.
- [38] A. L. Leao, M. Idicula, N. Giacomini, and A. Baggio, "Chapitre 9: Thermosetting and Thermoplastic Composites Based On Natural Fibers: Processing, Properties Applications And Recyclability," in *Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, 2009.
- [39] Y. Lei, Q. Wu, F. Yao, and Y. Xu, "Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites," *Composites: Part A*, vol. 38, pp. 1664–1674, 2007.
- [40] H. Anuar and A. Zuraida, "Improvement in mechanical properties of reinforced thermoplastic elastomer composite with kenaf bast fibre," *Composites: Part B*, vol. 42, pp. 462–465, 2011.
- [41] A. Bendahou, Y. Habibi, H. Kaddami, and A. Dufresne, "Matériaux Composites à Base Des Fibres Lignocellulosiques et de Matrices Thermoplastiques (PP et PEBD)," *Revue Roumaine de Chimie*, vol. 54, pp. 557–563, 2009.
- [42] T. Behzad and M. Sain, "Measurement and Prediction of Thermal Conductivity for Hemp Fiber Reinforced Composites," *Polymer Engineering And Science*, pp. 977-983, 2007.
- [43] M. Mounika, K. Ramaniah, A. V. R. Prasad, K. M. Rao, and K. H. C. Reddy, "Thermal Conductivity Characterization of Bamboo Fiber Reinforced Polyester Composite," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 3, pp. 1109-1116, 2012.
- [44] M. Idicula, A. Boudenne, L. Umadevi, L. Ibos, Y. Candau, and S. Thomas, "Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites," *Composites Science and Technology*, vol. 66, pp. 2719–2725, 2006.
- [45] O. L. S. Alsina, L. H. d. Carvalho, F. G. R. Filho, and J. R. M. d'Almeida, "Thermal properties of hybrid lignocellulosic fabric-reinforced polyester matrix composites," *Polymer Testing*, vol. 24, pp. 81–85, 2005.
- [46] M. A. AlMaadeed, Z. Nogellova, M. Micusik, I. Novak, and I. Krupa, "Mechanical, sorption and adhesive properties of composites based on low density polyethylene filled with date palm wood powder," *Materials and Design*, vol. 53, pp. 29–37, 2014.

- [47] M. Tajvidi and G. Ebrahimi, "Water Uptake and Mechanical Characteristics of Natural Filler–Polypropylene Composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 88, pp. 941–946, 2003.
- [48] S. K. Najafi, M. Tajvidi, and M. Chaharmahli, "Long-Term Water Uptake Behavior of Lignocellulosic-High Density Polyethylene Composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 102, pp. 3907–3911, 2006.
- [49] J. Wang, J. K. Carson, 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.
- [50] R. L. Gorring and S. W. Churchill, "Thermal conductivity of heterogeneous materials," *Chemical Engineering Progress*, vol. 57, pp. 53-59, 1961.
- [51] R. C. Progelhof, J. L. Throne, and R. R. Ruetsch, "Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite Systems," *Polymer Engineering and Science*, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [52] K. Wattanakul, H. Manuspiya, and N. Yanumet, "Thermal conductivity and mechanical properties of BN-filled epoxy composite: effects of filler content, mixing conditions, and BN agglomerate size," *Journal of Composite Materials*, vol. 45, pp. 1967–1980, 2010.
- [53] M. Karkri, A. Boudenne, L. Ibos, B. Garnier, and Y. Candau, "Numerical and experimental study of thermophysical properties of spheres composite materials," *High Temperatures-High Pressures*, pp. 1-24, 2011.
- [54] D. M. Bigg, "Thermal Conductivity of heterophase Polymer Compositions," *Advances in Polymer Science*, vol. 119, pp. 1-30, 1995.
- [55] D. P. H. Hasselman and al, *J. Compos. Mater.*, vol. 1, pp. 508, 1987.
- [56] Y. K. Godovsky and V. P. Privalko, "Thermal and Electrical Conductivity of Polymer Materials," *Springer- Verlag: Berlin*, 1995.
- [57] A. Boudenne, L. Ibos, and Y. Candau, *Handbook of Multiphase Polymer Systems*, ed. by A. Boudenne, L. Ibos, Y. Candau and S. Thomas (John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2011) ed.
- [58] J. Flourey, J. Carson, and Q. T. Pham, "Modeling Thermal Conductivity in Heterogeneous Media with finite Element Method," *Food Bioprocess Technol*, pp. 161-170, 2007.

- [59] J. K. Carson, S. J. Lovatt, D. J. Tanner, and A. C. Cleland, "Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 48, pp. 2150-2158, 2005.
- [60] A. Boudenne, "Etude Expérimentale et Théorique des Propriétés Thermophysiques de Matériaux Composites à Matrice Polymère," Université Paris XII Val de Marne, 2003.
- [61] H. Hatta and M. Taya, "Effective thermal conductivity of a misoriented short fiber composite," *J. Appl. Phys*, vol. 58, pp. 2478-2486, 1985.
- [62] I. Krupa, V. Cecen, R. Tlili, A. Boudenne, and L. Ibos., "Thermophysical properties of ethylene-vinylacetate copolymer (EVA) filled with wollastonite fibers coated by silver," *Eur Polym J*, vol. 44, pp. 3817-826, 2008.

Chapitre II :
Caractérisation
thermophysique des
composites
polymère/fibres naturelles

I. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence la démarche expérimentale utilisée pour l'élaboration et la caractérisation thermophysique des matériaux composites. On présente également la méthode suivie pour l'obtention des fibres de bois de palmier dattier.

Dans la première partie de ce chapitre nous présentons les différents matériaux utilisés pour l'élaboration des matériaux composites.

La deuxième partie de ce travail est consacrée à la présentation d'une étude granulométrique des fibres de bois de palmier dattier.

La méthode de mise en œuvre des matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres de bois de palmier dattier sera présentée dans la troisième partie de ce chapitre.

Les différentes méthodes expérimentales utilisées pour étudier le comportement des composites de résine polymère renforcée avec des fibres naturelles par analyse microscopique, étude de l'absorption d'eau des échantillons et la méthode de mesure de la conductivité thermique des composites seront présentées dans la dernière partie de ce chapitre.

II. Matériaux utilisés

II.1 Résine

La résine utilisée dans ce projet est une colle blanche vinylique (Pertacolle) de provenance de CONCORDAL SPA (Bir-Mourad-Raïs, Alger). La colle blanche vinylique est un polymère thermodurcissable. Ce polymère est non inflammable, utilisable à des températures supérieures à 12°C. Il est utilisable pour le bois, le papier, le carton etc. Sa masse volumique est 1026.64 Kg/m³.

II.2 Fibres de bois de palmier dattier (FBPD)

Les fibres naturelles utilisées dans cette étude sont des fibres de bois de palmier dattier. Le palmier dattier est relativement léger et ne contient pas de résidus résineux. Ce bois est récolté des oasis de Laghrou (Biskra, Algérie). Les différentes parties du bois utilisées dans cette étude sont le pétiole, la grappe et le rachis (figure II.1). Selon les études expérimentales effectuées par Agoudjil *et al* [1] sur le palmier dattier, les différentes parties utilisées dans ce travail sont renouvelable et abondant en Algérie.

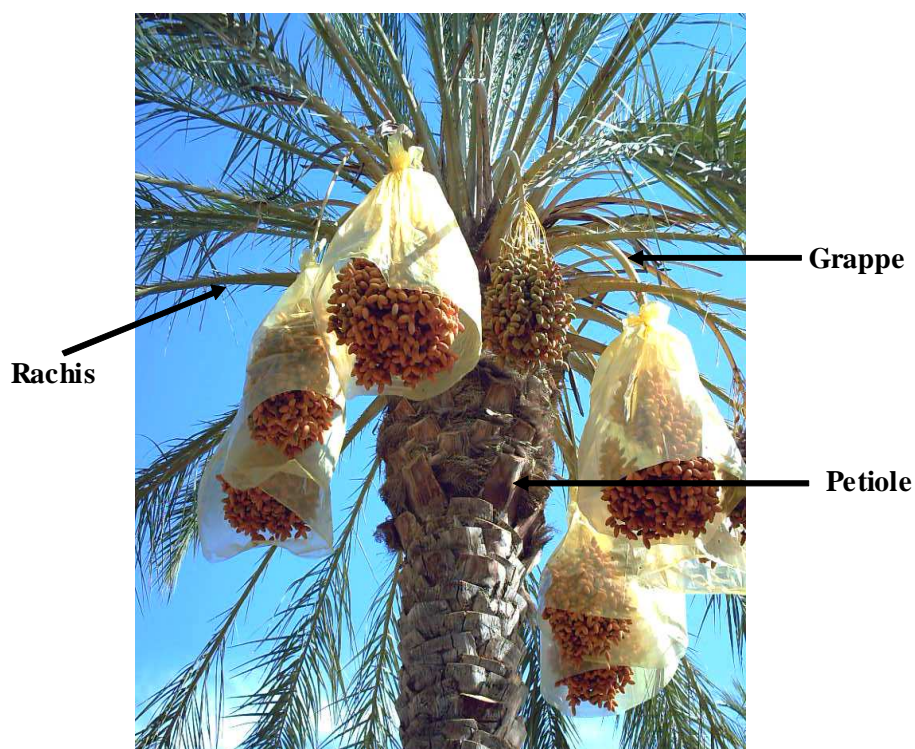


Figure II.1: *Différentes parties du bois de palmier dattier*

III. Broyage mécanique

Le broyage mécanique est une opération qui consiste à diviser un solide et réduire la taille des particules et des grains de différents types de matériaux.

Le bois utilisé dans notre étude a été séché, puis broyé afin d'obtenir des fibres de petites dimensions.

La figure II.2 présente le broyeur utilisé lors de l'opération de broyage du bois de palmier dattier.



Figure II.2: *Procédé de broyage du bois*

La figure II.3 montre les différentes parties obtenues après le broyage :

- Echantillon A : les particules de taille fine.
- Echantillon B : les particules de taille moyenne.
- Echantillon C : les particules de taille grosse.



Figure II.3 : *Échantillons de bois de palmier dattier à différentes tailles*

IV. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer les différents diamètres des grains qui constituent les échantillons. De ce fait, l'analyse consiste à séparer et à classer les

grains de bois selon leurs diamètres à l'aide d'une série de tamis suivante en (mm): 2.5; 3.15; 4.5; 6.3; 8; 10; 12.5; 16; 20; 25; 31.5. Les résultats du tamisage sont présentés dans le tableau II.1:

Tableau II.1: Résultats des tamisât cumulés de deux échantillons de bois

Tamis (mm)	Tamisât cumulés (%)	
	Echantillons	
	Gros	Fins
31.50	100.00	100.00
25.00	100.00	100.00
20.00	100.00	100.00
16.00	99.05	100.00
12.50	98.42	100.00
10.00	94.17	100.00
08.00	92.14	100.00
06.300	88.29	100.00
05.00	82.09	100.00
04.00	71.84	100.00
03.15	64.83	99.16
02.15	56.02	98.55

La figure II.4 montre la distribution granulométrique des fibres de bois de palmier dattier.

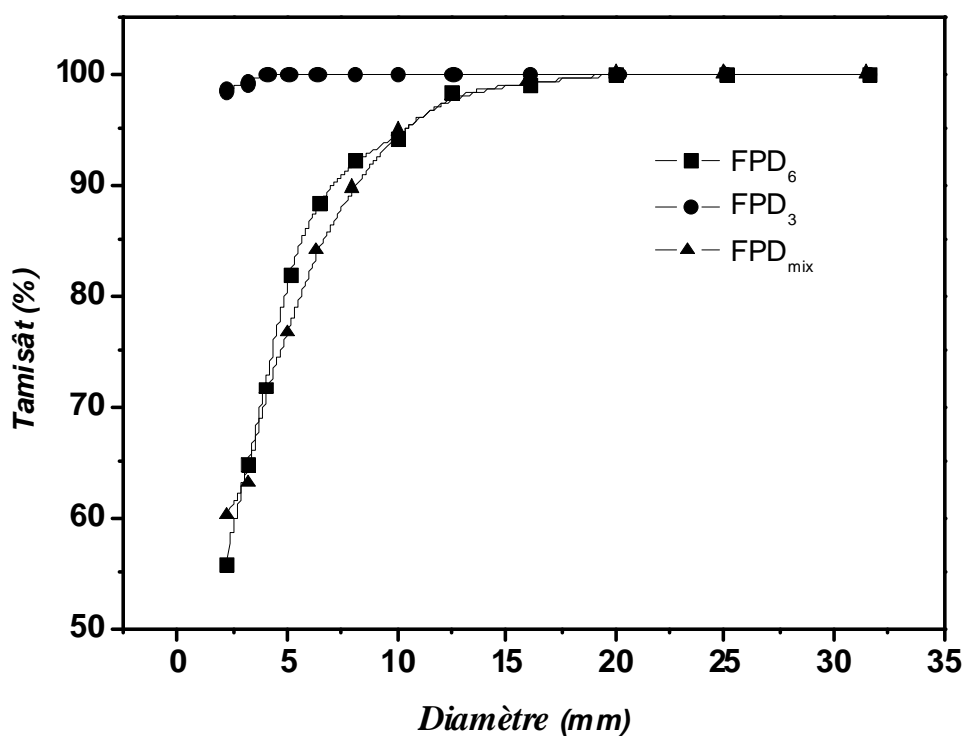


Figure II.4 : Distribution granulométrique des fibres de bois de palmier dattier

L'analyse granulométrique nous a permis de déduire les points suivants:

- Les trois courbes présentent une continuité et une granulométrie serrée.
- Pour l'échantillon de grains fins, seulement 0.84% de fibres retenus par le tamis d'ouverture de 3.15 mm et 1.45% par le tamis de 2.5 mm, donc les particules sont très fines.
- Pour l'échantillon de gros grains, la plupart des grains sont situés entre les tamis d'ouverture de 2.5 et 16 mm. La plus grande quantité des fibres retenue se situe entre les tamis de 2.5 et 6.3 mm.

Dans cette étude, nous avons utilisé les fibres de palmier dattier de taille fine.

V. Préparation des composites

V.1 Calcul des masses des composants

Pour calculer les masses de la résine et des fibres du bois de palmier dattier, on utilise la loi du mélange tel que :

$$m_c = m_r + m_f \quad (1)$$

Avec

$$m_{resine} = \rho_{resine} \cdot V \cdot \varphi_{resine} \quad (2)$$

$$m_f = \rho_f \cdot V \cdot \varphi_f \quad (3)$$

Où m_{resine} , m_f et m_c sont respectivement les masses de la résine, des fibres et du composite; ρ_{resine} et ρ_f sont respectivement les masses volumiques de la résine et des fibres; φ_{resine} et φ_f sont respectivement les concentrations volumiques de la résine et des fibres, tel que:

$$\varphi_{resine} = 1 - \varphi_f \quad (4)$$

V: volume de l'échantillon.

La masse volumique de la colle blanche est égale à 1026.64 Kg/m³, celle des fibres de bois de palmier dattier est égale à 387.85 Kg/m³.

Les masses de la résine et des fibres calculées sont regroupées dans le tableau II.2

Tableau II.2: *Masses de la résine et des fibres*

Concentration volumique des fibres (%)	Masse de la colle blanche	Masse des fibres de bois de palmier dattier
	(Kg)	(Kg)
35	0.300	0.0611
40	0.277	0.0698
45	0.254	0.0785
50	0.231	0.0873
55	0.210	0.0960
60	0.185	0.1047

V.2 Mise en œuvre des échantillons

Pour la mise en œuvre de la résine colle blanche vinylique renforcée avec des fibres naturelles, il faut généralement sécher d'abord les fibres afin de minimiser le dégagement d'eau lors du mélange.

Le procédé de fabrication des échantillons comporte trois étapes:

1. Le mélange de la résine et des fibres de bois de palmier dattier: les fibres sont donc mélangées à la résine dans un bêcher.
2. Le moulage dans un moule parallélépipédique de 150 mm de longueur, 150 mm de largeur et 20 mm d'épaisseur. On verse le mélange de résine et fibres naturelles dans le moule jusqu'à ce qu'il soit rempli (figure II.5).

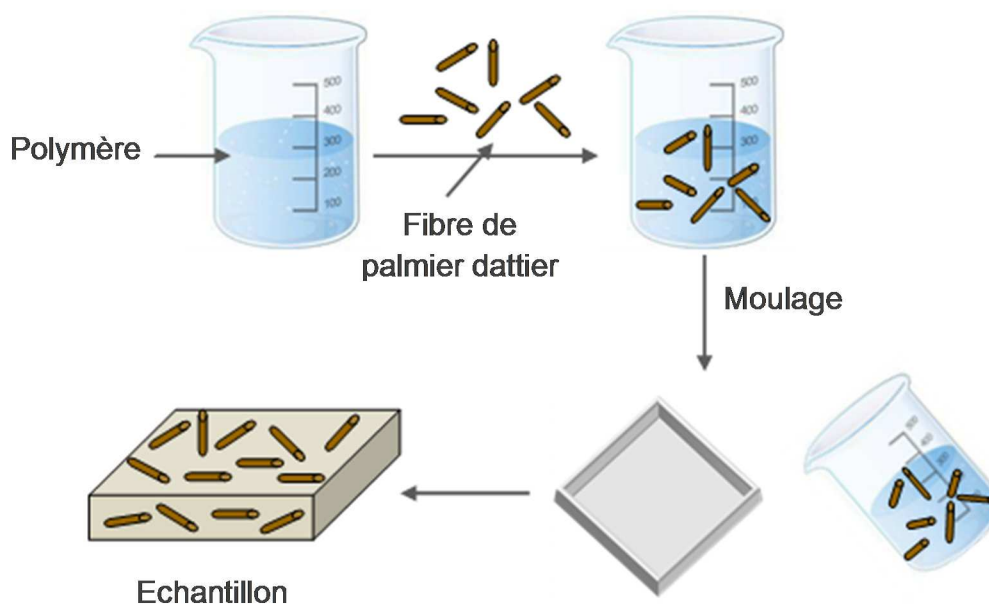


Figure II.5: *Schéma explicatif de la préparation des échantillons*

3. La cure du mélange s'est fait dans les conditions normales de température (25°C), de pression (1 atm) et d'humidité.



Figure II.6 : *Echantillon CB/FBP*

VI. Méthodes expérimentales

VI.1 Analyse morphologique

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Le principe du MEB consiste en un faisceau d'électron balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules qui sont analysées par différents détecteurs permettant ainsi de reconstruire une image virtuelle de l'objet observé par MEB en trois dimensions de la surface.

Les images prises ont été prises par un microscope électronique Merlin Zeiss (figure II.7).



Figure II.7 : Microscope à balayage ZEISS MERLIN [2]

Il est basé sur la nouvelle colonne GEMINI II et le système de détection complet ZEISS. La vitesse de collecte des images est encore améliorée avec des temps de transfert d'échantillon de moins de 60 secondes. La combinaison avec le logiciel ATLAS permet d'obtenir avec MERLIN une imagerie à haute résolution avec des tailles d'image pouvant aller jusqu'à 32k × 32k pixels [2].

VI.2 Absorption d'eau

Les essais d'absorption d'eau des composites ont été réalisés par immersion totale des échantillons dans l'eau à différents intervalles de temps jusqu'à la stabilisation du poids. Le pourcentage d'absorption d'eau des matériaux a été calculé par la différence de poids entre les échantillons immergés dans l'eau et les échantillons secs à l'aide de l'équation suivante :

$$M(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

Où :

$m(t)$: la masse de l'échantillon immergé dans l'eau à l'instant 't' et mesurée à l'air libre

m_s : la masse de l'échantillon sec

VI.3 Méthode de mesure de la conductivité thermique

Les principales méthodes de détermination des conductivités thermiques peuvent être classées en 2 groupes. Il y a ainsi les méthodes stationnaires et les méthodes transitoires. Dans les méthodes stationnaires, nous pouvons citer la méthode de la plaque chaude gardée dont un schéma est donné sur la figure II.8. C'est une technique de mesure très commune qui a fait l'objet de nombreux développements donnant lieu à plusieurs versions de la méthode.

Le dispositif de mesure (Figure II.8) est conçu de la manière suivante : deux échantillons identiques, de forme cylindrique ou parallélépipédique de faible épaisseur e , sont disposés de part et d'autre d'un élément chauffant (plaque chaude). Un anneau isolant est placé autour de la plaque chaude, afin de limiter les pertes radiales de chaleur. Les deux échantillons sont alors refroidis par une plaque froide, mise en contact avec leurs surfaces extérieures. L'ensemble est isolé thermiquement, pour limiter l'influence agitative du milieu extérieur [3].

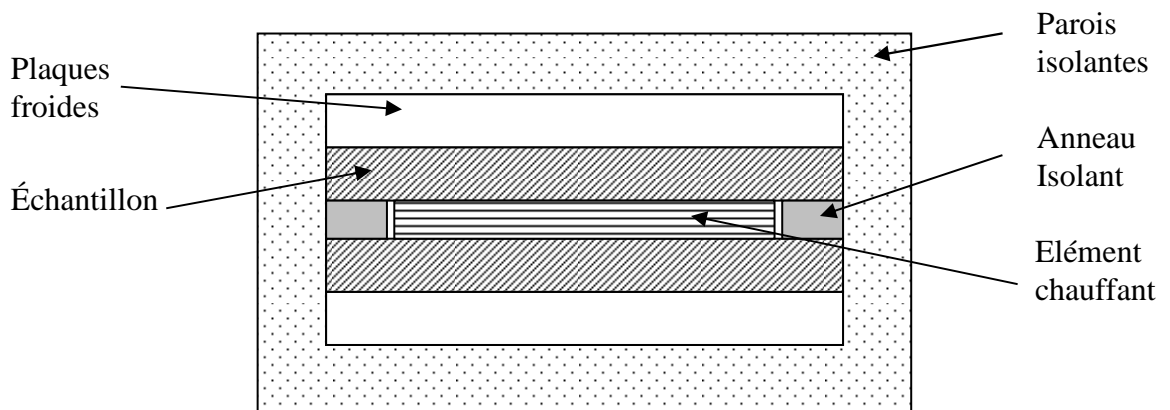


Figure II.8 : Principe de la méthode de la plaque chaude gardée

Le principe de cette méthode est relativement simple et s'appuie sur la loi de Fourier unidirectionnelle. On obtient la conductivité thermique, k , à partir de la relation :

$$k = \frac{q \cdot e}{S(T_1 - T_2)} \quad (6)$$

Où q : est le flux de chaleur dissipé par la source chaude, e : l'épaisseur de l'échantillon, S : la surface chauffée et, T_1 et T_2 : les températures des faces respectivement chaude et froide de l'échantillon.

On remarque dans l'équation (6) que la connaissance de l'épaisseur de l'échantillon, de l'écart de température entre ses faces ainsi que du flux qui est transmis permet la mesure directe de la conductivité thermique. Aucune donnée additionnelle (densité ou chaleur spécifique volumique) n'est nécessaire pour effectuer la mesure.

Il est préférable de dimensionner correctement l'épaisseur de l'échantillon, de telle sorte que les résistances thermiques de contact soient minimisées ; ceci ne veut pas dire qu'elles deviennent négligeables devant la résistance de conduction des échantillons (e/k). En effet, cette situation n'arrive que dans le cas de matériaux très bons conducteurs de la chaleur (métaux notamment) où les résistances de contact peuvent être négligées. Au contraire, une attention toute particulière du contact thermique doit être observée dans le cas d'échantillons moins conducteurs (comme les composites), notamment lorsque l'épaisseur de ces échantillons est relativement faible (2-4 mm). La résistance de contact aux interfaces des plaques avec l'échantillon a été négligée, ceci provoque des erreurs qui nécessitent l'application d'une couche intermédiaire de graisse conductrice de chaleur.

Les techniques en régime transitoire ont été élaborées afin de réduire le temps nécessaire pour l'obtention des données.

Une méthode en régime transitoire, très commune dans la caractérisation des composites est la méthode flash. Elle a été introduite par Parker en 1961. Le principe de cette méthode est très simple : la face avant de l'échantillon est soumise à une impulsion de flux de chaleur de durée très faible devant le temps caractéristique de la mesure. La mesure consiste à enregistrer l'augmentation de température de la face arrière ou avant de l'échantillon au cours du temps. Et, pour une impulsion de durée négligeable, de distribution homogène et avec des pertes thermiques négligeables, la température mesurée dépend uniquement du nombre de Fourier caractéristique de l'échantillon $Fo = a.t/L^2$, avec a : la diffusivité thermique, L : l'épaisseur et t : le temps. L'identification de ce nombre de Fourier permet de déterminer la conductivité thermique par le biais de la connaissance des valeurs de ρ et de C_p . Cette expérience,

simple en théorie, nécessite beaucoup de précautions afin de satisfaire aux hypothèses du modèle. De plus, l'impulsion thermique sur la face avant de l'échantillon provoque une augmentation considérable de la température, ce qui peut causer la dégradation du matériau polymère.

Les méthodes en régime transitoire présentées conviennent seulement pour des matériaux dont les propriétés sont peu dépendantes de la température. Des modèles plus élaborés ont été mis au point pour identifier une conductivité variable en utilisant une méthode inverse d'estimation de paramètres [3].

Comme procédé de mesure, nous avons finalement retenu la méthode de la plaque chaude gardée (PCG) car elle offre :

- (1) une meilleure précision de mesure (typiquement inférieure à 5%). Les sources d'erreurs et les biais sont plus importants dans les méthodes en régime transitoire.
- (2) des effets réduits des biais dus à l'hétérogénéité des composites. En effet, ce dispositif fonctionnant en régime permanent, on obtient un gradient de température identique dans toute l'épaisseur du matériau tandis qu'en régime transitoire les zones thermiquement affectées sont plus réduites, notamment afin de respecter les conditions aux limites dans le modèle utilisé et/ou limiter l'effet de l'environnement. Plus le volume de mesure est petit par rapport à la taille des inclusions plus la mesure de conductivité thermique sera biaisée.
- (3) une simplicité quant à la mise en place de l'instrumentation. La méthode de PCG est non invasive. En effet, les capteurs de température sont situés dans les plateaux de part et d'autre de l'échantillon et sont réutilisables après chaque essai.

VI.3.1 Dispositif expérimental pour la mesure de la conductivité thermique

La caractérisation de la conductivité thermique du composite présentée dans ce chapitre a été réalisée au sein du laboratoire de Thermocinétique de Nantes (UMR_C) sous la direction de Bertrand Garnier. Ce travail a été consacré essentiellement à faire des expériences pour la détermination de la conductivité thermique des composites à matrice polymère renforcée par des fibres de palmier dattier.

Le dispositif expérimental de la mesure de la conductivité thermique que l'on a utilisé représente une extension de la méthode de la plaque chaude gardée. L'avantage de la modification proposée est qu'elle ne nécessite qu'un seul échantillon lors de la mesure. Dans le montage symétrique précédent, deux échantillons sont nécessaires et l'instrumentation doit être doublée afin de tenir compte de leurs éventuels légers écarts de conductivité [3].

VI.3.1.1 Principe de la mesure

La détermination de la conductivité thermique nécessite une configuration dans laquelle il existe un gradient de température au sein du matériau. La configuration utilisée pour identifier la conductivité thermique consiste en un échantillon carré de 15 cm de côté et de quelques millimètres d'épaisseur (≤ 20 mm), placé entre les plateaux d'une presse de laboratoire. Les plateaux inférieur et supérieur jouent respectivement le rôle d'une source de chaleur et d'un puits de chaleur. La particularité de ce dispositif, qui constitue une amélioration de la plaque chaude gardée, réside dans l'utilisation d'une garde active placée en dessous de la chaufferette. Cette garde permet au flux de chaleur, dissipé par la chaufferette, de traverser entièrement l'échantillon. Lorsque le régime permanent est atteint, la distribution de température au sein du matériau est déduite de la loi de Fourier et la conductivité thermique, k , est calculée par l'équation (6) [3].

VI.3.1.2 Le dispositif expérimental

La figure II.9 présente le dispositif expérimental :

- L'élément chauffant est entouré d'une garde thermique¹ constituée d'un matériau isolant afin de limiter les pertes de chaleur transversales.
- L'échantillon est lui aussi entouré d'une garde thermique² pour réduire le taux de perte latérale du flux de chaleur.
- Le thermocouple situé en dessous de la chaufferette indique la température de la source chaude. Un programme de régulation permet de contrôler la puissance dissipée, de manière à obtenir au mieux l'égalité des températures

mesurées par les thermocouples situés de part et d'autre de la garde thermique isolante. Lorsque le régime stationnaire de notre dispositif de mesure est atteint (typiquement en moins de 30 minutes), cet écart de température est maintenu inférieur à 0.025°C (i.e. avec un écart entre les forces électromotrices des thermocouples de type K inférieure à $1\mu\text{V}$).

- Un système pneumatique avec vérin permet de contrôler la pression de contact (ajustable de 0 à 20 bars). De plus, un dispositif de guidage assure le parallélisme entre les plateaux situés de part et d'autre de l'échantillon.

Ces différents points techniques assurent une bonne reproductibilité de la mesure de conductivité. Les écarts de conductivité d'un échantillon mis en place à plusieurs reprises n'excèdent pas 2% [3].

- Position des thermocouples

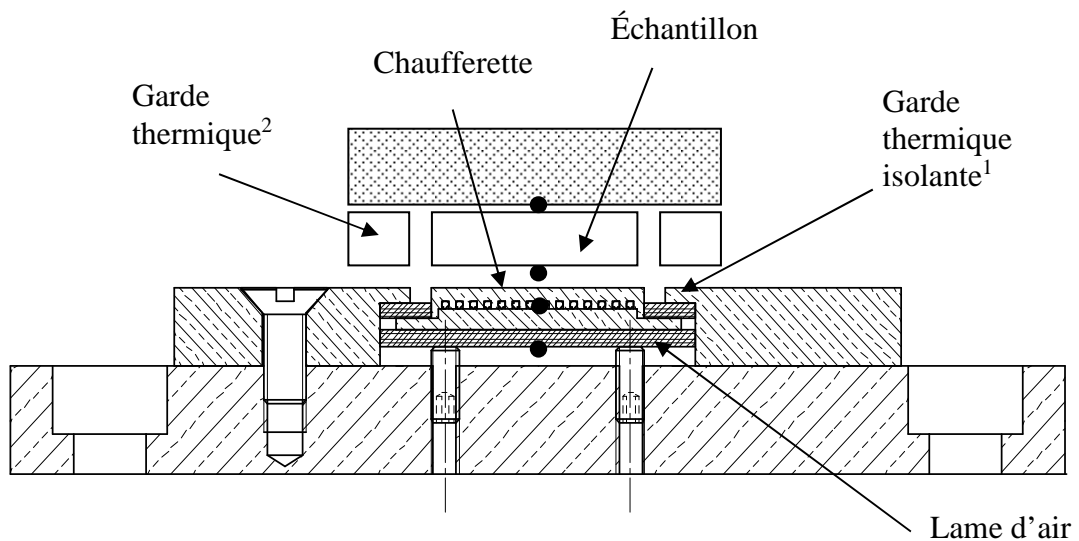


Figure II.9 : Cellule de mesure de la conductivité thermique

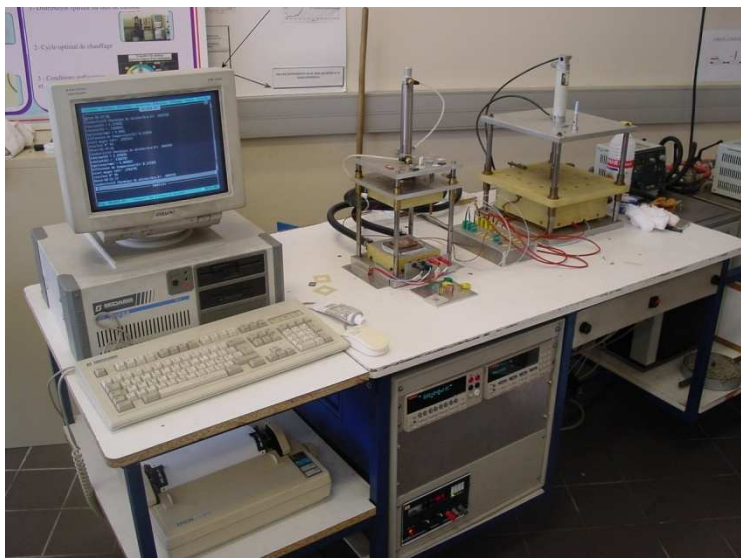


Figure II.10 : *Dispositif de mesure de conductivité thermique basé sur le principe de la plaque chaude gardée[3]*

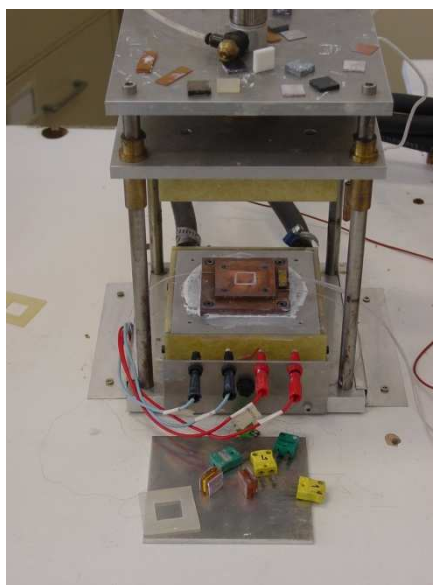


Figure II.11 : *Cellule de mesure de la conductivité thermique [3]*

VII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés la méthode d'élaboration des matériaux composites à matrice polymère renforcée avec des fibres de palmier dattier, ainsi que les appareils de mesure des propriétés des composites.

L'analyse granulométrique a permis la détermination des différents diamètres des grains qui constituent les échantillons.

L'analyse microscopique des composites à matrice polymère renforcée par des fibres de bois de palmier dattier avait pour but de déterminer la morphologie des composites.

Les différents tests effectués sur les échantillons ont pour but d'analyser l'absorption d'eau des composites en fonction du temps d'immersion ainsi que le comportement de la conductivité thermique en fonction de la concentration volumique des fibres.

Les résultats de l'absorption d'eau et de la conductivité thermique seront présentés et analysés dans le prochain chapitre.

VIII. Références

- [1] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois, "Renewable materials to reduce buildings heat loss: characterization of date palm wood," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [2] "Analyse d'image et caractérisation complète des échantillons biologiques," www.zeiss.fr (15/04/2015).
- [3] D. Thierry, "Etude théorique et expérimentale de la construction thermique dans des polymères à distribution aléatoire de charges conductrices fortement connectés- Application à la réalisation des composites à matrice thermoplastique, bons conducteurs de chaleur," in *Ecole Polytechnique: Université de Nantes*, 2002.

**Chapitre III: Etude
expérimentale du
comportement des
composites naturels**

I. Introduction

L'objectif du travail présenté dans ce chapitre est l'étude du comportement thermophysique du composite polymère/fibre de bois de palmier dattier. Les modèles de prédiction de la conductivité thermique ont été décrits dans le premier chapitre.

Dans la première partie de ce chapitre nous présentons l'analyse microscopique des échantillons afin de mieux visualiser la distribution et la surface des fibres.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de l'absorption d'eau des échantillons en fonction du temps d'immersion pour différentes concentrations volumiques des fibres.

La troisième partie comporte une étude des propriétés thermophysiques du composite CB/FPB. Les mesures de conductivité thermique sont présentées en fonction de la concentration des fibres. Les valeurs expérimentales de la conductivité thermique des composites sont comparées aux modèles de prédiction théoriques en fonction de la concentration des fibres. Nous nous sommes également intéressé à l'étude de la masse volumique de ces composites. Une corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique a été également réalisée.

Enfin, nous présentons dans la dernière partie une étude de la résistance thermique du composite CB/FPB en fonction de l'épaisseur, ainsi qu'une présentation de la variation du coefficient de transmission thermique en fonction de l'épaisseur du composite.

II. Analyse morphologique

L'étude du comportement des composites de résine polymère renforcée avec des fibres naturelles passent par l'analyse microscopique des échantillons. Les figures obtenues par microscopie électronique à balayage illustrent d'une façon générale la morphologie de la surface des fibres.

Afin de mieux visualiser la distribution des fibres dans la matrice, nous allons présenter un agrandissement faible ($\times 30$) de la structure des échantillons avec une concentration volumique des fibres de 30% (figure 1-3).

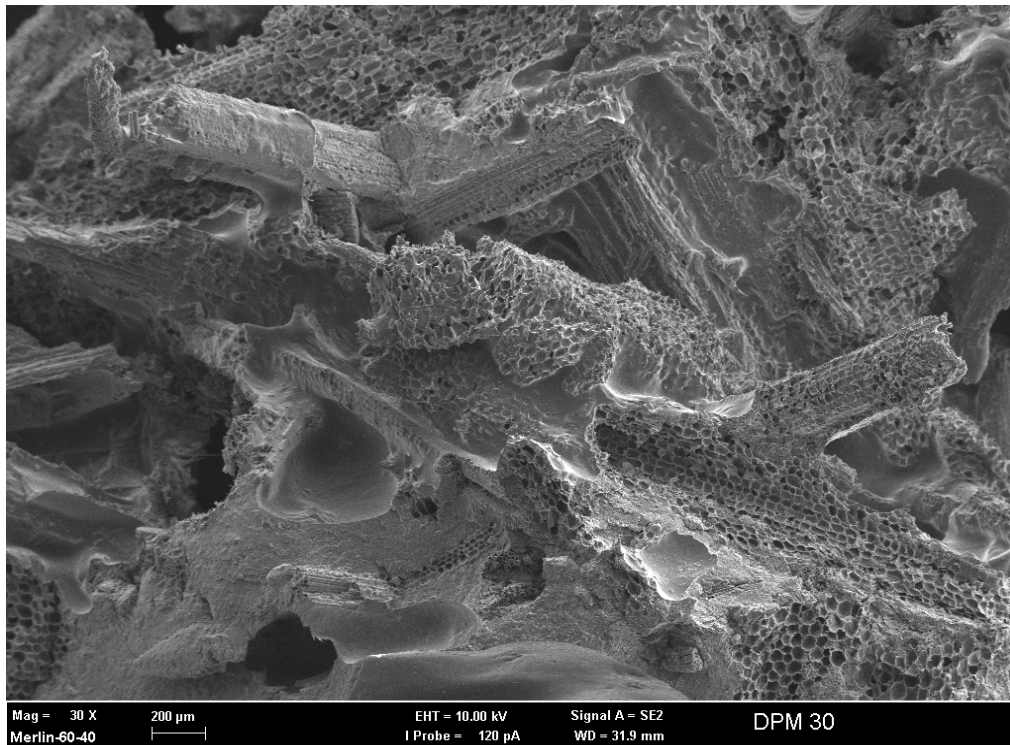


Figure III.1: Images MEB de l'échantillon contenant 30% de fibres avec un agrandissement $\times 30$

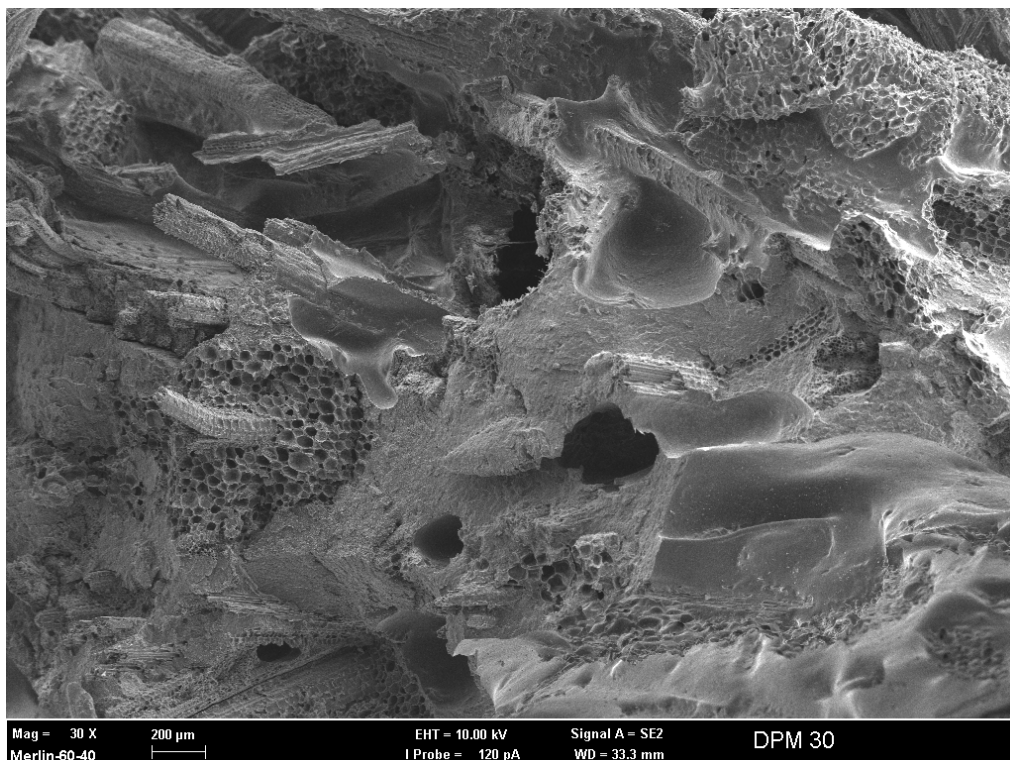


Figure III.2: Images MEB de la distribution des fibres dans la matrice avec un agrandissement $\times 30$

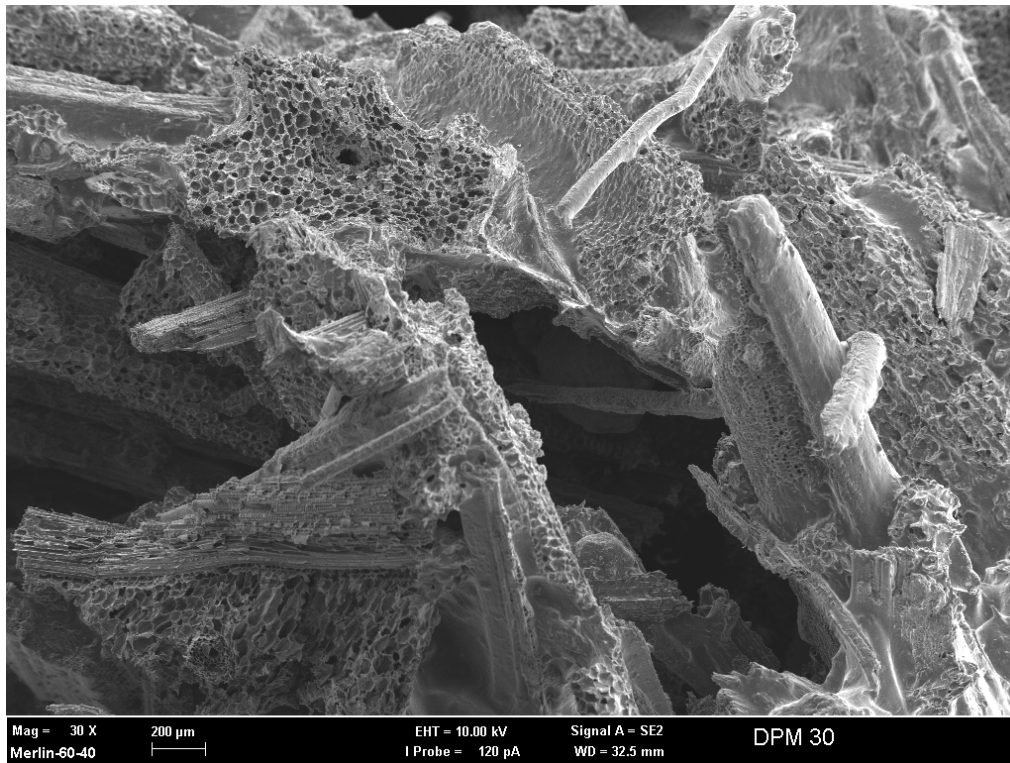


Figure III.3: Images MEB de la surface des fibres avec un agrandissement $\times 30$

Les figures III.1, 2 et 3 montrent la surface des fibres du palmier dattier incorporées dans la matrice. On peut voir clairement que les fibres du palmier dattier sont couvertes par la résine. En outre, on peut voir à partir de ces figures que la surface des fibres est irrégulière avec plusieurs filaments et cellules. Ceci permet l'adhésion entre la fibre et la résine.

D'autre part, pour mieux voir la structure des fibres, un agrandissement de ($\times 100$) a été utilisé pour la même concentration (figure III.4). L'agrandissement des images MEB de l'échantillon montre que les fibres du palmier dattier ont une structure poreuse. On peut remarquer aussi que les échantillons sont constitués de fibre multicellulaire contenant chacune un vide central (lumen).

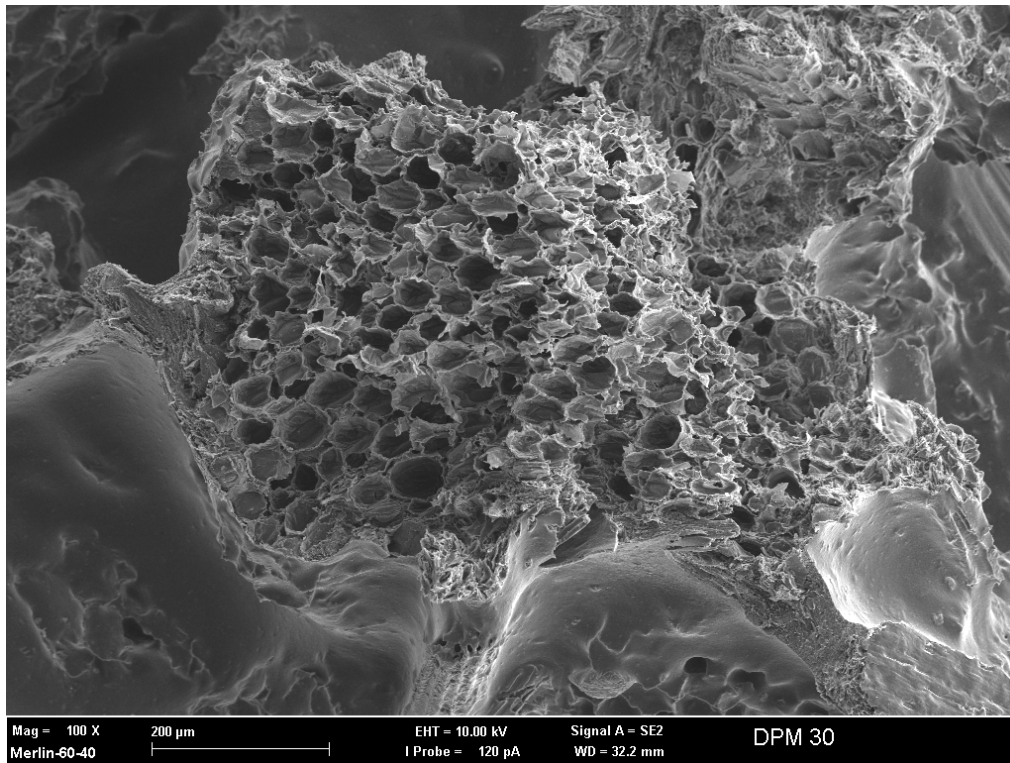


Figure III.4: Image MEB de l'échantillon contenant 30% de fibre avec un agrandissement $\times 100$

En effet, l'augmentation du vide dans les composites engendre une faible densité et une faible conductivité thermique. Ceci explique la forte absorption d'eau des matériaux composites et la diminution de la conductivité thermique en augmentant la concentration des fibres dans la matrice.

III. Absorption d'eau

La figure III.5 montre l'évolution de l'absorption d'eau des échantillons à base de fibres de bois de palmier dattier en fonction du temps d'immersion pour une durée de 200 seconds.

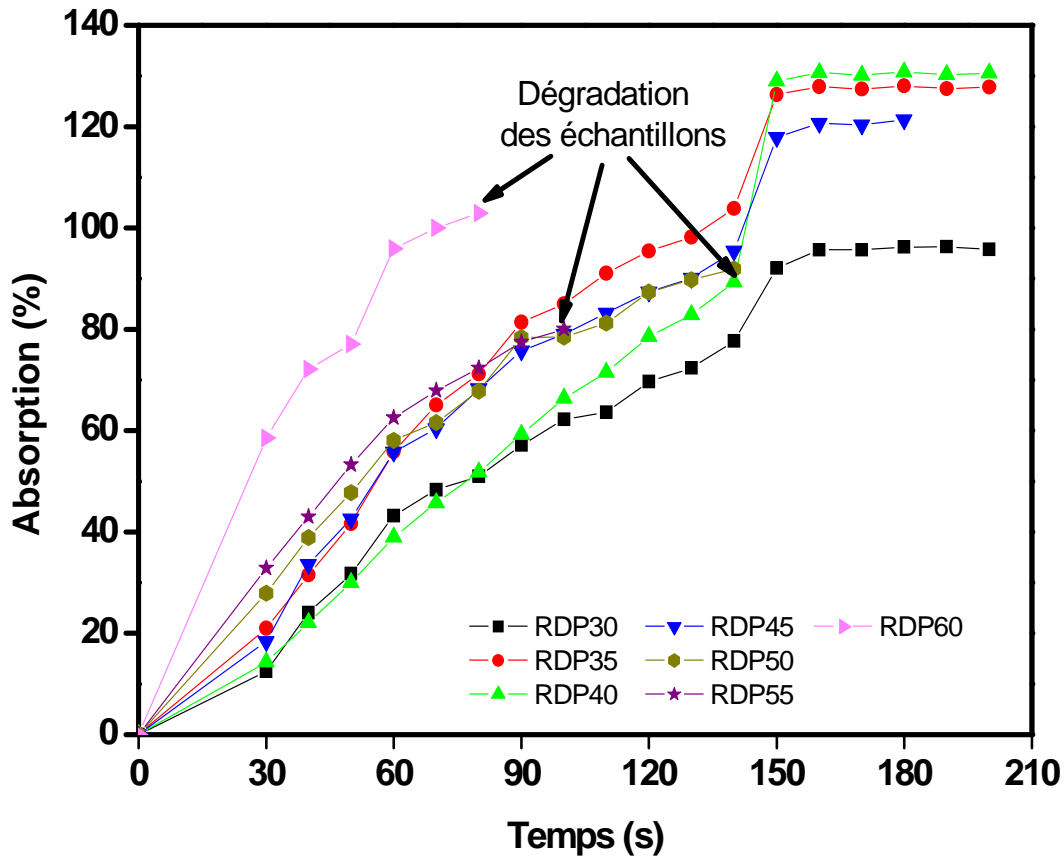


Figure III.5: Absorption d'eau des composites en fonction du temps d'immersion pour différentes concentrations

On remarque d'après cette figure que l'augmentation de la concentration des fibres dans les composites induit un temps de saturation plus élevé.

On note aussi que pour une concentration de fibres inférieure à 50%, l'absorption d'eau la plus importante survient après 150 seconds d'immersion. On note une absorption d'eau de 92%, 129%, 138% et 126% pour des concentrations de fibres de 30%, 35%, 40% et 45% respectivement. On peut voir que l'équilibre a été atteint au bout de 160 s pour tous les composites. Il est clairement montré que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de la concentration des fibres. Le même résultat a été observé par Almaaded *et al* [1] concernant l'influence de l'absorption d'eau sur des composites à base de polyéthylène renforcé par des poudres de bois de palmier dattier. Ils ont révélé une forte tendance du composite pour l'absorption d'eau. Cette tendance augmente avec l'augmentation de la concentration des fibres. Plusieurs travaux ont été rapportés sur l'absorption d'eau pour les composites à matrice polymère renforcée par des fibres naturelles [2-8]. L'influence de la concentration des fibres, des méthodes de fabrication et de la température ont été étudiées par Sreekumar *et al* [9]. Les

résultats obtenus montrent que l'augmentation de la concentration des fibres dans le composite conduit à une augmentation de l'absorption d'eau quelque soit la méthode de fabrication du composite. Dans un autre travail, Uma Devi *et al* [10] ont étudié l'influence de la concentration des fibres sur l'absorption de l'eau du composite polyester renforcé par des fibres de feuilles d'ananas. Ils ont montré que le degré d'absorption d'eau du composite augmente avec l'augmentation de la concentration des fibres. Dans un autre travail, Akil *et al*[11] ont étudié la durabilité des fibres de kenaf incorporées dans une matrice époxy. Ils ont conclu que l'exposition de ces composites à l'eau augmente la teneur en eau et l'humidité.

On note aussi une dégradation des échantillons pour une concentration de fibres de 50%, 55% et 60% au bout de 140 s, 100 s et 80 s respectivement. Ceci peut être expliqué par la nature hydrophile du bois qui implique une adhésion interfaciale faible avec la matrice polymère.

Dans un autre travail, Osman *et al*[12] ont étudié l'absorption d'eau des composites polyesters renforcés par des fibres de kenaf et son effet sur les propriétés mécaniques du composites. Les échantillons étudiés sont placés dans l'eau à des températures de 25°C et 50°C. Les résultats obtenus (figure III.6) ont montré une forte tendance du composite pour l'absorption d'eau. Il a été aussi montré que l'absorption d'eau du composite augmente avec l'augmentation du temps d'immersion.

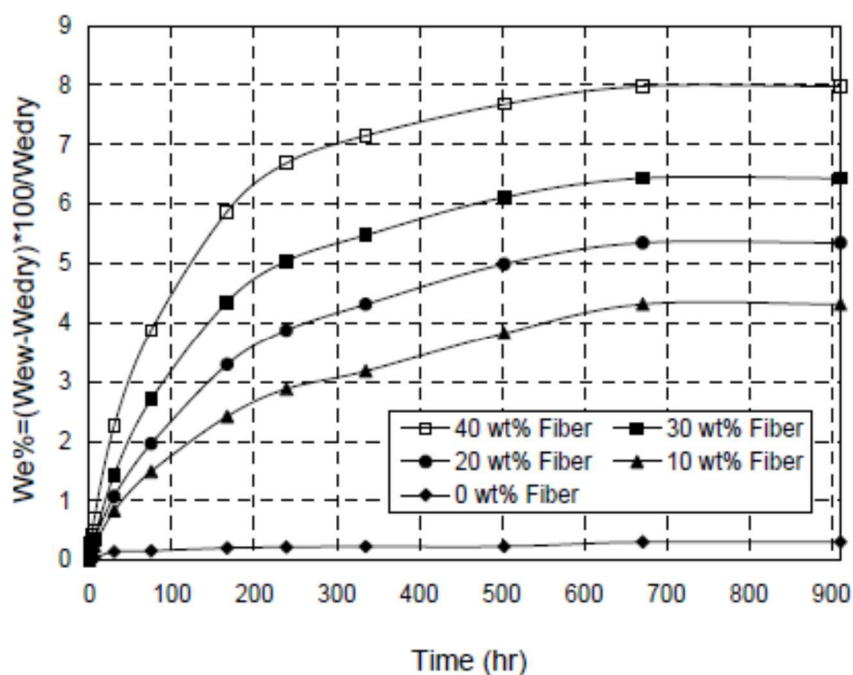


Figure III.6 : Absorption d'eau du composite Kenaf/Polyester à 25°C[12]

Le même comportement a été montré par Seki *et al* [13] pour les composites jute/polyester. La figure III.7 montre les résultats obtenus. Cette figure montre que plus le temps d'immersion augmente, plus le composite absorbe de l'eau.

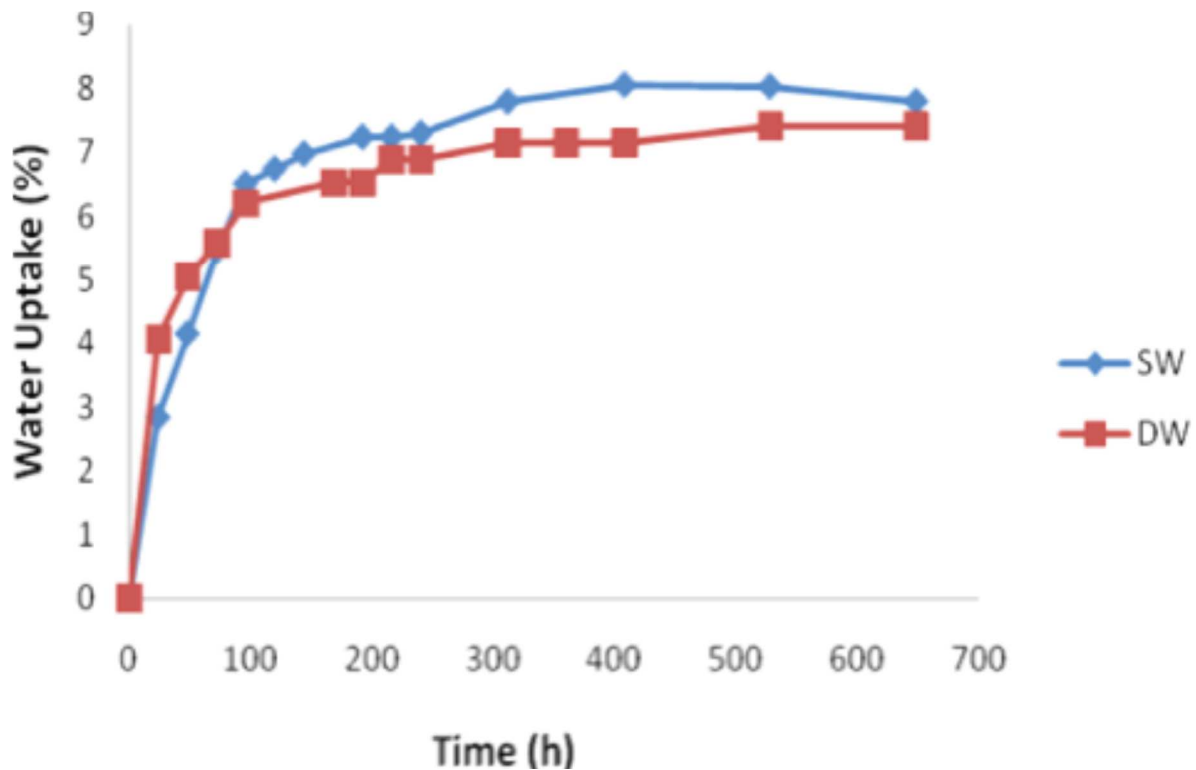


Figure III.7 : Absorption d'eau du composite jute/polyester en fonction du temps d'immersion[13]

Sreekala *et al* [14] ont étudié aussi l'absorption d'eau des composites à matrice formaldéhyde renforcée par des fibres de palmier à huile. Les échantillons ont été incorporés dans l'eau à différentes températures pendant 13 min. Il a été noté que la masse des échantillons augmente avec l'augmentation du temps d'immersion. Ils ont aussi montré qu'au bout de 7 min l'équilibre a été atteint. D'autre part, il est clairement montré que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation du temps d'immersion.

On remarque aussi que la vitesse d'absorption de l'eau augmente durant le premier contact du composite avec l'eau. Ainsi, le temps de saturation des composites est lié au temps de remplissage des vides des fibres de palmier dattier. En outre, l'augmentation de l'absorption d'eau des composites est due à un gonflement des fibres, ce qui conduit à la formation de fissure dans la matrice et qui agit comme voie pour les molécules d'eau de se diffuser dans le matériau composite.

IV. Propriétés thermophysiques

L'interaction de l'énergie thermique avec les atomes constituant un matériau permet de déterminer certaines propriétés physiques de la matière. Les propriétés décrivant cette interaction sont souvent appelées propriétés thermophysiques qui incluent la capacité thermique, diffusivité thermique, la conductivité thermique, etc. Une caractérisation complète des propriétés thermiques des matériaux nécessite la détermination de la conductivité thermique. La conductivité thermique est une propriété importante des matériaux. Elle détermine souvent le comportement d'un matériau en vue d'une application thermique déterminé [15].

IV.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique du composite CB/FBP est caractérisée avec la méthode de la plaque chaude gardée. Dans le tableau III.1 sont présentés les résultats des mesures de la conductivité thermique en fonction de la concentration des fibres dans le composite.

Tableau III.1: Propriétés thermophysiques du composite CB/FBP

Concentration (%)	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (kg/m ³)
0	0.480	1026.64
30	0.276	401.42
35	0.197	388.28
40	0.164	365.36
45	0.146	352.27
50	0.128	340.76
55	0.120	340.71
60	0.098	314.96

Dans la figure III.8, est présentée la variation de la conductivité thermique des composites. Une diminution de la conductivité thermique est observée en fonction de la concentration des fibres.

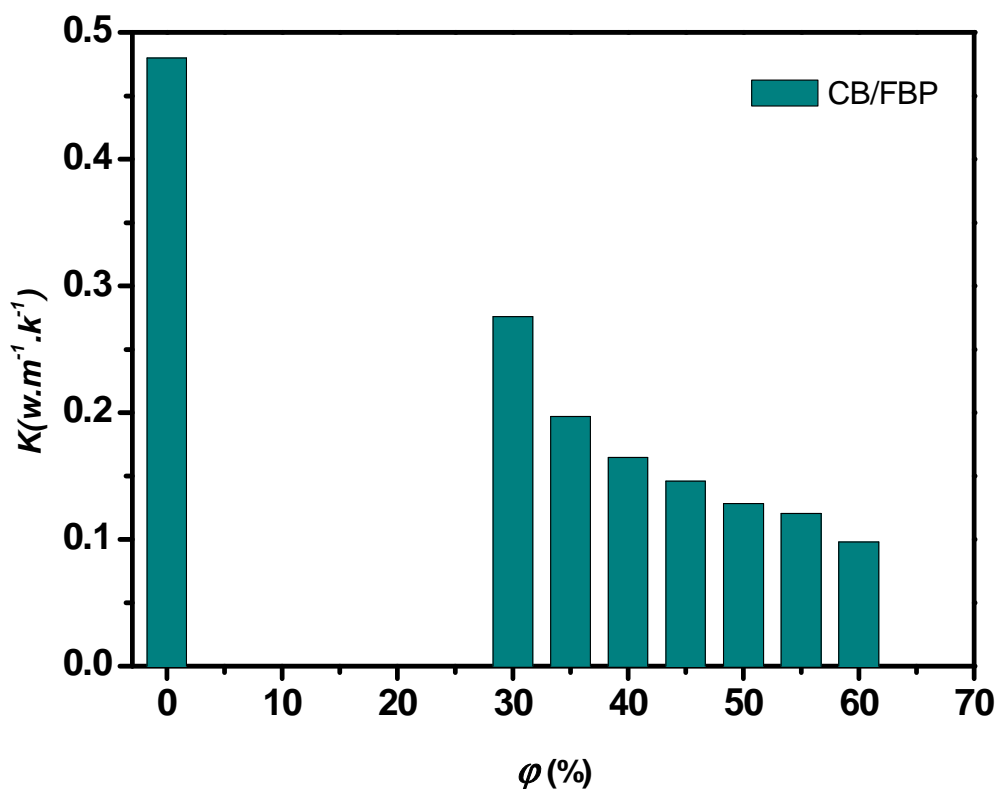


Figure III.8: Variation de la conductivité thermique du composite en fonction de la concentration volumique des fibres

Cependant, on note que les composites chargés avec les FBPD possèdent une conductivité thermique inférieure à celle de la matrice. Cette diminution est plus marquée pour les fortes concentrations. On note aussi que pour une concentration de 30% de fibres, la conductivité thermique diminue de $0.480 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $0.276 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. De même, ces résultats sont en accord avec d'autres résultats expérimentaux rapportés dans la littérature. Sherey *et al* [16] ont étudié les propriétés thermophysiques du composite polypropylène chargé par des fibres de banane. Dans cette étude, une mesure simultanée de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique du composite polypropylène/fibres de banane a été réalisée à une température ambiante. Les effets du traitement chimique des fibres de banane sur la conductivité et la diffusivité thermique des composite ont été aussi étudiés.

Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la concentration des fibres de banane dans le composite conduit à une diminution significative de la conductivité et de la diffusivité thermique du composite.

Dans un autre travail, Idicula *et al* [17] ont aussi étudié les propriétés thermophysiques du composite polyester renforcé par des fibres naturelles. Dans ce travail les propriétés

thermophysiques du composite ont été étudiées en fonction de la concentration des fibres et de la modification de la surface des fibres.

Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la concentration des fibres de banane et de sisal dans le composite conduit à une diminution significative de la conductivité thermique du composite.

Un même résultat a été obtenu par Kedar *et al* [18]. Ils ont étudié les propriétés thermophysiques du composite phenolformaldehyde/ fibre de palmier à huile. La conductivité thermique du composite a été étudié en fonction de la concentration des fibres et de la température. Les résultats obtenus sont montrés dans la figure III.9. Cette figure montre que la conductivité thermique du composite diminue en fonction de l'augmentation de la concentration des fibres.

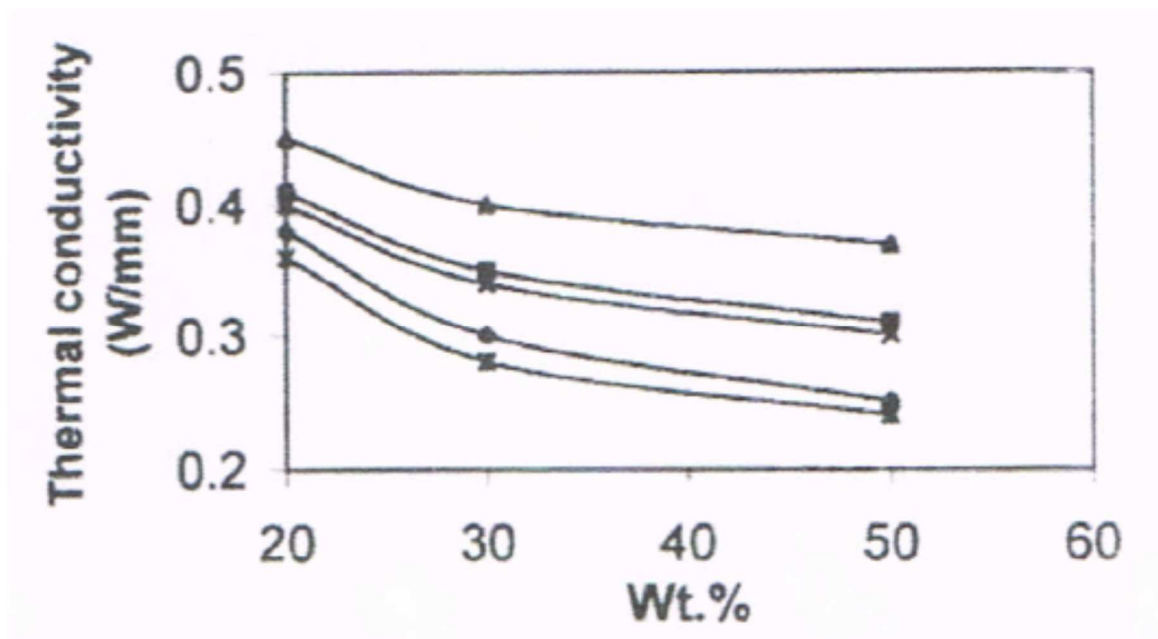


Figure III.9 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la concentration des fibres [18]

Liu *et al* [19] ont aussi étudié expérimentalement la conductivité thermique de composite à base de fibre d'abacca en fonction de la concentration volumique des fibres. La figure III.10 montre les résultats obtenus. Il est clairement montré que plus la concentration volumique des fibres augmente plus la conductivité thermique du composite diminue.

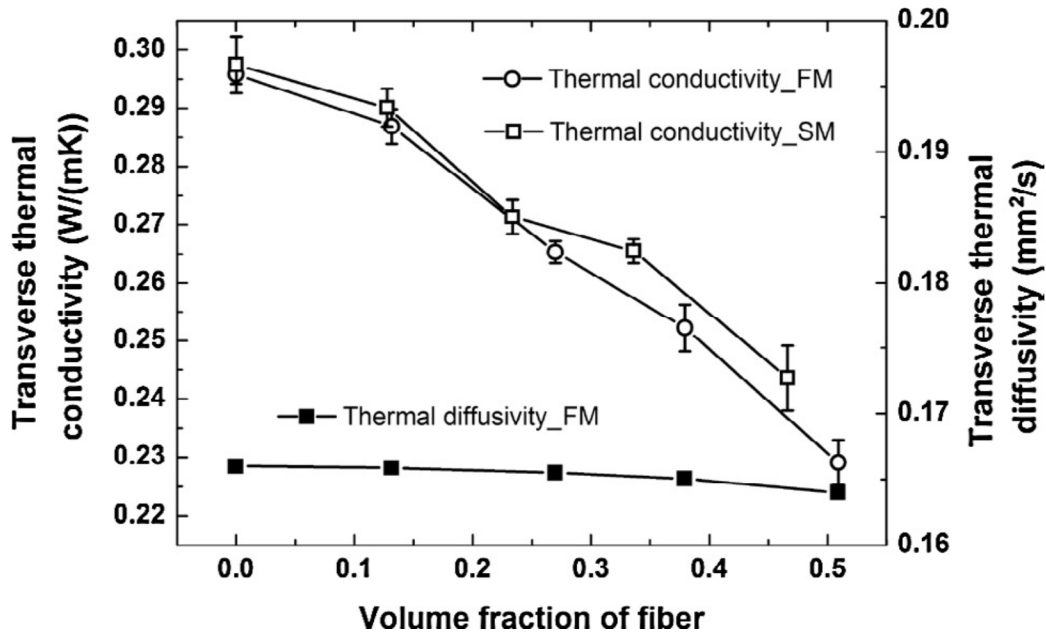


Figure III.10 : Conductivité thermique en fonction de la concentration volumique[19]

IV.2 Comparaison entre les résultats expérimentaux et les modèles théoriques

Dans cette partie, nous allons étudier l'évolution de la conductivité thermique du composite CB/FBP en fonction de la concentration volumique des fibres avec quelques modèles de prédictions.

Les modèles de prédiction utilisés font intervenir la conductivité thermique de la matrice, la conductivité des fibres, la concentration volumique des fibres et le paramètre qui représente la dimension du système et définit la forme du renfort.

Les variations de la conductivité thermique estimées par les différents modèles sont comparées aux mesures expérimentales dans la figure III.11 en fonction de la concentration volumique des fibres de bois de palmier dattier. On remarque que pour une concentration de fibres de 30%, les modèles donnent des valeurs proches les unes des autres. Par ailleurs, pour les fortes concentrations, ils donnent des valeurs moins importantes que celles obtenues expérimentalement. Les modèles théoriques utilisés dans cette étude sont établis à partir d'hypothèse sur la géométrie des renforts et leurs interactions avec la matrice. Cela peut expliquer la divergence observée entre les valeurs prédites et celle mesurées aux fortes concentrations des fibres.

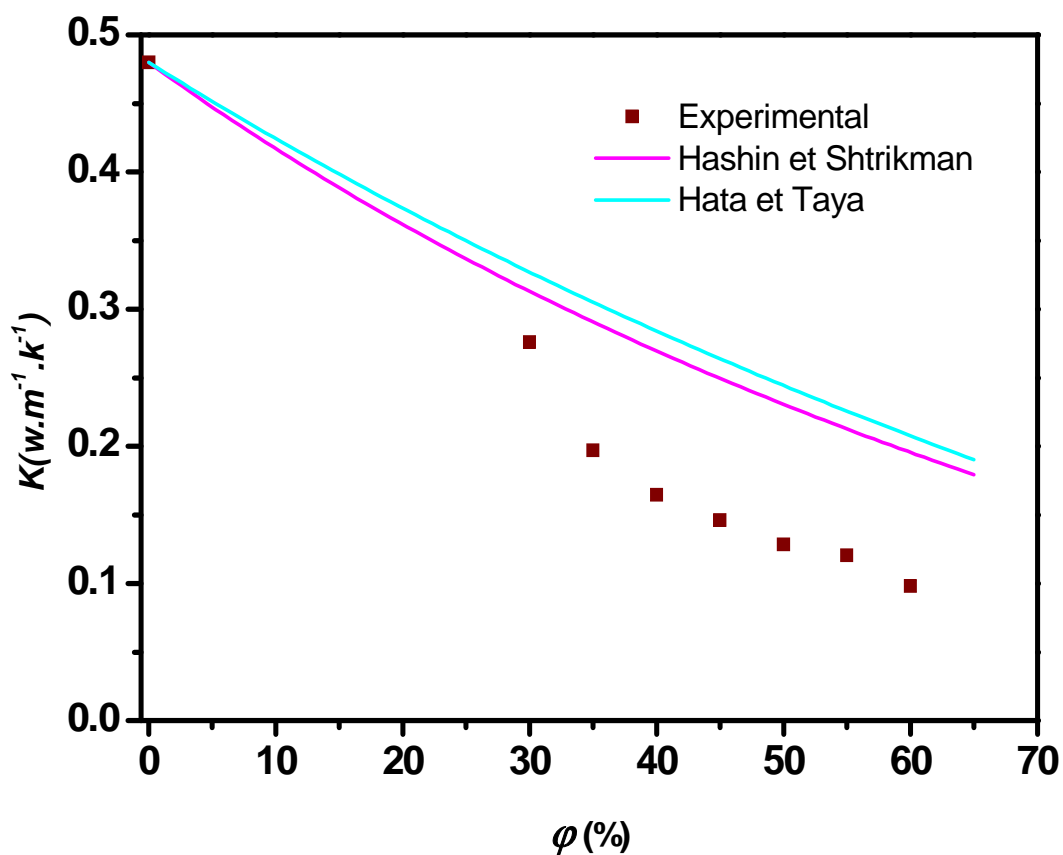


Figure III.11: Comparaison de la conductivité thermique mesurée du composite aux modèles théoriques

Monika *et al* [20] ont aussi étudié expérimentalement la conductivité thermique du composite polyester/fibre de bambou. Une comparaison entre les résultats expérimentaux et les modèles théoriques a été aussi effectuée. La figure III.12 montre l'évolution de la conductivité thermique. Dans cette figure, il est clairement montré qu'il y a une divergence entre les résultats expérimentaux et les modèles théoriques. Cette divergence peut être attribuée au fait que certaines hypothèses prises pour les modèles théoriques ne sont pas réelles.

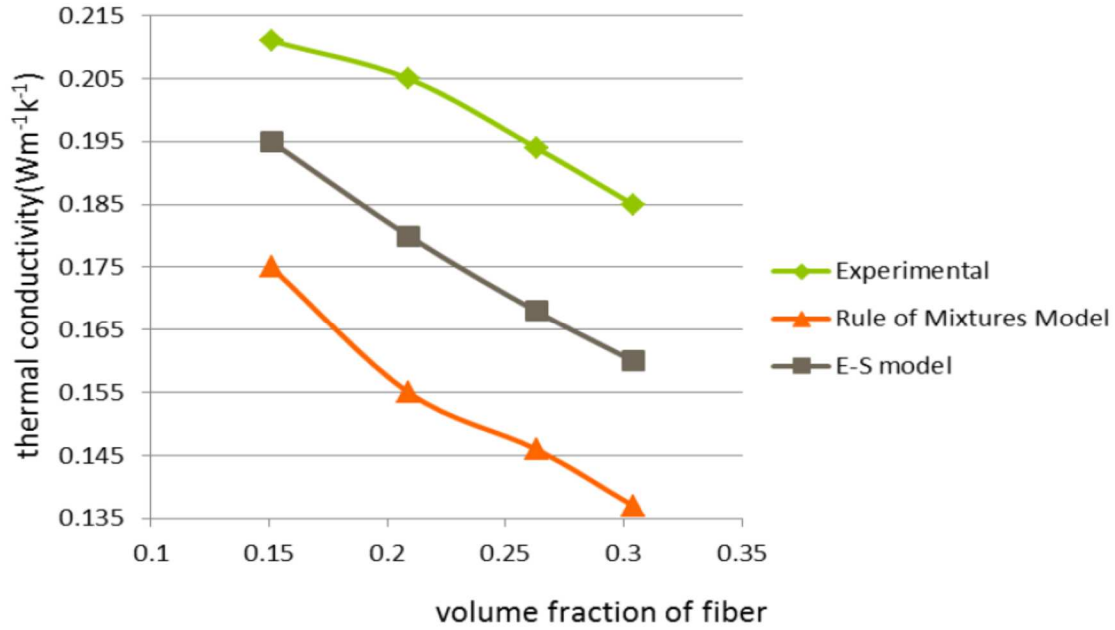


Figure III.12 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les modèles théoriques[20]

Sahu [21] a aussi étudié la conductivité thermique du composite époxy/ fibre de banane. Les valeurs expérimentales obtenues ont été comparées aux modèles théoriques (figure III.13). Il a été montré que la conductivité thermique diminue en fonction de l’augmentation de la concentration volumique des fibres. D’autre part, il a été observé qu’il y a une légère divergence entre les modèles théoriques et les valeurs expérimentales.

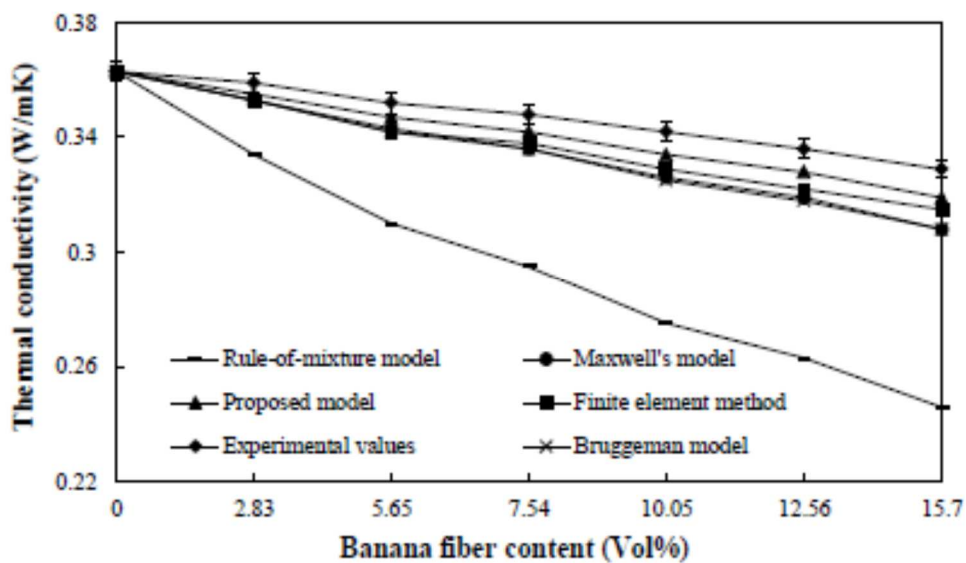


Figure III.13 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les modèles théoriques[21]

IV.3 Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique

Le tableau III.1 présente les valeurs expérimentales de la masse volumique du composite à base de polymère renforcé par des fibres de bois de palmier dattier. Dans la figure III.14, est présentée la variation de la masse volumique du composite en fonction de la concentration volumique des fibres. On remarque d'après cette figure que pour une concentration de 30% de fibres, la masse volumique diminue de 1026.64 Kg.m^{-3} pour le polymère à 401.64 Kg.m^{-3} . Ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 60%. D'autre part, l'augmentation de la concentration volumique des fibres de bois de palmier dattier dans la matrice diminue la masse volumique du composite. Cette diminution est reliée d'une part à la faible masse volumique des fibres de bois de palmier dattier qui est de l'ordre de 387.85 Kg.m^{-3} et d'autre part, au vide présent dans la matrice. Un résultat similaire a été rapporté par Shereyly *et al* [16] montrant que la masse volumique du composite polyester renforcé par des fibres de banane et de sisal diminue en fonction de l'augmentation de la concentration des fibres.

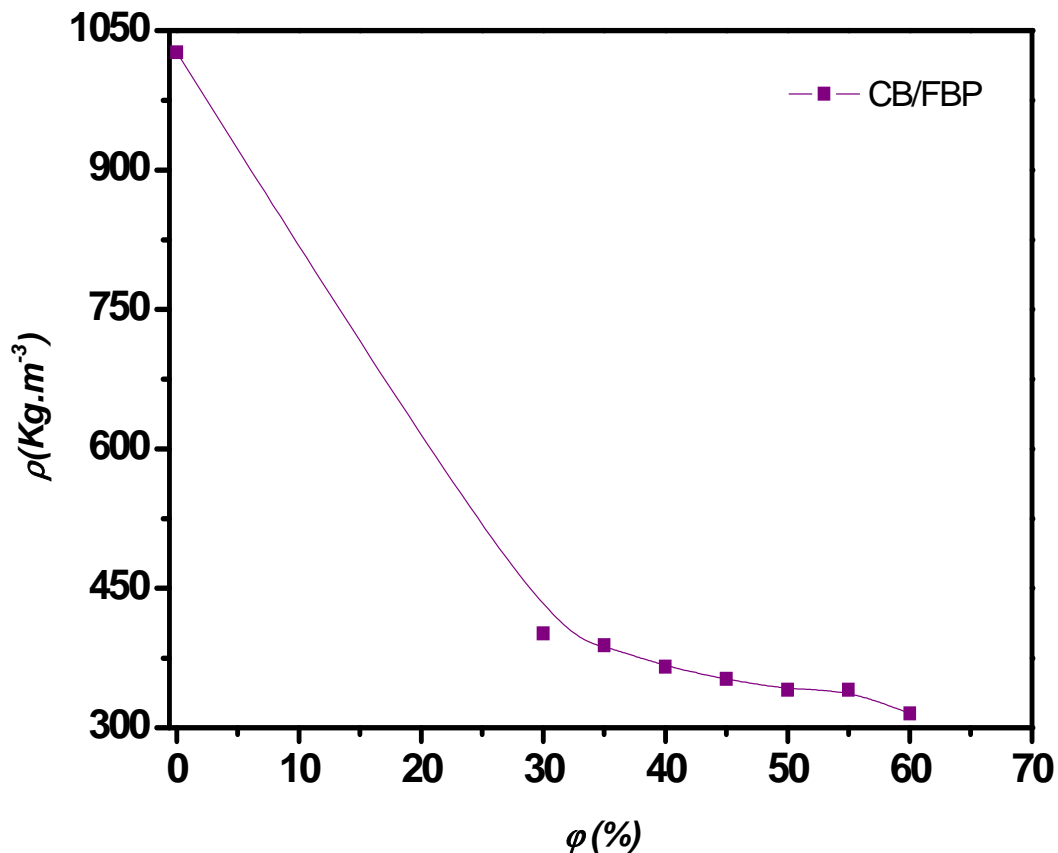


Figure III.14: Variation de la masse volumique du composite en fonction de la concentration volumique des fibres

La relation entre la conductivité thermique et la masse volumique du composite CB/FBP est présentée dans la figure III.15. On remarque d'après cette figure qu'il y a une relation directe entre la conductivité thermique et la masse volumique. On note que l'augmentation de la masse volumique conduit à une augmentation de la conductivité thermique du composite. La présence du vide dans le composite conduit à une diminution de la masse volumique, ce qui implique une grande résistance thermique et une faible conductivité thermique.

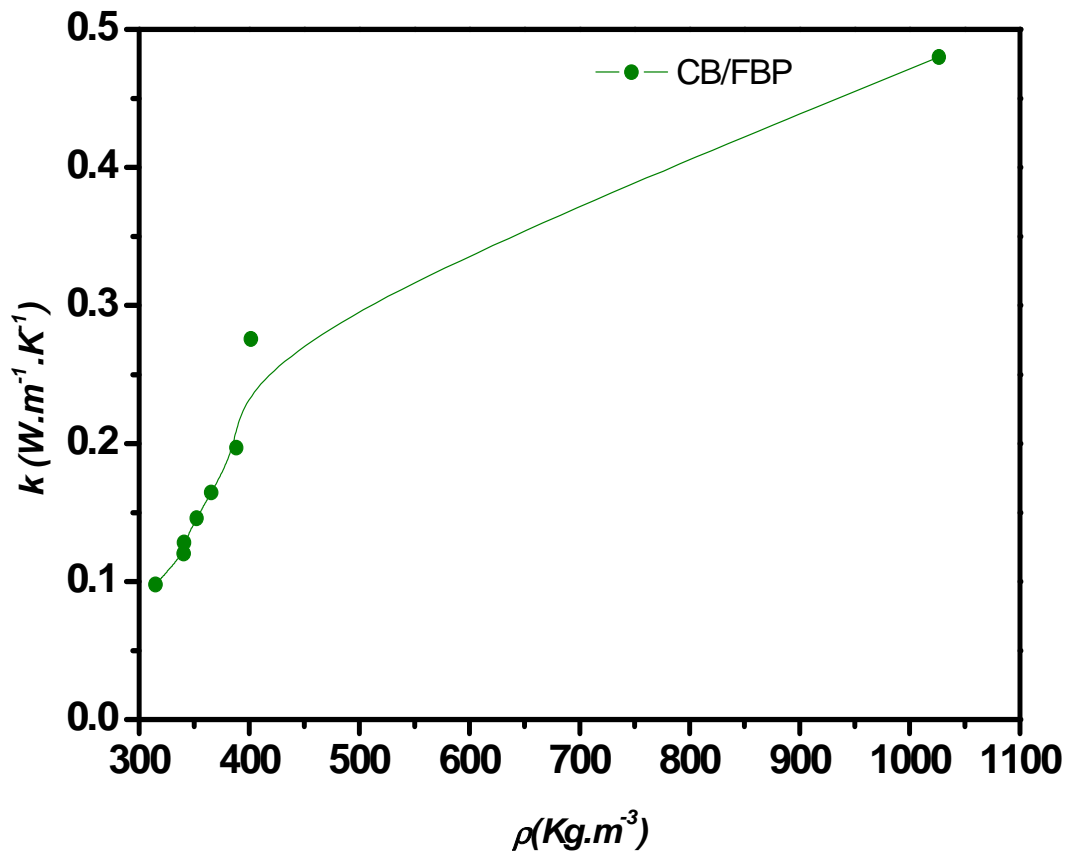


Figure III.15: Variation de la conductivité thermique du composite en fonction de la masse volumique

Un même résultat a été observé par Ji *et al* [22]. Ils ont étudié la conductivité thermique des composites dans le but de les utiliser comme matériaux isolants. La conductivité thermique a été étudiée expérimentalement et numériquement. Une corrélation entre la masse volumique du composite et sa conductivité thermique a été aussi effectuée. La figure III.16 montre les résultats obtenus. Cette figure montre qu'il y a une relation entre la masse volumique et la conductivité thermique ; plus la masse volumique du composite augmente plus sa conductivité thermique augmente.

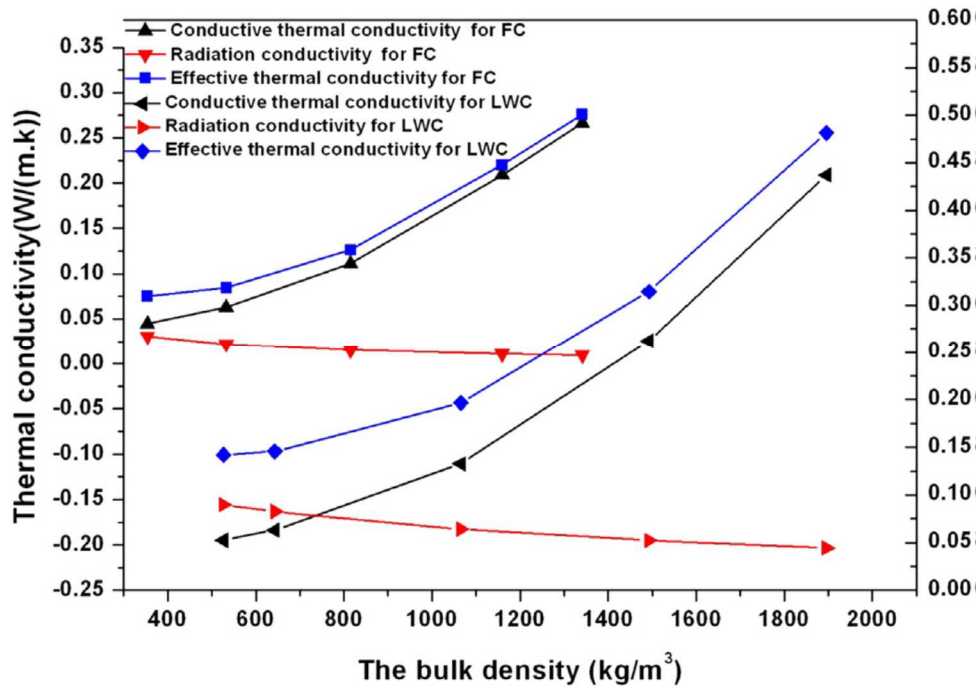


Figure III.16 : *Corrélation entre la masse volumique et la conductivité thermique du composite[22]*

V. Performances thermiques du composites CB/FBP

L'isolation thermique des bâtiments est une méthode fondamentale pour la réduction de la consommation d'énergie et a un effet direct sur la charge du chauffage et du refroidissement, donc la performance de l'isolation de l'enveloppe du bâtiment est déterminée par les propriétés thermiques des matériaux et la méthode d'isolation utilisée [23]. La performance thermique d'un matériau isolant est caractérisée par sa résistance thermique R. Cette dernière dépend de la conductivité thermique du matériau isolant et de son épaisseur.

V.1 Caractéristiques des isolants

Comprendre les valeurs thermiques qui caractérisent les matériaux et les systèmes est aujourd'hui indispensable pour choisir judicieusement ses produits à la fois d'un point de vue technique qu'économique.

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux en présence d'un ou plusieurs types d'échange thermique. Les propriétés thermiques se rapportent aussi à la capacité du matériau à absorber de l'énergie thermique. Cette énergie peut être absorbée pour élever la température du matériau ou pour le transformer [24].

V.1.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique est la quantité d'énergie traversant 1 m² de matériau d'un mètre d'épaisseur et, pour une différence de 1 degré de température.

Elle représente l'aptitude du matériau à se laisser traverser par la chaleur. C'est une caractéristique constante intrinsèque aux matériaux homogènes. La figure III.17 montre la conductivité thermique de quelques matériaux usuels :

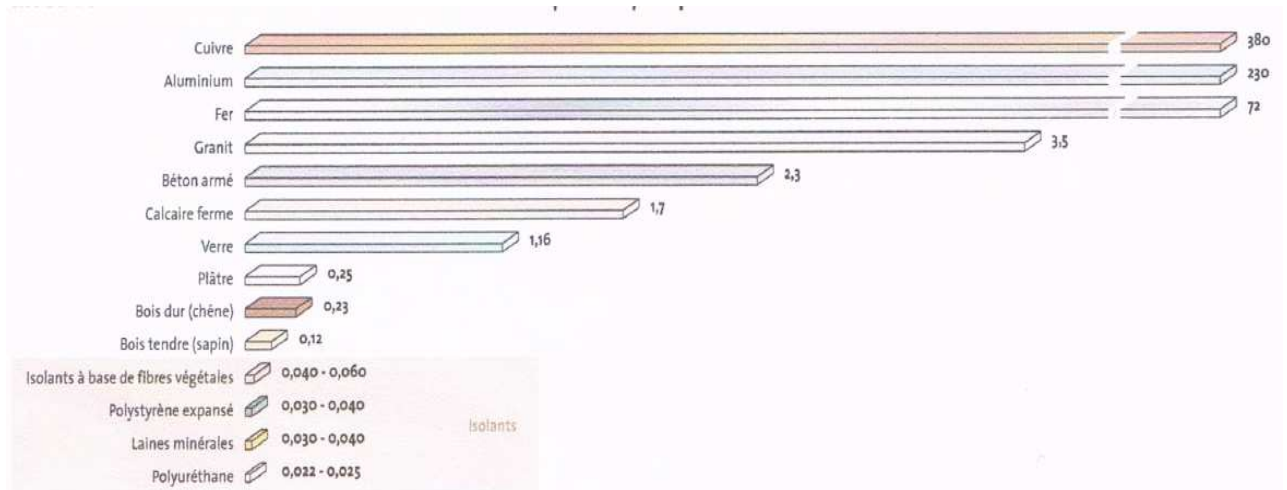


Figure III.17 : Conductivité thermique de quelques matériaux usuels [25]

V.1.2 Résistance thermique

La résistance thermique d'un matériau caractérise sa capacité à ralentir le transfert de chaleur par conduction. Elle est calculée avec la formule suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (1)$$

Où :

e : épaisseur du matériau

λ : conductivité thermique

Une paroi est d'autant plus isolante que sa résistance thermique est élevée. Cette grandeur est particulièrement utilisée dans les applications d'isolation thermique.

V.1.3 Coefficient de transmission thermique

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi homogène traduit la quantité de chaleur s'échappant au travers une paroi homogène de 1 m² pour un différentiel de 1 degré. Il s'obtient par le calcul de l'inverse de la résistance thermique. Il sert à caractériser les déperditions thermiques d'une paroi homogène composée d'un matériau simple ou de plusieurs matériaux [25].

V.2 Résistance thermique du composites CB/FPB

Une étude de la variation de la résistance thermique du composite CB/FPB en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de l'échantillon a été effectuée dans ce travail. Dans la figure III.18 sont montrées les valeurs de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur du composite.

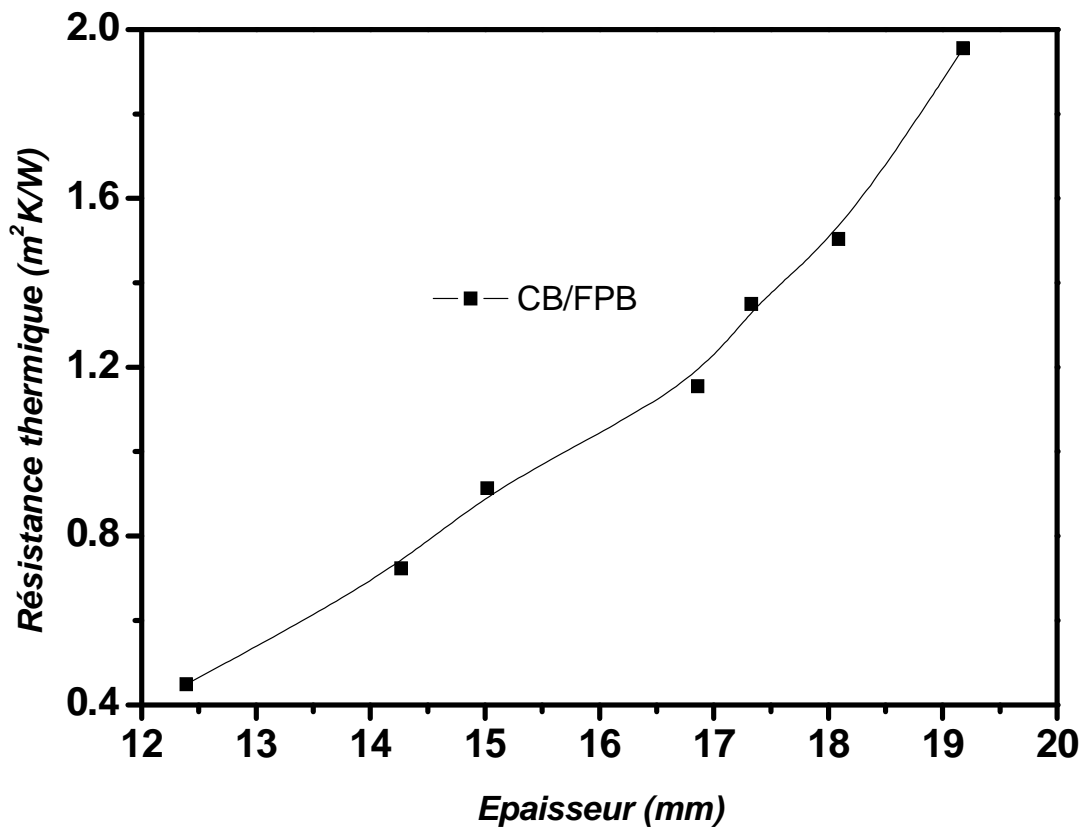


Figure III.18 : Variation de la résistance thermique du composite en fonction de l'épaisseur de l'échantillon

La figure III.18 montre une augmentation de la résistance thermique en fonction de l'augmentation de l'épaisseur du composite. On note aussi d'après cette figure que la

résistance thermique du composite CB/FPB varie de 0.44 à 1.95 m²K/W pour une épaisseur de l'échantillon variant de 12 à 19 mm.

Un même résultat a été obtenu par Gyoung-Seok *et al* [26]. Ils ont étudié expérimentalement les propriétés thermiques des composites en fonction de l'épaisseur du matériau. Les résultats obtenus ont montré que la résistance thermique du composite augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du matériau.

Dans un autre travail, Sami *et al* [27] ont étudié la performance thermique des murs en optimisant la répartition et l'épaisseur des isolants. Ils ont aussi étudié la variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur de l'isolant. Les résultats obtenus ont montré que plus l'épaisseur de l'isolant augmente plus la résistance thermique augmente. La figure III.19 montre les résultats obtenus :

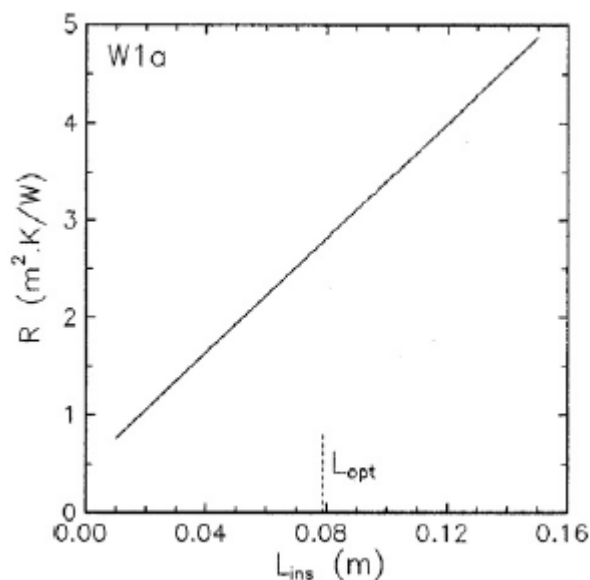


Figure III.19 : Variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur [27]

Jinghua *et al* [28] ont aussi étudié l'influence de l'épaisseur de quelques isolants sur l'évolution de la résistance thermique. Il a été montré que plus l'épaisseur de l'isolant augmente plus la résistance thermique du matériau augmente.

L'augmentation de la résistance thermique des composites CB/FPB est liée au caractère isolant des fibres de palmier dattier, qui représente une conductivité thermique plus faible que celle du polymère.

Le choix d'un matériau isolant se fait à partir de sa résistance thermique. Plus la résistance thermique du matériau est élevée plus il est isolant. D'autre part l'utilisation des isolants dans une paroi permet de réduire les déperditions thermiques. Donc, plus l'épaisseur des isolants augmentent, plus les déperditions thermiques sont réduites.

La figure III.20 montre une comparaison de la résistance thermique du composite CB/FPB avec d'autres matériaux isolants.

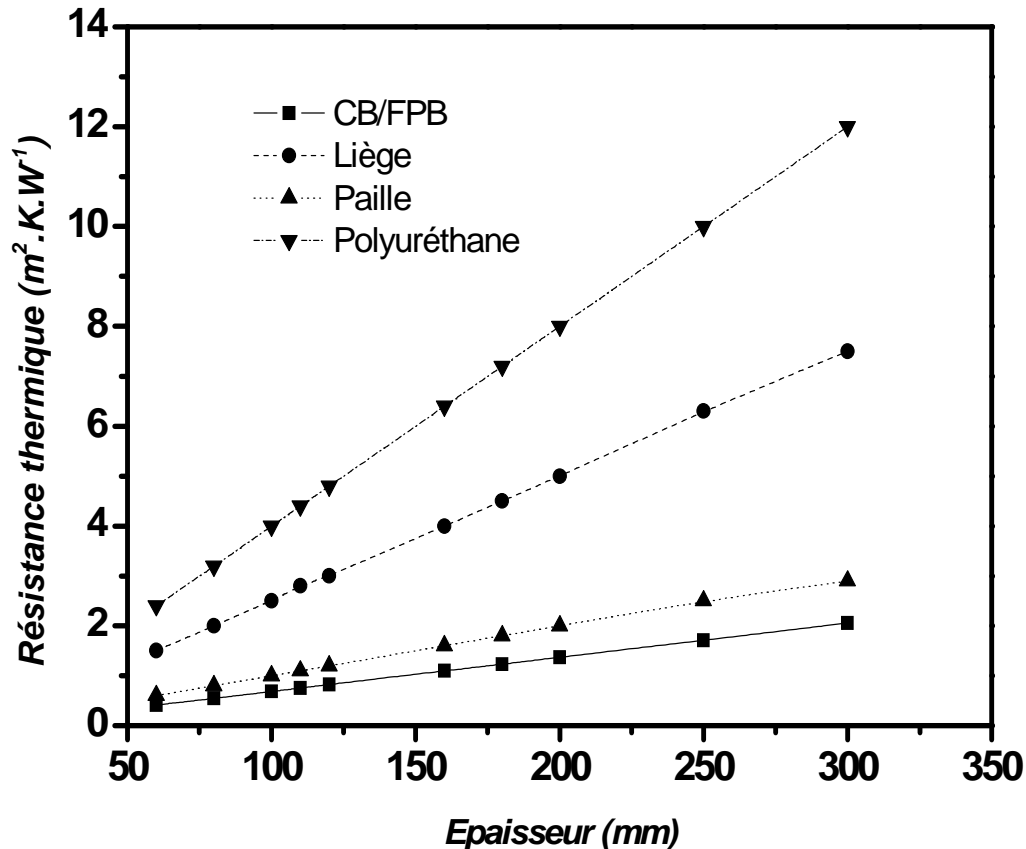


Figure III.20: Variation de la résistance thermique de quelques isolants

On remarque d'après cette figure que la résistance thermique augmente avec l'augmentation de l'épaisseur des matériaux. On note une résistance de $0.41 m^2.K.W^{-1}$ à $2.05 m^2.K.W^{-1}$ pour une épaisseur qui varie entre 60 mm et 300 mm. On note aussi que le composite CB/FPB présente une bonne résistance thermique. On remarque aussi que les valeurs de la résistance thermique du composite CB/FPB sont plus proches de celle de la paille. Cette figure montre aussi que le polyuréthane a une résistance thermique élevée par rapport à celle des autres matériaux isolants.

A partir des résultats obtenus on peut dire que les composites à base de fibres de palmier dattier sont des matériaux ayant de bonne performance thermique et peuvent être utilisés comme isolant dans le bâtiment afin de réduire les déperditions thermiques à travers les parois.

V.3 Coefficient de transmission thermique du composite CB/FPB

Le coefficient de transmission d'une paroi se mesure en quantifiant la quantité de chaleur en régime permanent, traversant une paroi de 1 m², en 1 seconde et pour une différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi de 1K.

Le coefficient de transmission thermique est l'inverse de la résistance thermique (équation 2) :

$$U = \frac{1}{R} \text{ en } \text{W.m}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (2)$$

La figure III.21 montre l'évolution du coefficient de transmission thermique du composite (CB/FPB) en fonction de l'épaisseur du matériau.

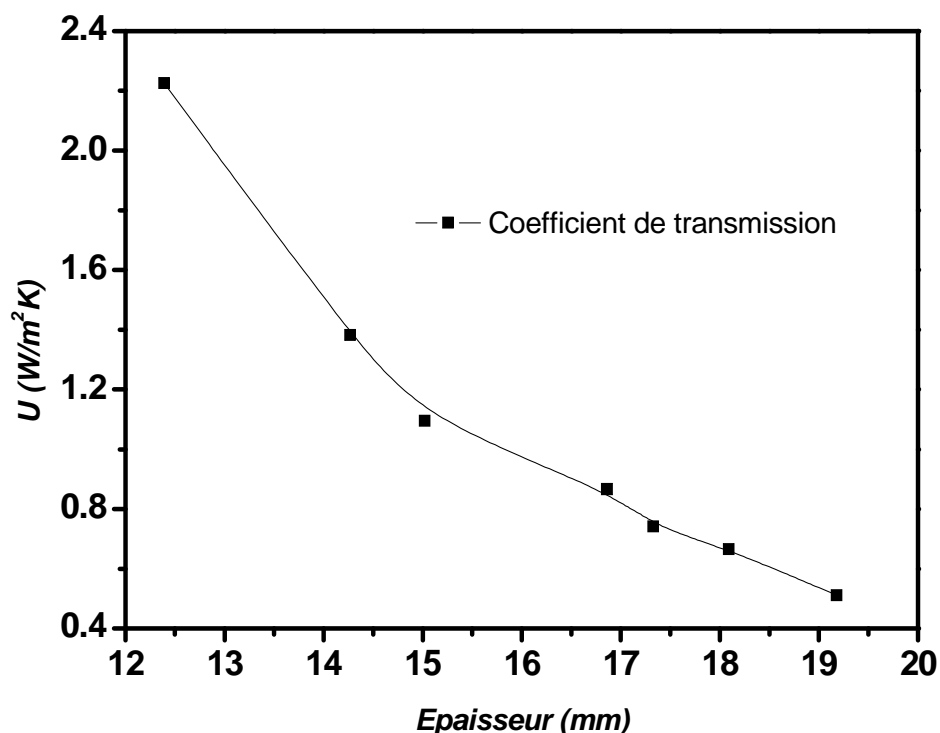


Figure III.21 : Variation du coefficient de transmission thermique en fonction de l'épaisseur des échantillons

On remarque d'après cette figure que plus l'épaisseur du composite augmente plus le coefficient U diminue. Un même résultat a été obtenu par Mehmet *et al* [29]. Ils ont étudié l'influence de l'isolation thermique des constructions sur le refroidissement dans les régions chaudes et humides. Ils ont aussi étudié la variation du coefficient de transmission thermique en fonction de l'épaisseur. Les résultats obtenus ont montré que plus l'épaisseur du mur augmente plus le coefficient U diminue.

En effet, à partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'ajout de fibres de palmier dattier dans des matrices polymères pourrait améliorer considérablement l'isolation thermique des composites. Ce résultat est confirmé par plusieurs auteurs. Anabela *et al* [30], ont étudiés les performances de l'isolation des panneaux à base de particules de maïs. Ils ont aussi étudié la variation du coefficient de transmission thermique du matériau. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau III.2: Coefficient de transmission
U en fonction de l'épaisseur [30]

Epaisseur de l'échantillon	U
cm	W.m⁻²°C⁻¹
3	2.14
5	1.89
6	1.64
8	0.95

Ils ont montré que plus l'épaisseur du matériau augmente, plus le coefficient de transmission augmente. Donc les performances de l'isolation thermique sont améliorées. Ces résultats sont en accord avec les suggestions faites par Dowling *et al* [31] concernant l'amélioration de la performance de l'isolation thermique des matériaux à base de maïs.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que les composites à base de fibres de bois de palmier dattier conviennent aux techniques de constructions dans le secteur du bâtiment, vu que ces matériaux font preuve d'une résistance thermique suffisante.

V.4 Coefficient de transmission thermique d'une paroi en forme de pente

Dans le cas d'élément de construction composé de formes irrégulières et/ou de couches de construction d'épaisseur variable (figure III.22), la résistance thermique totale de l'élément de

construction varie sur toute sa surface, c'est la raison pour laquelle une valeur moyenne de U doit être déterminée pour l'ensemble de l'élément [32].

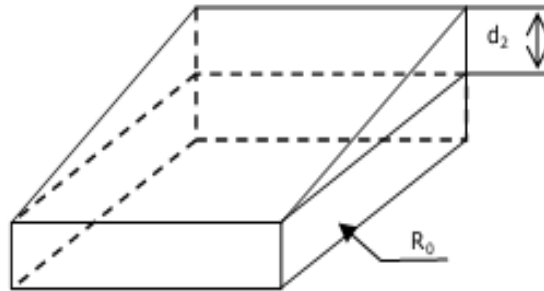


Figure III.22: *Forme rectangulaire*

d_2 : est l'épaisseur maximale de la couche d'épaisseur variable,

R_2 : est la résistance thermique utile maximale de la couche d'épaisseur variable, en $m^2.K.W^{-1}$,

R_0 : résistance thermique des autres couches, en $m^2.K.W^{-1}$.

Le calcul thermique doit être effectué séparément pour chaque partie ayant différentes formes.

La détermination de la valeur de U pour l'élément de construction se fait selon la formule suivante [32]:

$$U = \frac{1}{R_2} \ln \left[1 + \frac{R_2}{R_0} \right] \quad (3)$$

Avant de choisir un isolant, il est important de s'assurer de sa performance, exprimée par sa conductivité thermique, sa résistance thermique et son coefficient de transmission U . C'est à partir de la valeur de la résistance thermique R et en fonction de l'épaisseur que le coefficient de transmission de l'isolant sera déterminé.

La figure III.23 montre l'isolant thermique en forme de pente:



Figure III.23: *Isolant en forme de pente*

Afin de déterminer le coefficient de transmission thermique de notre isolant nous avons utilisé les propriétés montrées dans la figure III.23.

D'après les valeurs ci-dessus et en utilisant l'équation (3), la valeur du coefficient U de l'isolant en forme de pente est de $1.057 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Afin de s'assurer des performances thermiques du matériau conçu, une comparaison avec un autre isolant est primordiale. La figure III.24 montre un isolant en forme de pente constitué du béton et un panneau en polystyrène expansé :

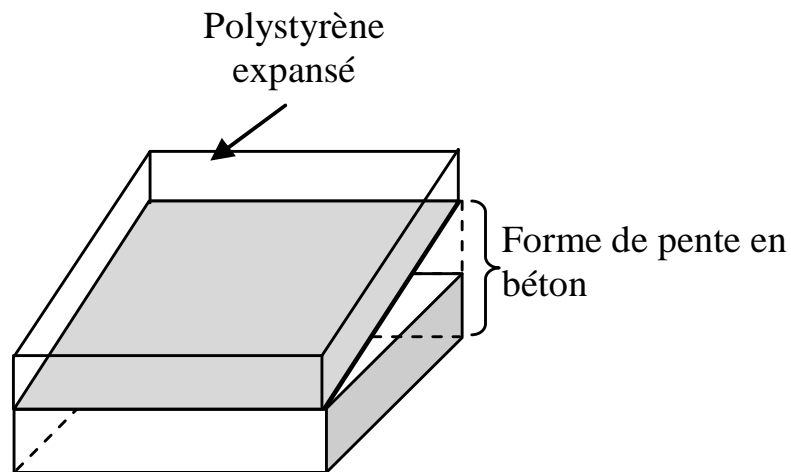


Figure III.24: *Isolant en forme de pente (béton+polystyrène)*

Le tableau III.3 montre les résultats obtenus:

Tableau III.3: *Calcul du coefficient U*

Résistance thermique R₂	Résistance thermique de la partie parallélépipédique de la forme en Béton	Résistance thermique du panneau en polystyrène	Coefficient U calculé à partir de la formule (3)
m ² .K.W ⁻¹	m ² .K.W ⁻¹	m ² .K.W ⁻¹	W.m ² .K ⁻¹
0.024	0.0297	0.789	1.204
k _{Béton} =1.75 W.m ⁻¹ .K ⁻¹		k _{Polystyrène} =0.038 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	

Les meilleurs matériaux isolants sont ceux qui représentent la plus faible conductivité thermique. Ce qui permet de réduire le coefficient de transfert de chaleur. Dans le tableau III.4 on compare entre les deux isolants en forme de pente :

Tableau III.4 : *Comparaison entre les deux isolants*

Isolants	Résistance thermique m ² .K.W ⁻¹	Coefficient de transmission thermique W.m ² .K ⁻¹
Mortier/FPB	1.03	1.057
Béton/polystyrène	0.8427	1.204

On remarque d'après les résultats obtenus que le coefficient de transmission thermique de l'isolant en forme de pente en mortier/ (20% BPD) dattier ($U = 1.057 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$) est inférieure à celui en béton/polystyrène ($U = 1.204 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$). On note aussi que plus le coefficient de transmission thermique diminue, plus la paroi est isolante.

En conclusion, nous pouvons dire que les résultats obtenus montrent que l'isolant conçu répond pleinement aux exigences de l'amélioration de l'efficacité énergétique et possède une bonne capacité d'isolation thermique.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté et analysé le comportement des composites CB/FPB. L'analyse morphologique des composites à matrice polymère renforcée par des fibres de palmier dattier a été présentée et analysée. Nous avons noté que la surface des fibres est irrégulière avec plusieurs filaments et cellules.

L'évolution de l'absorption d'eau des échantillons à base de fibres de bois de palmier dattier a été également présentée. Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la concentration des fibres dans les composites induit un temps de saturation plus élevé. Nous avons noté aussi que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de la concentration des fibres.

Les mesures de la conductivité thermique des composites ont été présentées et analysées. Nous avons noté que les valeurs de la conductivité varient en fonction de la concentration volumique des fibres. Ces valeurs ont été comparées aux modèles de prédiction théorique. Les résultats obtenus ont montré que les modèles de prédiction surestiment la conductivité pour les fortes concentrations.

Nous avons étudié le comportement de la masse volumique du composite en fonction de la concentration des fibres. Une corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique a été également étudiée. Les résultats obtenus ont montré que la présence du vide dans le composite conduit à une diminution de la masse volumique, ce qui implique une grande résistance thermique et une faible conductivité thermique.

Enfin, nous avons présenté la variation de la résistance thermique du composite en fonction de l'épaisseur de l'échantillon a été également présentée. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a une augmentation de la résistance thermique du composite en fonction de l'épaisseur de l'échantillon. Cette augmentation montre que plus le matériau ralentit le transfert de chaleur plus il est isolant.

Nous avons aussi étudié le comportement du coefficient de transmission thermique du composite en fonction de la variation de l'épaisseur du matériau. Les résultats obtenus ont montré que plus l'épaisseur du matériau augmente plus le coefficient U diminue.

Pour les propriétés thermiques du composites CB/FPB, nous avons constaté que l'ajout de fibres de palmier dattier a un effet favorable sur la résistance et le coefficient de transmission thermique.

En effet, pour une concentration volumique des fibres inférieure à 50%, les composites CB/FPB satisferont aux exigences thermiques et peuvent être utilisés comme matériaux biocomposites destinés à l'isolation thermique dans le bâtiment.

VII. Références

- [1] M. A. AlMaadeed, Z. Nogellovaj, M. Micusik, I. Novak, and I. Krupa, "Mechanical, sorption and adhesive properties of composites based on low density polyethylene filled with date palm wood powder," *Materials & Design*, vol. 53, pp. 29-37, 2014.
- [2] A. Stamboulis, C. A. Baillie, S. K. Garkhail, H. G. H. van Melick, and T. Peijs, "Environmental Durability of Flax Fibres and their Composites based on Polypropylene Matrix," *Applied Composite Materials*, vol. 7, pp. 273-294 LA - English, 2000.
- [3] X. Lu, M. Q. Zhang, M. Z. Rong, G. Shi, and G. C. Yang, "All-plant fiber composites. II: Water absorption behavior and biodegradability of unidirectional sisal fiber reinforced benzylated wood," *Polymer Composites*, vol. 24, pp. 367-379, 2003.
- [4] M. Tajvidi and G. Ebrahimi, "Water uptake and mechanical characteristics of natural filler-polypropylene composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 88, pp. 941-946, 2003.
- [5] S. K. Najafi, M. Tajvidi, and M. Chaharmahli, "Long-term water uptake behavior of lignocellulosic-high density polyethylene composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 102, pp. 3907-3911, 2006.
- [6] M. V. D. Urs, C. Ranganathaiah, R. Ramani, B. Lal, and S. Alam, "Diffusion of seawater in unsaturated polyester resin and its glass fiber reinforced composites in the presence of titanium dioxide as UV absorber," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 102, pp. 2784-2794, 2006.
- [7] M. H. Zamri, H. M. Akil, A. A. Bakar, Z. A. M. Ishak, and L. W. Cheng, "Effect of water absorption on pultruded jute/glass fiber-reinforced unsaturated polyester hybrid composites," *Journal of Composite Materials*, pp. 1-11, 2011.
- [8] M. A. AlMaadeed, Z. Nógellová, I. Janigová, and I. Krupa, "Improved mechanical properties of recycled linear low-density polyethylene composites filled with date palm wood powder," *Materials and Design*, vol. 58, pp. 209-216, 2014.
- [9] P. A. Sreekumar, K. Joseph, G. Unnikrishnan, and S. Thomas, "A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques," *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 453-461, 2007.

- [10] L. Uma Devi, K. Joseph, K. C. Manikandan Nair, and S. Thomas, "Ageing studies of pineapple leaf fiber reinforced polyester composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 94, pp. 503-510, 2004.
- [11] H. M. Akil, M. F. Omar, A. A. M. Mazuki, S. Safiee, Z. A. M. Ishak, and A. Abu Bakar, "Kenaf fiber reinforced composites: A review," *Materials & Design*, vol. 32, pp. 4107-4121, 2011.
- [12] E. Osman, A. Vakhguelt, I. Sbarski, and S. Mutasher, "Water Absorption Behavior Ana Its Effect On The Mechanical Properties Of Kenaf Natural Fiber Unsaturated Polyester Composites," *18Th InternaionalConfence On Composite Materials*, pp. 1-6.
- [13] Y. Seki, K. Sever, M. Sarikanat, I. Sen, and A. Aral, "Jute/Polyester Composites: The Effect of Water Aging on The Interlaminar Shear Strength (ILSS)," *6th International Advanced Technologies Symposium*, pp. 368-371, 2011.
- [14] M. S. Sreekala, M. G. Kumaran, and S. Thomas, "Water sorption in oil palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, pp. 763-777, 2002.
- [15] B. Agoudjil, "Etude des propriétés thermophysiques et électriques de matériaux hétérogènes," Université Paris XII Val de Marne, 2006.
- [16] S. Annie Paul, A. Boudenne, L. Ibos, Y. Candau, K. Joseph, and S. Thomas, "Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, pp. 1582-1588, 2008.
- [17] M. Idicula, A. Boudenne, L. Umadevi, L. Ibos, Y. Candau, and S. Thomas, "Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites," *Composites Science and Technology*, vol. 66, pp. 2719-2725, 2006.
- [18] K. Singh, N. S. Saxena, and S. Thomas, "Temperature Dependence of Thermophysical Properties of Untreated Glass Oil Palm Fiber Reinforced Phenolformaldehyde Composites," *Jounal of Scientific and Industrial Research*, vol. 62, pp. 903-908, 2003.
- [19] K. Liu, Z. Yang, and H. Takagi, "Anisotropic thermal conductivity of unidirectional natural abaca fiber composites as a function of lumen and cell wall structure," *Composite Structures*, vol. 108, pp. 987-991, 2014.
- [20] M. Mounika, K. Ramaniah, A. V. R. Prasad, K. M. Rao, and K. H. C. Reddy, "Thermal Conductivity Characterization of Bamboo Fiber Reinforced Polyester Composite," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 3, pp. 1109-1116, 2012.

- [21] Y. K. Sahu, "Study on the Effective Thermal Conductivity of Fiber Reinforced Epoxy Composites," in *Department of Mechanical Engineering*, 2014.
- [22] R. Ji, Z. Zhang, L. Liu, and X. Wang, "Development of the random simulation model for estimating the effective thermal conductivity of insulation materials," *Building and Environment*, vol. 80, pp. 221-227, 2014.
- [23] M. S. Al-Homoud, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Building and Environment*, vol. 40, pp. 353–366, 2005.
- [24] "Les propriétés thermiques des matériaux et les références métrologiques," *Laboratoire nationale de métrologie et d'essais*.
- [25] "Introduction à la thermique du bâtiment," *Saint Gobain*, 2012.
- [26] G.-S. Choi, J.-S.Kang, Y.-S.Jeong, S.-E.Lee, and J.-Y. Sohn, "An experimental study on thermal properties of composite insulation," *ThermochimicaActa*, vol. 455, pp. 75–79, 2007.
- [27] S. A. Al-Sanea and M. F. Zedan, "Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 3113–3124, 2011.
- [28] J. Yu, C. Yang, and D. L. LiweiTian, "A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 2520–2529, 2009.
- [29] M. A. Aktacir, O. Büyükalaca, and T. Yilmaz, "A case study for influence of building thermal insulation on cooling load and air-conditioning system in the hot and humid regions," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 599–607, 2010.
- [30] A. Paiva, S. Pereira, A. Sá, D. Cruz, H. Varum, and J. Pinto, "A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards," *Energy and Buildings*, vol. 45, pp. 274–279, 2012.
- [31] A. Dowling and J. A. Mathias, "Experimental Determination of the Insulating Ability of Corn By-Products," *Southern Illinois University Carbondale*, pp. 1-18, 2007.
- [32] "Calcul du coefficient de transmission thermique des parois des bâtiments (valeur U) et du coefficient de transfert thermique par transmission dans les bâtiments (valeur H)," *Annexe VII : Document de référence pour les pertes par transmission*.

Chapitre IV :
Modélisation numérique
de la conductivité
thermique des composites

I. Introduction

Nous avons présenté et analysé dans les chapitres précédents les différentes méthodes de mesure des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres de bois de palmier dattier. Afin de connaître les limites théoriques des propriétés thermophysiques de nos matériaux composites, nous avons réalisé une étude par simulation numérique. Pour cette étude, nous avons utilisé un logiciel basé sur la méthode des éléments finis, COMSOL software. Ce logiciel permet de simuler en 2D ou en 3D des problèmes basés sur un ou plusieurs phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur. Le but de ce chapitre est de montrer l'approche numérique suivie pour la détermination de la conductivité thermique. Pour cela ce chapitre est composé de trois parties.

On s'intéresse dans la première partie à la présentation de l'approche numérique utilisée par le logiciel COMSOL software pour estimer la conductivité thermique des matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres de bois de palmier dattier. Cette partie nous permet de calculer la conductivité thermique de ces composites en vue de les utiliser pour l'isolation thermique du bâtiment.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de la démarche à suivre pour étudier l'effet des niveaux de taille sur la conductivité thermique.

Dans la troisième partie de ce chapitre nous allons présenter la méthode numérique à suivre pour déterminer la conductivité thermique des composites chargés par des sphères creuses. Cette étude nous permet de voir si le centre de la particule peut affecter le transfert de chaleur au sein des composites.

II. Modélisation des composites à base de fibre

La modélisation numérique de la conductivité thermique effective des matériaux composites peut être nécessaire pour le contrôle du processus de fabrication, de même que pour de nombreuses applications de transfert de chaleur.

Plusieurs méthodes numériques ont été employées pour étudier la conductivité thermique des matériaux composites, y compris la méthode des éléments finis. L'analyse par éléments finis nécessite la discrétisation de la structure en un nombre fini de sous domaine pour lesquels la solution approchée est réalisée en appliquant les

méthodes résiduelles. En utilisant le logiciel COMSOL software basé sur la méthode des éléments finis, l'équation de transfert de chaleur par conduction à travers le matériau composite est résolue en régime stationnaire[1]. Afin de modéliser le transfert de chaleur au sein du composite, nous considérons une cellule élémentaire correspondante à une fibre centrée dans un parallélépipède (figure IV.1a).

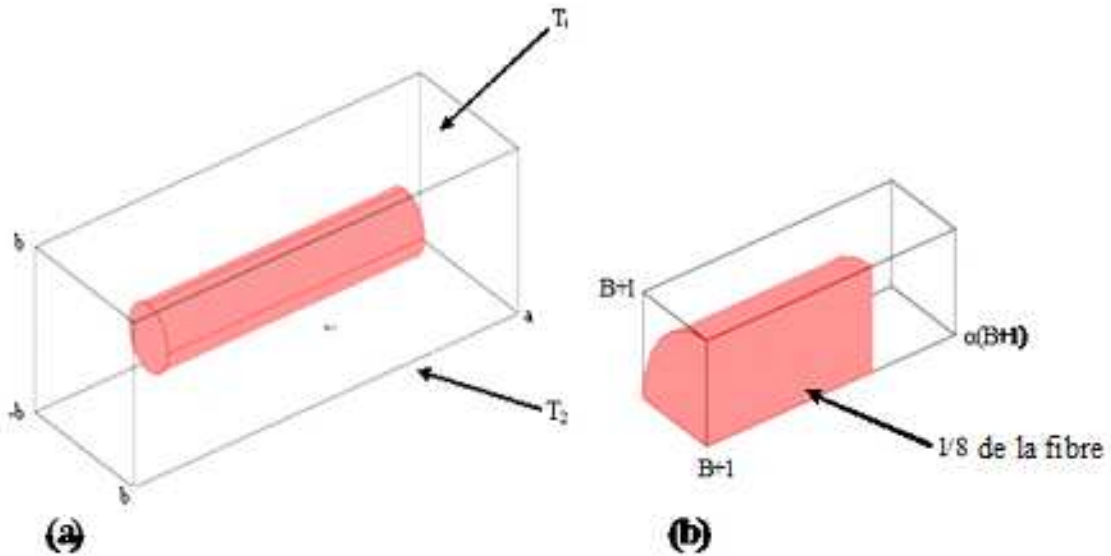


Figure IV.1 : Cellule élémentaire

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 la propagation de la chaleur sont isothermes avec des températures respectivement égales à τ_1 et τ_2 ;
- Les faces parallèles à la direction de la propagation de la chaleur sont adiabatiques.

Pour simplifier le problème et diminuer le temps de calcul, nous étudions seulement le 1/8^{ème} de la cellule élémentaire (figure IV.1b).

Les grandeurs adimensionnelles sont définies comme suit :

- $X = x/r$; $Y = y/r$; $Z = z/r$: variables d'espace sans dimension ;

- $B = \frac{b-a}{a}$; $D = \frac{k_m}{k_f}$: distance entre inclusion et matrice et le rapport entre la conductivité thermique de la matrice et de la fibre ;
- $S = \frac{2\theta - \tau_1 - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}$; $T = \frac{2\tau - \tau_1 - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}$: températures de la charge et de la matrice ;
- $\alpha = \frac{L}{d}$: rapport entre la longueur et le diamètre de la fibre ;
- $C = \frac{r_c k_m}{a}$; $E = \frac{k_c}{k_m}$ Résistance de contact réduite située à l'interface de la fibre et la conductivité thermique effective du matériau composite.

La conductivité thermique est calculée en fonction de trois paramètres (B : la distance entre la matrice et la fibre, C : la résistance de contact, D : le rapport entre la conductivité de la matrice et de la fibre). Le nombre de nœuds dans le réseau d'élément finis est d'environ 40000 à 70000 nœuds.

Le maillage de la géométrie est présenté dans la figure IV.2.

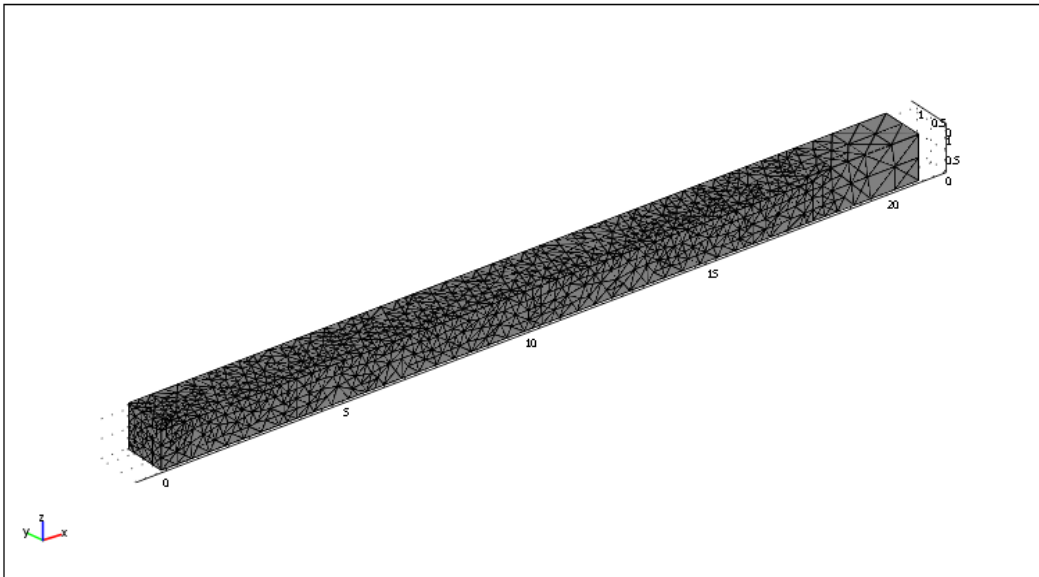


Figure IV.2 : *Maillage de la géométrie*

La distribution de la température dans le matériau est présentée dans la figure IV.3.

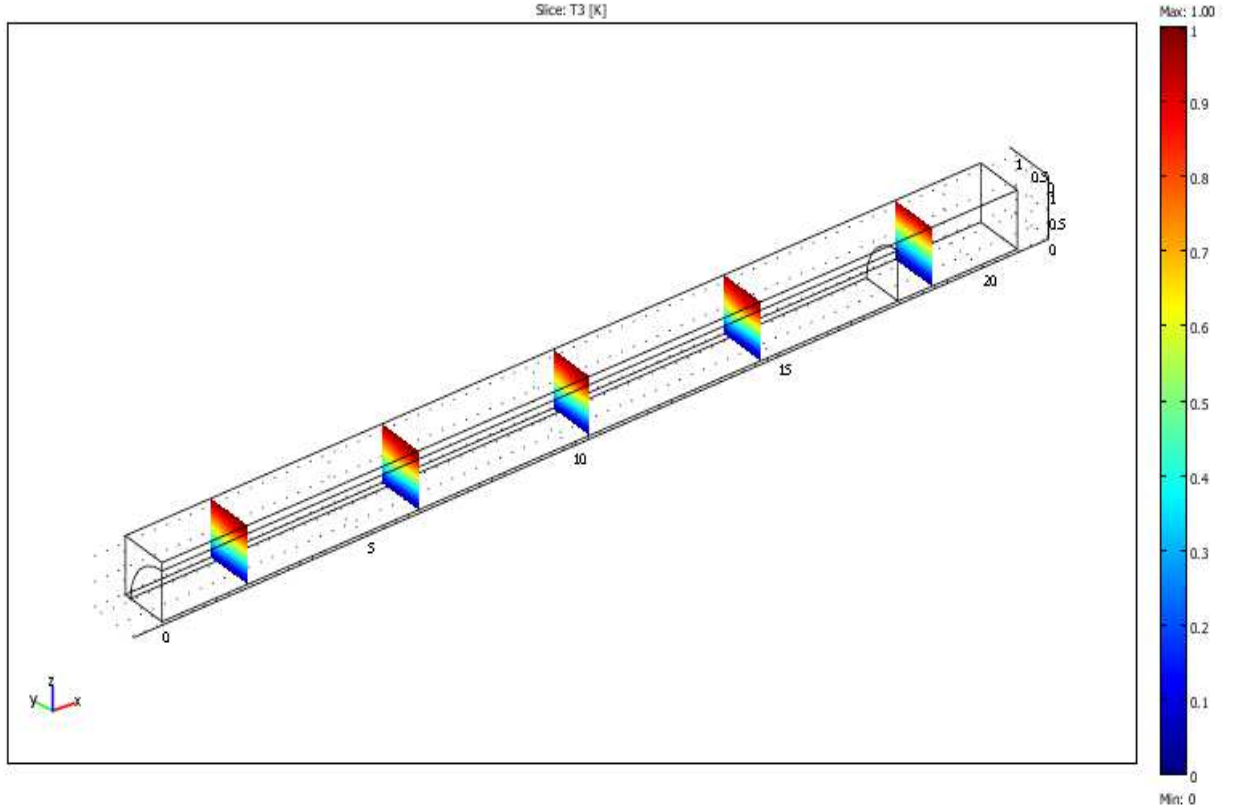


Figure IV.3 : *Distribution de la température*

Le flux de chaleur traversant la cellule élémentaire est défini par la relation suivante :

$$Q = \frac{k_c \alpha b^2 \Delta \tau}{b} = -k_m \iint_{S_1} \frac{d\tau}{dz} dx dy \quad (1)$$

Pour déterminer la conductivité thermique du matériau modélisé nous avons utilisé l'équation (1), tel que :

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\Delta \tau}{b} \times \alpha b^2 = -k_m \iint_S \frac{d\tau}{dz} dx dy \Leftrightarrow k_{eff} \alpha b \Delta \tau = -k_m \int_0^b \int_0^{ab} \frac{d\tau}{dz} dy dx \\ &\Leftrightarrow k_{eff} \alpha b \left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - \tau_1 \right) = -\frac{k_m}{2r} r \int_0^{1+B} \int_0^{\alpha(1+B)} \frac{d(\tau_1 - \tau_2)T + (\tau_1 + \tau_2)}{dz} dy dx \\ &\Leftrightarrow \frac{k_{eff}}{k_m} \alpha b \left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{2} \right) = -r \frac{\tau_1 - \tau_2}{2} \int_0^{1+B} \int_0^{\alpha(1+B)} \frac{dT}{dz} dy dx \\ &\Leftrightarrow E = \frac{k_{eff}}{k_m} = \frac{r}{b\alpha} \int_0^{1+B} \int_0^{\alpha(1+B)} \frac{dT}{dz} dy dx \end{aligned} \quad (2)$$

En introduisant la relation des paramètres B et α , on trouve :

$$E = \frac{Q}{\alpha(B+1)} \quad \text{avec} \quad Q = \int_0^{1+B} \int_0^{\alpha(1+B)} \frac{dT}{dz} dy dx \quad (3)$$

A partir de la relation de B, on peut déterminer la teneur en fibre dans le matériau, tel que :

$$\varphi = \frac{\text{Volume de la fibre}}{\text{volume de la cellule élémentaire}} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{4(B+1)}$$

III. Etude de l'effet de la dispersion de taille sur la conductivité thermique

L'effet de la taille des renforts sur la conductivité thermique des matériaux composites a été étudié par plusieurs auteurs[2-4]. Afin d'étudier l'influence des niveaux de taille sur la conductivité thermique nous considérons des particules sphériques de différentes tailles et de conductivité thermique k_2 incorporées dans un milieu continue. Pour cela nous avons considéré un modèle 2D pour étudier l'influence des niveaux de tailles sur la conductivité thermique.

L'idée est d'utiliser le concept du milieu apollonien. La figure IV.4 montre un empilement compact.

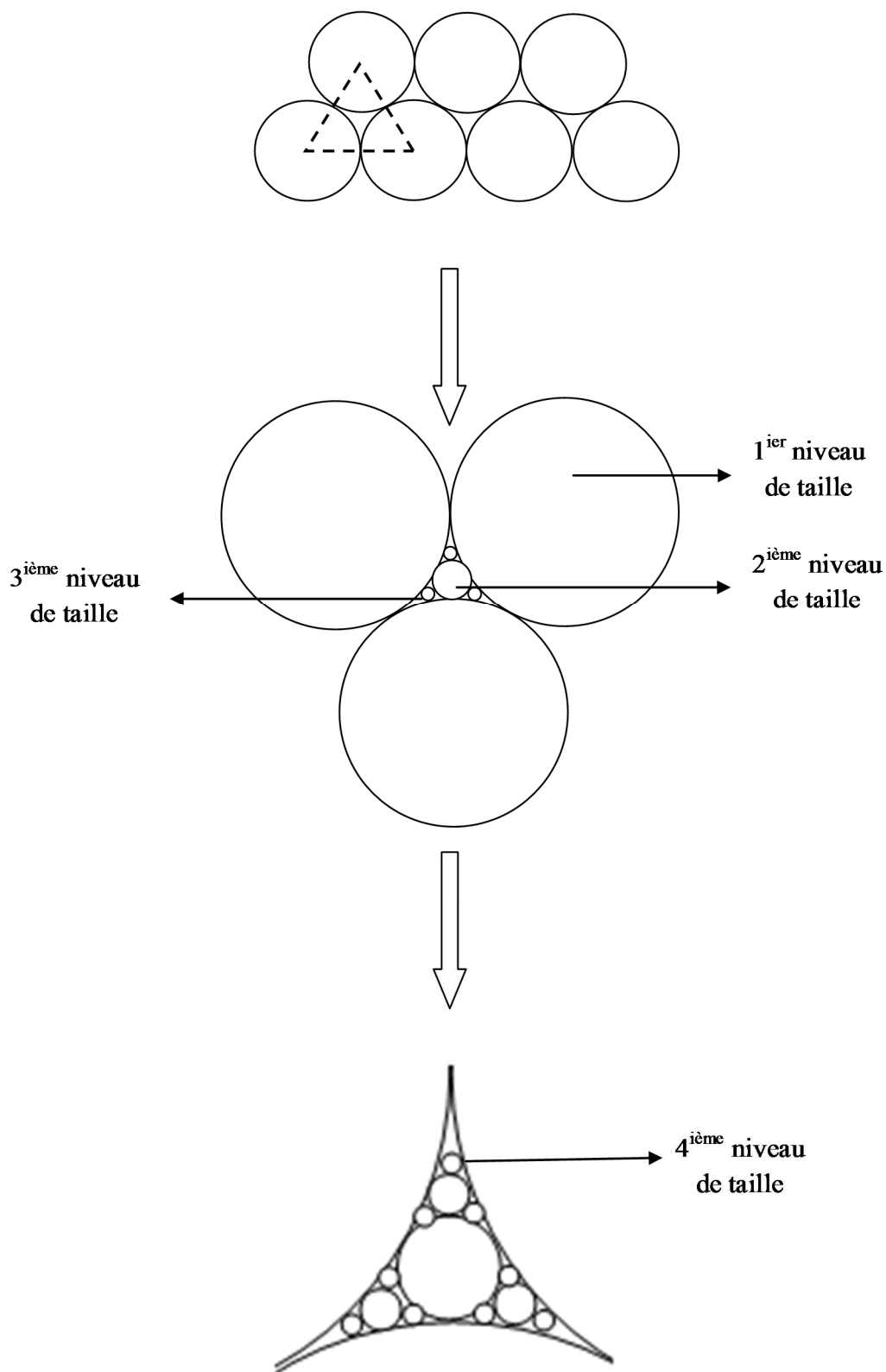


Figure IV.4: Empilement des charges

Il s'agit d'étudier la conductivité thermique pour voir l'effet du nombre de niveau de taille sur la conductivité.

En utilisant une cellule élémentaire, on aura :

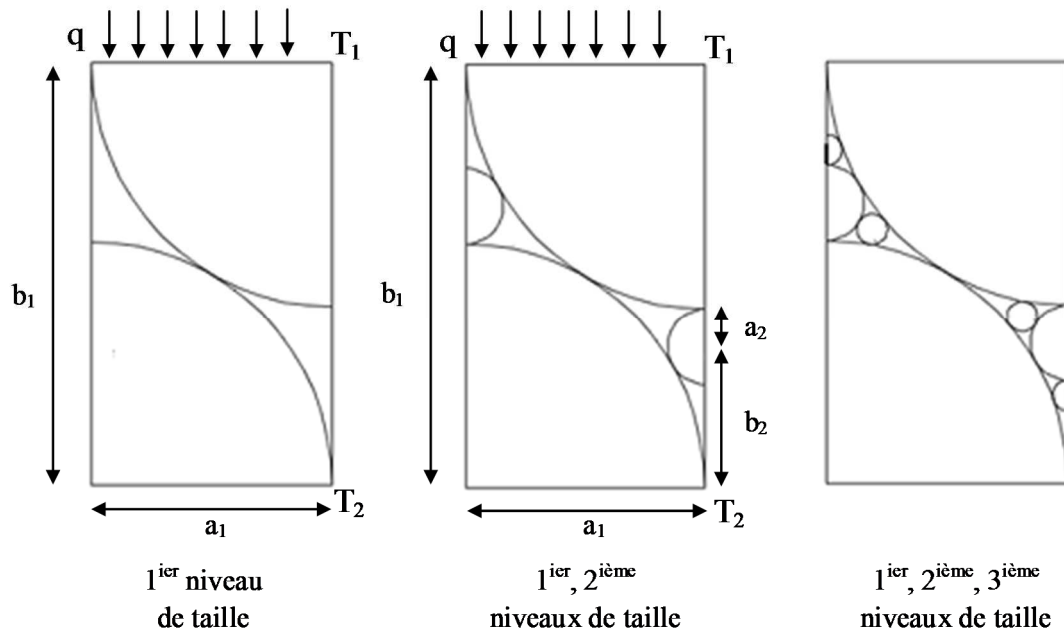


Figure IV.5: Cellule élémentaire

Où :

a_1 : rayon du 1^{ier} niveau de taille

a_2 : rayon du $2^{\text{ième}}$ niveau de taille

a_3 : rayon du $3^{\text{ième}}$ niveau de taille

b_1 : hauteur de la cellule

b_2 : position de la cellule de $2^{\text{ième}}$ niveau

La figure IV.6 montre la distribution des charges dans la cellule élémentaire.

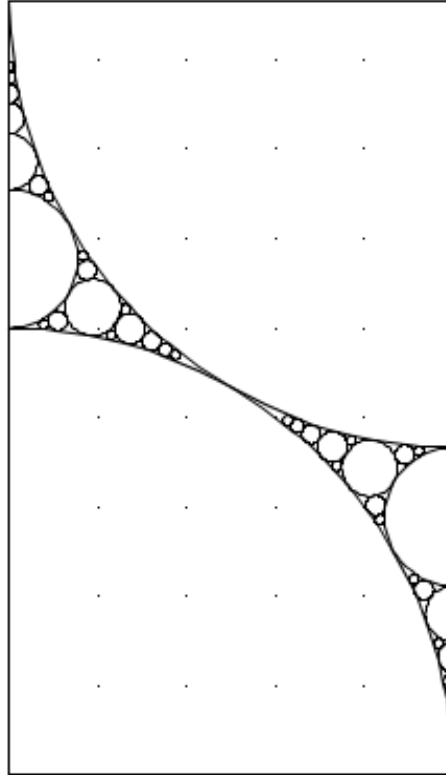


Figure IV.6 : *Distribution des charges dans la cellule élémentaire*

Le nombre de nœuds dans le réseau d'élément finis est d'environ 80000 à 360000 nœuds. Le maillage de la géométrie est présenté dans la figure IV.7 :

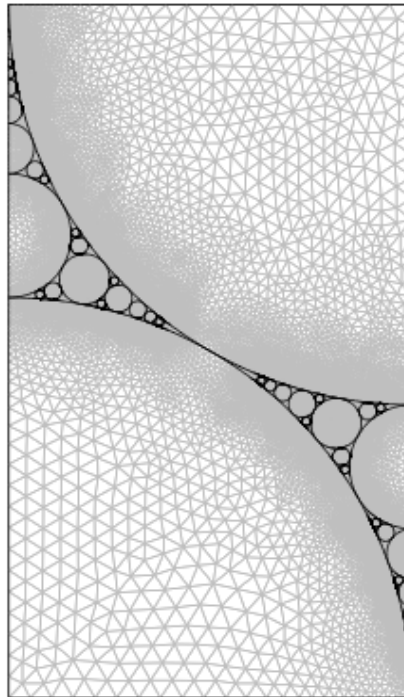


Figure IV.7 : *Maillage de la géométrie*

La distribution de la température dans le matériau est présentée dans la figure IV.8 :

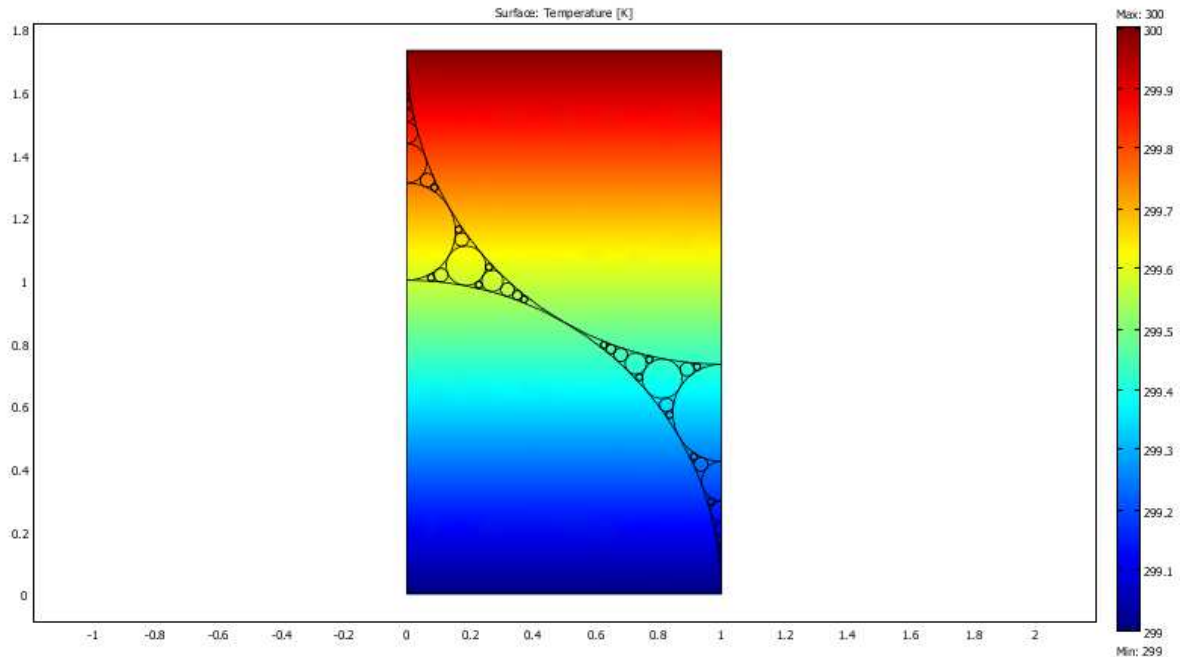


Figure IV.8 : *Distribution de la température*

Le flux de chaleur traversant la cellule est donné par la relation :

$$Q = \frac{k_c b^2 \Delta \tau}{b} = -k_m \iint_{S_1} \frac{d\tau}{dz} dx dy \quad (5)$$

La conductivité thermique est déterminée à partir de la loi de Fourier :

$$Q = \frac{kS}{e} \Delta T \Rightarrow k = \frac{Qe}{S\Delta T} \quad (6)$$

IV. Conductivité thermique de composites chargés de sphères creuses

L'ajout de particules conductrices de chaleur permet d'augmenter notablement la conductivité thermique des polymères. Les taux de charges nécessaires pour avoir des augmentations importantes de conductivité effective sont de l'ordre de plusieurs dizaines de %. La réduction du taux de charge tout en maintenant l'augmentation de conductivité effective est un élément important pour conserver un des avantages des polymères que représente leur faible densité. Les particules métalliques creuses semblent d'excellentes candidates pour ce cas[5].

L'objectif de ce travail est d'étudier à l'aide d'une modélisation numérique 3D, l'effet de la réduction de l'épaisseur F des parois des particules métalliques creuses sur la conductivité E des composites.

Une analyse numérique en 3D par le logiciel COMSOL software a été réalisée pour étudier le transfert de chaleur par conduction au sein du composite ; Afin de modéliser le problème nous considérons une cellule élémentaire correspondante à deux arrangements : cubique simple (SC) et cubique à face centrée (FCC) (figure IV.9).

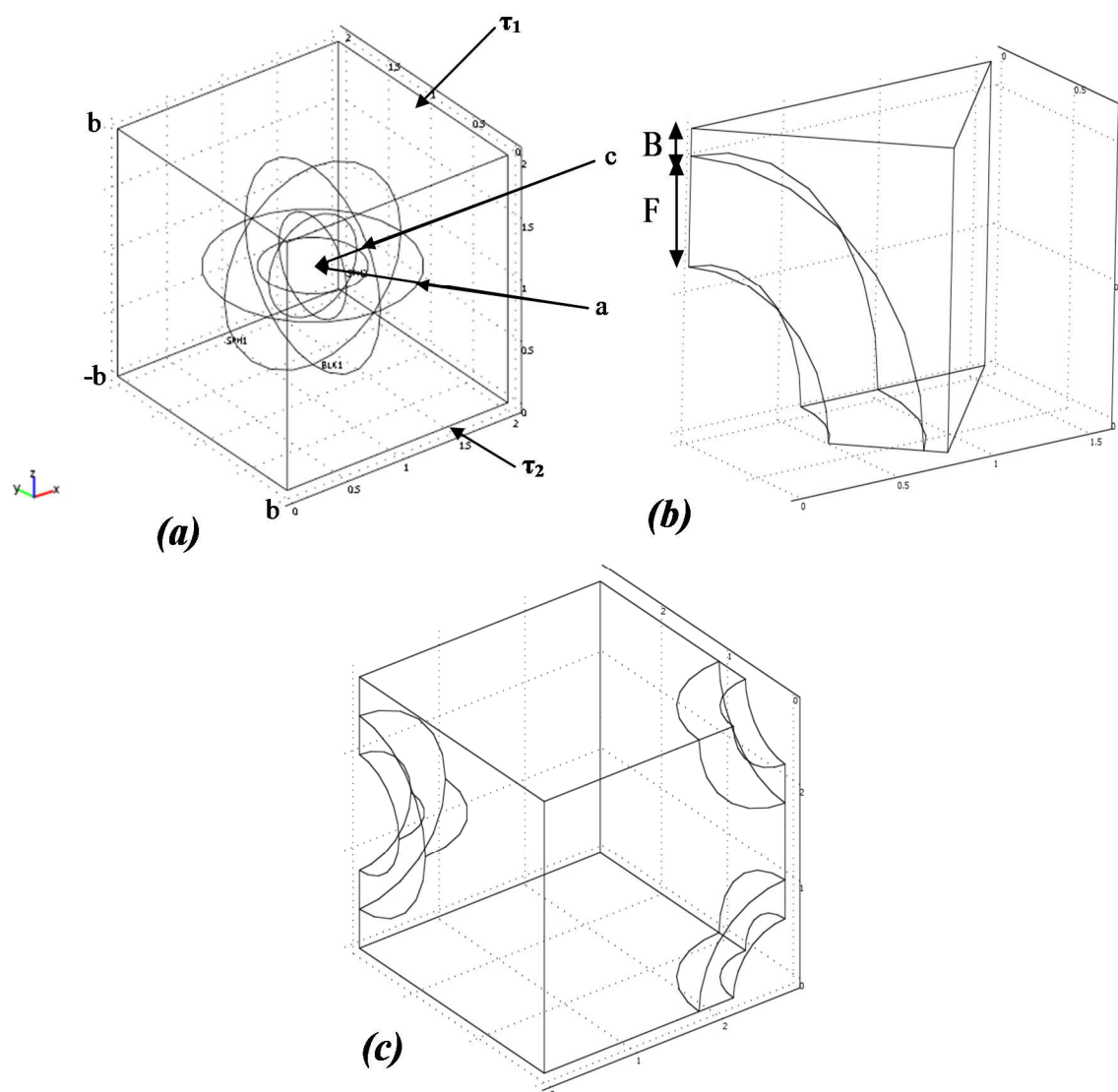


Figure IV.9 : (a) Cellule élémentaire, (b) arrangement cubique simple, (c) arrangement cubique à face centrée

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 avec des températures respectivement égales à τ_1 et τ_2 ;
- Les faces parallèles à la direction de l'écoulement de la chaleur sont adiabatiques.

Pour simplifier le problème et diminuer le temps de calcul, nous étudions seulement le $1/16^{\text{ième}}$ de la cellule élémentaire (figure IV.9b, c).

Les grandeurs adimensionnelles sont définies comme suit :

- $X = x/r$; $Y = y/r$; $Z = z/r$: variables d'espace sans dimension ;
- $B = \frac{b-a}{a}$; $D = \frac{k_m}{k_f}$: distance entre inclusion et matrice et le rapport entre la conductivité thermique de la matrice et de fibre ;
- $S = \frac{2\theta - \tau_1 - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}$; $T = \frac{2\tau - \tau_1 - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}$: températures de la charge et de la matrice ;
- $C = \frac{r_c k_m}{a}$; $E = \frac{k_c}{k_m}$: résistance de contact réduite situé à l'interface de la fibre et la conductivité thermique effective du matériau ;
- $F = 1 - \frac{c}{a}$: épaisseur relative de la paroi des sphères conductrices creuses.

La conductivité thermique est calculée en fonction de quatre paramètres (B : la distance entre la matrice et la fibre, C : la résistance de contact, D : le rapport entre la conductivité de la matrice et de la fibre et F : l'épaisseur relative de la paroi des sphères conductrices creuses). Le nombre de nœuds dans le réseau d'élément finis est d'environ 130000 à 630000 nœuds.

Le maillage de la géométrie est présenté dans la figure IV.10.

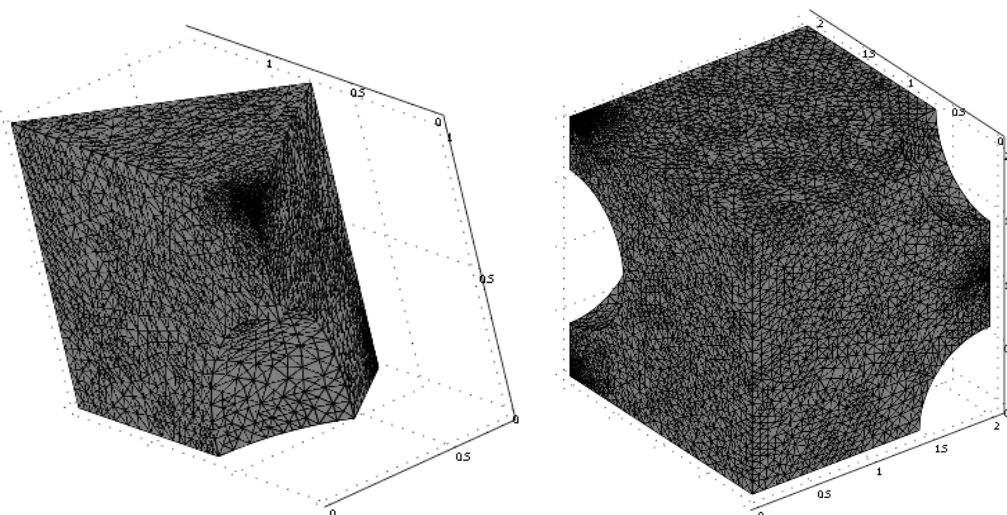


Figure IV.10 : *Maillage de la géométrie*

La distribution de la température dans le matériau est présentée dans la figure IV.11 :

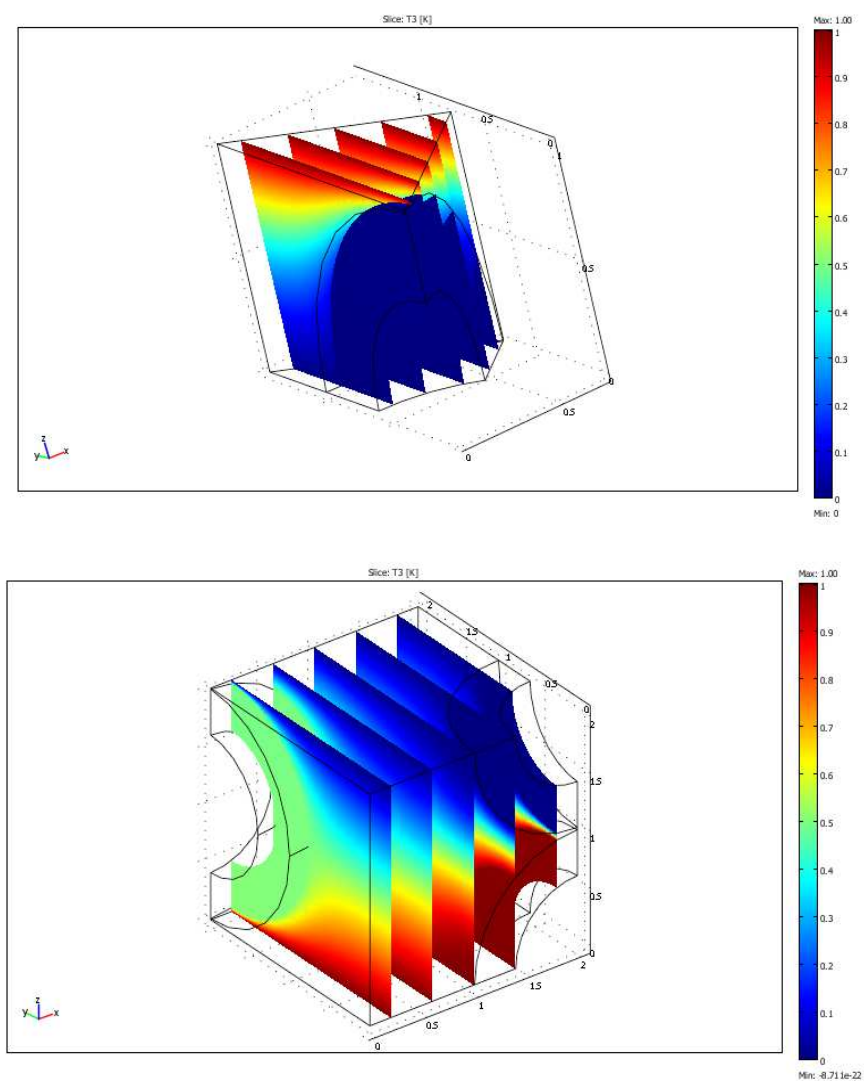


Figure IV.11 : *Distribution de la température*

A partir de la relation de B, on peut déduire la concentration volumique des charges tel que :

$$\varphi = \frac{\pi(1 - (1 - F)^3)}{6(1 + B)} \quad (7)$$

Le flux de chaleur traversant la cellule élémentaire est obtenu en intégrant le flux relative définie en chaque point de la face supérieure, ceci permettant de calculer la conductivité E du composite.

$$Q = \frac{k_c b^2 \Delta \tau}{2b} = -k_m \iint_{s_1} \frac{d\tau}{dz} dx dy \quad (8)$$

La conductivité thermique effective pour l'arrangement cubique simple est donnée par la relation (9) :

$$\begin{aligned} \frac{k_{eff} \times \left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{2} \right) \times b}{2} &= -\frac{k_m \times r^2}{2r} \int_0^{B+1} \int_0^Y \frac{d[(\tau_1 - \tau_2)T + (\tau_1 + \tau_2)]}{dZ} dXdY \\ \frac{k_{eff} \times b \times (\tau_2 - \tau_1)}{4} &= -\frac{k_m \times r}{2} \times (\tau_1 - \tau_2) \int_0^{B+1} \int_0^Y \frac{dT}{dZ} dXdY \\ \frac{k_{eff} \times b}{2} &= k_m \times r \int_0^{B+1} \int_0^Y \frac{dT}{dZ} dXdY \\ \frac{k_{eff}}{k_m} &= \frac{2 \times r}{b} \int_0^{B+1} \int_0^Y \frac{dT}{dZ} dXdY \end{aligned} \quad (9)$$

En introduisant la relation du paramètre B, on trouve :

$$E = \frac{2Q}{1 + B} \quad (10)$$

En suivant les memes étapes decrites ci-dessus, la conductivité thermique effective correspondante à l'arrangement cubique à face centrée est donnée par la relation (11) :

$$E = \frac{2Q}{1 + B} \quad (11)$$

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'approche numérique utilisée pour estimer la conductivité thermique des matériaux composites renforcés par des fibres naturelles. Cette méthode a été développée en utilisant le logiciel COMSOL software. Nous avons aussi montré la démarche à suivre pour étudier l'influence des niveaux de taille sur la conductivité thermique. La méthode de détermination de la conductivité thermique des composites chargés par des sphères creuses pour les deux arrangements cubique simple et cubique à face centrée a été également présentée dans ce chapitre.

Les résultats numériques obtenus ont été présentés et comparés aux valeurs expérimentales et aux modèles théoriques dans le chapitre suivant.

VI. Références

- [1] M. Haddadi, B. Agoudjil, A. Boudenne, and B. Garnier, "Analytical and Numerical Investigation on Effective Thermal Conductivity of Polymer Composites Filled with Conductive Hollow Particles," *International Journal of Thermophysics*, vol. 34, pp. 101-112 LA - English, 2013.
- [2] J. K. Carson, S. J. Lovatt, D. J. Tanner, and A. C. Cleland, "An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations," *International Journal of Refrigeration*, vol. 26, pp. 873-880, 2003.
- [3] W. Zhou, S. Qi, Q. An, H. Zhao, and N. Liu, "Thermal conductivity of boron nitride reinforced polyethylene composites," *Materials Research Bulletin*, vol. 42, pp. 1863-1873, 2007.
- [4] S. Yu, P. Hing, and X. Hu, "Thermal conductivity of polystyrene-aluminum nitride composite," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, pp. 289-292, 2002.
- [5] A. Boutros, B. Garnier, F. Danes, A. Boudenne, L. Ibos, and B. Agoudjil, "Conductivité thermique effective de composites chargés de sphères conductrices creuses en contact imparfait avec la matrice isolante," 2008.

**Chapitre V:Etude
numérique du comportement
de la conductivité thermique
des matériaux composites**

I. Introduction

Dans ce chapitre, on présente tous les résultats obtenus par simulation numérique et réalisés avec le logiciel COMSOL software. On présente aussi les résultats expérimentaux pour validation et dans le but de déterminer l'influence de chaque paramètre sur le comportement thermique d'un composite bois-polymère.

Dans la première partie de ce chapitre nous présentons les résultats numériques obtenus dans ce travail, ainsi qu'une comparaison avec les valeurs expérimentales et les modèles de prédiction de la conductivité thermique des composites.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de l'effet du niveau de taille des inclusions sur la conductivité thermique des composites.

La troisième partie comporte une étude numérique de la conductivité thermique des composites à matrice polymère renforcée par des sphères métalliques creuses. Les valeurs numériques de la conductivité thermique sont présentées en fonction de l'épaisseur de la paroi et de la concentration volumique des charges. Nous nous sommes également intéressé à l'étude de l'influence du rapport de conductivité et de la résistance de contact sur la conductivité thermique du composite. Les valeurs numériques de la conductivité thermique des composites sont comparées aux modèles de prédiction théorique en fonction du rapport de conductivité et de la concentration volumique des charges.

II. Propriétés thermophysiques

II.1 Conductivité thermique

L'approche numérique décrite dans le chapitre IV section IV.1 est utilisée pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux composites renforcés par des fibres de bois de palmier dattier. Les résultats numériques obtenus sont illustrés dans les figures V.1 et V.2.

Dans la figure V.2, les valeurs de la conductivité thermique sont comparées à plusieurs modèles de prédictions théoriques de la conductivité thermique ainsi qu'aux valeurs expérimentales.

La figure V.1 montre qu'il y a une diminution linéaire de la conductivité thermique en fonction de l'augmentation de la concentration volumique des fibres. Cette diminution est due à la différence entre la conductivité thermique de la matrice et des fibres.

Un même résultat a été rapporté par K. Ramanaiah *et al*[1]. Ils ont étudié la conductivité thermique de composite à matrice polyester renforcé par des fibres de déchets d'herbe à balai. Les résultats obtenus ont montré que la conductivité thermique du composite diminue en fonction de l'augmentation de la concentration des fibres. Cette diminution est due à la différence entre les conductivités de la matrice et des fibres. Ainsi l'ajout de fibres naturelles génère une porosité et la présence d'air dans la matrice ce qui conduit à une faible densité et une faible conductivité thermique. Dans un autre travail, M. Chikhi *et al* [2] ont étudié la conductivité thermique de composite à base de gypse renforcé par des fibres de bois de palmier dattier. Ils ont rapporté aussi que la conductivité thermique du composite diminue en fonction de l'augmentation des fibres.

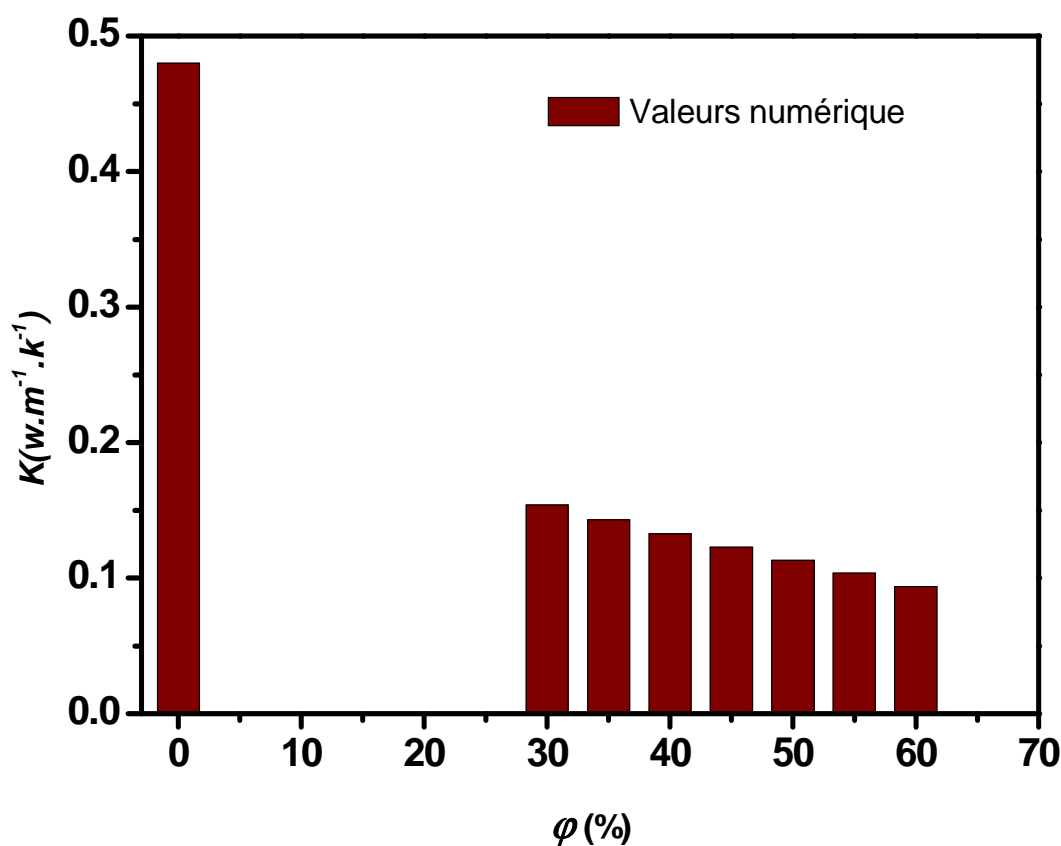


Figure V.1: Variation de la conductivité thermique du composite en fonction de la concentration volumique des fibres

La figure V.2 montre que notre modèle numérique fournit une bonne estimation de la conductivité thermique. Par ailleurs, pour les concentrations de 30% et 35% il y a une petite divergence entre les résultats numériques et les mesures expérimentales. Cette divergence est peut être due à l'effet de l'orientation des fibres dans la matrice. Pour les concentrations supérieures à 35%, le modèle numérique développé dans cette étude donne une bonne prédiction de la conductivité thermique des composites.

On remarque aussi d'après la figure V.2, que la diminution de la conductivité thermique est d'environ 83% pour une concentration volumique de fibres de 60%.

L'évolution de la conductivité thermique de la figure V.2 montre qu'au delà de 50% de concentration volumique de fibres, la diminution de la conductivité thermique du composite est relativement faible. En outre, à partir de l'étude précédente de l'absorption d'eau, la dégradation des échantillons a été observée dès 50% de fibres. Par conséquent, il est apparu utile de limiter la concentration volumique des fibres dans la matrice à 50%.

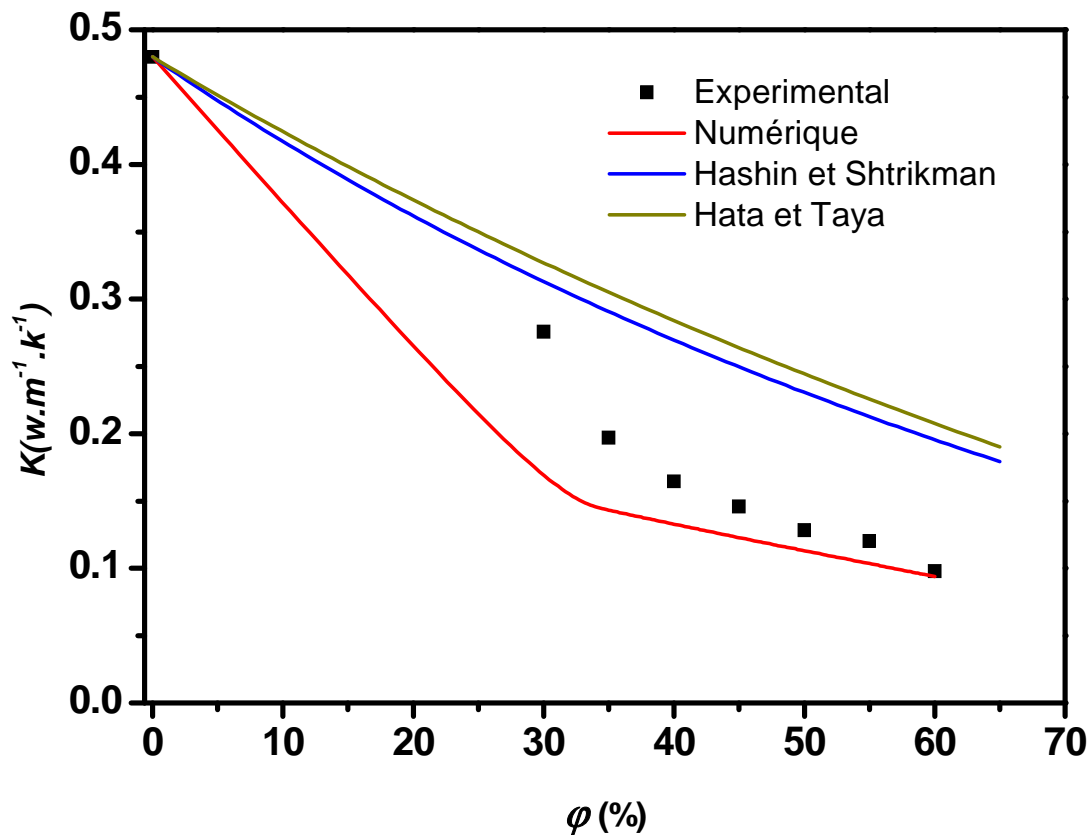


Figure V.2 : Comparaison de la conductivité thermique du composite aux modèles théoriques et aux valeurs expérimentales

On remarque également d'après la figure V.2, que pour une concentration volumique de fibres supérieure à 35%, les modèles de prédiction théorique surestime la conductivité thermique des composites.

Un résultat similaire a été obtenue par Rjaskshmi *et al* [3]. Ils ont étudié expérimentalement et numériquement la conductivité thermique des composites à base de poudre de pin. Dans cette étude la méthode des éléments finis via le logiciel ANSYS a été mise en œuvre pour déterminer la conductivité thermique de composite à matrice polymère renforcée par des poudres de pin. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure V.3. Il a été montré qu'il y a une différence entre les valeurs expérimentales et numériques. Cette différence peut être attribuée au fait que certaines hypothèses prises pour l'analyse par éléments finis ne sont pas réelles.

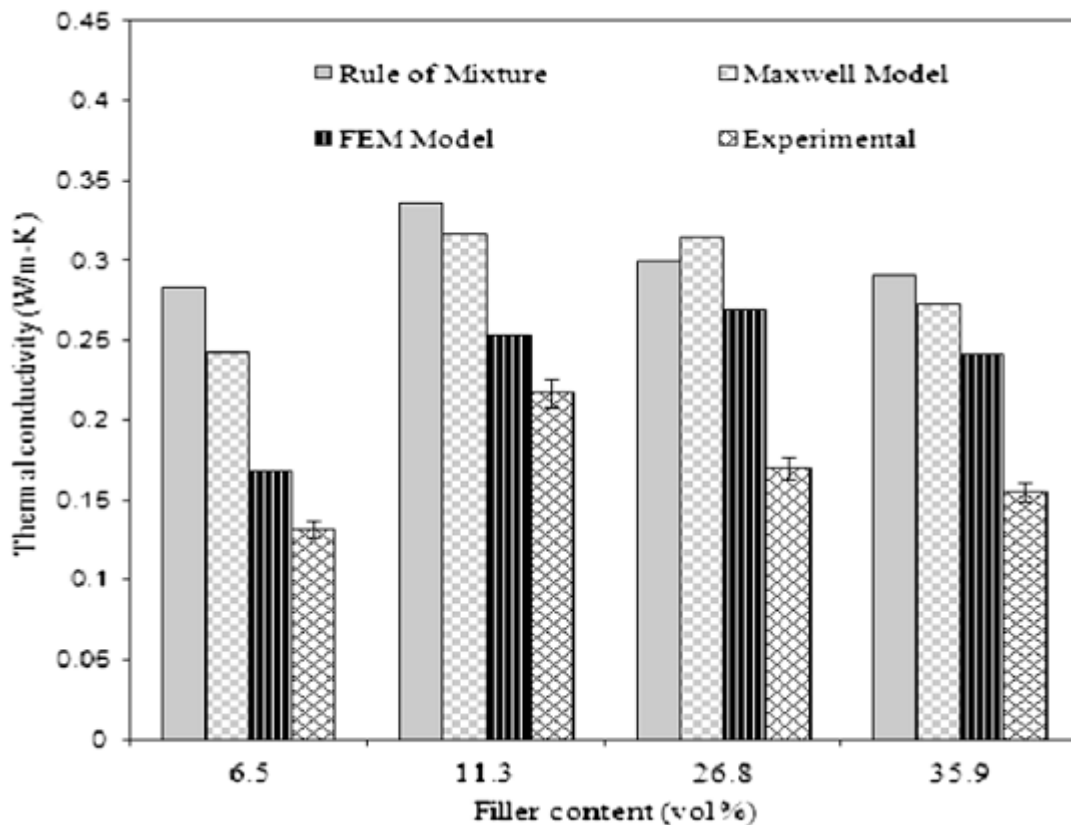


Figure V.3: Comparaison entre les conductivités thermiques expérimentale, théorique et numérique[3]

Dans un autre travail, Liu *et al* [4] ont étudié numériquement la conductivité thermique des composites à base de fibre de chanvre. La méthode des éléments finis en 2D a été utilisé pour

calculer la conductivité thermique du composite. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure V.4. Cette figure montre une comparaison entre les valeurs numériques et expérimentales. Il a été constaté que la conductivité thermique du composite diminue en fonction de l'augmentation de la concentration des fibres. D'autre part, il y a une légère différence entre les valeurs numériques et expérimentales.

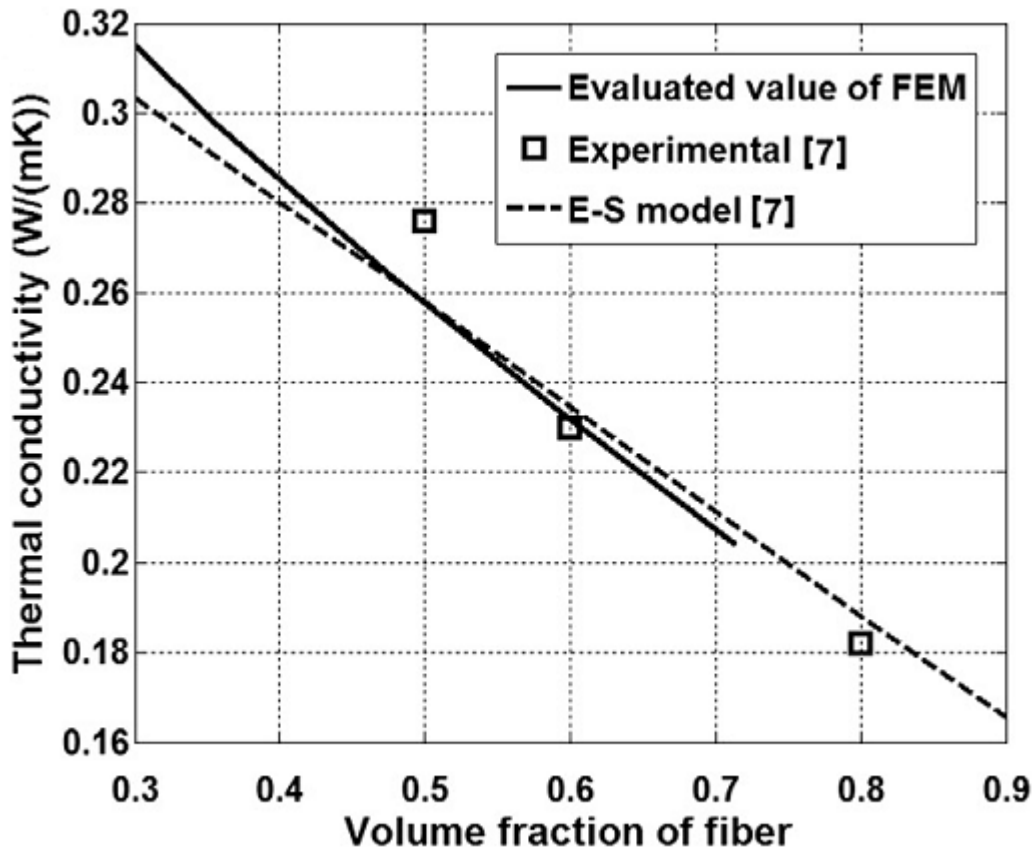


Figure V.4: Comparaison entre la conductivité thermique expérimentale et numérique[4]

Behzad *et al* [5] ont déterminé la conductivité thermique de composite à matrice polymère renforcée par des fibres de chanvre pour différentes concentrations volumiques des fibres. Afin de confirmer les résultats expérimentaux, une simulation par éléments finis a été effectuée en utilisant les valeurs de conductivité thermique obtenus à partir de l'expérimentale. Ils ont trouvé un bon accord entre l'expérimentale et le numérique.

Saravana *et al* [6] ont étudié les propriétés thermiques de composite à matrice polyester renforcée par des fibres de maïs. Ils ont aussi étudié la conductivité thermique du composite expérimentalement, théoriquement et numériquement. L'étude numérique a été effectuée en

utilisant le logiciel ANSYS. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a une diminution de la conductivité thermique en fonction de l'augmentation de la concentration volumique des fibres. Ils ont aussi montré qu'il y a un bon accord entre les valeurs numériques et théoriques. Une légère différence entre les résultats expérimentaux et numériques a été aussi observée.

D'après notre étude, on peut conclure que la conductivité thermique des composites renforcés par des fibres naturelles est influencée par la différence entre les conductivités de la matrice et des fibres. Ce résultat a été montré par Li *et al* [7] qui ont étudié la conductivité, la diffusivité et la capacité thermique du composite à matrice polyéthylène haute densité renforcé par des fibres de lin. Ils ont montré que la conductivité du composite diminue en fonction de l'augmentation de la concentration des fibres. Ce résultat est dû aux faibles conductivités thermiques des fibres.

II.2 Influence de la résistance de contact

Afin d'étudier l'influence de la résistance de contact sur la conductivité thermique des matériaux composites, nous avons considéré différentes valeurs de la résistance, $C = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}]$. Pour un polymère avec une conductivité thermique $k_m = 0.48 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et un rayon de la fibre $a = 2.5 \text{ mm}$, les valeurs de r_c sont comprises entre 5.10^{-8} et $5.10^{-4} \text{ m}^2.\text{W}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

La figure V.3 montre l'évolution de la conductivité thermique effective pour différentes valeurs de la résistance de contact. Comme le montre la figure pour toutes les concentrations volumiques des fibres, les valeurs de la conductivité sont presque les mêmes. Pour des faibles valeurs de la résistance de contact $C = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}]$, la variation de la conductivité thermique est négligeable. Pour $C = [10^{-2}, 10^{-1}]$ la résistance de contact a une petite influence sur la conductivité thermique.

Ces résultats montrent que la diminution de la résistance de contact améliore le transfert de chaleur entre la matrice et le renfort et conduit à augmenter la conductivité thermique.

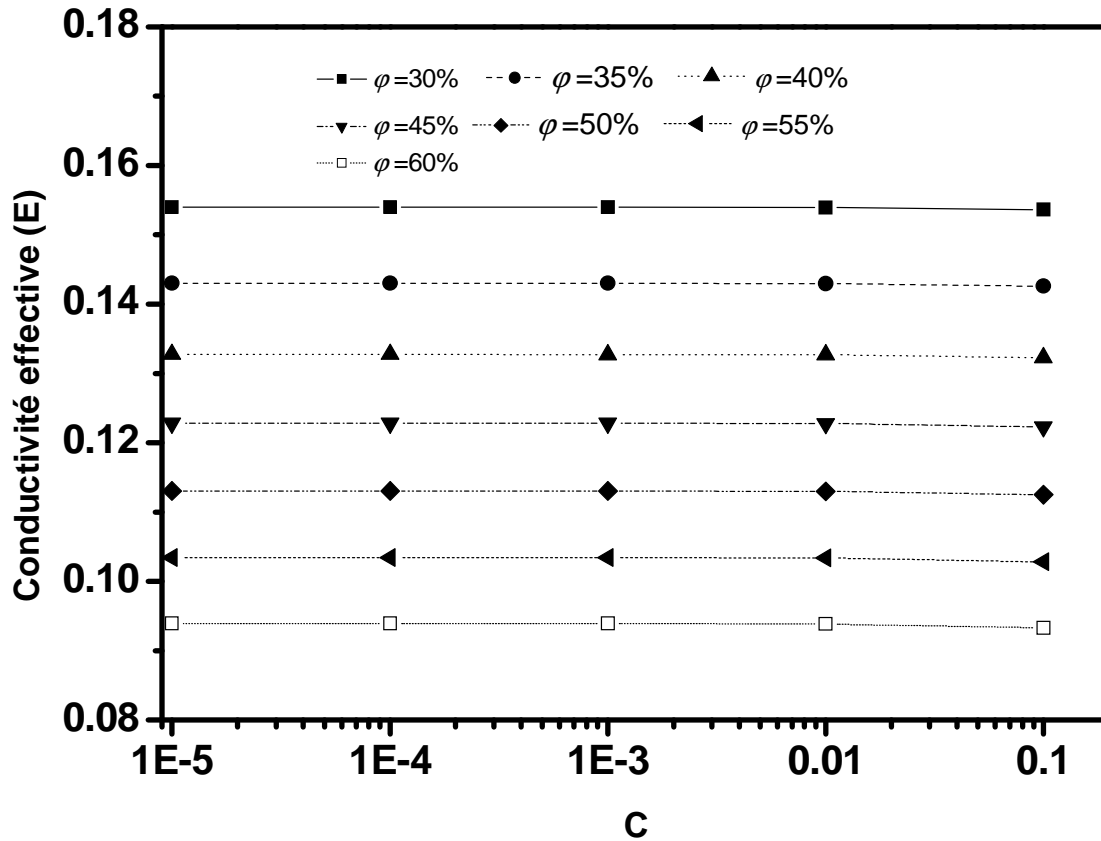


Figure V.3: Influence de la résistance de contact sur la conductivité thermique

III. Influence du diamètre des fibres et du paramètre alpha

Afin d'étudier l'influence du diamètre des fibres sur la conductivité thermique ; des fibres de différents diamètres et de conductivité thermique k_2 sont incorporées dans une phase continue de conductivité thermique k_1 . Pour cela nous avons développé un modèle numérique en 3D décrit dans le chapitre IV section II dans le but d'étudier l'influence du diamètre des fibres sur la conductivité thermique des composites.

La figure V.4 présente les résultats numériques de la conductivité thermique du composite CB/FPB.

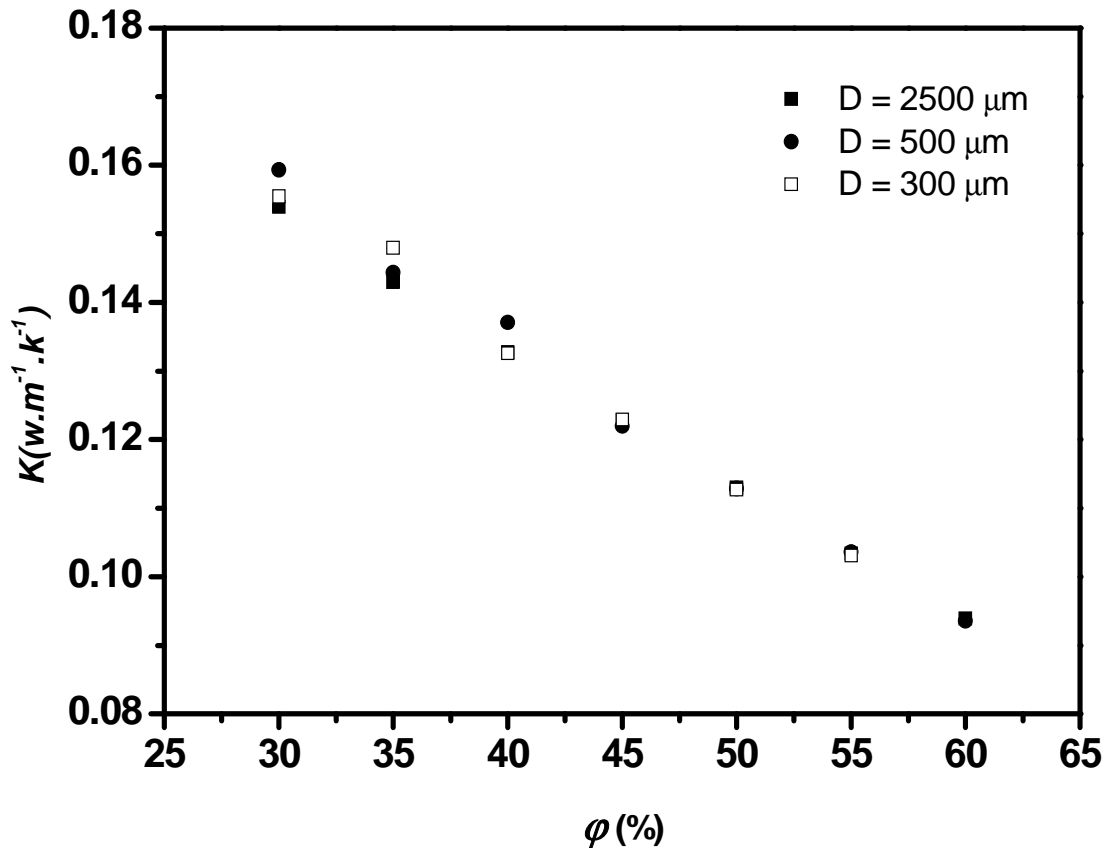


Figure V.4 : Influence du diamètre des fibres sur la conductivité thermique du composite

D'après la figure V.4, pour une concentration de fibres de 30 à 40%, il y a une légère différence entre les valeurs de la conductivité thermique. Par ailleurs, pour les concentrations supérieures à 40% on remarque qu'il y n'a pas de différence entre les conductivités thermiques du composite CB/FPB.

Faruk Hossain *et al* [8] ont étudié l'effet du type et de la taille du bois sur la conductivité thermique des composites à matrice polymère. Ils ont indiqué que les grosses particules de bois n'ont pas d'effet significatif sur la conductivité thermique du composite.

Néanmoins, ce résultat ne peut pas être généralisé. Nous avons constaté aussi à partir de notre étude, que pour les faibles concentrations volumiques des fibres ($\phi < 40\%$), la conductivité thermique des composites est faiblement influencée par la variation du diamètre des fibres. Tandis que pour les fortes concentrations ($\phi > 40\%$), l'effet du diamètre des fibres sur la conductivité thermique du composite est négligeable.

La figure V.5 montre l'effet du paramètre alpha (α) sur la conductivité thermique du composites. Comme le montre cette figure, la conductivité thermique des composites diminue avec l'augmentation de la concentration volumique des fibres. On remarque d'après cette figure que la conductivité thermique est maximale pour les fortes valeurs d'alpha. On remarque aussi que pour les concentrations des fibres supérieures à 35%, il n'y a aucun effet du paramètre alpha sur la conductivité thermique du composite.

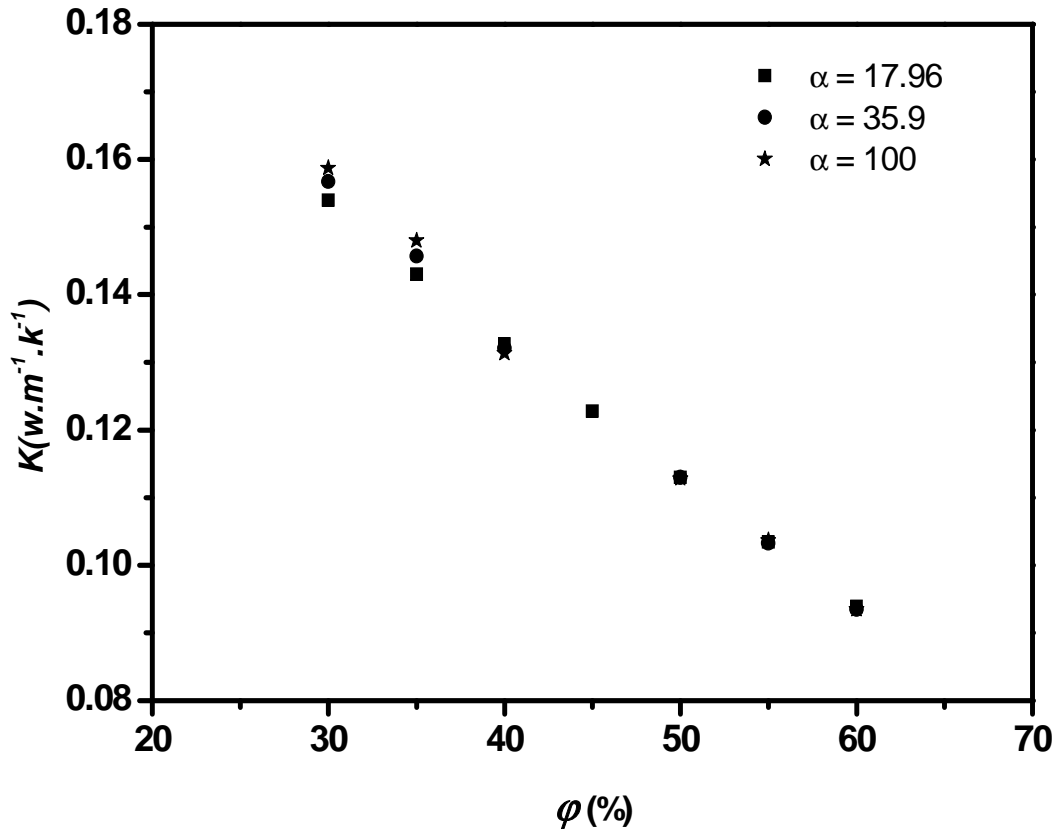


Figure V.5 : Influence du paramètre alpha sur la conductivité thermique du composite

IV. Effet du niveau de taille

Afin d'étudier l'influence des niveaux de taille des inclusions sur la conductivité thermique des composites, des charges avec différentes tailles est de conductivité thermique k_2 sont incorporés dans une phase continue de conductivité thermique k_1 . Pour cela nous avons utilisé le modèle numérique 2D décrit dans le chapitre IV section IV.2 pour étudier l'influence des niveaux de taille sur la conductivité thermique des composites.

La figure V.6 présente les résultats numériques de la conductivité thermique du composite CB/FBPD pour différents niveaux de charges.

D'après la figure V.6, on remarque qu'il y a une diminution importante de la conductivité thermique du composite pour les 4 premiers niveaux de taille. Donc, on peut dire que la conductivité thermique du composite diminue avec l'augmentation des niveaux de taille. Ce résultat peut être relié au faible conductivité thermique des charges par rapport à celle de la matrice. On observe aussi que du 5^{ième} au 8^{ième} niveau de taille de charge, la diminution de la conductivité thermique du composite est très faible. Par ailleurs, à partir du 9^{ième} niveau la conductivité thermique du composite commence à se stabiliser. Ceci peut être relié à la taille des charges utilisées. A partir du 8^{ième} niveau, les charges utilisées sont très petite donc l'influence sur la conductivité thermique est négligeable.

Nous avons constaté à partir de notre étude, qu'à partir du 8^{ième} niveau de taille, l'influence sur la conductivité thermique est négligeable. Tandis que du 1^{er} au 7^{ième} niveau, la conductivité thermique du composite est influencée par des niveaux de taille de charge.

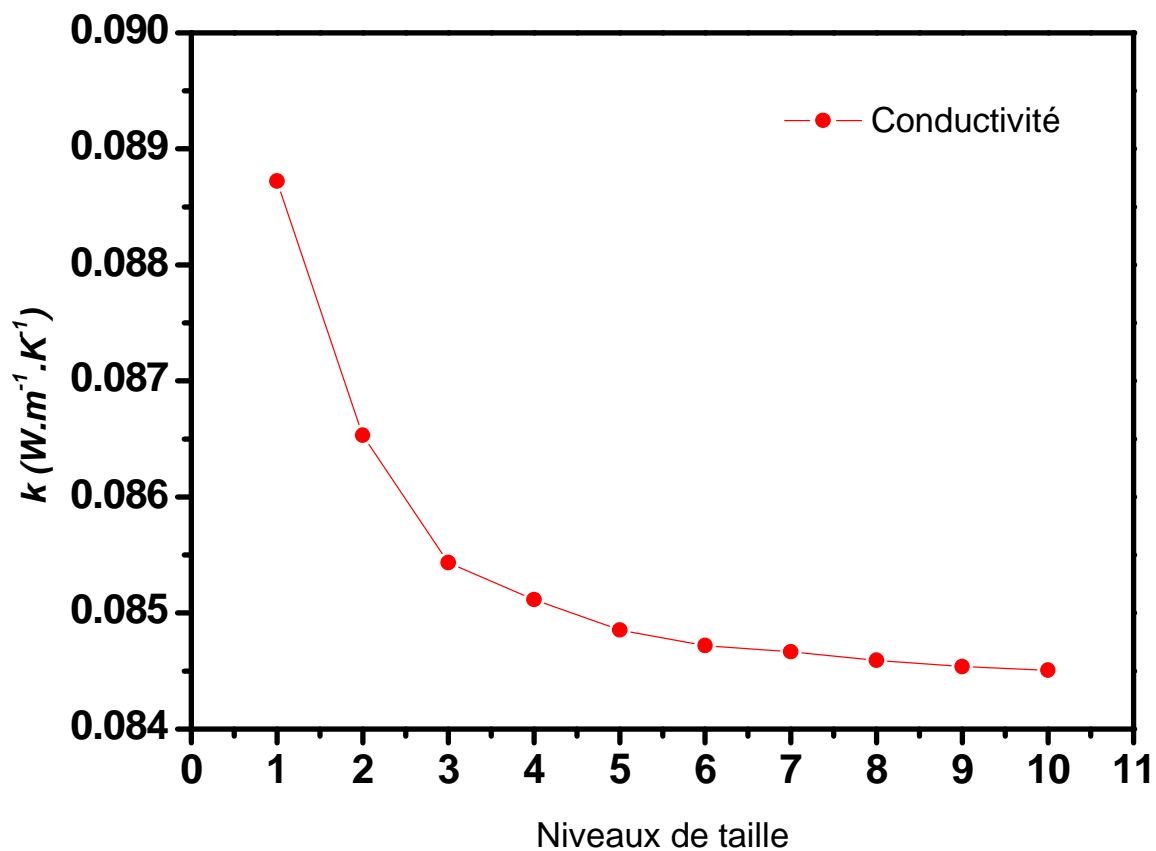


Figure V.6: Influence des niveaux de taille sur la conductivité thermique du composite

V. Conductivité thermique effective des composites chargés de sphères creuses

V.1 Influence de l'épaisseur de la paroi

Les résultats numériques obtenus à partir de l'approche décrite dans le chapitre IV section IV.3 sont présentés dans la figure V.7 avec $B = [0, 0.0025, 0.01, 0.025, 0.1]$ et $F = [0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1]$, et dans laquelle les paramètres C et D sont fixés ($C = 10^{-5}$ et $D = 10^{-3}$). Cette dernière valeur correspond à une particule creuse en aluminium incorporée dans une matrice polymère ($k_m = 0.2$ W/m.K, $k_f = 200$ W/m.K donc $D = 10^{-3}$) avec une résistance thermique interfaciale $r_c/a = C/k_m = 5 \cdot 10^{-5}$ ou $C = 10^{-5}$, $k_m = 0.2$ W/m.K. Si par exemple le rayon de la particule est $a = 10 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ ou $1000 \mu\text{m}$, il conduit à des valeurs de la résistance r_c de $5 \cdot 10^{-8}$ m²/K.W, $5 \cdot 10^{-9}$ m²/K.W ou $5 \cdot 10^{-10}$ m²/K.W respectivement. Ces valeurs sont très faibles et correspondent à un contact presque parfait. La figure V.7 (a, b) montre la variation de la conductivité thermique effective pour des arrangements cubique simple (SC) et cubique à face centrée (FCC) pour différentes concentrations volumiques de charges et différentes épaisseurs de la paroi. Comme on le voit sur les figures, pour une faible concentration volumique (valeur de B élevée), il y a une faible dépendance de la conductivité thermique de B et cela pour les deux arrangements cubiques simples et cubiques à face centrée (SC, FCC).

On observe aussi une augmentation significative de la conductivité thermique avec l'augmentation de la concentration volumique des charges. Il est montré aussi que pour les particules en contact successives, la conductivité thermique effective peut augmenter d'un facteur 14. Cette augmentation était prévisible, car la charge a une conductivité thermique significativement plus élevée que celle de la matrice polymère. On peut voir également que la diminution de l'épaisseur de la paroi de la particule creuse F induit une diminution de la conductivité thermique effective du composite. On peut voir aussi qu'à partir d'une particule solide ($F = 1$) et en diminuant l'épaisseur de la paroi de la particule creuse, la diminution de la conductivité thermique effective E est assez faible jusqu'à ce que $F = 0.2$ (diminution de E inférieure à 5%) et par la suite la diminution de E est pointu ($0 < F < 0.2$), en particulier pour une concentration volumique en charge élevée (faible valeur de B). Ceci montre que l'utilisation d'une particule creuse au lieu d'une forme solide ne change pas d'une manière significative les valeurs de la conductivité thermique effective des composites, ceci à condition que l'épaisseur de la paroi ne soit pas trop faible ($F > 0.2$).

Ces matériaux importants ont déjà fait l'objet de plusieurs recherches. Fielder *et al*[9] ont étudié la conductivité thermique effective des matériaux poreux en basant sur la conduction dans les matériaux solide. Ils ont utilisé deux approches différentes: une méthode d'approximation numérique basée sur la méthode des éléments finis et une méthode analytique. Ils ont constaté que la conductivité thermique du matériau est pratiquement indépendante de la forme des inclusions et que la morphologie de la structure montre un effet mineur sur la conductivité thermique.

Dans un autre travail, Fielder *et al* [10] ont étudié la conductivité thermique de matériau à base de sphères creuses en utilisant trois approches différentes: une méthode par éléments finis, la méthode de Monte Carlo (LMC) et un modèle analytique. Il a été constaté qu'il existe une forte dépendance de la conductivité thermique de la composition du matériau.

On peut également dire que le matériau au centre de la particule solide est non nécessaire pour la conduction de la chaleur à travers la particule, ce qui fait que le centre de la particule peut être rempli d'une matrice ou d'un autre matériau sans affecter le transfert de chaleur au sein des composites.

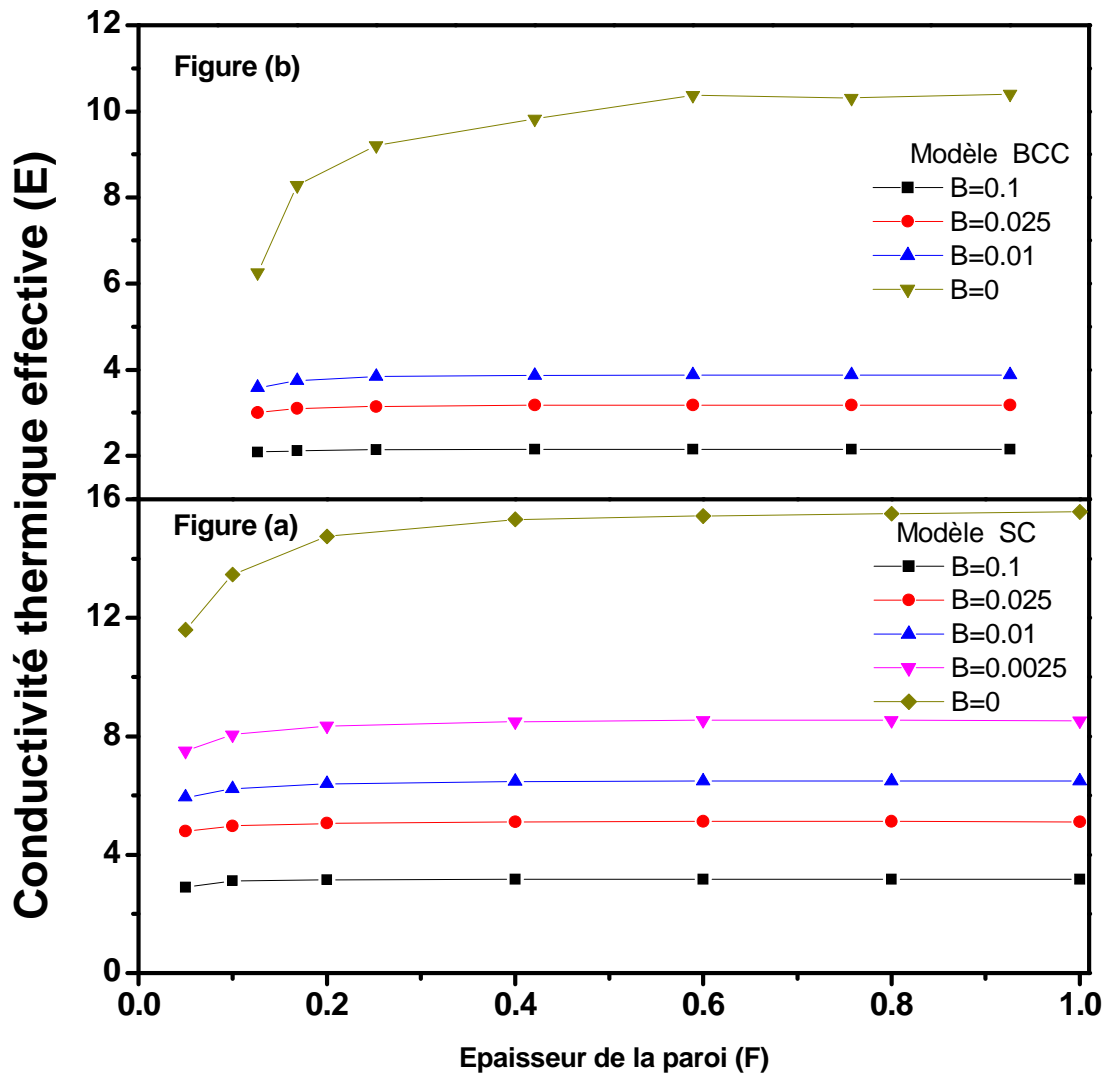


Figure V.7: Conductivité thermique en fonction de B et F ($C=10^{-5}$, $D=10^{-3}$) :
 (a) arrangement cubique simple, (b) arrangement cubique à face centrée

V.2 Influence de la résistance de contact

Afin d'étudier l'effet de la résistance de contact sur la conductivité thermique des matériaux composites, nous avons considéré différentes valeurs de la résistance de contact, $C = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}]$. Pour un polymère ayant une conductivité $k_m = 0.2 \text{ W/m.K}$, et un rayon de particule allant de $10 \mu\text{m}$ à $1000 \mu\text{m}$, les valeurs de r_c sont entre $5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{W.K}$ et $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{W.K}$. En effet, Chappelle *et al*[11] ont mesuré la résistance thermique de contact pour un polymère thermodurcissable à renfort métallique, ils ont trouvé des valeurs comprises entre $0.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $1.7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. En outre, ils ont montré que les valeurs de r_c variaient avec la température et la taille des particules. Cette dernière varie entre $27 \mu\text{m}$ et $123 \mu\text{m}$.

La figure V.8 montre la variation de la conductivité thermique effective pour un arrangement cubique simple (SC) et cubique à face centrée (FCC), pour différentes résistances de contact et épaisseur de la paroi de la particule conductrice creuse. Pour obtenir les résultats représentés sur la figure V.8, nous avons fixé les paramètres B et D tel que $B = 0.01$ et $D = 10^{-3}$. Comme on le voit sur la figure, pour des faibles valeurs de la résistance de contact $C = [10^{-5}, 10^{-3}]$, la variation de la conductivité thermique effective est presque négligeable. A partir de $C = 10^{-3}$, on remarque que l'influence de la résistance de contact sur la conductivité thermique est dominante.

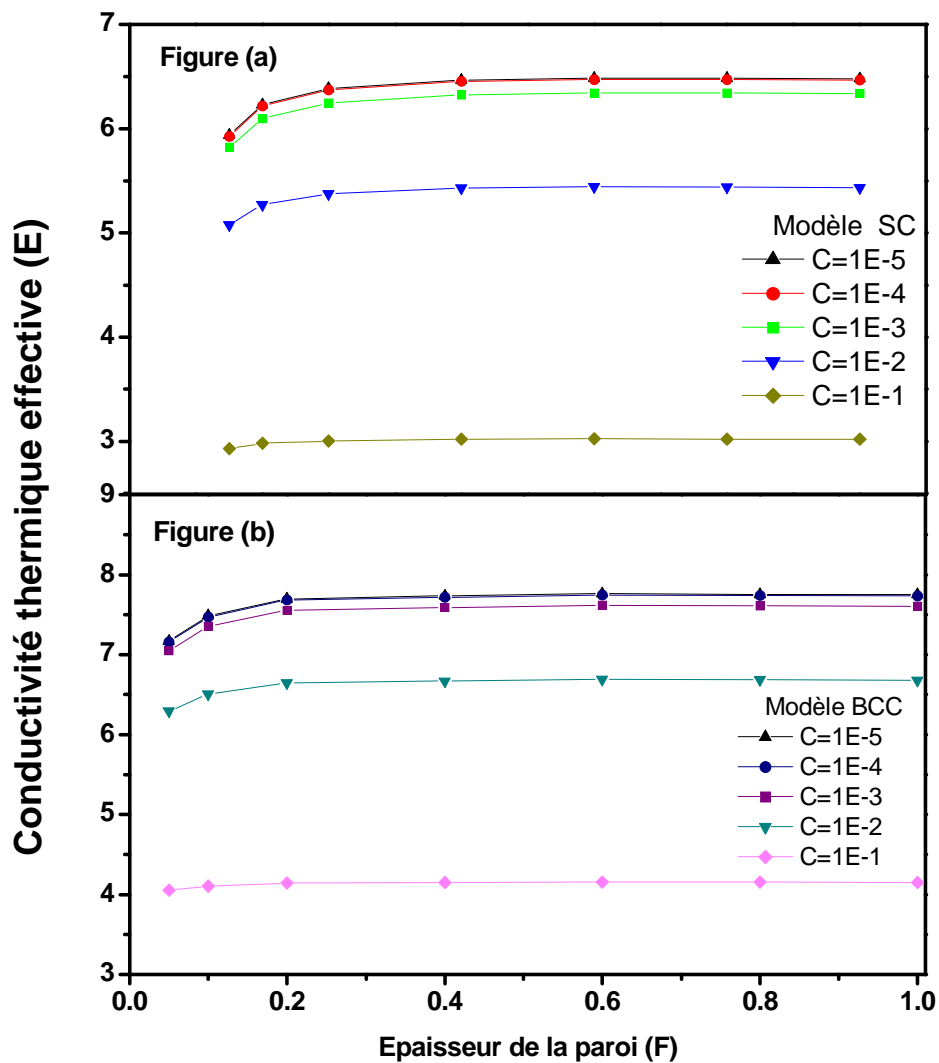
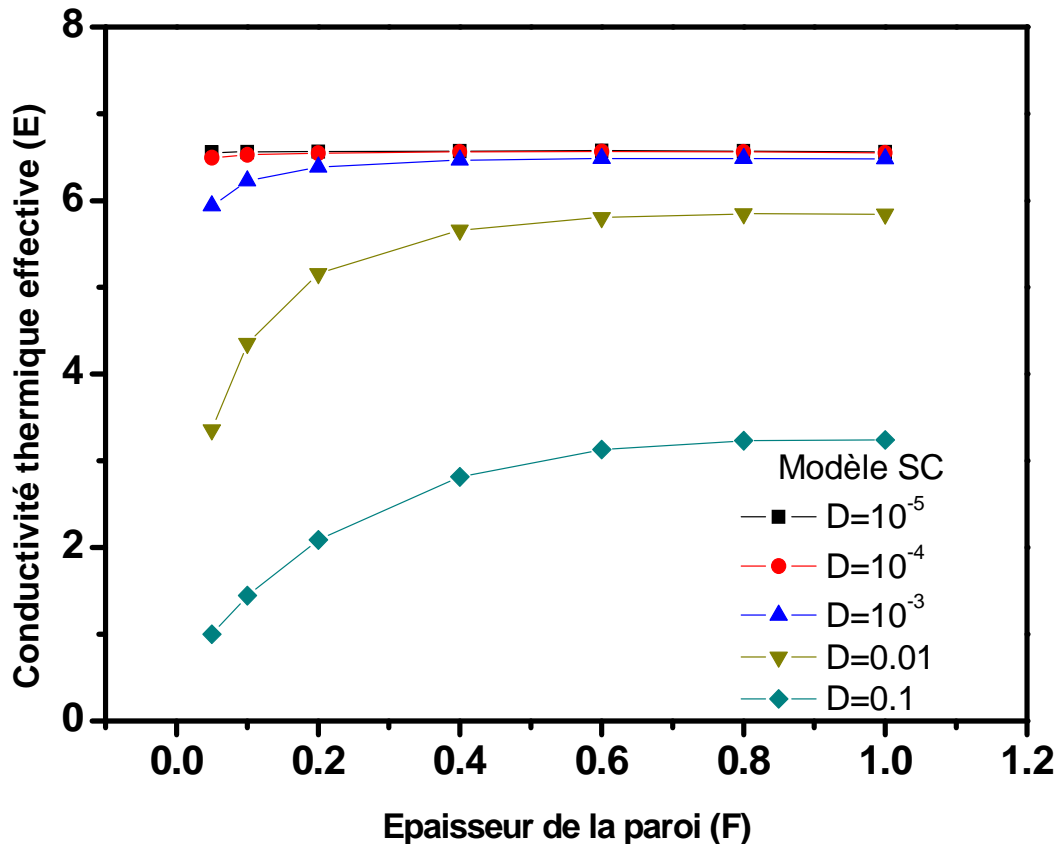


Figure V.8: Conductivité thermique en fonction de C et F ($B=0.01$, $D=10^{-3}$) :
(a) arrangement cubique simple, (b) arrangement cubique à face centrée

V.3 Influence du rapport de conductivité

L'influence de la diminution de la résistance thermique interne (rapport de conductivité D) sur la conductivité thermique effective du composite est présentée sur la figure V.9. Pour obtenir les résultats présentés dans cette figure, nous avons considéré différentes valeurs du rapport D ou $D \in [10^{-5}, 10^{-3}]$, et nous avons fixé les paramètres B et C tel que $B = 0.01$ et $C = 10^{-5}$.

Comme on le voit sur la figure V.9, pour des faibles valeurs de D , l'effet de la résistance interne sur la conductivité thermique effective est négligeable. Pour $D \in [10^{-3}, 10^{-1}]$, on remarque que l'influence du rapport D est importante. Lorsque D augmente, la conductivité thermique effective diminue.



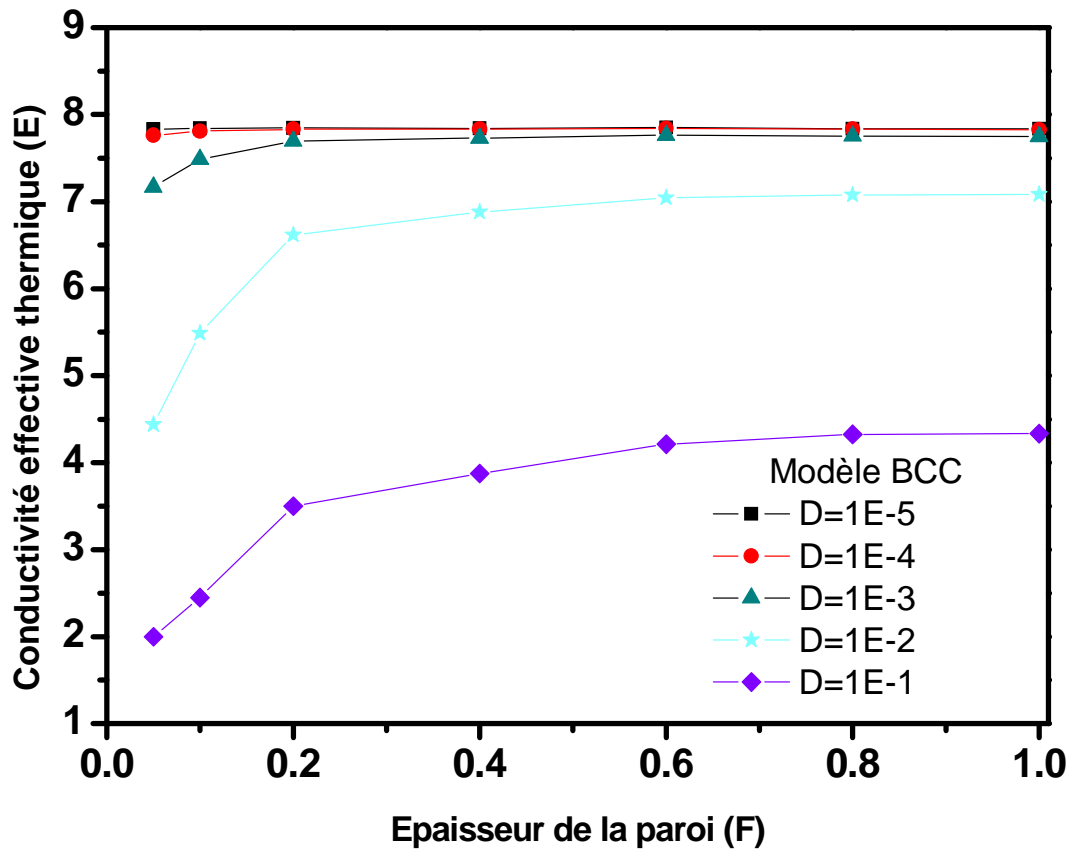


Figure V.9: Conductivité thermique en fonction de D et F ($B=0.01$, $C=10^{-5}$) :
 (a) arrangement cubique simple, (b) arrangement cubique à face centrée

V.4 Comparaison avec les modèles de prédictions théoriques

Afin d'illustrer la différence entre les modèles de prédiction théoriques et les résultats numériques, la conductivité thermique effective des composites en fonction du rapport entre la conductivité thermique de la charge et de la matrice pour une concentration de charge égale à 40.62% et une résistance thermique $C = 10^{-5}$, est présentée dans la figure V.10.

On remarque d'après la figure V.10 que les valeurs de la conductivité thermique effective des deux méthodes numériques et analytiques montrent une augmentation avec la diminution du paramètre D et tend à être une valeur constante. Nous remarquons aussi qu'il y a une différence entre la conductivité thermique effective numérique et le modèle de Hashin et Shtrikman [12,13]. Ceci indique que les sphères sont dispersées dans la matrice et ne sont pas en interaction les unes avec les autres. Toutefois, un écart par rapport aux résultats numériques est observé lorsque la concentration des charges est supérieure à 40%. La valeur la plus élevée de la conductivité thermique effective est obtenue dans le cas de l'arrangement cubique à face centrée. Ce résultat peut être expliqué par le fait que l'arrangement cubique à

face centrée montre une densité d'intégration maximale des sphères métalliques fortement conductrices. En conséquence, l'arrangement cubique simple présente une densité plus faible donc de faible valeur de la conductivité thermique. Un même résultat a été observé par Fielder *et al*[14].

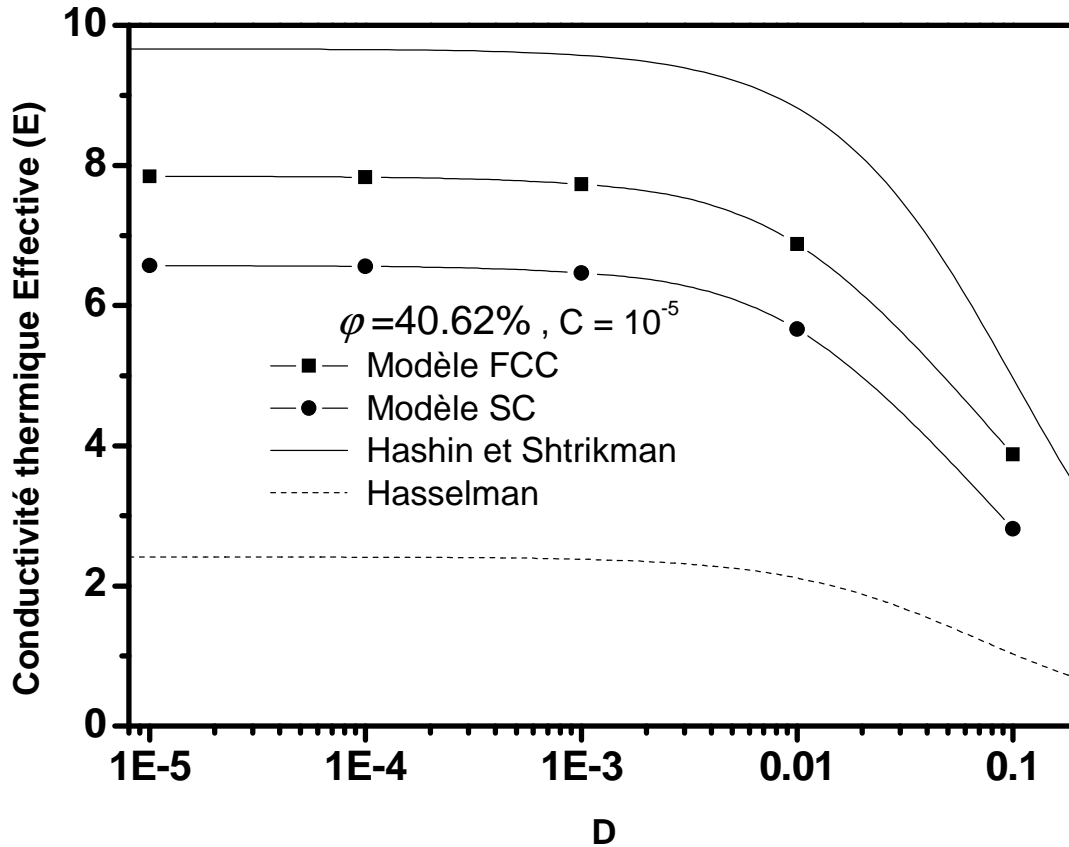


Figure V.10: Comparaison de la conductivité thermique aux modèles théoriques en fonction de D

La figure V.11 montre une comparaison entre les modèles de prédictions théoriques et la simulation numérique pour des composites à matrice époxy renforcé par des charges en aluminium. Comme on le voit sur cette figure, la plupart des modèles de prédictions théoriques utilisés dans cette étude, sont en bon accord avec les résultats numériques de la conductivité thermique pour des faibles concentrations volumiques en charge ($< 15\%$). Au-delà de 30% de concentration de charge les deux modèles de Maxwell [15] et Bruggeman [13] sous-estiment les valeurs de la conductivité thermique numérique pour les deux arrangements (SC et FCC). En effet, le modèle de Maxwell ne tient pas en compte l'effet de la résistance de contact entre la matrice époxy et les charges. Lorsque la concentration volumique des charges est supérieure à 30% , l'interaction entre les inclusions augmente, d'où la formation d'une

chaîne conductrice qui se traduit par une augmentation importante de la conductivité thermique du composite.

Les mêmes résultats ont été obtenus par Kumlutas *et al* [16]. Ils ont étudié numériquement la conductivité thermique du composite polyéthylène haute densité renforcé par des charges en aluminium. Les résultats obtenus ont montré que les modèles de prédiction théorique ne prédisent pas correctement la conductivité thermique du composite pour des concentrations de charge supérieures à 10%. Dans un autre travail, Floury *et al* [15] ont également étudié la conductivité thermique des composites en utilisant la méthode des éléments finis en 3D. Ils ont montré que le modèle de Maxwell ne fournit pas une bonne estimation de la conductivité thermique. Le modèle de Hasselman [17] donne une bonne estimation de la conductivité thermique par rapport aux modèles de Bruggeman et Maxwell. En effet, le modèle tient en compte de l'effet de la résistance de contact entre la matrice et les charges.

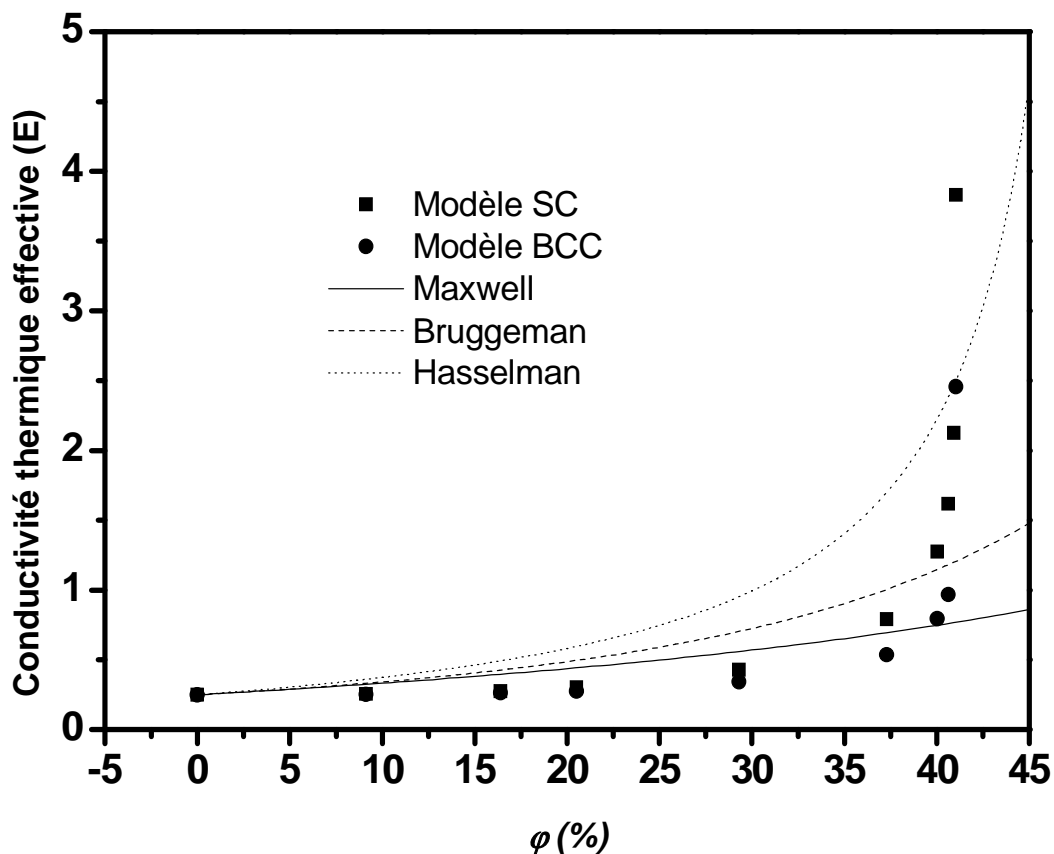


Figure V.11: Comparaison de la conductivité thermique aux modèles théoriques en fonction de la concentration volumique des fibres

VI. Conclusion

Dans cette étude, la conductivité thermique des composites à matrice polymère chargée de fibres de bois de palmier dattier ainsi que des composites renforcés par des sphères métalliques creuses a été étudiée numériquement. La méthode des éléments finis via le logiciel COMSOL software a été utilisée pour estimer les propriétés thermophysiques de ces composites et d'étudier l'influence des niveaux de taille de charge, du rapport de conductivité et de la résistance de contact sur la conductivité thermique des composites. La conductivité thermique obtenue numériquement a été comparée aux valeurs expérimentales et aux modèles de prédiction théoriques. Les résultats obtenus ont montré que notre modèle numérique prédit correctement les mesures expérimentales de la conductivité thermique. Il a été constaté aussi que les modèles de prédiction théorique surestime la conductivité thermique des composites pour les fortes concentrations.

L'effet du niveau de taille de charge sur la conductivité thermique a été présenté et analysé. Nous avons noté que pour les 4 premiers niveaux la diminution de la conductivité thermique est importante. Nous avons aussi noté qu'à partir du 5^{ème} niveau la diminution de la conductivité thermique est faible et tend à être une valeur constante.

Enfin, nous avons étudié le comportement de la conductivité thermique des composites à matrice époxy renforcé par des sphères métalliques creuses. Nous avons noté que la conductivité thermique diminue en fonction de la diminution de l'épaisseur de la paroi. L'influence de la résistance de contact sur la conductivité thermique est importante pour les fortes valeurs de C. Nous avons aussi constaté que le modèle de Hasselman donne une bonne estimation de la conductivité thermique par rapport aux modèles de Bruggeman et Maxwell.

VII. Références

- [1] K. Ramanaiah, A. V. Ratna Prasad, and K. Hema Chandra Reddy, "Thermal and mechanical properties of waste grass broom fiber-reinforced polyester composites," *Materials & Design*, vol. 40, pp. 103-108, 2012.
- [2] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. Boudenne, and A. Gherabli, "Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation," *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 267-273, 2013.
- [3] R. Nayak, T. D. P., and A. Satapathy, "A computational and experimental investigation on thermal conductivity of particle reinforced epoxy composites," *Computational Materials Science*, vol. 48, pp. 576–581, 2010.
- [4] K. Liu, H. Takagi, and Z. Yang, "Evaluation of transverse thermal conductivity of Manila hemp fiber in solid region using theoretical method and finite element method," *Materials and Design*, vol. 32, pp. 4586–4589, 2011.
- [5] T. Behzad and M. Sain, "Measurement and Prediction of Thermal Conductivity for Hemp Fibre Reinforced Composites," *Polymer Eng. Sci.*, vol. 47, pp. 977-983, 2007.
- [6] D. S. Bavan and G. C. M. Kumar, "Thermal Properties of Maize Fiber Reinforced Unsaturated Polyester Resin Composites," *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 3, pp. 1-6, 2013.
- [7] X. Li, L. G. Tabil, I. N. Oguocha, and S. Panigrahi, "Thermal diffusivity, thermal conductivity, and specific heat of flax fiber-HDPE biocomposites at processing temperatures," *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 1753-1758, 2008.
- [8] M. F. Hossain, S. N. Shuvo, and M. A. Islam, "Effect of Types of Wood on the Thermal Conductivities of Wood Saw Dust Particle Reinforced Composites," *Procedia Engineering*, vol. 90, pp. 46–51, 2014.
- [9] T. Fiedler, E. Pesetskaya, A. Öchsner, and J. Grácio, "Calculations of the Thermal Conductivity of Porous Materials," *Materials Science Forum*, vol. 514, pp. 754, 2006.
- [10] T. Fiedler, A. Öchsner, I. V. Belova, and G. E. Murch, "Recent Advances in the Prediction of the Thermal Properties of Syntactic Metallic Hollow Sphere Structures," *Advanced Engineering Materials*, vol. 10, pp. 361-365, 2008.
- [11] E. Chapelle, B. Garnier, and B. Bourouga, "Interfacial thermal resistance measurement between metallic wire and polymer in polymer matrix composites," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, pp. 2221-2227, 2009.

- [12] M. Karkri, A. Boudenne, L. Ibos, B. Garnier, and Y. Candau, "Numerical and experimental study of thermophysical properties of spheres composite materials," pp. 1, 2010.
- [13] D. M. Bigg, "Thermal Conductivity of heterophase Polymer Compositions," *Advances in Polymer Science*, vol. 119, pp. 1-30, 1995.
- [14] T. Fiedler, E. Solàrzano, and A. Áchsner, "Numerical and experimental analysis of the thermal conductivity of metallic hollow sphere structures," *Materials Letters*, vol. 62, pp. 1204-1207, 2008.
- [15] J. Flourey, J. Carson, and Q. T. Pham, "Modelling Thermal Conductivity in Heterogeneous Media with the Finite Element Method," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 1, pp. 161-170 LA - English, 2008.
- [16] D. Kumlutas, Ä. s. H. Tavman, and M. Turhan Äđoban, "Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 63, pp. 113-117, 2003.
- [17] D. P. H. Hasselman and L. F. Johnson, "Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance," *Journal of composite materials*, vol. 21, pp. 508-515, 1987.

Conclusions

Conclusions

L'ajout de fibres de bois de palmier dattier dans les matériaux polymères représente une voie prometteuse car elles permettent l'amélioration de l'ensemble des propriétés du matériau. La détermination de la conductivité thermique des composites provient des faibles propriétés de la fibre, mais de nombreux autres paramètres comme la taille des fibres, la concentration volumique des fibres influencent également les propriétés thermophysiques ainsi que d'autres caractéristiques du composite tel que l'absorption d'eau. La réalisation d'un matériau composite avec les meilleures propriétés possibles passe donc par le contrôle de tous ces paramètres.

Dans ce travail, plusieurs résultats ont été obtenus sur la fabrication et la caractérisation des matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres naturelles.

L'analyse microscopique des composites avait pour but de déterminer la morphologie des fibres. Afin d'obtenir des composites homogènes avec différentes concentrations de fibres naturelles, le choix des conditions optimales de moulage doit être fait. En général, la densité des composites diminue avec l'augmentation de la concentration volumique des fibres naturelles parce que la densité des fibres naturelles est plus faible que la densité du polymère.

Pour les essais d'absorption d'eau, les résultats ont montré que l'augmentation de la concentration des fibres dans les composites induit un temps de saturation plus élevé.

Pour les composites à concentration inférieure à 50% de fibres, l'absorption d'eau la plus importante survient après 150seconds d'immersion. On a noté aussi une absorption d'eau de 92%, 129%, 138% et 126% pour les concentrations de fibres de 30%, 35%, 40% et 45% respectivement. On a aussi constaté que l'équilibre a été atteint au bout de 160s pour tous les composites. Il est montré également que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de la concentration des fibres ;

La conductivité thermique du composite CB/FBP a été déterminée avec la méthode de la plaque chaude gardée. On a constaté que les composites chargés avec les fibres de bois de palmier dattier possèdent une conductivité thermique inférieure à celle de la matrice. Cette diminution est plus marquée pour les fortes concentrations. On a noté

aussi que pour une concentration de 30% de fibres, la conductivité thermique diminue de $0.48 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $0.276 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Il a été montré aussi que pour une concentration de 30% de fibres, la masse volumique diminue de $1026.64 \text{ Kg.m}^{-3}$ à 401.64 Kg.m^{-3} . Ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 60%. D'autre part, l'augmentation de la concentration volumique des fibres de palmier dattier dans la matrice diminue la masse volumique du composite. On note aussi que l'augmentation de la masse volumique conduit à une augmentation de la conductivité thermique du composite.

L'approche numérique effectuée dans ce travail est utilisée pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux composites renforcés par des fibres de bois de palmier dattier.

Les résultats obtenus montrent que le modèle numérique développé dans ce travail prédit correctement les mesures expérimentales de la conductivité thermique. Par ailleurs pour les concentrations de 30% et 35% il y a une petite divergence entre les résultats numériques et les mesures expérimentales.

La taille des inclusions présente aussi un paramètre important qui influe sur la conductivité thermique des matériaux composites. Il a été montré qu'il y a une diminution de la conductivité thermique pour les 4 premiers niveaux de la taille. On a constaté aussi qu'à partir du 8^{ième} niveau de taille, l'influence sur la conductivité thermique est négligeable.

La conductivité thermique des composites chargés par des sphères creuses a été également étudiée dans ce travail. On a constaté que la diminution de l'épaisseur de la paroi de la particule creuse induit une diminution de la conductivité thermique du composite.

On a noté aussi que le matériau au centre de la particule solide n'est pas nécessaire pour la conduction de la chaleur à travers la particule, ce qui fait que le centre de la particule peut être rempli d'une matrice ou d'un autre matériau sans affecter le transfert de chaleur au sein des composites.

Le rôle de l'isolation thermique dans le bâtiment est de garantir un confort thermique aux occupants et de diminuer les frais de chauffage d'un bâtiment. La performance

thermique d'un matériau dépend de sa conductivité thermique. En fonction de l'épaisseur de l'isolant, nous obtenons sa résistance, c'est à dire sa capacité à s'opposer au passage de la chaleur à travers ses parois. On a constaté à partir des résultats obtenus de l'étude de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique du composite CB/FPB en fonction de l'épaisseur, que plus cette dernière augmente plus la résistance thermique du matériau augmente et plus son coefficient de transmission thermique diminue. La comparaison entre les valeurs des résistances thermiques du composite CB/FPB et d'autres matériaux isolants a montré que le composite CB/FPB peut être utilisé comme isolant dans le bâtiment pour réduire les déperditions thermiques à travers les parois. Nous avons aussi constaté que l'isolant conçu en forme de pente répond pleinement aux exigences de l'amélioration de l'efficacité énergétique et possède une bonne capacité d'isolation thermique.

Nous avons aussi constaté que l'ajout des fibres de palmier dattier a un effet favorable sur les propriétés thermique du composite. On constate aussi que pour une concentration des fibres inférieure à 50%, les composites CB/FPB satisferont aux exigences thermiques et peuvent être utilisés comme matériaux biocomposites destinés à l'isolation thermique dans le bâtiment.

Perspectives

Comme on a considéré les propriétés thermophysiques des composites ne varie pas en fonction de la température, une analyse plus approfondie de ces propriétés serait nécessaire pour les prédire à basse et à haute température afin d'apporter plus de précision dans les résultats ;

Cette étude peut être complétée par l'intégration d'une troisième phase (les pores) ;

La modélisation numérique pourrait aussi être développée en 3D pour des géométries plus complexes

Finalement, il serait intéressant d'utiliser d'autres matériaux et d'autres types de charges pour effectuer des comparaisons et élargir les champs d'application de ce modèle.

Titre du mémoire : PROPRIETES DE TRANSPORTS DES MATERIAUX HETEROGENES A RENFORT NATUREL: APPROCHE EXPERIMENTAL ET MODELISATION NUMERIQUE

Option : Energie et développement durable

Auteur : HADDADI Manel.

Mots clés : Matériaux composites, matériaux naturels, développement durable, propriétés de transport, conductivité thermique effective, modélisation numérique.

Adresse : Laboratoire de Physique Energétique Appliquée LPEA, Université Hadj Lakhdar Batna, 1, rue Boukhrouf Med El Hadi, 05000 Batna, Algérie.

Résumé :

Le sujet de cette thèse vise la conception et le développement de nouveaux matériaux composites à base de fibres naturelles adaptés à l'isolation thermique dans le bâtiment. Cela permettra d'une part d'accroître notre connaissance sur les propriétés thermophysiques de composite à renforts naturels. D'autre part, il serait primordial de déterminer les facteurs influant sur les propriétés de ces composites. Une étude expérimentale et numérique sur le comportement de la conductivité thermique a été réalisée en utilisant la plaque chaude gardée et la méthode des éléments finis via le logiciel COMSOL, afin de prédire la conductivité thermique des composites et d'étudier l'influence de la taille du renfort et de la résistance de contact sur la conductivité des composites. L'absorption d'eau des matériaux composites a été également étudiée. Du point de vue thermique la conductivité thermique du polymère diminue en fonction de l'augmentation de la concentration des fibres. Par ailleurs, les valeurs numériques de la conductivité thermique ont été comparées à plusieurs modèles analytiques issus de la littérature et aux résultats expérimentaux. Les mesures d'absorption d'eau ont révélé que les composites ont une forte tendance à absorber de l'eau. L'effet du niveau de taille de charge sur la conductivité thermique a été aussi étudié. Nous avons noté que pour les 4 premiers niveaux la diminution de la conductivité thermique est importante. Il a été constaté aussi que les composites renforcés de fibres de bois de palmier dattier présentent une faible conductivité thermique. Ces matériaux contribuent donc à améliorer le confort, et à réduire la consommation d'énergie.

Report title: TRANSPORT PROPERTIES OF HETEROGENEOUS MATERIALS REINFORCED WITH NATURAL FIBER: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL APPROACH

Keywords: Composite materials, natural materials, sustainable development, transport properties, effective thermal conductivity, numerical modelling.

Abstract:

The subject of this thesis is the design and the development of new composite materials based on natural fibers adapted for the thermal insulation in various sectors, particularly in the building one. This will allow one hand, to increase our knowledge of the thermophysical properties of composites reinforced with natural fibers. On the other hand, it would be essential to determine the factors affecting the properties of these composites. An experimental and numerical study of the behavior of the thermal conductivity was performed using the guarded hot plate and the finite element method using COMSOL software to predict the thermal conductivity of composites and to study the influence of filler size and the contact resistance on the conductivity of composite. The water absorption of composite materials was also studied. The thermal conductivity of the polymer decreases with increasing of the filler concentrations. Furthermore, the numerical values of the thermal conductivity were compared to several analytical models derived from the literature and to experimental results. Water absorption measurements showed that the composite have a strong tendency to absorb water. The effect of load size on the level of thermal conductivity was also studied. We noted that for the first 4 levels the decrease of the thermal conductivity is important. It was also found that composites reinforced with date palm fibers have low thermal conductivity. Therefore, these materials contribute to improve comfort and reduce energy consumption.