

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

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



DOMAINE : Sciences de la Matière

FILIERE : Physique

N° :.....

OPTION : Energie Solaire

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: *Hadjer Khaldoune*

Intitulé

**Modélisation numérique de comportement
thermophysique de composite de mortier à base
des fibres de palmier dattier**

Soutenu le 25/05/2017 devant le jury composé de:

Dr. Mohamed SALMI	Université de M'sila	Président
Dr .Nadia BENMANSOUR	Université de M'sila	Rapporteur
Dr .Farouk TAHROUR	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016/2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents lumière de ma vie, pour leur soutien et tous les efforts qu'ils m'ont donné le long de mon parcours et je leur souhaite bonne santé et longue vie.

Je dédie mon travail à mon fiancé qui m'a beaucoup encouragé et tous les membres de sa famille.

Je dédie mon travail à tous mes frères Hicham et Ahmad et Ali, Badr Aldin Et ma petite sœur Marwa, je leur souhaite tout le succès.

Je dédie mon travail à tous la famille Khaldoune à partir de la grande à la petite et la famille Fanda et la famille Ghadbane. Je dédie mon travail à Me connaissez et a mes très chers amies, Merci beaucoup.





Remerciements

*La première personne que je veux remercier est bien évidemment mon directeur de mémoire qui ma soutenu et merveilleusement encadré. Merci **Dr. Nadia Benmansour** maitre de conférence de l'université de M'sila, pour vos conseils avisés m'ont souvent permis d'avancer dans mes travaux et surtout merci pour ta confiance et ta franchise.*

Je remercie également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Je remercie tous mes professeurs de primaire à l'université. Je remercie toutes les personnes qui ont contribué au succès de moi



Table des matières

Introduction	02
Chapitre I : Matériaux composites à bas des fibres naturels (Matériau composite mortier/ fibre de palmier dattier)	
I. Introduction	06
II. Matériaux composites à bas de fibres naturelles	06
II.1. Définition d'un matériau composite	06
II.2. Fibres naturelles	07
II.2.1. Les fibres végétales	07
II.2.2. Classification des fibres végétales	08
II.2.3. Morphologie de la fibre végétale	08
III. Les mortiers	10
III.1. Les constituants de mortier	10
III.2. Différents types des mortiers	13
IV. Bois de Palmier Dattier (Phoenix dactylifera)	14
IV.1. Caractéristiques thermophysiques des fibres de bois de palmier dattier	14
V. Conclusion	19
Chapitre II : Modélisation numérique de la conductivité thermique des composites	
I. Introduction	23
II. Modélisation des propriétés de transfert dans les matériaux composites	23
II.1. Modélisation numérique en deux dimensions (2D)	23
II.2. Modélisation numérique en trois dimensions (3D)	28
III. Conclusion	31
Chapitre III : Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les composites	
I. Introduction	36
Partie (1) : La méthode des éléments finis	36
1. Rappel sur la méthode des éléments finis	36
2. La conductivité effective	36
Partie (2) : Présentation du logiciel COMSOL	37
Partie (3) : Modélisation Numérique	40
1. Propriétés des fibres et de la matrice	40

2. Modélisation Numérique par le logiciel comsol	41
II. Résultats et Discussions	42
III. Comparaison entre les résultats numériques, résultats expérimentaux	43
IV. Conclusion	44
Conclusion générale	47

Introduction

I. Introduction

Les matériaux composites connaissent un départ considérable dans de nombreux secteurs d'activités [1].

De nombreuses technologies modernes font appel à des matériaux composites dotés de propriétés que ne peuvent offrir les matériaux traditionnels (métaux, céramiques et polymères). Ces technologies trouvent une application dans de différents domaines tels que l'industrie aérospatiale, la construction automobile, la fabrication d'appareils de plongée ou d'objets sportifs, ou encore des structures minces en béton. Les ingénieurs en aéronautique recherchent de plus en plus des matériaux de construction légers, robustes, rigides et capables de résister aux chocs, à l'abrasion et à la corrosion. Il s'agit d'une combinaison de propriétés assez exceptionnelle [2,3].

En outre, les matériaux composites sont largement utilisés dans les applications de transfert de chaleur et de la gestion thermique des équipements. La conductivité thermique effective est l'une des principales propriétés thermophysique utilisées pour quantifier le comportement thermique de ces matériaux hétérogènes [4]. 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.

L'évolution des méthodes numériques a ouvert des champs d'applications très divers et plus particulièrement celui de la détermination des caractéristiques des matériaux composites. Parmi les méthodes numériques les plus connues et les plus répandues pour la résolution des équations différentielles, décrivant des phénomènes ou des structures électromagnétiques, on peut citer la méthode des éléments finis (MEF), la méthode des différences finis (MDF), la méthode des équations intégrales de frontière (MEIF), la méthode des différences finies dans le domaine des temps (FDTD) [5,6].

Au cours de ces dernières années, la méthode des éléments finis (FEM) a été souvent utilisée pour étudier le domaine du transfert de chaleur dans les matériaux composites [7].

La méthode des éléments finis est une méthode générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique: problèmes permanents ou non permanents, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions [8].

L'objectif de ce mémoire est de réaliser une modélisation numérique des propriétés thermophysiques de composites de mortier à base des fibres de palmier dattier et de comparer les résultats obtenus avec les données expérimentales.

Dans le premier chapitre, on s'intéresse à une étude bibliographique sur les composites à base de fibres naturels (fibre végétale), nous apportons une connaissance des matériaux composites en présentant les différents constituants des composites, et on se focalisera sur les composites à base de mortier et de fibres de bois de palmier.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différents modèles numériques utilisés pour déterminer la conductivité thermique des matériaux composites ; à savoir les modèles numériques en deux dimensions (2D), et les modèles numériques en trois dimensions (3D), ainsi qu'une discussion des modélisations numériques de plusieurs auteurs, sera présentée.

Le but de troisième chapitre est d'illustrer l'approche numérique suivie pour la détermination de la conductivité thermique de composite mortier/fibres de palmier dattier. On s'intéresse dans la première partie à la méthode des éléments finis. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du logiciel COMSOL, ainsi que la démarche à suivre pour la modélisation numérique. Enfin, les résultats obtenus dans ce travail sont présentés.

Référence

- [1] C. Lorrette, "Outils de caractérisation thermophysique et modèles numériques pour les composites thermostructuraux à haute température, thèse doctorat de " Université Bordeaux 1, 2007).
- [2] F. Gouanvé, S. Marais, M. Métayer, " composites polyester insaturé renforcés par des fibres de lin", *composites et matériaux avancés*, Vol.16, pp.117-128, 2006.
- [3] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composites", thèse doctorat de l'université de Limoges, *matériaux céramiques et traitement de surface*, 2007.
- [4] J. Wang, J. K. Carson, M. F. North, and D. J. Cleland, "A new structural model of effective thermal conductivity for heterogeneous materials with co-continuous phases" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 2389–2397, 2008.
- [5] H. Z. Liang, "Simulation of heat transfer in hollow-glass-bead-filled polypropylene composites by finite element method," *Polym. Test*, vol. 26, pp. 419-424, 2007.
- [6] H. W. Zhang, H. L. Xing, and H. Muhlhaus, "A DEM study on the effective thermal conductivity of granular assemblies," *Powder Technology*, vol. 205, pp. 172-183, 2011.
- [7] K. Ramani and A. Vaidyanathan, "Finite element analysis of effective thermal conductivity of filled polymeric composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 29, pp. 1725-1740, 1995.
- [8] J. K. Carson, D. J. Tanner, and A. C. C., "An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations," *Int J Refrigeration*, vol. 26, pp. 873-880, 2003.

Chapitre I

**Matériaux composites à base de fibres
naturels**

-

**Matériau composite mortier/ fibre de
palmier dattier**

I. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter une étude bibliographique sur les composites à base de fibres naturels, la première partie s'intéresse aux matériaux composites à bas de fibres naturelles. Dans la deuxième partie, on se focalisera sur le composite de mortier renforcé par les fibres de bois de palmier en présentant l'état de l'art des propriétés physiques, thermiques des constituants de ce composite.

II. Matériaux composites à bas de fibres naturelles

II.1. Définition d'un matériau composite

Un composite correspond à l'association de matériaux élémentaires aux caractéristiques complémentaires, en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants, pris séparément, ne permettent pas de les atteindre. Un des constituants peut remplir la fonction de matrice tandis que l'autre, immergé dans le premier et joue le rôle de renfort [1].

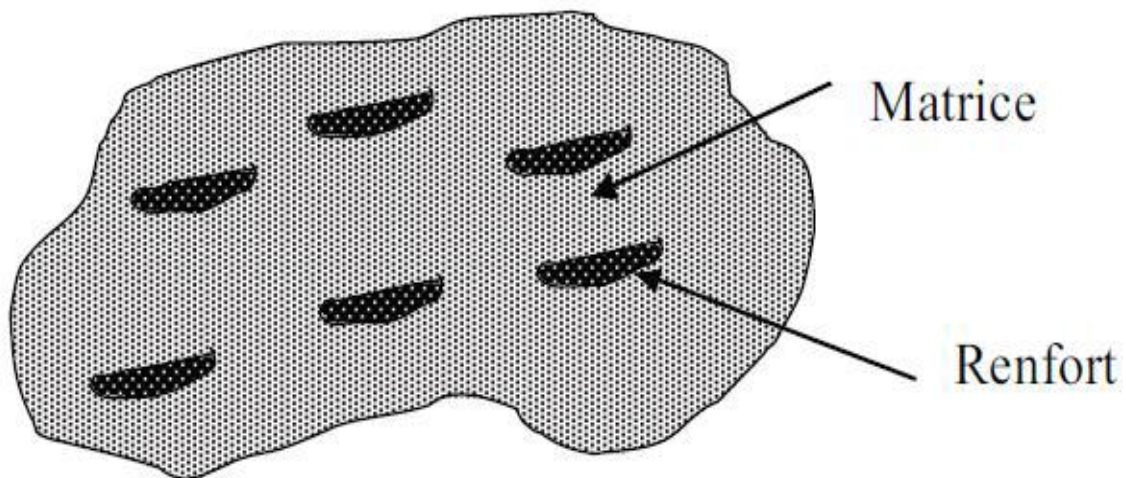


Figure. I.1: Schéma d'un matériau composite.

Le domaine des composites est très vaste. Ces derniers peuvent être divisés en trois types. La (figure I.2) présente une classification schématique des matériaux composites.

Nous y distinguons trois catégories principales : les composites renforcés par des particules, les composites renforcés par des fibres et les composites structuraux.

Chacune de ces catégories se divise en au moins deux sous catégories [2].

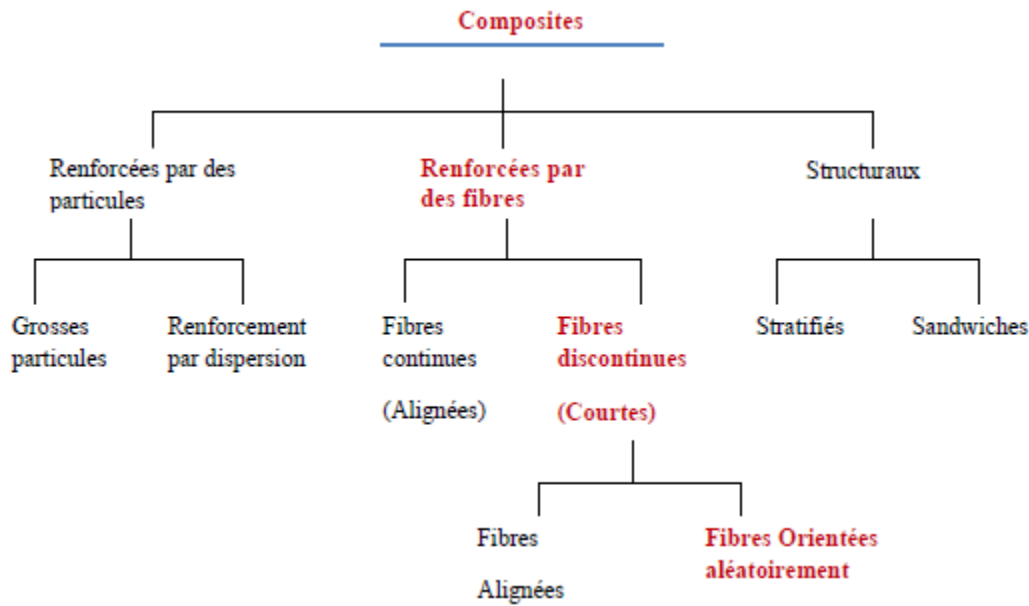


Figure. I. 2 : Classification schématique des différents types de composites [2].

II.2. Fibres naturelles

Sous le terme « fibres naturelles » se trouvent des fibres naturelles, d'origine végétale (cellulosique) et animale (protéinique, qui ne sont pas présentées), et des fibres minérales telles que l'amiante (qui ne sont pas présentées) elle est soit isolée regroupée avec d'autres en un faisceau [3].

L'utilisation de fibres naturelles est en expansion dans le domaine du bâtiment afin de remplacer les matériaux d'isolation classiques par des matériaux naturels. Dans ce cas, ces fibres s'utilisent seules, soit en combinaison avec d'autres matériaux, afin de créer des matériaux de gros œuvre ou de finition possédant une résistance thermique plus élevée [4].

De ce fait, l'utilisation des matériaux composites à base de fibres végétales (le chanvre, la paille, le lin, le bois, le palmier dattier,...etc.) est une bonne réponse dans le souci de préserver la santé de l'homme, de répondre à ses besoins de bien-être et de confort et de réduire les impacts environnementaux [5].

II.2.1. Les fibres végétales

Les matériaux à base de fibres végétaux ont les avantages suivants :

- Ce sont des ressources abondantes, renouvelables, recyclables et durables. Les végétaux se renouvellent périodiquement et par conséquent assurent une ressource abondante sachant que les autres ressources (charbon, pétrole, gaz) seront épuisées d'ici quelques décennies.
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Chapitre I Matériaux Composites à Bas Des Fibres Naturels

-Propriétés mécaniques et spécifiques importantes [6].

Cependant, il y a des inconvénients correspondants à ces fibres, on peut citer par exemple : l'absorption d'eau, fibres anisotropes (les propriétés diffèrent) et faible stabilité dimensionnelle, renfort discontinu, faible tenue thermique (200 à 300°C max), variation de la qualité en fonction du lieu de croissance et des conditions météorologiques [6].

II.2.2. Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (Kéna, jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abaca, paille de graminée) [7].
- Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides provenant de matériaux ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois) et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kéna, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [8].
- Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libériennes, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues [7].

II.2.3. Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale (Figure. I.3) [9]

La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire qui découle de celle de la porosité des fibrilles [10].

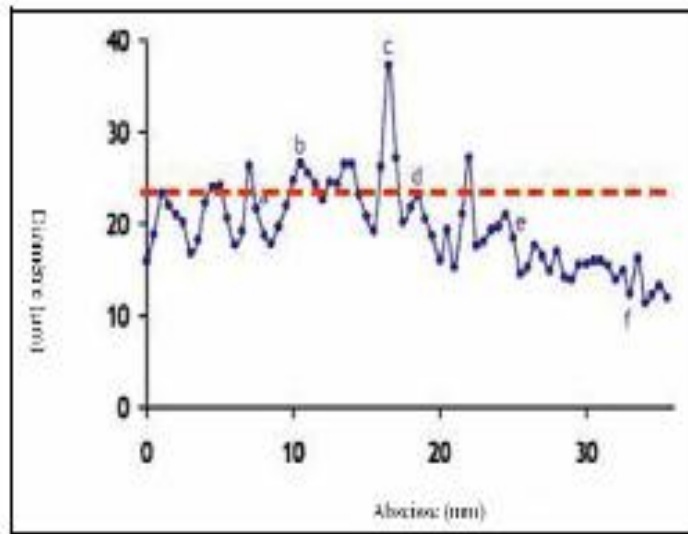


Figure .I.3: Variation du diamètre le long de la fibre de lin [9].

Fibres	Longueur de la fibre (mm)	Diamètre de la fibre (µm)	Angle micro fibrillaire (°)	Référence
Cotton	35	10-45	-	[22]
Lin	4-77	5-76	10	[20]
Chanvre	5-55	10-51	6.2	[18]
Kénaif	2.5-4.5	14-33	-	[19]
Jute	2.5	5-25	8	[19]
Sisal	900	8-50	20	[22]
Rami	900-1200	20-80	7.5	[22]
Noix de coco	03-1	12-24	45	[20]

Tableaux .I.1 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales.

La morphologie des fibres végétales peut constituer une donnée importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice.

(La Figure. I.4) présente à titre d'exemple la structure torsadée d'une fibre de coton.

D'autres fibres ont des morphologies, encore plus tourmentées. La géométrie des fibres végétales est donc un problème important et difficilement surmontable pour ce qui concerne la micromécanique des composites renforcée par de telles fibres [11].

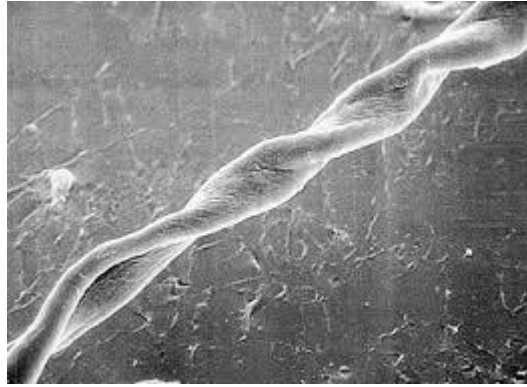


Figure I.4 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton [11].

III. Les mortiers

Les mortiers sont très utilisés pour des travaux de tous types, ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon [12].

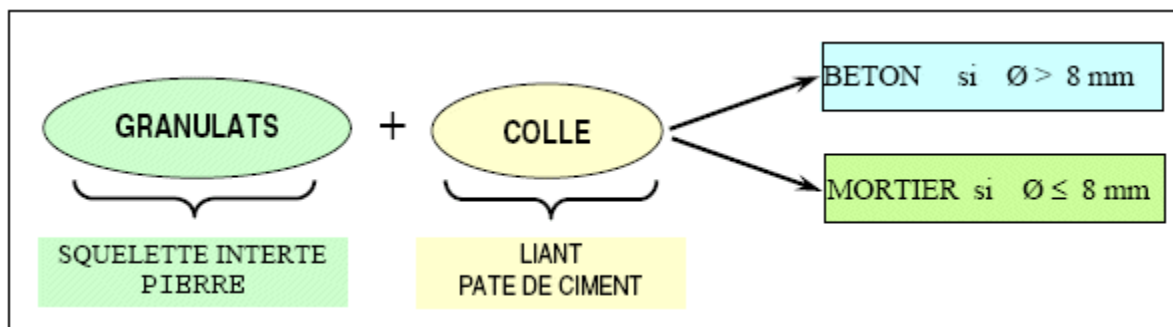


Figure I.5: Constituants des mortiers

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction [12].

Les mortiers peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure [13].

III.1. Les constituants de mortier

Un mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux, ciment ou autre), de sable et d'eau auxquels peuvent être ajoutés des additions minérales et/ou adjuvants organiques [13].

a) Les liants

Généralement, les liants hydrauliques les plus utilisés dans la construction sont les ciments et les chaux.

Chapitre I Matériaux Composites à Bas Des Fibres Naturels

✓ Les chaux

La chaux est un oxyde de calcium, avec plus ou moins d'oxyde de magnésium. Trois catégories se distinguent de par leur utilisation dans la construction : la chaux vive (produit direct de la pyrolyse du calcaire), la chaux aérienne (obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau), et la chaux hydraulique (constituée en plus de silicate et d'aluminate de calcium). Les mortiers de chaux sont utilisés essentiellement dans le bâtiment, où leurs qualités sont appréciées pour les enduits, les menus ouvrages en maçonnerie.

✓ Les ciments

Le ciment est une matière pulvérulente se présentant sous l'aspect de poudre très fine formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier. Autrement on peut dire que le ciment est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton et le mortier [14].

Les ciments sont constitués, par mélange et broyage. Ils se composent de [14]:

→Le clinker

Le constituant principal des ciments industriels actuels est le clinker, mot anglais signifiant *scorie*. Il est obtenu en cuisant, vers 1450°C, des mélanges appropriés de calcaire et d'argile, appelés crus. L'argile, principalement composée de silicates d'alumine, se scinde sous l'effet de la chaleur en ses constituants, silice et alumine, qui se combinent ensuite à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de chaux.

→Le gypse

Le gypse dénommé aussi gypsite est une roche saline commune des bassins sédimentaires soumis à subsidences, elle est composée principalement du minéral gypse, minéral salin très commun des séries sédimentaires, et de sulfate doublement hydraté de calcium. Ce dernier est à la fois une espèce chimique et une espèce minérale, décrite par la formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le gypse est la roche qui permet de fabriquer industriellement le plâtre.

Chapitre I Matériaux Composites à Bas Des Fibres Naturels

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
%	10,05	2,99	1,55	26,90	3,86	0,41	0,05	30,33	0,007

Tableaux .I.2: Composition chimique du gypse

→ Les additifs

On les ajoute éventuellement afin d'améliorer certaines propriétés. Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0.5% de la masse totale et ceci pour tous les ciments à l'exception des CEM III/A ou B et des CEM III/C, pour lesquelles la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1% [15].

b) Le sable

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin [13].

Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Il y a trois types de sable[13]:

→ **Sable d'origine naturelle** naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;

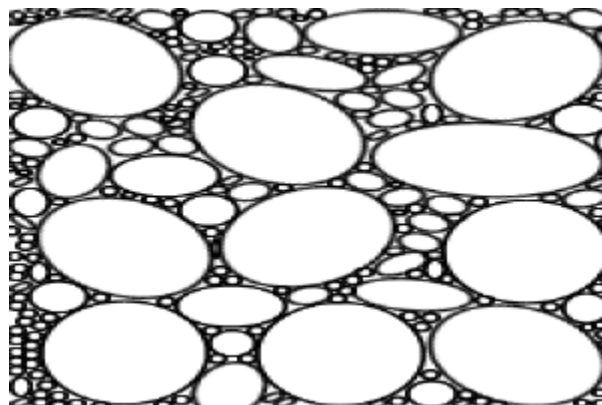


Figure .I.6: Sable roulé (naturel) [12].

→ **Sable d'origine artificielle** naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.

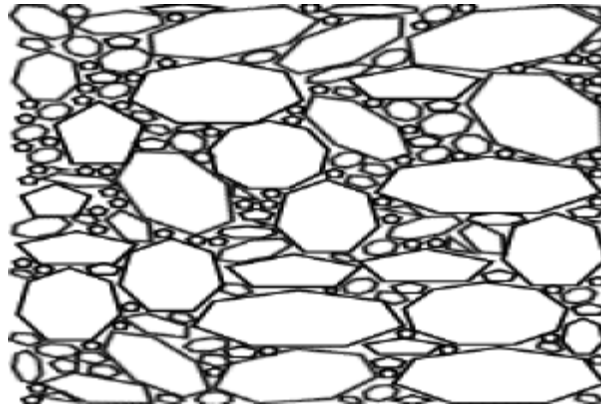


Figure .I.7: Sable concassé (Artificiel) [12].

Le diamètre maximal des grains de sable utilisés pour les mortiers est [13]:

- extra-fins: jusqu'à 0.8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- fins: jusqu'à 1.6 mm;
- moyens: jusqu'à 3.15 mm;
- gros: jusqu'à 5 mm.

III.2. Différents types des mortiers

Les mortiers se partagent en [12]:

➤ Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables.

➤ Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.

➤ Les mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales; mais on mettra une quantité plus ou moins grande l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

➤ Mortier réfractaire

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues.

➤ Mortier rapide

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements.

➤ Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

IV. Bois de Palmier Dattier (*phoenixdactylifera*)

Le palmier dattier a été dénommé *Phoenix dactylifera* par Linne en 1934. *Phoenix* dérivé de *Phoinix*, nom du dattier chez les grecs de l'antiquité qui le considéraient comme arbre des Phéniciens. *Dactylifera* vient du latin *dactylis*, dérivant du grec *dactylus*, signifiant doigt (en raison de la forme du fruit), associé au mot latin *fero*, porté, en référence aux fruits.

Le *Phoenix dactylifera* résiste aussi bien à la chaleur, à la sécheresse et au froid. Il se trouve généralement sur la bande aride afro-asiatique qui s'étend de l'Afrique du Nord au Moyen-Orient, plus précisément dans les Oasis du Sahara (Biskra Algérie). Les phoenix sont des palmiers dioïques, il existe donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Ces dernières donnent une multitude de variétés de dattes [16, 17,18]. Dans le sud de notre pays, il y'a plus de 800 variétés de palmier dans les oasis d'après des statistiques universitaires [19]. Les types les plus connus sont: Deglette Nour, Dokar, Elghers (appellation locale)[19,20].

IV.1. Caractéristiques thermophysiques des fibres de bois de palmier dattier

➤ Structure et morphologie

D'après les études d'Agoudjil et al [16], la figure (I.8) présente des images MEB d'échantillon typique de pétiole (Deglet-Nor) dans une direction transversale des fibres. Ces images montrent que la surface d'échantillon n'est pas lisse, elle est irrégulière avec beaucoup de filaments, des impuretés, des cellules et des pores qui lui permettent une bonne adhérence à d'autre matériau (matrice).

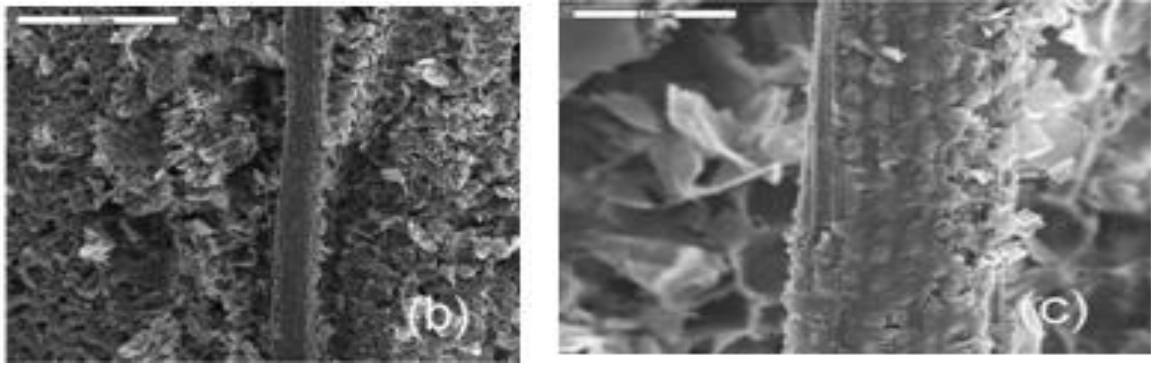


Figure. I.8: Des images MEB d'échantillon de DN pétiole dans une direction transversale des fibres [16].

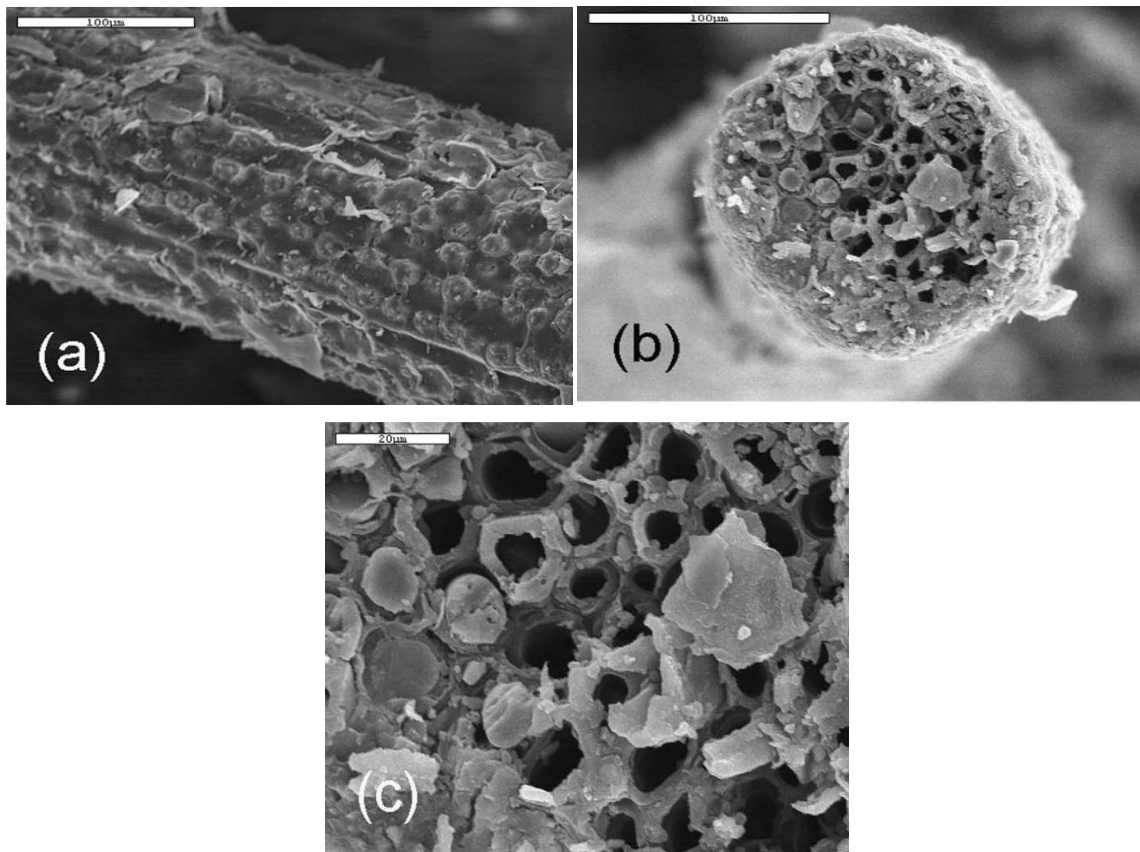


Figure .I.9 : Des images MEB pour une seule fibre de pétiole : (a) une coupe longitudinale, (b) une coupe transversale.

Pour plus d'informations sur cette morphologie, trois micrographies MEB montrant la forme d'une seule fibre de palmier dattier (pétiole) ont été présentées (Figure I.9).

Une coupe transversale d'une fibre de pétiole (Figure I.9 b et c) montre un grand nombre de fibres creuses individuelles collectées et collée par une couche. De ce fait, comme il est montré dans ces figures, cette fibre a une section poreuse, ce qui explique son grand pouvoir hydrophile (absorption de l'eau) [21].

Chapitre I Matériaux Composites à Bas Des Fibres Naturels

➤ Propriétés physiques

Le **tableau (I.3)** présente les principales propriétés physiques de fibres de palmiers dattiers (Dokar, Elghers, D-Nour et D-Bida) [19,20].

Propriété	Minimum –Maximum	Moyenne - CV(%)
Diamètre (mm)	0.1-1.00	0.45-54.43
Densité Absolue (kg/m ³)	1300-1450	1383.33-5.52
Densité Apparente (kg/m ³)	512.21-1088.81	900-17.64
Teneur en eau naturelle	9.50-10.00	10-5.00

Tableau. I.3 : Propriétés physiques de fibres de palmiers dattiers.

➤ Propriétés thermophysiques

Le **tableau (I.4)** montre les propriétés thermophysiques et diélectriques de diverses variétés de palmier dattier [16]. Selon le tableau (I.4), les propriétés thermiques des différentes variétés de bois de palmier dattier présentent des valeurs faibles, la conductivité thermique varie entre $0.072 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $0.085 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Chapitre I Matériaux Composites à Bas Des Fibres Naturels

Echantillon	P (mbar)	K ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	a ($\times 10^{-7} m^2.s^{-1}$)	ϵ_r
PDN//	10^{-4}	0.046 ± 0.003	1.65 ± 0.10	-
PDN	10^{-4}	0.042 ± 0.003	2.16 ± 0.15	-
PDN//	1000	0.084 ± 0.003	3.31 ± 0.31	10.38 ± 0.52
PDN	1000	0.083 ± 0.003	2.29 ± 0.20	8.09 ± 0.26
PMD	1000	0.073 ± 0.003	3.13 ± 0.49	24.70 ± 1.61
PEG	1000	0.072 ± 0.002	2.76 ± 0.24	2.58 ± 0.02
BDN	1000	0.085 ± 0.004	1.91 ± 0.21	5.81 ± 0.08
BMD	1000	0.084 ± 0.005	2.07 ± 0.30	5.70 ± 0.10
BEG	1000	0.074 ± 0.004	2.29 ± 0.30	5.13 ± 0.09

Tableau(I.4): Propriétés thermophysiques et diélectriques du palmier dattier (Pétioles et grappes) [16].

Avec :

K : la conductivité thermique

a: la diffusivité thermique

ϵ_r : la permittivité diélectrique relative

➤ Composants du bois de palmier dattier

Le bois de palmier dattier est constitué de plusieurs parties sont :

➔ Tronc

C'est un stipe, généralement cylindrique, son élongation s'effectue dans sa partie coronaire par le bourgeon terminal ou phyllophore.

Chapitre I Matériaux Composites à Bas Des Fibres Naturels

→ Couronne

La couronne ou frondaison est l'ensemble des palmes vertes qui forment la couronne du palmier dattier. On dénombre de 50 à 200 palmes chez un palmier dattier adulte. Les palmes vivent de trois à sept ans, selon les variétés et le mode de culture. Elles sont émises par le bourgeon terminal ou « phyllophore », pour cela, on distingue : la couronne basale, la couronne centrale et les palmes du cœur [10].

→ Palme

La palme ou « Djérid » est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis. Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues [10].

→ Fleurs

Le dattier est une plante dioïque, c'est-à-dire qu'il existe des dattiers mâles (*Dokar*) et des dattiers femelles (*Nakhla*). Seuls les dattiers femelles donnent des fruits, donc elles sont à l'origine des multiples variétés des dattes. De façon générale deux des trois carpelles, uniovulés, avortent et les fruits sont monospermes ce qui peut s'expliquer par la grande densité des inflorescences [10].

→ Le fruit

Le fruit de dattier, la datte est une baie contenant une seule graine, vulgairement appelée noyau. La datte est constituée d'un mésocarpe charnu, protégé par un fin épicarpe, le noyau est entouré d'un endocarpe parcheminé, il est de forme allongée, plus ou moins volumineux, lisse ou pourvu de protubérances latérales en arêtes ou ailettes, avec un sillon ventral l'embryon est dorsal, sa consistance est dure et cornée. La couleur de la datte est variable selon les espèces : jaune plus ou moins clair, jaune ambré translucide, brun plus ou moins prononcé, rouge ou noire [22].

La figure(I.10) illustre les différents constituants d'une palme. La grappe, pétiole et le tronc sont représentés dans les figures I.11 (a) et(b).

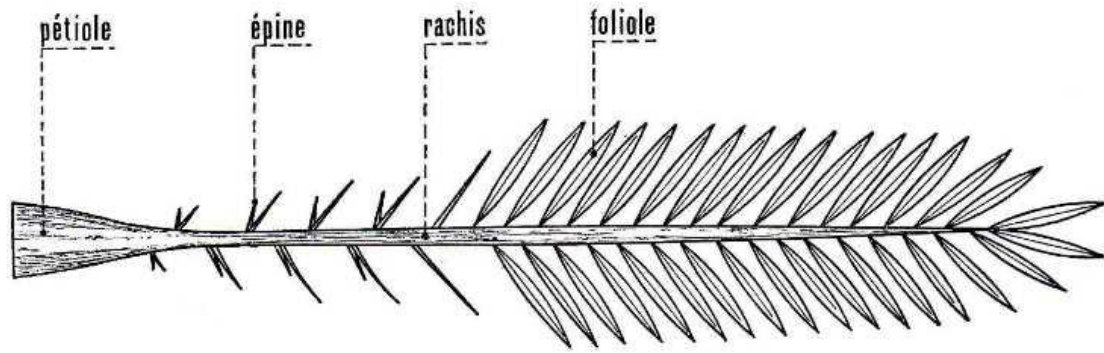
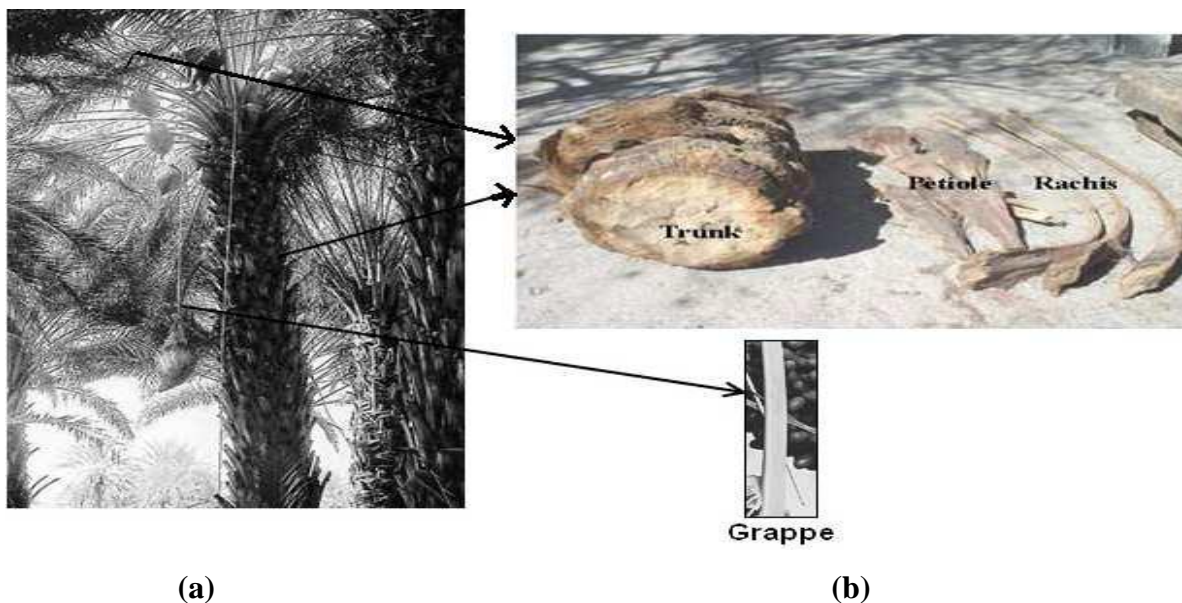


Figure I.10. Schéma d'une palme [18].



(a)

(b)

Figure. I.11 : Différents parties du bois de palmier dattier [21].

V. Conclusion

Nous avons présenté une étude bibliographique sur les composites à base de fibres naturels (fibre végétale), nous apportons une connaissance des matériaux composites en présentant les différents constituants des composites, et on se focalisera sur les propriétés de chaque constituant de composite à base de mortier et de fibres de palmier dattier. Ces propriétés, spécialement la conductivité thermique de bois de palmier dattier, sont intéressantes pour la modélisation numérique de la conductivité thermique de composite mortier/fibres de palmier dattier.

Références

- [1] M. Geier, D. Duedal "Guide pratique des matériaux composites", "TEC & DOC (Lavoisier)", Paris, 349P.1985.
- [2] W.D. Calliste Jr., " Science et Génie des matériaux ", Edition Dunod, Mont-Royal, Québec, p. 463..2001.
- [3] B. Kurek, "Les fibres naturelles originalité, propriétés, qualités et défauts", journée technique de matériaux renforcés par fibres naturelles, bellignat (France) ,2006.
- [4] N. dujardin. " Un matériau bio source de choix : les fibres naturelles. Caractérisations et applications". Danielthevenot. 25èmes journées scientifiques de l'environnement - l'économie verte en question, feb 2014, Créteil, france. jse-2014 (01), 2014, journées scientifiques de l'environnement. <hal-00978360>
- [5] A. D. Tranle, "Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment," Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010, pp. 221.
- [6] M. Chikhi, "Métrologie et modélisation des transferts dans les composites naturels a faible cout pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires," Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2013, pp. 163.
- [7] A. Y. Nenonene, "Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage", thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
- [8] F. Michaud, "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage" thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [9] K. Charle, C. morvan, J. Bréard, JP. Jernot, M. Gomina, "Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin " revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24,2006.
- [10] C. Ververis, K. Georghiou, N. Christodoulakis, P. Santas, R. Santas. " Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production". Industrial Crops and Products 19: 245–254, 2004.

Chapitre I Matériaux Composites à Bas Des Fibres Naturels

- [11] M. Nardin, "interface fibre-matrice dans les matériaux composite suppletion aux fibres végétales", revue des composites et des matériaux avancés, Vol16, pp 49-61, 2006.
- [12] K. Bouali, Mémoire de Magister, université m'hamed bougara-boumerdes, "Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires", Année Universitaire:2013/2014
- [13] L. Patural, "Méthode d'action des éthers de cellulose sur la rétention d'eau des mortiers à l'état frais," Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011, pp. 262.
- [14] GCI712 "Durabilité ET réparation du béton", département Génie civil, Université de Sherbrooke -Canada, Avril 2009.
- [15] Erik B Nelson, Jean-François Baret and Michel Michaux, "Cement Additives and Mechanisms of Action", Article (1990).
- [16] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011
- [17] K. Riahi, B. BenThayer, "Date-palm fibers media filters as a potential technology for tertiary domestic wastewater treatment," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, pp. 608-613, 2009.
- [18] G. Peyron, "Cultiver le palmier dattier," *G.R.I.D.A.O, Montpellier*, pp. 109-129, 2000.
- [19] A. Kriker, "Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec", Thèse de Doctorat d'Etat, ENP, 2005, PP166.
- [20] A. Kriker, G. Debicki, A. BALI, M. M. Khenfer, M. Chabannet, "Valorization of date palm fibers in reinforcement of concrete at hot dry climate", pp20 –22 Sept. Vienna, ITALY 2004.
- [21] N. Benmansour, "développement et caractérisation de composites naturels" locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat, docteur en physique de l'université hadj lakhdar de batna option : énergies renouvelables Soutenu le 18/05/2015
- [22] N. Sotehi, "Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation," Thèse de Doctorat, 2010.

Chapitre II

Modélisation numérique de la conductivité thermique des composites

I. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents modèles numériques utilisés pour déterminer la conductivité thermique des matériaux composites. Il est composé de deux parties, dans la première partie, on s'intéresse aux modèles numériques en deux dimensions (2D). La deuxième partie est dédiée à la présentation des modèles numériques en trois dimensions (3D), ainsi qu'une discussion des modélisations numériques de plusieurs auteurs, sera présentée.

II. Modélisation des propriétés de transfert dans les matériaux composites

II.1. Modélisation numérique en deux dimensions (2D)

Eric W. Tiedje et *al.* [5], ont étudié l'influence de la forme et de l'orientation des particules sur la conductivité thermique de composites par une simulation numérique en deux dimensions, en utilisant FlexPDE qui est basé sur la méthode des éléments finis (FEM). Ils ont supposé qu'il n'y a pas d'interaction entre les particules. Cette hypothèse limite l'application de ce modèle pour les composites avec des concentrations de particules relativement faibles. Deux géométries ont été observées : une seule particule (figure II.1) et plusieurs particules (Figure II.2). L'allongement a été caractérisé par le rapport d'aspect, AR , défini comme le rapport de la plus grande dimension des particules à la plus petite, et l'orientation de la particule est caractérisée par l'angle entre l'axe longitudinal de particule et la direction du gradient thermique imposé.

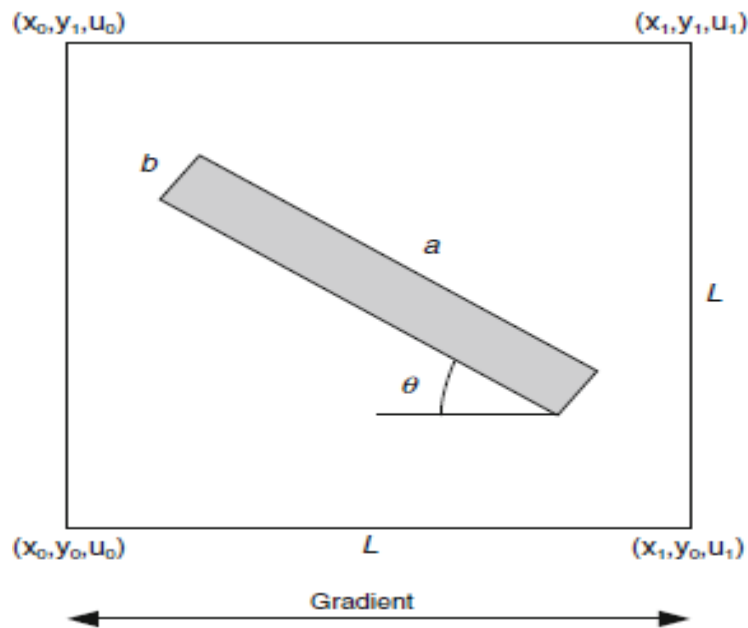


Figure II. 1: Représentation schématique d'une simulation De composite de particule unique, rectangulaire [5].

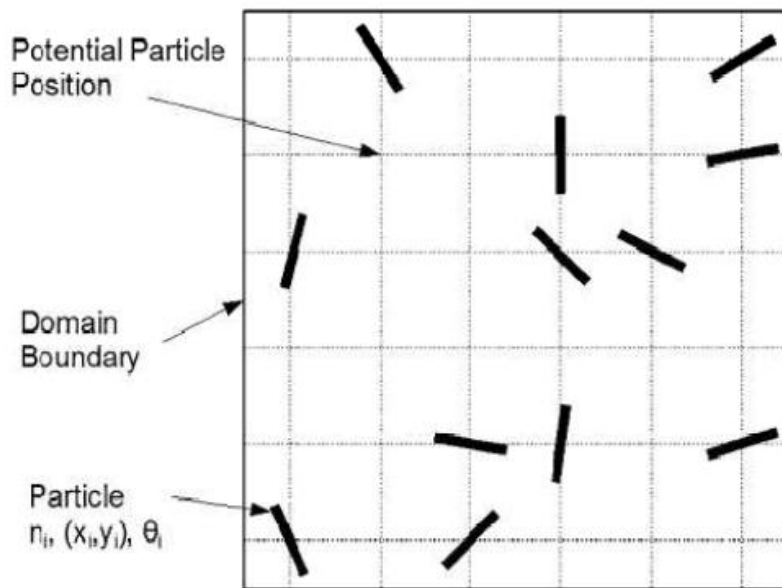


Figure II.2: Illustration du système de distribution de particules [5].

La simulation d'Eric W. Tiedjeet *al.*[5], montre que la conductivité thermique de tels composites est influencée non seulement par la concentration volumique et la conductivité des inclusions, mais aussi par leur forme générale, l'allongement, et l'orientation par rapport à la direction du flux de chaleur.

Selon les études de Thanh Hung Pham et *al.*[6], le tenseur des conductivités thermiques de béton de chanvre a également été estimé par une méthode éléments finis en utilisant le logiciel

Chapitre II Modélisation numérique de la conductivité thermique des composites

ABAQUS®[6]. Les deux maillages adoptés pour cette étude sont présentés sur la Figure II.3: l'un représente le cas où l'orientation des particules de chènevotte est selon une direction donnée (Figure II.3 a) et l'autre matérialise une orientation aléatoire en 2D (Figure II.3 b). Pour une orientation parfaitement alignée (Figure II.3 a), la conductivité longitudinale, selon la direction principale des particules, et la conductivité transverse, selon la direction orthogonale à la précédente, sont calculées.

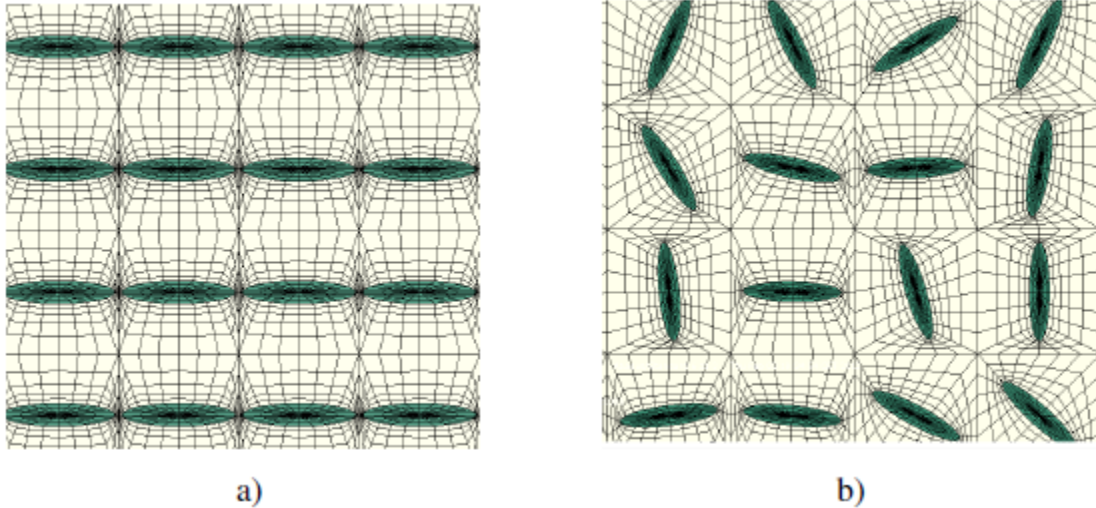


Figure II.3. Maillages utilisés pour les résolutions par éléments finis : (a) orientation unidirectionnelle alignée ; (b) orientation aléatoire en 2D.

Leur étude montre que la méthode des éléments finis pour des orientations alignées avec un flux de chaleur appliqué transversalement donne de meilleures prédictions de la conductivité thermique du composite (Figure. II.4). Les résultats obtenus ont été également comparés aux résultats expérimentaux et quelques approches théoriques. Ils ont constaté que l'approche auto-cohérente (HAC) avec une orientation isotrope des particules est la moins éloignée des mesures expérimentales.

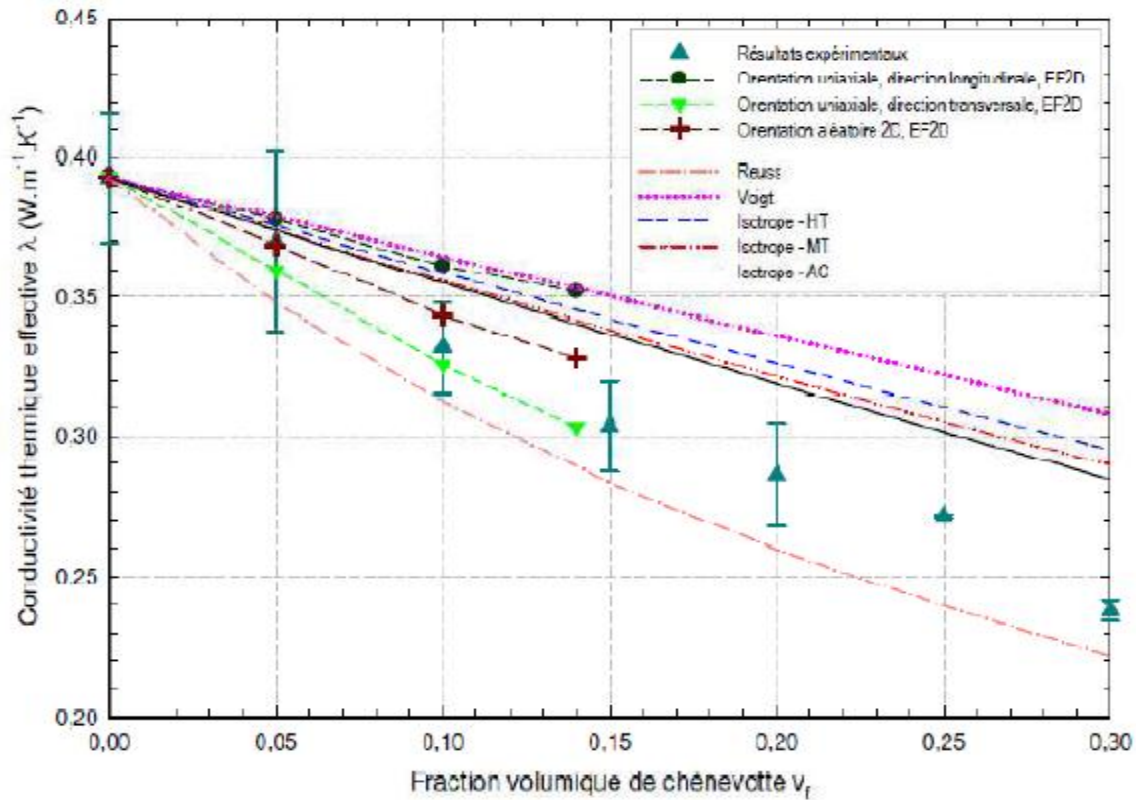


Figure II.4: Prédications des conductivités thermiques du béton de chanvre en fonction de la fraction volumique de chanvre [6].

Philippe Olivier et Gilles Dilles [7] ont déterminé la conductivité thermique de composite des fibres de carbone en utilisant le logiciel Comsol multiphysics.

Ils ont étudiés deux cas; la conductivité thermique transverse, et la conductivité thermique longitudinale [7] telle que le 1^{er} cas définis sur (figure II.5).

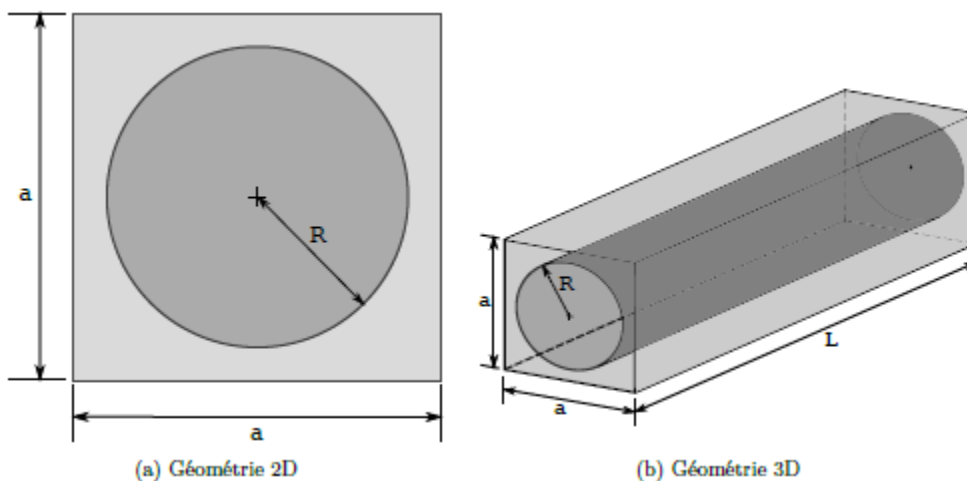


Figure II.5: Modélisation d'une fibre isotrope transverse de section circulaire [7].

➤ Conductivité thermique longitudinale

Philippe Olivier et Gilles Dilles [7] ont réduit le modèle à un V.E.R. simple constitué d'une fibre isotrope transverse de section circulaire entourée de matrice. Le V.E.R. a été étudié via deux modèles numériques 2D et 3D comme il est défini dans (la figure II.6).

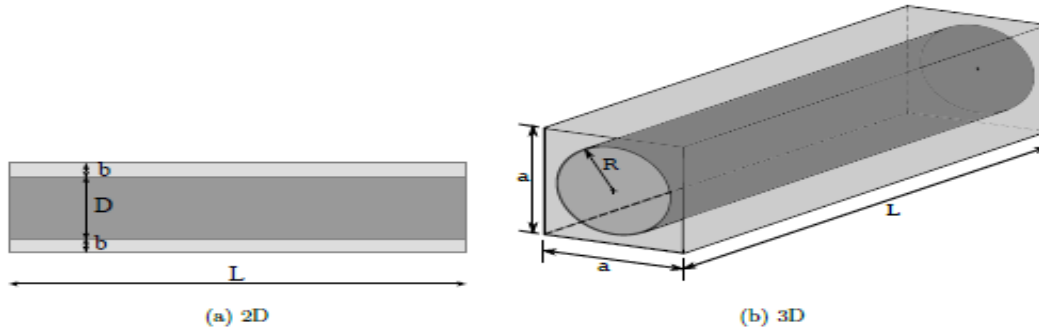


Figure II.6 : V.E.R. dans le cas de la caractérisation de la conductivité thermique longitudinale de renforts UD Dans Comsol Multiphysics [7].

Ils ont comparés les différents résultats obtenus numériquement avec ceux obtenus par la loi des mélanges. La figure (II.7) présente les résultats obtenus comparés avec les valeurs obtenus par la loi de mélange. Ils ont constaté d'après leurs études que le modèle 3D sous-estime la valeur du coefficient de conductivité thermique longitudinal par rapport à celle du modèle 2D. De plus, plus la longueur des fibres augmente plus les valeurs du coefficient de conductivité thermique longitudinal augmentent.

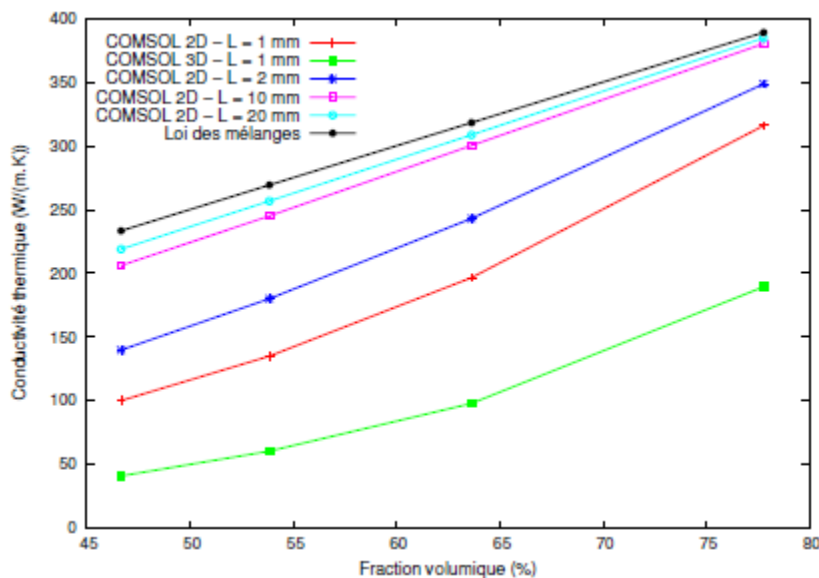


Figure II.7: Évolution du coefficient de conductivité thermique longitudinal en fonction de la fraction volumique de fibres pour différentes longueurs L de fibres [7].

Chapitre II Modélisation numérique de la conductivité thermique des composites

➤ Conductivité thermique transverse

De la même manière que pour le modèle longitudinal, Philippe Olivier et Gilles Dilles [7] ont défini un V.E.R. contenant une fibre isotrope transverse de section circulaire entourée de résine (Figure II.8).

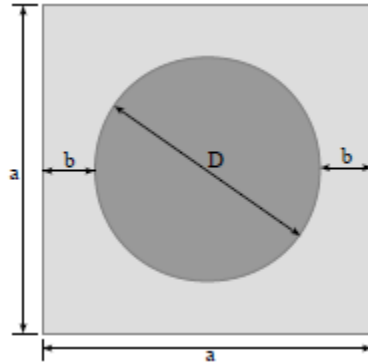


Figure II.8– V.E.R. 2D dans le cas de la caractérisation de la conductivité thermique transverse de renforts UD [7].

Nous avons constaté que pour le modèle longitudinal, le cas 3D n'était pas exploitable à cause de la différence d'échelle entre les dimensions transverse et longitudinale. Pour cette raison, ils n'ont développé que le modèle 2D du cas transverse. Les résultats obtenus par ces auteurs sont présentés par la figure II.9, elle montre l'évolution du coefficient de la conductivité thermique transverse en fonction de la fraction volumique de fibres, comparées à ceux obtenus par les modèles analytiques.

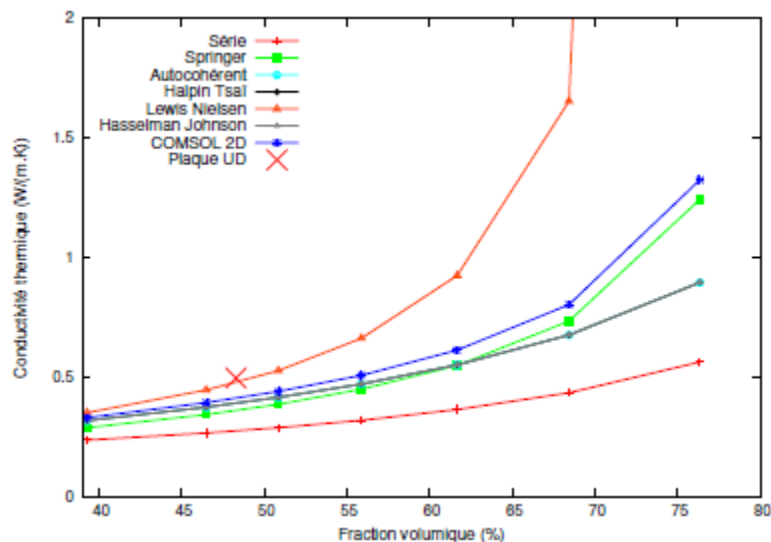


Figure II.9– Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique transverse en fonction de la fraction volumique de fibres entre les modèles analytiques et numériques [7].

Chapitre II Modélisation numérique de la conductivité thermique des composites

Ils ont observés que le modèle numérique et le modèle de Springer ont la même tendance. Par contre, le point expérimental qu'ils ont trouvé est proche du modèle de Lewis-Nielsen.

II.2. Modélisation numérique en trois dimensions (3D)

W.-Z. Cai et al. [8], ont effectué une étude sur la conductivité thermique du composite polytétrafluoroéthylène (PTFE) ayant une distribution quelconque de charges (particules ou fibres) en utilisant le programme des éléments finis ANSYS en 3D. La distribution aléatoire de l'emplacement et de la taille des charges est prise en compte. Ils ont supposé un modèle de forme cubique et ils ont programmé un algorithme qui génère des positions et/ou des orientations de charges pour une fraction volumique donnée. L'algorithme assure que les charges ne se croisent pas, et le processus de génération automatique ne s'arrêtera que lorsque la fraction volumique en charges soit satisfaite.

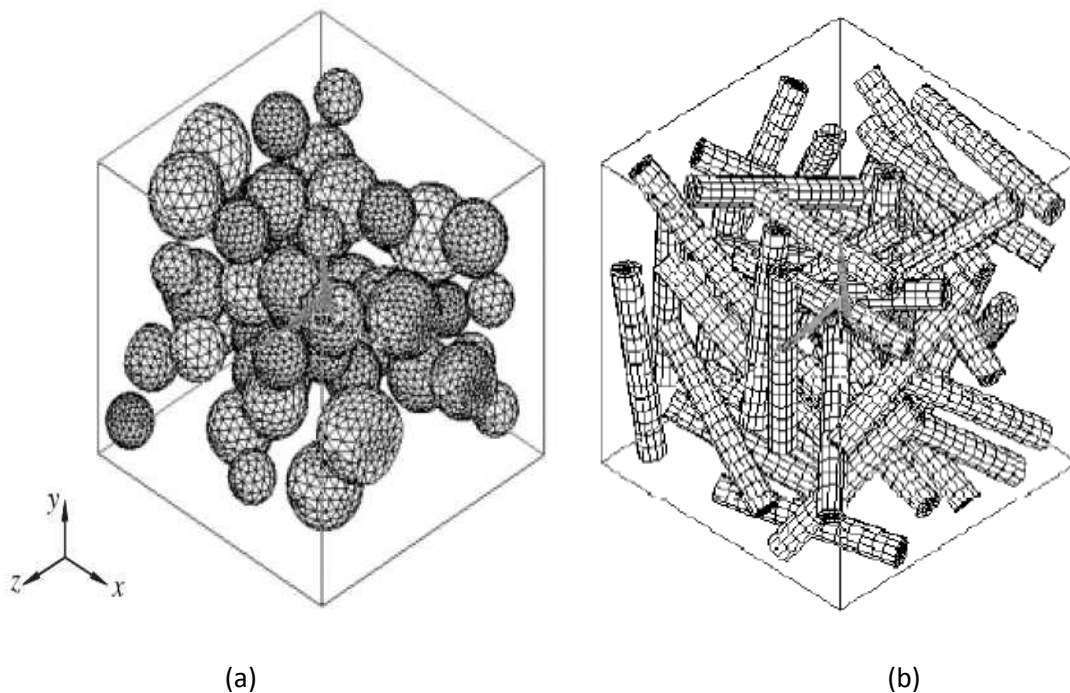


Figure II.11: Exemples de modèles numériques en 3D avec une distribution quelconque de Charges : (a) charges sphériques (b) fibres courtes [8].

W.-Z. Cai et al. [8] ont analysé par la suite quelques modèles du composite PTFE chargé avec du graphite pour différentes concentrations volumiques en charges. Les résultats sont présentés dans la figure II.11 où les valeurs numériques de la conductivité thermique effective ont été comparées aux valeurs expérimentales et aux modèles théoriques existants.

D'après (la figure II.12), ils ont noté que le modèle 3D avec une distribution aléatoire de charges et le modèle de Nielson sont en bon accord avec les valeurs expérimentales de la

Chapitre II Modélisation numérique de la conductivité thermique des composites

conductivité thermique comparés aux autres modèles. Cela est dû au fait que ces modèles prennent en compte la distribution, l'orientation et la forme des charges.

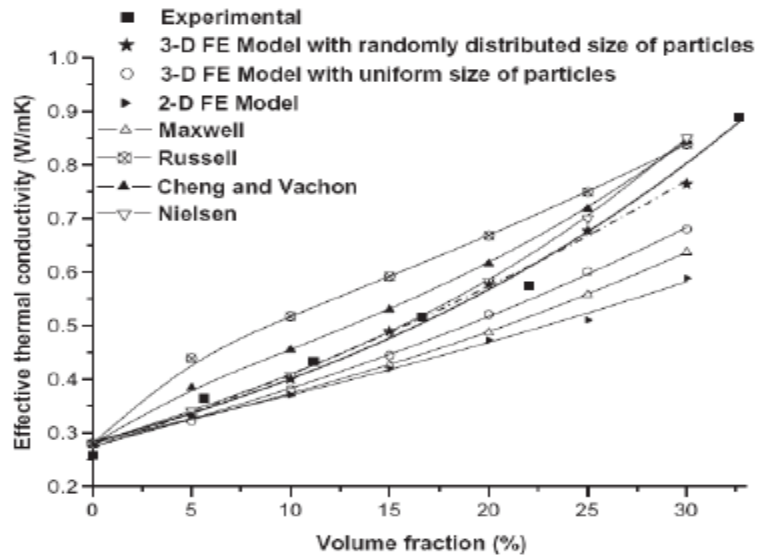


Figure II.12. Comparaison des résultats numériques, des modèles théoriques et des Valeurs expérimentales de la conductivité thermique effective du composite PTFE chargé Avec du graphite [8].

Selon les études de Yibin Xu et *al.*[9], une nouvelle méthode de modélisation a été développée pour générer un modèle FEM de composite avec des matériaux d'arrangement compliqué, particulièrement l'arrangement aléatoire. Le logiciel FINAS, qui est basé également sur la méthode des éléments finis a été utilisé pour analyser le champ de température et le flux de chaleur de composite suivi d'un programme de calcul de la conductivité thermique effective. Un programme a été élaboré pour générer automatiquement la position et l'orientation des inclusions. Dans ce modèle, quand la géométrie, l'orientation et la dispersion sont données, l'ordinateur génère de façon aléatoire la position et l'orientation pour chaque dispersion, et crée le modèle géométrique et le maillage. Dans le modèle de base de leur étude, la dispersion peut prendre trois types d'orientation (voir la figure II.13). Ils ont constaté d'après leurs études que les valeurs numériques de la conductivité thermique sont en bon accord avec les mesures expérimentales et le modèle analytique. Ils ont conclu que ce modèle numérique est particulièrement adapté au calcul de la conductivité thermique effective des composites quand il n'y a pas de solution analytique disponible. Par exemple, les composites fabriqués avec des composants de conductivité thermique anisotrope, comme dans le cas des matériaux renforcés de fibres de carbone.

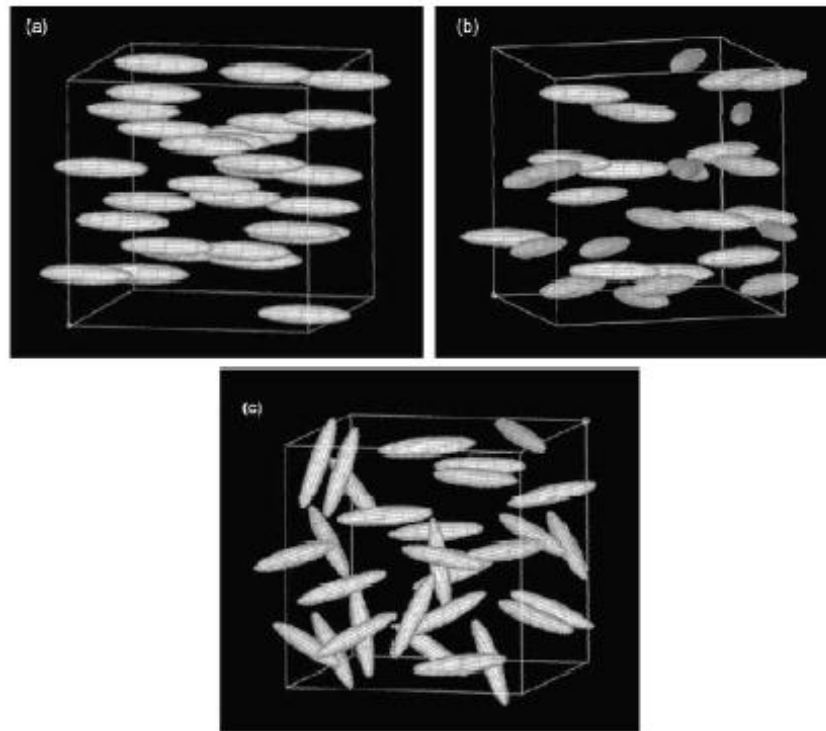


Figure II.13 : Modèles géométriques de composites générés automatiquement [9].

Une analyse par éléments finis en trois dimensions est développée par Öchsner et *al.* [10] afin d'étudier la conductivité thermique d'un nouveau type de structures, sphères creuses dispersées dans différents arrangements de cellules unitaires. Le cubique simple, le cubique centré, le cubique à faces centrées et l'hexagonale sont les arrangements utilisés dans leur modèle. Selon cette étude [10], la conductivité thermique des composites est fortement influencée par la concentration des charges et le type d'arrangement.

Les auteurs de [11] ont effectué une analyse numérique tridimensionnelle (3D) en utilisant le logiciel Comsol, pour déterminer la conductivité thermique effective des sphères de verre argentées dispersées dans une matrice d'éthylène-acétate de vinyle. La modélisation a été établie pour trois cellules élémentaires; cubique simple (SC), cubique centré (BCC), et cubique faces centrés (FCC). Ils ont étudié l'effet de la résistance thermique de contact d'inclusion/matrice sur la conductivité thermique de composite. Ils ont constatés que la conductivité thermique est diminuée avec l'augmentation de la résistance de contact.

III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modèles numériques qui peuvent être utilisés pour la détermination de la conductivité thermique des composites.

Plusieurs modèles numériques ont été proposés pour prédire la conductivité thermique des matériaux hétérogènes. Néanmoins, ces modèles parfois, ne sont pas valables sur tout pour les

Chapitre II Modélisation numérique de la conductivité thermique des composites

matériaux qui ont une géométrie complexe, ils ne peuvent pas prédire la conductivité thermique avec précision. Pour cela, les méthodes numériques offrent un champ d'application plus large, notamment, dans la détermination des propriétés thermiques des composites. En effet, la conductivité thermique des composites est affectée par plusieurs facteurs, comme la longueur et, la distribution des inclusions, la résistance de contact inclusion/matrice, ainsi que, par le modèle utilisé pour la modélisation, soit 2D, ou 3D.

Références

- [1] H. Z. Liang, "Simulation of heat transfer in hollow-glass-bead-filled polypropylene composites by finite element method," *Polym.Test*, vol. 26, pp. 419-424, 2007.
- [2] H. W. Zhang, H. L. Xing, and H. Muhlhaus, "A DEM study on the effective thermal conductivity of granular assemblies," *Powder Technology*, vol. 205, pp. 172-183, 2011.
- [3] K. Ramani and A. Vaidyanathan, "Finite element analysis of effective thermal conductivity of filled polymeric composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 29, pp. 1725-1740, 1995.
- [4] J. K. Carson, D. J. Tanner, and A. C. C., "An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations," *Int J Refrigeration*, vol. 26, pp. 873-880, 2003.
- [5] E. W. Tiedje and P. Guo, "Modeling the influence of particulate geometry on the thermal conductivity of composites," *J Mater Sci*, vol. 49, pp. 5586-5597, 2014.
- [6] T. H. Pham, J. Férec, V. Picandet, P. Tronet, J. Costa, and P. Pilvin, "Etude expérimentale et numérique de la conductivité thermique d'un composite chaux-chanvre," *XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie*, 6 au 8 juin 2012.
- [7] Pr. Philippe Olivier - ICA, Université Paul Sabatier, Dr. Gilles Dusserre - ICA, École des Mines d'Albi-Carmaux, "Étude et simulation de la conductivité thermique de matériaux composites à matrice organique chargée et renforcée de fibres de carbone", PITCH Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) 26/09/2004
- [8] W.-Z. Cai, S.-T. Tu, and G.-L. Tao, "Thermal Conductivity of PTFE Composites with Three-dimensional Randomly Distributed Fillers," *Journal of Thermo plastic Composite Materials*, vol.18, pp. 241-253, 2005.
- [9] Y. Xu and K. Yagi, "Automatic FEM model generation for evaluating thermal conductivity of composite with random materials arrangement," *Computational Materials Science*, vol. 30, pp. 242-250, 2004.
- [10] A. Ochsner and T. Fiedler, "Geometrical properties of hollow sphere structures," *Engineering Materials*, pp. 31-46, 2009.
- [11] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Boudenne, and B. Garnier, "Numerical Investigation of Heat Transfer of Silver-Coated Glass Particles Dispersed in Ethylene Vinyl Acetate Matrix," *Int J Thermophys*, vol. 35, pp. 1803-1816, 2014.

Chapitre III

Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les composites

I. Introduction

Nous avons présenté aux chapitres précédents des généralités sur les matériaux composites ainsi qu'un rappel sur leurs propriétés thermophysiques, les modèles numériques de prédiction de la conductivité thermique. Le but de ce chapitre est d'illustrer l'approche numérique suivie pour la détermination de la conductivité thermique des composites. Pour cela, ce chapitre est composé de trois parties. On s'intéresse dans la première partie à la méthode des éléments finis. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du logiciel COMSOL. En fin la dernière partie est consacrée à l'étude numérique effectuée sur le matériau composite abas de mortier et de fibres de palmier dattier. La conductivité thermique de composite mortier/fibres de palmier dattier est calculée en 2D.

Partie (1) : La méthode des éléments finis

1. Rappel sur la méthode des éléments finis

Pour résoudre ce problème, la méthode des éléments finis propose de découper le système réel en un certain nombre d'éléments à géométries simples. Cette procédure est appelée « discrétisation » car le milieu continu est remplacé par une série d'éléments discrets [1]

Cette méthode est l'une des méthodes les plus employées aujourd'hui pour résoudre des équations aux dérivées partielles, et notamment les équations de Maxwell qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Elle est basée sur la technique d'approximation par éléments finis [2] qui permet d'approcher une fonction polynôme dans un espace donné à partir de la connaissance des valeurs en certains nœuds du domaine. Il faut pour cela divisé le domaine d'étude de ces fonction sen sous-domaines élémentaires appelés éléments. Ces fonctions locales ont l'avantage d'être plus simple que celles quel' on pourrait éventuellement utiliser pour représenter la totalité du domaine de calcul. Grâce à la diversité des éléments pouvant être employés, notamment les triangles en 2D ou les tétraèdres en 3D, cette méthode est très répandue pour la modélisation de géométries complexes. Cette méthode exige un traitement particulier des équations qui sont transformées à l'aide d'une formulation intégrale, puis discrétisées pour aboutir à un système d'équations algébriques [3].

2. La conductivité effective

La conductivité effective des matériaux composites, matériaux hétérogènes, est définie comme la conductivité d'une région homogène équivalente qui, pour un écart donné de température, autorise le transfert du même flux de chaleur. Pour un milieu continu,

indéformable, en l'absence de source de chaleur interne au matériau et en régime stationnaire, Où se soucier dans l'étude à l'équation de l'énergie [4].

Partie (2) : Présentation du logiciel COMSOL

Cet outil de simulation numérique, basé sur la méthode des éléments finis permet de traiter de nombreux problèmes grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées. Il possède de plus un environnement graphique permettant de réaliser rapidement des figures relativement complexes (en 1D, 1D-axisymétrique, 2D, 2D-axisymétrique ou 3D). Par ailleurs, COMSOL Multiphysics possède un environnement de programmation dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème [5]. Par défaut le maillage est automatique et se compose de triangle en 2D et de tétraèdre en 3D. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « solvers », pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendant du temps [5]. Il est donc possible d'évaluer avec ce logiciel la conductivité, la capacité et la diffusivité thermique des matériaux composites.

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

→ Choix du modèle, dans notre cas c'est le transfert de chaleur par conduction en régime stationnaire (Figure III.2)

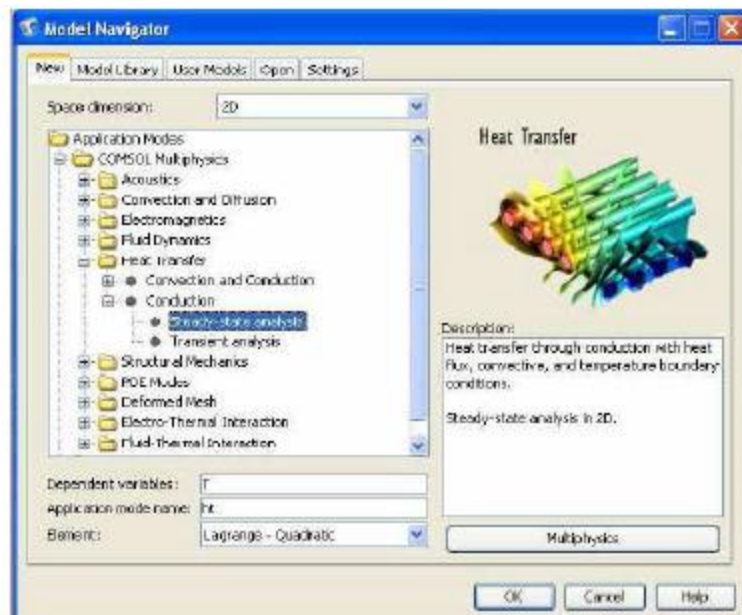


Figure III.2 : Choix du modèle

→ Choix d'un volume élémentaire représentatif de la totalité du matériau (Figure III.3). La géométrie est subdiviser en sous domaine

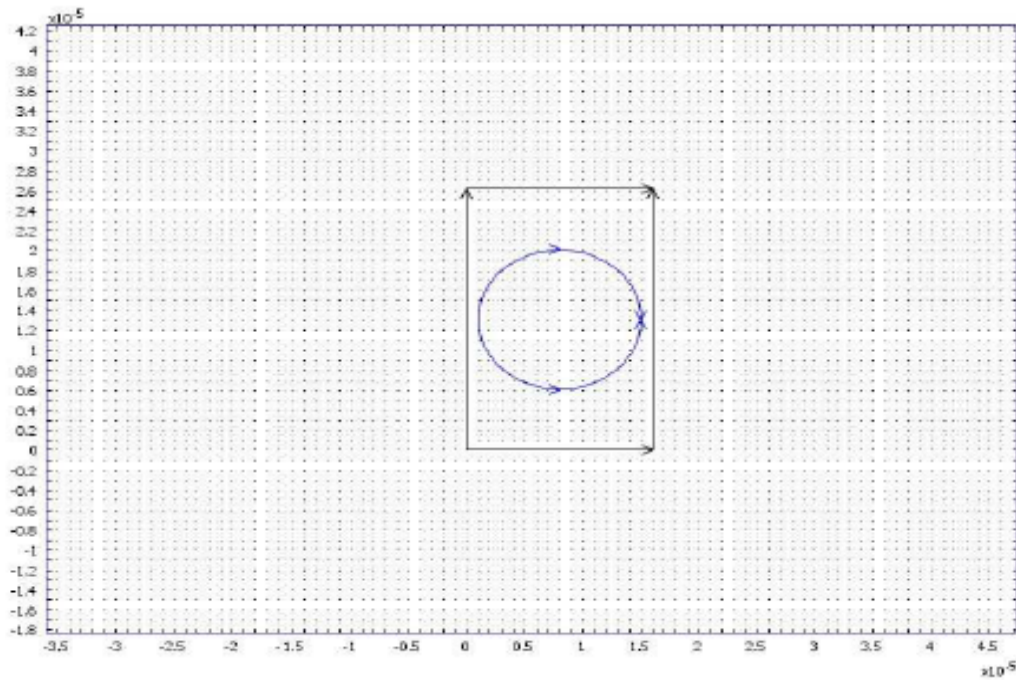


Figure III.3 : Géométrie à modéliser

→ Définition des propriétés de chaque sous domaine (Figure III.4)



Figure III.4 : Définition des propriétés des sous domaine

→ Introduction des conditions aux limites (Figure III.5)

- Conduire un flux de chaleur

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

- Etre isolant $n \cdot (K \nabla T) = 0$

- Avoir une température fixée $T=T_0$
- Avoir une température nulle $T = 0$

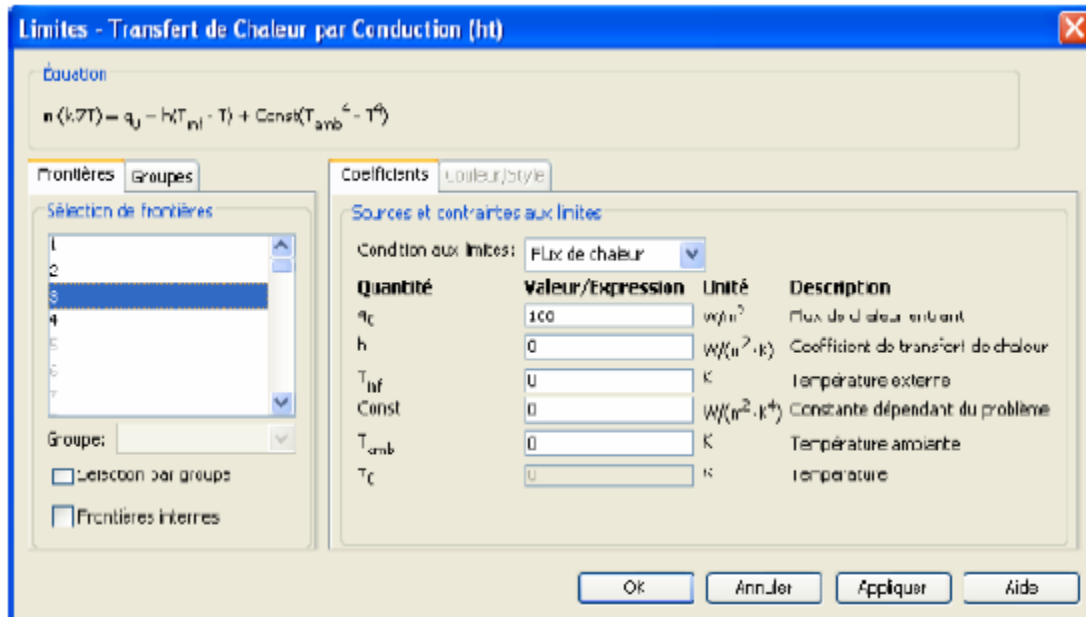


Figure III.5 : Définition des conditions aux limites

- Maillage de la géométrie
- Post-traitement de données calculées (Figure III.6)

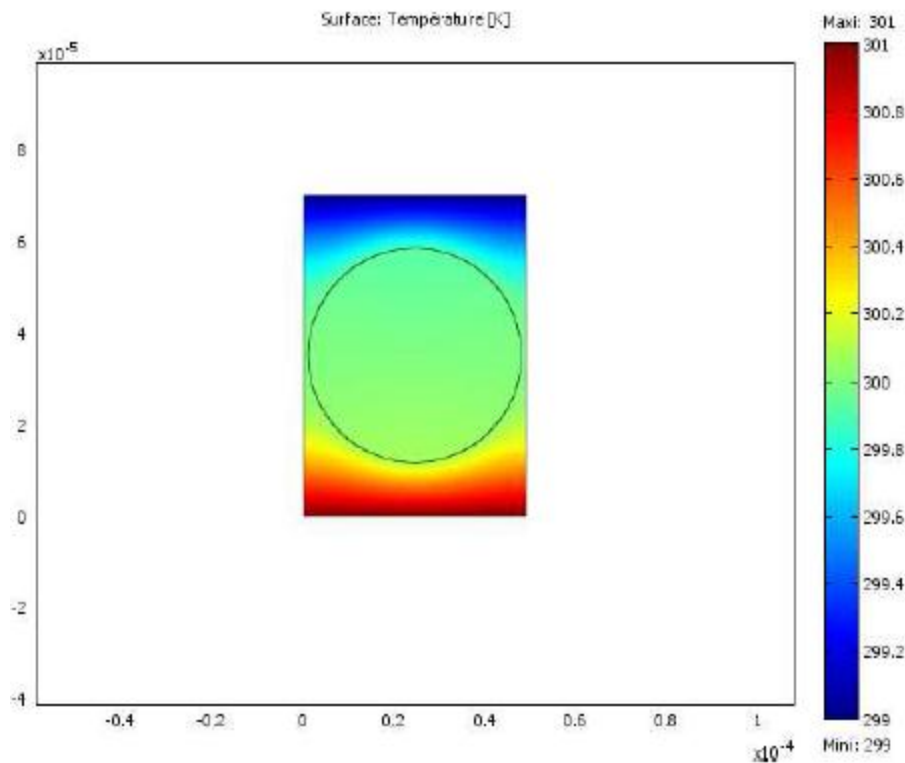


Figure III.6 : Grandeurs physiques calculées

Chapitre III Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les composites

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

$$K = S \cdot \phi / dT \quad (\text{III.1})$$

Nous choisissons donc les conditions aux limites suivantes (Figure III.7) :

- On applique deux températures différentes sur les faces (1,3)
- Les deux faces restantes (2,4) sont isolées.

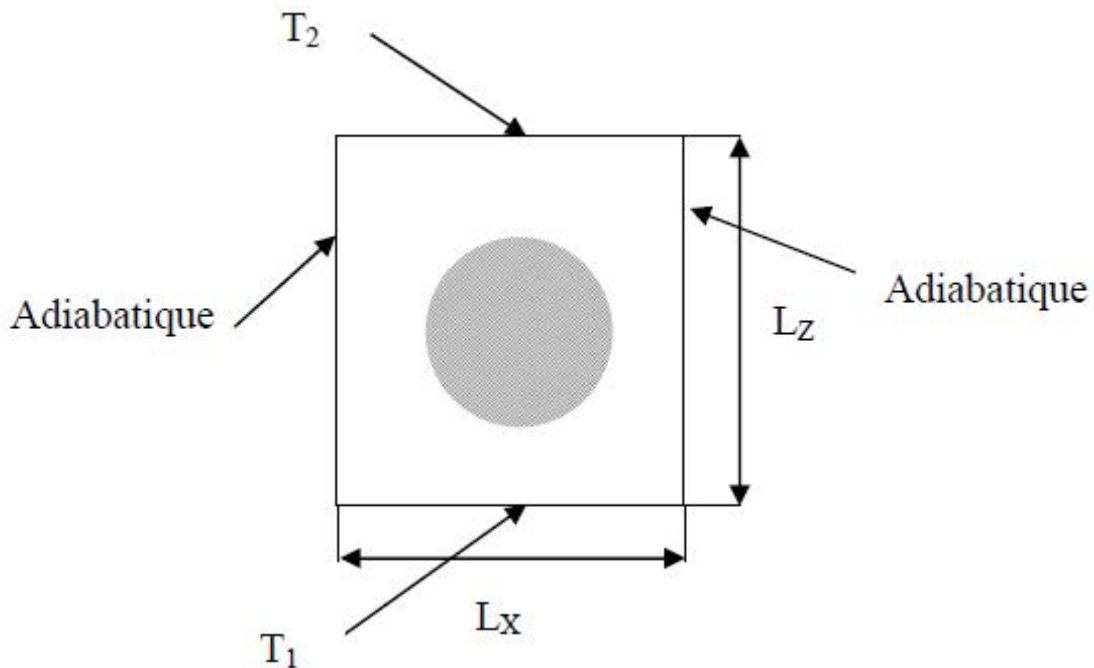


Figure III.7 : Conditions aux limites

Partie (3) : Modélisation numérique

1. Propriétés des fibres et de la matrice

Les propriétés thermophysiques de la matrice et des fibres de renforcement (FPD) sont présentés dans le tableau III.1 [6].

Tableau III.1 : Propriétés de la matrice et de fibres

Matériaux	k ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	a ($\times 10^{-7} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
FPD ^a	0.084	3.31	254
Mortier ^b	0.8039	4.9752	1908

2. Modélisation numérique par le logiciel COMSOL

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 [7]. Afin de modéliser le transfert de chaleur au sein du composite, nous considérons une cellule élémentaire correspondant à plusieurs sphères et cylindres dans un rectangle.

Le champ de température dans le matériau est défini en résolvant numériquement l'équation de Laplace à l'aide d'une formulation éléments finis avec les conditions aux limites présentés ci-dessus (Figure III.7).

La distribution de la température dans le matériau est présentée dans (la figure III.8).

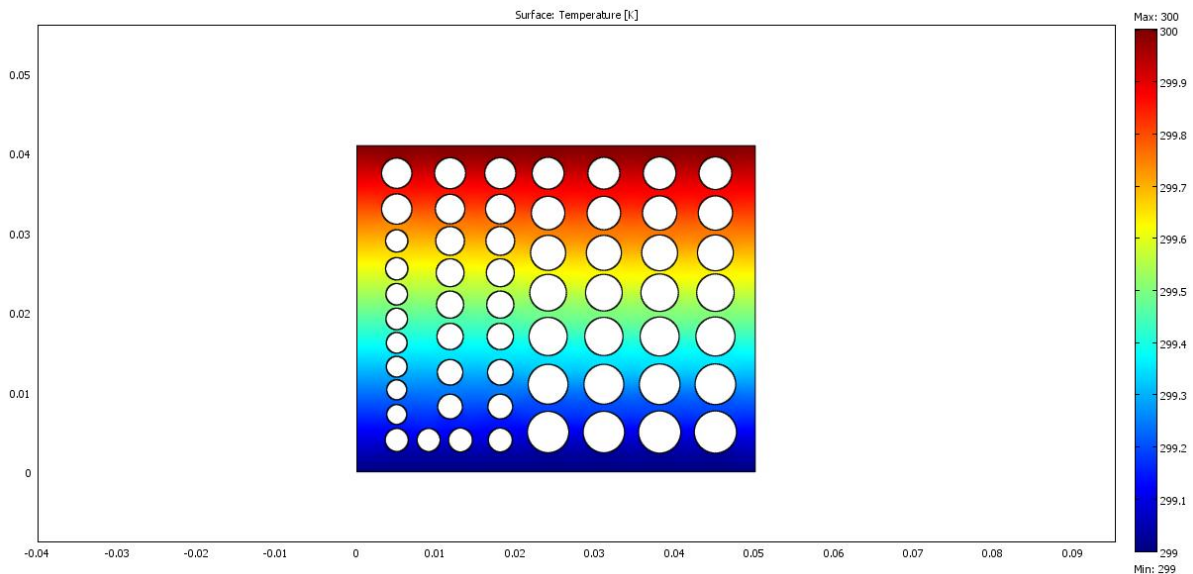


Figure III.8 : Distribution de la température .

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

$$\phi = \int_s k \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \tag{III.2}$$

Pour déterminer la conductivité thermique du matériau modélisé nous avons utilisé l'équation

L'équation :

$$K = \frac{Q \times Z}{X} \tag{III.3}$$

Avec :

K : la conductivité thermique

Q : le flux de chaleur

X : la longueur la cellule

II. Résultats et Discussions

L'approche numérique décrite dans section est utilisée pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux composites chargés par des inclusions sphériques et cylindre. Les résultats de la simulation numérique sont illustrés dans le tableau (III.1) et la figure (III.9).

D'après la figure, une diminution non linéaire de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en charge (la concentration des fibres est observée).

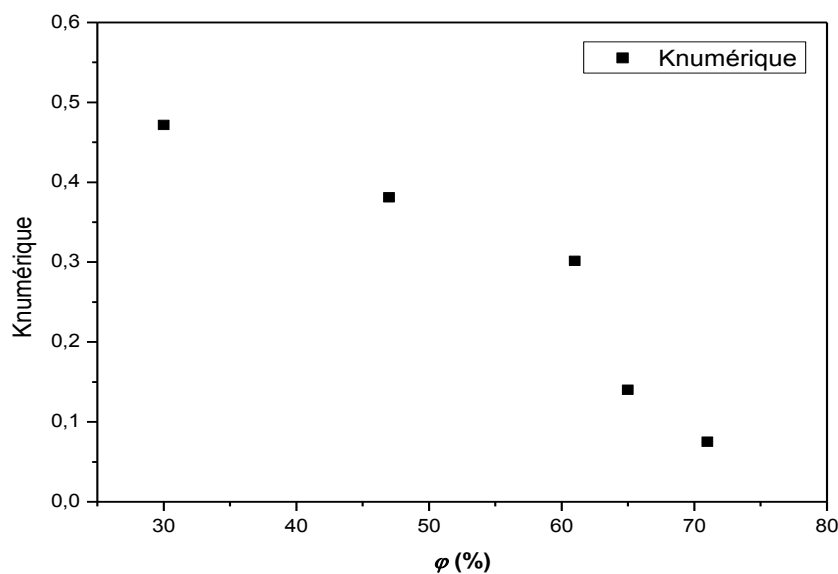


Figure. III.9 : Valeurs numériques de k du composite béton et fibre de palmier dattier

En effet, le paramètre gouvernant la conductivité thermique effective des composites est la conductivité thermique des matériaux constituant de ces composites. Ce comportement est déduit à partir des résultats de la littérature, lorsque la conductivité thermique des inclusions est faible que celle de la matrice, la conductivité effective du composite diminue et vice versa. Ces résultats sont dus à l'effet des faibles conductivités thermiques des charges naturelles comparées à celles des matrices.

III. Comparaison entre les résultats numériques, résultats expérimentaux

Le tableau III.2 présente les valeurs numériques obtenues dans cette étude comparées aux valeurs expérimentales obtenues par N.Benmansour.

$\varphi(\%)$	$K_{num} (w.m^{-1}.k^{-1})$	$K_{exp} (w.m^{-1}.k^{-1})$
30	0,47165	0,62778
47	0,38091	0,43044
61	0,3014	0,22236
65	0,14021	0,15568
71	0,07514	0,11318

Tableau III.2 : Valeurs numériques et expérimentales de k du composite béton et fibre de palmier dattier

La figure (III.14) présente les variations de la conductivité thermique k ($w.m^{-1}.k^{-1}$) en fonction de variation de la concentration des fibres.

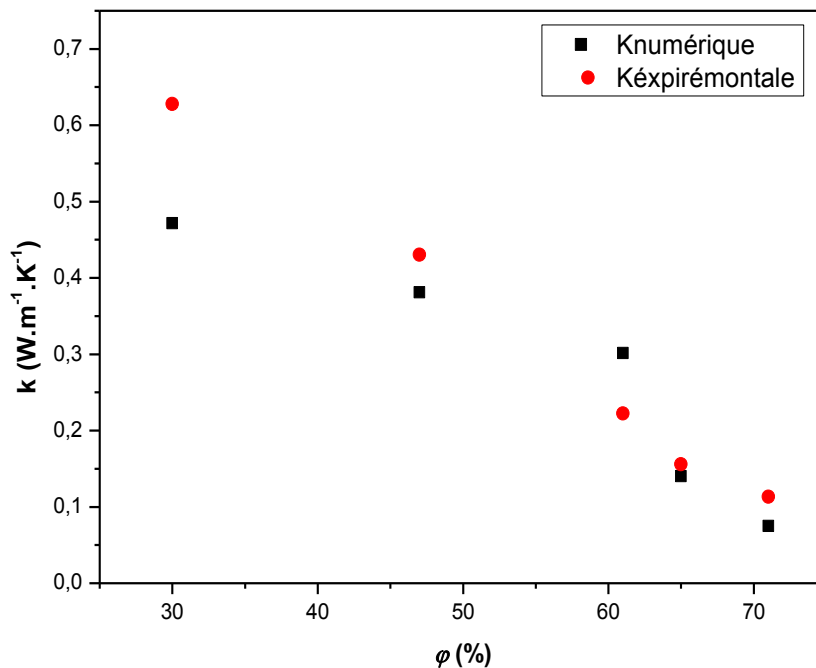


Figure III.10 : Comparaison entre les résultats numériques, résultats expérimentaux de prédiction de k du composite béton et palmier dattier

D'après le tableau et la figure, on observe que l'écarte entre les valeurs numériques et expérimentales de la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la concentration (quand le K_{exp} et K_{num} diminue). Les écarts entre $k_{numérique}$ et $k_{expérimentale}$ diminuent, c'est-à-dire quand la concentration des fibres augmente.

Chapitre III Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les composites

Pour les concentrations 30 % et 50 %, le modèle numérique ne prédit pas bien les valeurs expérimentales du composite; il y a une grande divergence entre les résultats numériques et les mesures expérimentales. Cette divergence est peut être due au fait que la simulation ne prend pas en compte l'orientation des fibres dans la matrice et les différentes formes et tailles de ces fibres.

Par ailleurs, pour les concentrations supérieures à 50 %, le modèle numérique développé dans cette étude donne une bonne prédiction de la conductivité thermique des composites. Ceci est lié au fait que réellement lorsque la concentration des inclusions augmente, l'interaction entre les inclusions augmente, d'où la formation d'une chaîne des particules isolantes (la conductivité thermique des fibres est très inférieure à celle de la matrice, elle est de l'ordre de $0.084 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Pour la concentration de 65%, le modèle numérique estime bien la conductivité thermique de composite ($K_{\text{num}}=0,14021$, et $K_{\text{exp}}=0,1556$)

IV. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé un modèle de simulation numérique en régime permanent dont le but est de déterminer la conductivité thermique de composite mortier/fibres de palmier dattier. Les valeurs de la conductivité thermique obtenues numériquement ont été comparées aux valeurs expérimentales. Il est conclu que le modèle numérique ne prédit pas bien la conductivité thermique de composite, pour les faibles concentrations de fibres, mais il y a un bon accord entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques de la conductivité thermique, pour les concentrations élevées.

Références

- [1] A. Chateaufneuf, "Comprendre les éléments finis Principes, formulations et exercices corrigés", 2005.
- [2] L. Zhou et L. E. Davis, IEEE Trans. on MTT. 44, No. 6, June (1996).
- [3] Abdelilah Mejdoubi, " étude par simulation numérique des propriétés diélectriques d'hétéro structures multiphasiques contenant des inclusions de forme arbitraire". Physique Numérique [physics.comp-ph]. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2007.Français.
- [4] C.Lorrette Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Toulouse ,l'Université Bordeaux 1,Ecole Doctorale des Sciences Chimiques, Laboratoire d'accueil : LCTS, "Outils de caractérisation thermophysique et modèles numériques pour les composites thermostructuraux à haute température", Soutenu le 20 /4/2007
- [5] "COMSOL Multiphysics v3.3," <http://www.comsol.com>.
- [6] N.Benmansour, " développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat", docteur en physique de l'université hadj lakhdar de batna option : énergies renouvelables Soutenu le 18/05/2015
- [7] M.Haddadi,"Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère", thèse de master en physique de l'université hadj lakhdar de batna option : Energétique, Soutenu le 2010/2011

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire a été consacré dans un premier temps à faire une synthèse bibliographique sur les matériaux composites, les propriétés thermophysiques, Puis, à faire une étude numérique du comportement thermophysique de composite à matrice mortier et bois de palmier dattier.

La caractérisation des propriétés thermophysiques des composites peut se faire numériquement. Nous avons donc développés dans ce travail une modélisation numérique qui a permis d'obtenir la conductivité thermique effective de composite mortier/fibres de palmier dattier. Ce modèle est validé par la comparaison des résultats expérimentaux.

D'après cette étude, nous avons constatés que le modèle numérique ne prédit pas bien la conductivité thermique de composite, pour les concentrations faibles de fibres, mais il y a une cohérence entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques de la conductivité thermique, pour les concentrations élevées de fibres.

En effet, la modélisation numérique de transfert de chaleur dans un matériau hétérogène, particulièrement le composite Mortier/FPD, est très compliqué, et cela peut être du à la composition de matériau composite. Ce dernier se compose de différents constituants, à savoir : le sable, le ciment, les fibres, et la présence de l'eau et des bulles d'air dans ce composite. En plus, la conductivité thermique effective des composites est influencée par plusieurs paramètres qui ne sont pas prises en compte dans notre simulation tels que l'orientation, la distribution. Des facteurs qui rendent la modélisation numérique de la conductivité thermique des composites très difficile.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Résumé :

Ce mémoire porte sur l'étude numérique des propriétés thermophysiques du mortier chargé du bois de palmier dattier .En plus, de montrer certains chercheurs qui ont utilisé dans leur étude de la modélisation numérique pour étudier certaines des caractéristiques des composites.

L'approche numérique décrite dans notre travail est utilisée pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux composites chargés par des inclusions sphériques et cylindriques, ce qui permettra de mettre en évidence l'effet de la forme et de la taille des fibres. Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de fibres de palmier dattier réduit la conductivité thermique, tout en réduisant le poids. En plus, une comparaison entre les résultats numériques, expérimentales a été effectué. Il est constaté que le modèle numérique prédit bien la conductivité thermique de composite, pour les concentrations élevées de fibres.

Mots clés : Mortier, Propriétés thermiques, Matériaux composites, Fibres de palmier dattier, Comsol.

Abstract:

This thesis focuses on the numerical study of thermo physical properties of mortar charged of date palm wood. In addition to showing some researchers who used in their study of numerical modeling to study some of the characteristics of composites. The numerical approach described in our work is used for the determination of the thermal conductivity of composite materials charged by spherical and cylindrical inclusions, which will highlight the effect of the shape and the size of the fibers. The results obtained show that the incorporation of date palm fibers reduces the thermal conductivity, while reducing the weight. In addition, a comparison between the numerical, experimental results was carried out. It is found that the numerical model predicts well the composite thermal conductivity, for high concentrations of fibers.

Keywords: Mortar, Thermal properties, Composite materials, Date Palm Fiber, Comsol.

ملخص:

هذه المذكرة تركز على الدراسة العددية للخصائص الحرارية الفيزيائية لهاون المشحونة بخشب ألياف النخيل. بالإضافة إلى ذلك، برهن مجموعة من الباحثون باستعمالهم في دراستهم لخصائص المركبات النمذجة العددية. نستخدم النهج الرقمي في عملنا لتحديد التوصيل الحراري للمركبات محملة شوائب كروية واسطوانية الشكل، حيث سنسلط الضوء على تأثير شكل وحجم الألياف. وتظهر النتائج أن إدراج ألياف النخيل يقلل من التوصيل الحراري في حين خفض الوزن. وبالإضافة إلى ذلك، تم إجراء مقارنة بين النتائج الرقمية، التجريبية. وجدت أن النموذج العددي يتوقع جيدا كذلك التوصيل الحراري للمركبات، بالنسبة للتركيزات العالية للألياف.

الكلمات المفتاحية : هاون، والخصائص الحرارية، والمواد المركبة، و شجرة ألياف النخيل، كمسول

