

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

**DOCTEUR EN PHYSIQUE DE L'UNIVERSITE
HADJ LAKHDAR DE BATNA
Option : Energies Renouvelables**

Par

Nadia BENMANSOUR

**DEVELOPPEMENT ET CARACTERISATION DE COMPOSITES
NATURELS LOCAUX ADAPTES A L'ISOLATION THERMIQUE DANS
L'HABITAT**

Soutenu le 18/05/2015

devant les membres de jury :

S. Bougoul	Pr.	Université de Batna	Président
A. Boudenne	MC.HDR	Université de paris-Est France	Examineur
H. Satha	Pr.	Université de Guelma	Examineur
M. Guellal	Pr.	Université de sétif	Examineur
Z. Aouachria	Pr.	Université de Batna	Examineur
A. Agoudjil	Pr.	Université de Batna	Rapporteur

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

Remerciements

Ce travail de recherche été réalisé au sein du laboratoire de physique énergétique appliquée, à l'université El-Hadj Lakhdar de Batna.

En premier lieu, je tiens à exprimer toute ma connaissance et gratitude au Professeur Boudjemaa AGOUDJIL de m'avoir accueilli dans son laboratoire, et pour m'avoir suivi au cours des années de travail. Je tiens à souligner sa disponibilité, le soutien qu'il m'a apporté dans les moments les plus difficiles de cette thèse, ses idées, ses expériences et la confiance qu'il m'a accordée, ses conseils jusqu'à la dernière minute.

Mes remerciements vont également à Abderrahim BOUDENNE de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire durant mon stage en France. Ses conseils et commentaires m'ont fait réfléchir et progresser sur de nombreux aspects.

Mes remerciements vont également à Monsieur Said BOUGOUL qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse et aussi aux Hamid SATHA, Abderrahim BOUDENNE, Zeroual AOUACHRIA, et M. GUELLAL pour m'avoir accepté de participer au jury et m'avoir suggéré de nombreux conseils.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Abdelkader GHERABLI, et Monsieur Abdelhak KARECHE pour leur aide précieux, surtout dans la partie expérimentale de ce travail.

J'adresse mes remerciements à mes collègues qui m'ont offert leur soutien tout au long de cette période, spécialement ma collègue M^{me}. Manel HADDADI.

Je tiens à remercier les personnels des laboratoires: laboratoire de génie civil, d'hydraulique et d'architecture et le laboratoire de national d'habitat de construction de Batna, qui m'ont permis d'effectuer la partie expérimentale de cette thèse.

J'en profite pour exprimer ma profonde affection à mes parents pour l'ensemble de ce qu'ils m'ont apporté, sans oublier mes chères sœurs souhir, fatma, amira, kanza, rania, et mon frère khaled.

Je tiens à exprimer toute ma sympathie et mon attachement à mes amies et à ma famille. Je remercie tous ceux qui se sont déplacés lors de ma soutenance.

Table des matières

Introduction.....	i
Chapitre I : Isolation thermique dans le bâtiment et matériaux composites à base de fibres naturelles	
I. Introduction	2
II. Enjeux énergétiques et environnementaux dans le secteur de bâtiment.....	2
II.1. Impact du secteur du bâtiment sur les consommations énergétiques et l'environnement.....	3
III. Etat de l'art sur l'isolation sur l'isolation thermique et les matériaux isolants.....	4
III.1. Isolation thermique	4
III.2. Avantages d'isolation thermique	5
III.3. Classification des matériaux isolants	6
III.3.1. Matériaux inorganiques	6
III.3.2. Matériaux organiques	6
III.3.2.1. Les isolants synthétiques	6
III.3.2.2. Les isolants d'origine végétale	9
III.3.2.3. Les isolants d'origine animale	10
III.3.3. Matériaux combinés	10
III.4. Propriétés et performances d'un matériau isolant.....	10
IV. Matériaux composites à base de fibres naturelles	11
IV.1. Matériaux composites à base de matrice minérale et de fibres naturelles.....	12
IV.1.1. Synthèse sur les comportements thermophysiques et mécaniques des matériaux composites à base de matrice minérale et de fibres naturelles.....	12
V. Matériaux composites Mortier/Bois de palmier dattier	21
V.1. Mortier	21
V.1.1. Constituants de mortier	23
V.1.2. Différents types de mortier	23
V.1.2.1. Les mortiers de ciment	23
V.1.2.2. Les mortiers de chaux	24

V.1.2.3. Les mortiers bâtards	24
V.2. Bois de palmier dattier	24
V.2.1. Caractéristiques thermophysiques et mécaniques des fibres de bois de	24
V.2.1.1. Structure et morphologie	25
V.2.1.2. Propriétés thermophysiques	26
V.2.1.3. Propriétés mécaniques	28
V.2.1.4. Propriétés physiques	29
V.2.1.5. Composition chimique	29
VI. Conclusion	29

Chapitre II : Etude expérimentale des composites Mortier /Bois de palmier dattier

I. Introduction	36
II. Matériaux utilisés	36
II.1. Sable	36
II.2. Ciment	36
II.2.1. Ciment portland	36
II.2.2. Ciment prompt (VICAT)	37
II.3. Adjuvant	37
II.4. Eau de gâchage	38
II.5. Bois de palmier dattier	38
III. Essais et mesures	42
III.1. Absorption du bois de palmier dattier	42
III.2. Cinétique de séchage du bois de palmier dattier	44
III.3. Elaboration des composites	45
III.3.1. Proportion des composants	45

III.3.2. Mise en œuvre des échantillons	46
III.3.3. Séchage	48
III.3.4. Masse volumique	48
III.4. Mesures des propriétés thermophysiques	49
III.4.1. Etat sec	50
III.4.2. Etat humide	50
III .5. Mesure des propriétés mécaniques	51
III.5.1. Surfaçage des échantillons	51
III.5.2. Résistance à la compression	52
IV. Conclusion	53

Chapitre III : Résultats et discussion

I. Introduction	56
II. Effet de l'eau sur les fibres de bois de palmier dattier.....	56
II.1. Absorption.....	56
II.2. Désorption	58
III. Propriétés thermophysiques de composites à base du mortier et des fibres de palmier dattier	61
III.1. Masse volumique	61
III.2.Résistance à l'eau de composites	63
III.3. Conductivité thermique	65
III.3.1. Etat sec	65
III.3.1.1. Effet de la concentration et de la taille de FPD	65
III.3.2. Etat humide	68
III.3.2.1. Effet de l'eau sur la conductivité thermique	68
III.3.2.2. Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique.....	70

III.4. Capacité thermique, diffusivité thermique et effusivité thermique de composites... ..	73
III.4.1. Capacité thermique	73
III.4.2. Diffusivité thermique et effusivité thermique.....	74
IV. Propriétés mécaniques	77
IV.1. résistance à la compression	77
IV.2. Corrélation entre la résistance à la compression, la conductivité thermique et la masse volumique de composites.....	81
V. Conclusion	84

Chapitre IV : Modélisation théorique et numérique de la conductivité thermique des composites

I. Introduction	89
II. Modèles théoriques et numériques pour la prédiction de la conductivité thermiques des composites.....	89
II.1. Modèles théoriques	89
II.1.1. Modèle de Hashin et Shtrikman	91
II.1.2. Modèle de Hatta et Taya.....	91
II.1.3. Modèle de Nielson... ..	92
II.1.4. Modèles par homogénéisation auto-cohérente (HAC).....	93
II.2. Modèles numériques.....	98
II.2.1. Modélisation numérique en deux dimensions.....	98
II.2.2. Modélisation numérique en trois dimensions.....	101
III. Conclusion.....	105

Chapitre V : Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les composites

I. Introduction.....	109
----------------------	-----

Partie (1) : Prédiction de la conductivité thermique de composite EVA/S-3000S2M

1. Equation de chaleur.....	110
2. Modélisation mathématique.....	113
2.1. Conductivité thermique effective du modèle cubique simple.....	113
2.2. Conductivité thermique effective du modèle BCC.....	115
2.3. Conductivité thermique effective du modèle FCC.....	116
3. Modélisation numérique.....	117
3.1. Propriétés de la matrice et de la charge.....	117
3.2. Etapes de modélisation numérique.....	118
4. Résultats et discussion.....	121
4.1. Effet de la concentration volumique, des paramètres (C), (D), et (B).....	121
4.2. Comparaison entre les résultats numériques, les mesures expérimentales et les modèles analytiques.....	124

Partie (2) : Prédiction de la conductivité thermique du composite FPD/Mortier

1. Modélisation mathématique.....	127
2. Modélisation numérique.....	129
2.1. Propriétés des fibres et de la matrice.....	129
2.2. Etapes de modélisation.....	130
3. Résultats et discussion.....	130
3.1. Effet de la concentration sur la conductivité thermique.....	130

3.2. Comparaison entre les résultats expérimentaux, numériques, et les modèles théoriques.....	133
II. Conclusion.....	134

I. Introduction

La plupart des bâtiments, d'habitation ou industriels, constituent des systèmes dont la consommation d'énergie est importante si l'on désire assurer un confort thermique acceptable par leurs occupants. De ce fait, la mise en œuvre d'un programme d'économie d'énergie dans les bâtiments devrait être une des actions prioritaires à entreprendre [1]. Dans le cadre du développement durable, les nouvelles réglementations en matière d'isolation thermique dans le secteur du bâtiment, incitent les scientifiques à la recherche de nouveaux matériaux pour constituer des systèmes économes en énergie tout en assurant le confort de l'habitat. Cette recherche est dirigée vers l'utilisation de matériaux issus de la matière végétale [2]. En général, la construction durable a pour but d'apporter une réponse cohérente à trois questions fondamentales: confort, impact sur l'environnement et santé. Elle vise à limiter les impacts de la construction sur l'environnement tout en assurant à l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saines et confortables [3].

Les objectifs sont clairs mais il existe de véritables défis économiques et scientifiques à relever avant de disposer de nouveaux produits permettant de réaliser le même type de construction mais avec un impact environnemental le plus faible possible. Malgré ces difficultés, la construction durable devient de plus en plus obligatoire dans les pays développés. Il apparaît actuellement des démarches professionnelles concernant la construction durable telles que le LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) aux Etats Unis, le BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) en Grande Bretagne ou HQE (Haute Qualité Environnementale) en France[3]. Elle désigne les pratiques consistant à concevoir et à réaliser des bâtiments plus respectueux de l'environnement et de la santé.

L'application de ces démarches nécessite la prise en compte pour les matériaux de construction, en plus des propriétés mécaniques, d'autres propriétés telles que l'isolation thermique et acoustique ou bien encore l'impact environnemental. De ce point de vue, il est indispensable de chercher dès aujourd'hui des solutions alternatives, car les matériaux de construction actuels ne sont pas biodégradables.

A l'heure actuelle, on retrouve un intérêt dans l'utilisation de matériaux d'origine naturelle tels que les végétaux (le bois, la paille, le chanvre, le lin, la terre,..), la brique de terre cuite, la laine de mouton. Les matériaux végétaux peuvent contribuer à limiter de manière non négligeable les émissions de gaz à effet de serre grâce à leur capacité d'emprisonnement du

CO₂. De plus, l'utilisation de matériaux naturels avec des constructions innovantes permet également de réduire le coût de construction.

En termes de développement des matériaux composites de construction, le béton et le mortier ne font pas exception. Les chercheurs et les producteurs de fibres ont pensé à l'incorporation de ces dernières comme matériau de renforcement dans les matrices cimentaires. Depuis lors, l'utilisation des fibres dans le béton et le mortier est devenue de plus en plus une pratique courante. Des applications sont développées grâce à la capacité prouvée par l'expérience de ces nouveaux composites, à limiter la fissuration et à améliorer la résistance à la flexion et au choc.

Plusieurs fibres ont été utilisées dans le renforcement des bétons et des mortiers. Les plus répandues sont: les fibres d'acier, d'amiante, de polymère, de carbone, et végétales. Néanmoins, vu le problème que présentent les fibres d'amiante sur la santé humaine, le coût exorbitant de production de quelques fibres industrielles, le renforcement par les fibres végétales a un avenir prometteur, et particulièrement dans les pays en voie de développement qui généralement possèdent les filières pour valoriser ces ressources naturelles [4].

L'Algérie est l'un des pays, qui dispose d'extraordinaires ressources en fibres végétales (Alfa, Diss, Liège, Palmier Dattier,...). Mais, malheureusement, leur valorisation dans les domaines pratiques est encore peu exploitée [5, 6].

Les fibres de bois de palmier dattier sont parmi les fibres végétales qui sont considérées comme déchet en Algérie. En dépit de son important potentiel quantitatif (210 000 tonnes de pétioles, 73 000 tonnes de folioles et 52 000 tonnes de grappes chaque année) [7, 8], le bois de palmier n'est pas utilisé dans les différents secteurs industriels. Il y'a donc une nécessité d'explorer le potentiel d'utilisation de cette ressource au profit de l'industrie nationale. Vue leur propriétés thermiques, les fibres de palmier dattier (FPD) représentent un matériau de renforcement très efficace pour l'isolation thermique [7].

C'est dans ce contexte que le présent travail s'intéresse au développement d'un nouveau biocomposite à base de fibres naturelles de palmier dattier et de mortier, en vue de l'utiliser comme isolant thermique dans le bâtiment. Les propriétés thermiques et mécaniques de ce biocomposite sont déterminées expérimentalement. A cet effet, l'influence de la taille et de la teneur en FPD sur les propriétés thermophysiques et mécaniques des composites ont été étudiées.

Ce mémoire est scindé donc en cinq chapitres:

Le premier chapitre s'intéresse aux enjeux énergétiques et environnementaux dans le secteur de bâtiment, l'isolation thermique, et les différents types des matériaux isolants. Une synthèse sur le comportement thermophysique et mécanique des matériaux composites à base de matrice minérale et de fibres naturelles sera présentée. Ensuite, on se focalisera sur les composites à base de mortier et de fibres de bois de palmier en précisant leurs compositions chimiques, leurs caractéristiques thermiques et mécaniques.

Le deuxième chapitre est consacré aux différents matériaux utilisés pour élaborer les composites à base du mortier et de bois de palmier dattier, et à la présentation de la méthode de mise en œuvre de ces composites. En outre, les différents dispositifs de mesures, et les méthodes de caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques des composites étudiés seront présentés.

Nous présentons dans le troisième chapitre les résultats des mesures des propriétés thermophysiques, mécaniques et de l'absorption d'eau des composites réalisés à base de mortier et de fibres de palmier dattier. Nous discutons aussi l'influence de la concentration et de la taille des fibres de bois de palmier dattier sur les propriétés mécaniques et thermophysiques de ces biocomposites. Les résultats obtenus sont comparés à ceux existants dans la littérature pour une application d'isolation thermique.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des différents modèles théoriques et numériques qui permettent la prédiction de la conductivité thermique des composites.

Enfin, nous présentons dans le cinquième chapitre l'approche numérique suivie pour la détermination de la conductivité thermique de composite à base de mortier et des fibres de palmier dattier et de composite de polymère renforcé par des sphères de verre argenté, en utilisant le logiciel Comsol. Ensuite, les résultats numériques sont comparés aux modèles théoriques de prédiction de la conductivité thermique, et aux résultats expérimentaux et présentés dans le troisième chapitre.

Références

- [1] P. Meukam, "Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment," Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004, pp. 157.
- [2] 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.
- [3] T. T. Nguyen, "Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre," Thèse de Doctorat, Université de Bretagne-Sud, 2010, pp. 168.
- [4] K. Abdelouahed, "Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec," Thèse de Doctorat, L'école Nationale Polytechnique, 2005, pp. 154.
- [5] M. Abdessamed, "Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier," Thèse de Magister, Université de Kasdi Merbah - Ouargla, 2006, pp. 98.
- [6] Y. Lamia, "Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss)," Thèse de Magister, Université de Ferhat Abbas-Sétif, 2011, pp. 118.
- [7] 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.
- [8] F. Abdouche, "Communication from the Botanic unit development at the Ministry of Agriculture and Rural Development - Algeria," *Algerian Press Service, APS. 30 March 2010: Algiers.*

**Chapitre I : Isolation
thermique dans le bâtiment
et Matériaux composites à
base de fibres naturelles**

I. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter une synthèse bibliographique sur l'isolation thermique dans le bâtiment et les composites naturelles. La première partie s'intéresse aux enjeux énergétiques et environnementaux dans le secteur de bâtiment, l'isolation thermique, ses avantages et les différents types des matériaux isolants. La deuxième partie est dédiée à la présentation d'une synthèse sur le comportement thermophysique et mécanique des matériaux composites à base de matrice minérale et de fibres naturelles. Ensuite, on se focalisera sur les composites à base de mortier et de fibres de bois de palmier en présentant l'état de l'art des propriétés physiques, thermiques et mécaniques des constituants de ce composite.

II. Enjeux énergétiques et environnementaux dans le secteur de bâtiment

Aujourd'hui, à cause des effets défavorables des activités humaines (comme l'industrie, la construction,...) sur l'environnement et la nécessité de réduire de ces impacts, à l'échelle internationale, les motivations sont de plus en plus fortes pour intégrer les projets à une démarche de développement durable et de la maîtrise des consommations d'énergie.

Le développement durable c'est la résultante d'un long processus de mise à l'agenda des préoccupations environnementales qui apparaissent dans les agendas politiques des pays développés à partir des années 70 en raison de catastrophes écologiques d'origine humaine ainsi que de la hausse du coût des énergies fossiles [1].

La définition la plus répandue du développement durable est celle décrétée en 1987 dans le Rapport de Gro Harlem Brundtland[1], présidente de la commission mondiale sur l'environnement et le développement à l'ONU, selon laquelle « le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs».

Néanmoins, la capacité des générations futures à subvenir à leurs besoins est menacée, parmi ces menaces, on peut citer:

- Le réchauffement climatique, il est identifié par la majorité des scientifiques, comme une conséquence du rejet en quantité importante de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ etc.) par les activités humaines.

- La raréfaction des ressources naturelles, dont certaines apparaissent pourtant à l'heure actuelle indispensables au fonctionnement de nos sociétés (pétrole, gaz, charbon etc.)[2].

C'est pour cela, la maîtrise des consommations d'énergie représente la meilleure solution pour le problème du changement climatique. Elle permet aussi de ralentir l'épuisement des ressources fossiles, alors qu'une part importante de la consommation d'énergie peut être assurée par les énergies renouvelables [3].

II.1. Impact du secteur du bâtiment sur les consommations énergétiques et l'environnement

Toutes les activités associées au secteur de la construction (design, construction, utilisation, démolition,...etc.), affectent en effet directement ou indirectement, l'environnement [4]. Le bâtiment en particulier reste un des secteurs les plus pollués, par non seulement une surconsommation et gaspillage d'énergie, mais également des rejets de déchets non recyclés [5].

Les bâtiments sont responsables de plus d'un tiers des émissions de dioxyde de carbone. Il faut noter aussi que le dioxyde de carbone est un des principaux gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique [4].

En Algérie, selon le rapport de l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE)[6], dans le bilan des émissions de dioxyde de carbone par secteur, l'habitat résidentiel est classé troisième après les industries énergétiques et le transport, avec 6312 Teq CO₂ (tonnes équivalent de CO₂).

Par ailleurs, ce secteur possède également d'autres impacts significatifs sur la qualité de l'air à l'intérieur et sur la santé qui sont de plus en plus considérés comme des critères importants pour la construction. Le cycle de vie (La production de matériaux : extraction des matières premières, transformation, et leur mise en œuvre) des constructions a des conséquences sur l'environnement. En plus, leur démolition engendre des déchets, des émissions polluantes. Pour minimiser ces impacts, des recherches visent à développer l'utilisation de matériaux de construction à faible impact environnemental et qui sont renouvelables, consomment très peu d'énergie ou de combustibles fossiles, produisent un minimum de pollution et de risques pour la santé, et devrait permettre de diminuer efficacement les émissions de dioxyde de carbone.

Le secteur du bâtiment est le secteur le plus énergivore en Algérie, sa consommation représente plus de 42% de la consommation globale de l'énergie. A titre d'exemple, en moyenne, l'habitat consomme plus que 151 kwh/an pour le chauffage, climatisation, eau sanitaire et éclairage. En termes d'efficacité énergétique dans le bâtiment, l'Algérie est en retard, essentiellement du à la subvention par l'état des énergies fossiles comme le gaz naturel. Dans ce contexte, l'exemple le plus important est les déperditions thermiques dans l'habitat qui se traduisent par des pertes de chaleurs à travers les toitures, les murs, les ponts thermiques, les planchers et le phénomène de renouvellement d'air. Un autre problème préoccupant, c'est la part des déchets non recyclés, d'importantes quantités sont aujourd'hui rejetés dans la nature contaminant ainsi le milieu environnement [7].

En effet, les démarches de maîtrise de l'énergie proposées pour ce secteur portent notamment sur l'introduction de l'isolation thermique des bâtiments qui permet d'une part de réduire la consommation d'énergie liée au chauffage, la climatisation d'un logement d'environ 40%, et d'autre part de valoriser les déchets naturels rejetés [8]. Ainsi, le domaine de bâtiments, qui a besoin d'importants volumes de matières premières, est un acteur essentiel de la logique de valorisation des déchets naturels.

III. Etat de l'art sur l'isolation thermique et les matériaux isolants

III. 1. Isolation thermique

L'isolation thermique joue un rôle principal dans la réduction des consommations énergétiques et également dans la création d'un espace de vie sain et plus confortable dans le bâtiment. En effet, une bonne isolation thermique entraîne le choix d'équipements de climatisation moins puissants donc plus économiques [9].

Selon la littérature [10], l'isolation thermique est une technique ou un moyen matériel (un matériau ou combinaison de matériaux) de limiter les transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement entre l'extérieur et l'intérieur d'un logement. Il retarde le flux de chaleur à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment en raison de sa haute résistance thermique. C'est un acte essentiel pour obtenir un niveau de bien être thermique satisfaisant. En fait, la notion de bien être thermique est plus large que celle de confort thermique. Au-delà de ce dernier qui correspond à l'absence de sensations physiques désagréables-« avoir froid, avoir chaud »-, le bien-être thermique fait intervenir des facteurs culturels et psychologiques [11].

III.2. Avantages d'isolation thermique

L'intérêt principal de l'isolation thermique c'est qu'elle permet de réduire la dépendance sur les systèmes (mécanique/ électrique) pour exploiter le bâtiment confortablement et, par conséquent, conserve l'énergie et les ressources naturelles associées [10]. En plus de confort thermique, il existe également plusieurs autres avantages de l'utilisation d'isolation thermique dans le bâtiment qui peuvent être résumées comme suit [10]:

Avantage économique: Des économies d'énergie importantes peuvent être atteintes à l'aide d'utilisation d'isolation thermique, avec peu de dépenses en capital. Il réduit les coûts d'exploitation de l'énergie.

Avantage environnemental: L'utilisation d'isolation thermique non seulement réduit les coûts d'exploitation de l'énergie, mais entraîne également des avantages environnementaux comme la valorisation des déchets rejetés qui causent des émissions polluantes.

Réduire le niveau de bruit: L'isolation peut réduire le bruit nuisible et stressant des espaces voisins ou de l'extérieur. Cela améliore le confort acoustique des bâtiments isolés.

Intégrité structurale d'un bâtiment: Les fortes variations de température peuvent causer des mouvements thermiques indésirables, ce qui pourrait endommager la structure du bâtiment. La préservation des bâtiments avec des fluctuations minimales de température contribue à la préservation de l'intégrité des structures de bâtiments. Ceci peut être réalisé par l'utilisation d'une isolation thermique appropriée en augmentant ainsi la durée de vie des structures du bâtiment.

Empêchement de condensation de vapeur: Bonne installation de l'isolation thermique aide à prévenir la condensation de vapeur sur la surface de bâtiment. Cependant, il faut faire attention à éviter les effets néfastes de la structure du bâtiment dommageable, qui peuvent résulter de mauvaise installation de matériaux d'isolation ou une mauvaise conception. En plus, les pare-vapeur sont généralement utilisés pour empêcher la pénétration d'humidité dans un isolant à basse température.

Protection contre le feu : Si le matériau isolant approprié est choisi et correctement installé, il peut aider à retarder la chaleur et à empêcher l'immigration de flamme dans la construction en cas d'incendie.

III.3. Classification des matériaux isolants

Les matériaux d'isolation peuvent être classés en trois groupes essentiels; à savoir : les matériaux inorganique (isolants minérales), organiques (isolants synthétique, végétales et animales) et les matériaux combinés (comme la laine de bois) [12].

III. 3.1. Matériaux inorganique

➤ Les isolants minéraux

Les isolants minéraux sont fabriqués à partir de matières naturelles inorganiques. Ils regroupent : le verre cellulaire, la laine de verre, la laine de roche (basalte en particulier), la perlite, la vermiculite, l'argile expansé [11-13].

Elles présentent de bonnes performances thermique, très résistant au feu, ils sont stables et solides, ils sont couramment utilisés dans tous les domaines de construction; et peuvent être fabriqués sous différentes formes (matelas ou panneaux) [11]. La laine de roche et la laine de verre sont les isolants les plus communément utilisés [13].

III.3.2. Matériaux organiques

➤ Les isolants synthétiques

Les isolants synthétiques sont généralement utilisés pour l'isolation extérieure. Cabeza et al [14] ont étudiés les propriétés d'isolation des panneaux de polyuréthane, polystyrène, en vue de les utiliser comme isolant extérieur dans le bâtiment. Ils ont montré que ces matériaux présentent des caractéristiques thermiques intéressantes. Néanmoins, il existe plusieurs types des isolants synthétiques ; on peut citer le polystyrène, le polyuréthane, les mousses urée-formol, les mousses phénoliques, les mousses de polychlorure de vinyle, les polyesters [11, 15]. Parmi les isolants synthétiques, il existe aussi une nouvelle génération d'isolants spécialement conçus pour offrir de hautes performances, comme le PIV (panneau d'isolants sous vide), l'aérogel, la brique monomur en terre cuite, les blocs monomur en argile expansée,...etc.[13].

- Le PIV (panneaux d'isolants sous vide)

Le PIV est composé d'un matériau « âme » confiné dans un film étanche et mis en dépression. Les panneaux isolants sous vide présentent des qualités thermiques exceptionnelles, leur conductivité thermique se situe entre $0.0042 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $0.0050 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Ils possèdent

une bonne capacité de réduction des nuisances sonores et une bonne résistance à la compression.



Figure I.1 : *Panneau isolant sous vide [16]*

- L'aérogel

Mis au point en 1931 par un chimiste Américain, le procédé de fabrication a été développé par la NASA pour l'isolation des satellites. Il consiste à extraire l'eau d'un gel de silice et à la remplacer par de l'air [17]. Les aérogels présentent des caractéristiques d'isolation exceptionnelles, composés de 99.8% d'air, ils sont extrêmement légers et plus proches de l'apparence d'un nuage de poussière que d'un matériau isolant classique ; ils possèdent un excellent coefficient de conductivité thermique, entre $0.011 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $0.013 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. A titre de comparaison, il est trois fois plus isolant que la laine de verre.

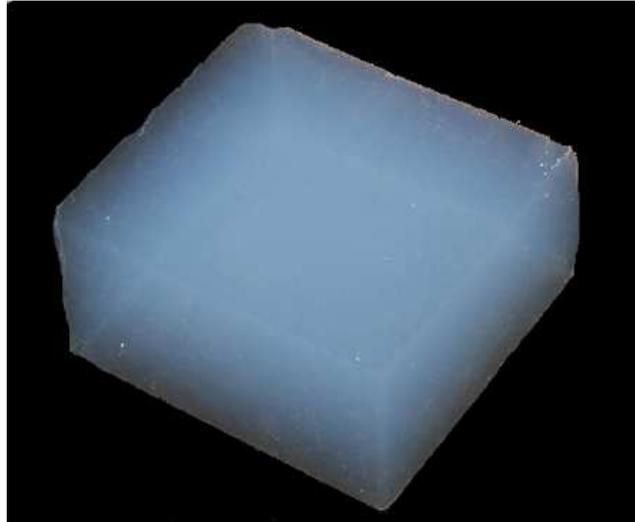


Figure I.2 : *L'aérogel*

- **Brique monomur en terre cuite**

C'est un matériau de maçonnerie en terre cuite qui se met en œuvre de manière classique, sa conductivité thermique varie entre $0.12 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $0.18 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, et peut descendre jusqu'à $0.07 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ avec le remplissage des alvéoles par un matériau isolant comme la laine de roche. Il offre également une faible inertie thermique et régule par sa structure microporeuse l'humidité de l'habitat.

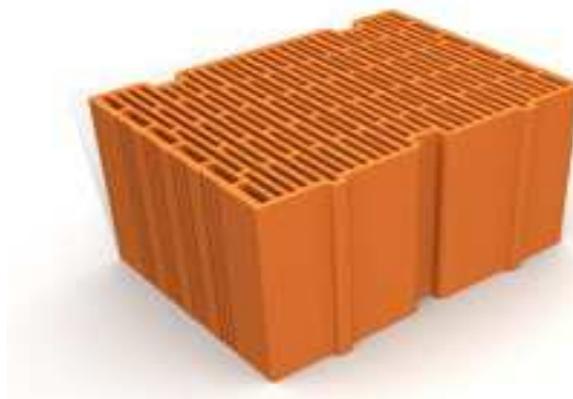


Figure I.3 : *Brique monomur en terre cuite*

- Blocs monomur en argile expansée

Il s'agit de blocs fabriqués à partir de billes d'argile expansée, cuites, calibrées, puis mélangées à du ciment. Par ailleurs, son coefficient de conductivité thermique est de $0.11 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. L'argile expansée en elle-même n'est pas un matériau très isolant, mais elle fait preuve de grandes capacités de résistance face au feu, à l'eau ainsi qu'à la compression. C'est la raison pour laquelle ce matériau est très utilisé dans la construction.



Figure I.4 : *Blocs monomur en argile expansée*

➤ Les isolants d'origine végétale

Les isolants d'origine végétale sont de plus en plus utilisés dans le domaine d'isolation grâce à leurs caractéristiques intéressantes et leurs disponibilités. Parmi les matériaux isolants disponibles et les plus répandues, on trouve: Les laines de bois, laine de coton, laine de lin, laine de coco, cellulose, la paille, le torchis, le liège expansé et le chanvre (laines et bétons de chanvre) [11]. Nous allons décrire quelques isolants, les plus répandus, dans cette partie.

- Liège expansé

Cette matière est réduite en granules puis expansée à la vapeur à haute température (300°C) en four autoclave, durant cette opération, les granules se dilatent et s'agglomèrent entre elles par l'effet de la résine qu'ils contiennent. L'aggloméré est ensuite découpé selon les épaisseurs souhaitées. Il se présente en granules, en panneaux, ou en éléments composites préfabriqués [11].

- Chanvre

A la fin des années 80, le chanvre devient un matériau de construction et d'isolation, en France. Un maçon Italien, M. Rasetti, eut l'idée de soumettre les particules issues de la partie centrale de la tige (la chènevotte) qui sont entourées par les fibres longues, a traitement d'imprégnation par les silicates. Il existe en granules de chènevotte, en granules et fibres longues, en fibre longues seules (laines de chanvre) [11].

- Cellulose

La laine de cellulose provient du papier recyclé, obtenu à partir de journaux non utilisés. Le papier est défibré et réduit en flocons, puis stabilisé par incorporation de divers agents de texture, variable selon les fabricants : gypse, sel de bore, sel de Sodium, de Calcium,..., etc. elle se présente en panneaux isolants texture ou en panneaux d'agencement. Elle est utilisée comme isolant depuis les années 30 aux Etats-Unis et en Scandinavie (région en Europe) [11, 15].

➤ Les isolants d'origine animale

- Laine de mouton

Depuis 1990, dans les pays germaniques, la laine de mouton a été conditionnée industriellement pour devenir un matériau homologué du bâtiment. Elle peut être utilisée comme isolant de remplissage à disposer manuellement [11, 15].

III.3.3. Matériaux combinés

- Laine de bois

Les panneaux de laine de bois sont élaborés à partir de fibre de bois, le liant étant la lignine de bois. Ce matériau naturel possède une conductivité thermique similaire aux autres laines isolantes, une structure rigide à assemblage rainuré garantissant une très grande longévité [9]. Ils sont utilisés comme isolant ou comme panneaux techniques complémentaires d'isolation [15].

III.4. Propriétés et performances d'un matériau isolant

La conductivité thermique n'est pas la seule propriété à prendre en compte dans le choix d'un isolant. En effet, les propriétés d'un matériau isolant sont subdivisées en trois groupes essentiels [12, 15]:

Propriétés physiques : Elles décrivent le comportement du matériau en termes de densité, de la résistance mécanique, de la capacité d'isolation thermique, de l'absorption acoustique, la résistance à l'humidité et au feu, stabilité dimensionnelle, etc.

Propriétés environnementales : Ce deuxième groupe comprend des propriétés comme l'énergie intrinsèque primaire, la quantité d'énergie totale qu'il a fallu prendre pour produire, transporter et à terme recycler le matériau, les émissions de gaz pour la production de la matière, l'utilisation d'additifs contre les effets biologiques, .etc.

Propriétés de l'hygiène et de la santé : Le troisième groupe s'intéresse à la santé publique durant la production, l'utilisation et l'étape finale de disposition des matériaux (par rapport aux besoins en oxygène, à l'élimination des odeurs, fumées et gaz nocifs divers). Chaque matériau peut avoir des conséquences sur la santé, à titre d'exemple le rejet de poussières ou particules (comme la laine de verre).

IV. Matériaux composites à base de fibres naturelles

Face aux inquiétudes environnementales mentionnées, dans la section II.1, le choix des matériaux adéquats est une bonne solution pour limiter leur impact sur l'environnement et assurer un milieu intérieur confortable. Pour cela, 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 [18].

Par ailleurs, l'utilisation des matériaux à base de produits végétaux a 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.
- Faible énergie grise: L'énergie grise est la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et enfin à la démolition du matériau ou à son élimination enfin de sa vie. A titre d'exemple, la figure I.5 compare l'énergie grise de différents matériaux de construction. On remarque que celle du béton de chanvre est plus faible que les autres.

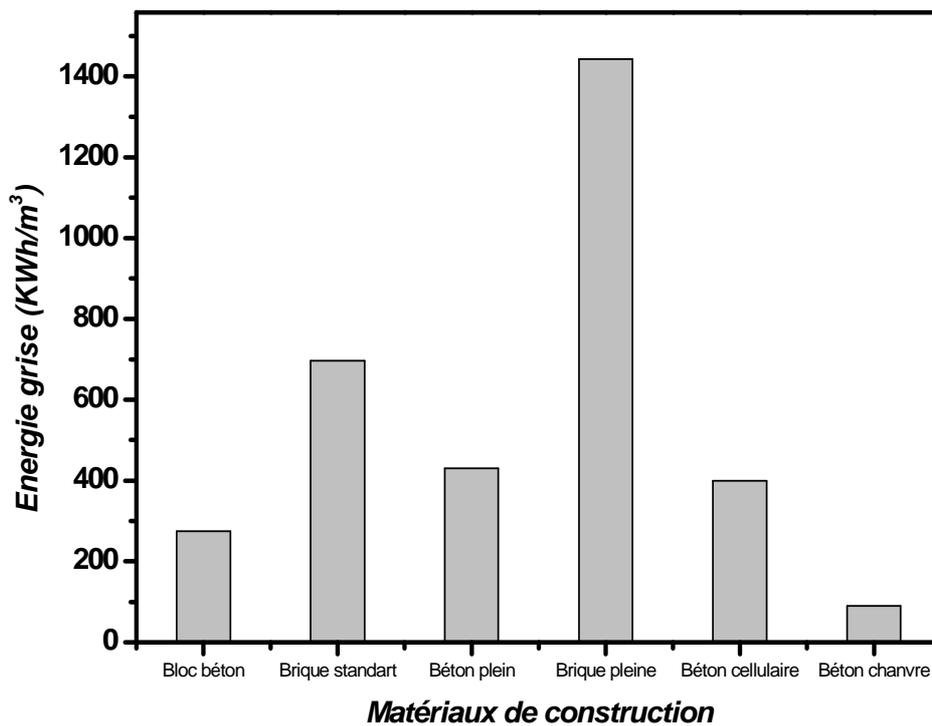


Figure I.5 : Energie grise des matériaux utilisés dans le bâtiment [18]

IV.1. Matériaux composites à base de matrice minérale et de fibres naturelles

Les matériaux composites à base de fibres naturelles sont classés, selon la matrice utilisée, en deux grandes classes : les composites à matrice polymérique et ceux à matrice minérale [19]. Nous nous intéressons dans ce qui suit aux matrices minérales comme le ciment, le plâtre, le mortier, etc. Dans les paragraphes suivantes nous essayons de présenter une synthèse non exhaustive des travaux réalisés sur les propriétés thermophysiques et mécaniques de matériaux composites: matrice minérale/fibres végétales.

IV.1.1. Synthèse sur les comportements thermophysiques et mécaniques des matériaux composites à base de matrice minérale et de fibres naturelles

Les matériaux composites à base de fibres naturelles et d'autres matériaux (matrices) ont déjà fait l'objet de nombreuses études permettant de caractériser ses propriétés mécaniques, thermiques, morphologique,...etc., afin de les intégrer et les utiliser dans les applications de bâtiment.

Driss Taoukil et al [20] ont examiné les potentialités d'isolation thermique de l'incorporation de la laine de bois dans un mortier de sable, afin de valoriser l'utilisation de ce type de matériaux allégés comme un béton léger isolant. Il a été montré d'après leur travail que l'incorporation de laine de bois dans le mortier diminue considérablement sa conductivité thermique et sa densité. En effet, l'augmentation de la teneur en laine de bois augmente la capacité d'isolation de mortier en diminuant la conductivité thermique et la densité du composite. Cependant, il conduit à la diminution de la résistance à la compression (Figure I.6, 7). Néanmoins, ils ont constaté que les valeurs de résistance à la compression sont compatibles avec l'utilisation de ces matériaux comme du béton léger.

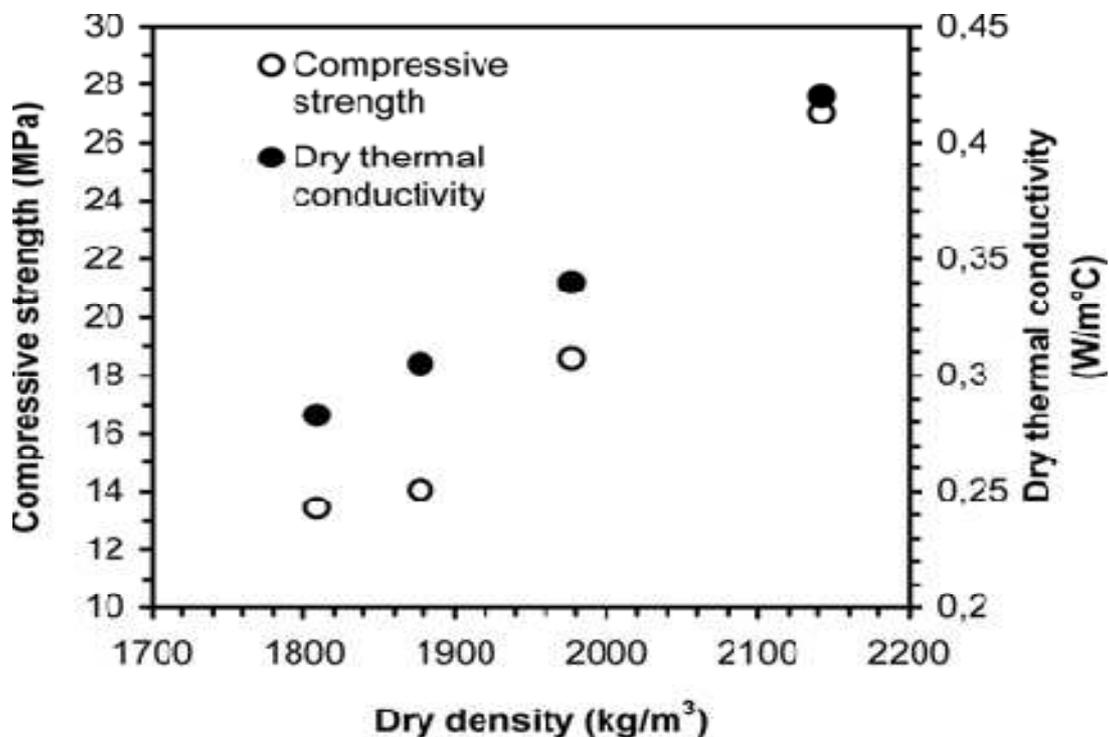


Figure I.6 : *Conductivité thermique et résistance à la compression en fonction de la masse volumique de composites [20]*

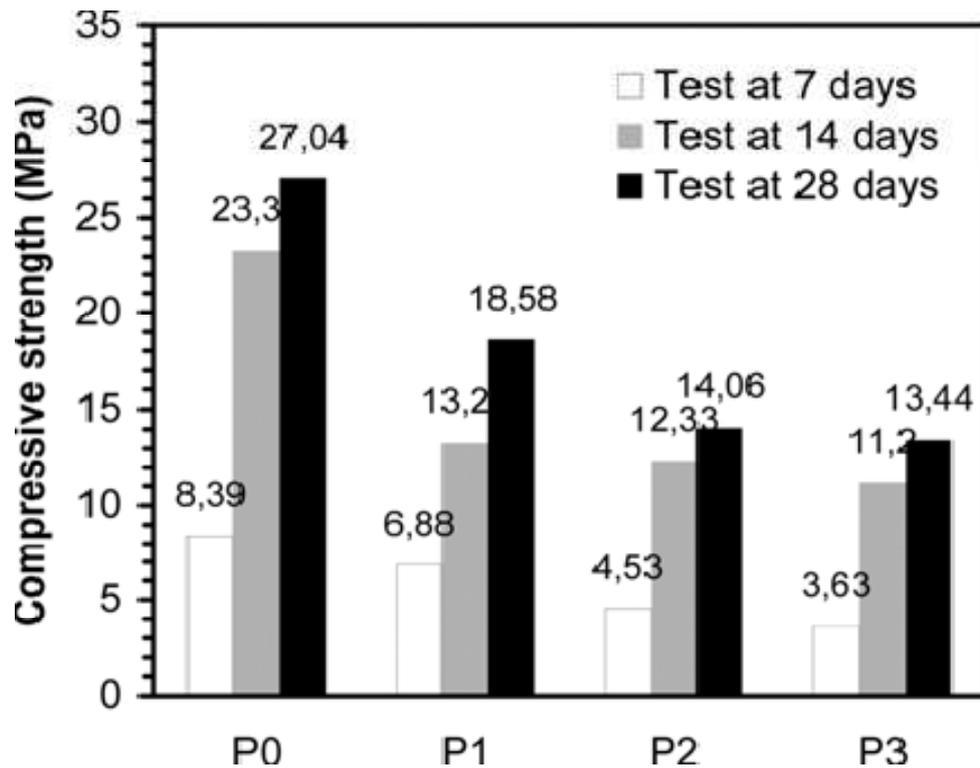


Figure I.7 : Résistance à la compression en fonction de la concentration de laine

de bois pour les composites P0, P1, P2, P3 correspondant aux concentrations de laine de bois de 0, 35,46,58%, respectivement [20].

Même comportement a été remarqué par A.Djoudi et al [21] qui ont étudié l'utilisation d'un nouveau matériau composite de construction de plâtre, sable, gravier concassé et les fibres de palmier dattier, et S. Mounir et al [22], qui ont essayé d'améliorer les propriétés thermiques de l'argile renforcée par le liège et ont constaté d'après leurs études que le composite est deux fois plus isolant que l'argile. Les résultats des auteurs de [21] montrent également une diminution de la conductivité thermique et la densité, ainsi qu'un changement et de comportement mécanique du matériau.

D'autre part, Driss Taoukil et al [20] ont remarqué que la conductivité thermique de mortier renforcé par la laine de bois a été fortement influencée par la teneur de l'eau du matériau. Elle augmente rapidement avec la teneur en eau, pour les différents composites: P0, P1, P2, P3, comme il est illustré dans la figure I.8.

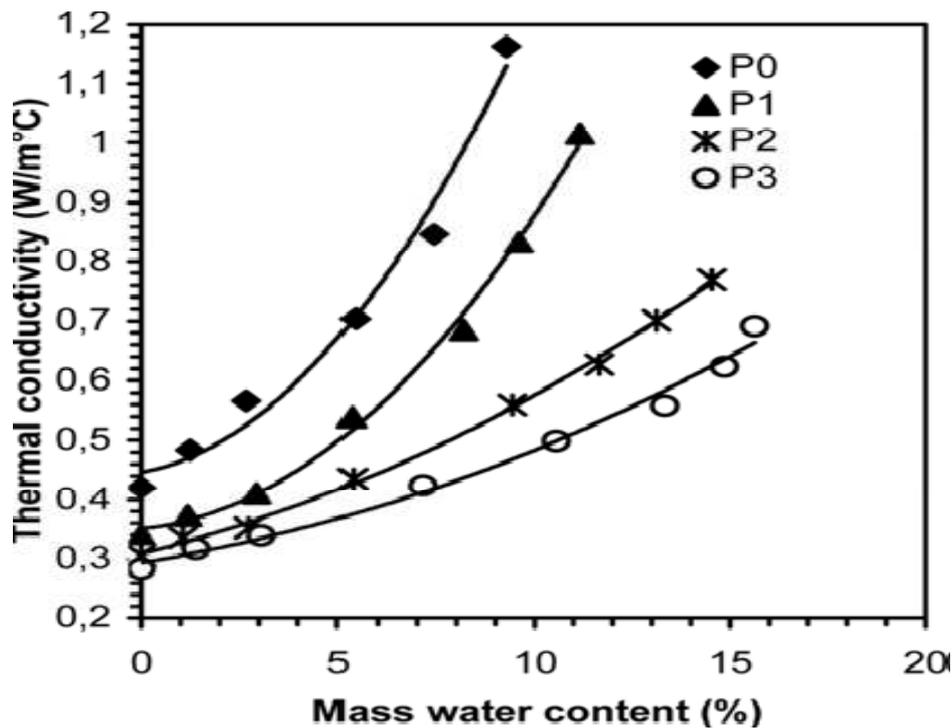


Figure I.8 : Conductivité thermique de composites en fonction de la teneur en eau pour les composites P0, P1, P2, P3 correspondant aux concentrations de laine de bois de 0, 35,46,58%, respectivement [20].

Une autre étude a été effectuée par F. Hernandez-Olivares et al [23], qui ont caractérisé expérimentalement les propriétés thermiques, mécaniques et acoustiques de composite à base de gypse et de liège. Leurs résultats montrent que le composite gypse-liège est un matériau non absorbant de bruit mais c'est un matériau réfléchissant. Ainsi, l'augmentation de la teneur en laine réduit la conductivité thermique et la résistance mécanique du mortier. Toutefois, les valeurs obtenues restent compatibles avec l'utilisation de ces matériaux comme isolants porteurs (RILEM, 1978). Les propriétés thermiques et mécaniques de leurs matériaux composites présentent de bons résultats. La conductivité thermique varie entre $0.1255 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $0.1915 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, tandis que, la résistance à la compression est comprise entre 4.67Mpa et 8.17Mpa. En effet, selon leurs études, ils ont proposé ce matériau pour l'utilisation dans les applications de bâtiment. Ils ont constaté également que le principal inconvénient de ces matériaux est leur absorption élevée d'eau. Cependant, plusieurs méthodes existant dans la littérature permettent de résoudre ce problème.

Bederina et al [24] ont étudié l'effet de l'ajout de copeaux de bois sur les propriétés thermiques de béton de sable. Leur objectif était de constituer un béton de sable structural léger, et d'améliorer ses propriétés thermiques tout en préservant ses performances mécaniques. Leurs résultats montrent que l'ajout de copeaux de bois réduit la densité du matériau dans une large gamme. En outre, la conductivité thermique a été améliorée. Même comportement a été remarqué par K. Al Rim et al [25] qui ont étudié l'effet de l'ajout de bois sur les propriétés thermiques et mécaniques de composite argile-ciment-bois. Il a été démontré que l'ajout de bois améliore ses caractéristiques d'isolation en diminuant la conductivité thermique, et réduit sa résistance mécanique (Figure I.9, 10).

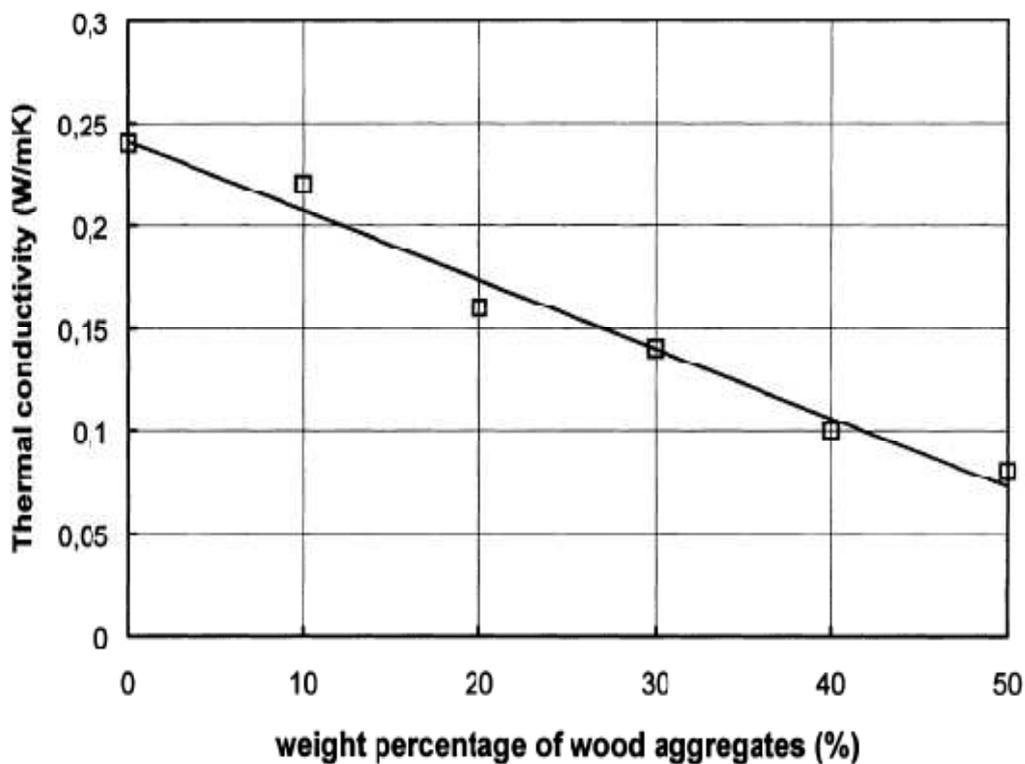


Figure I.9 : Conductivité thermique en fonction de la concentration de bois selon K. Al Rim et al [25]

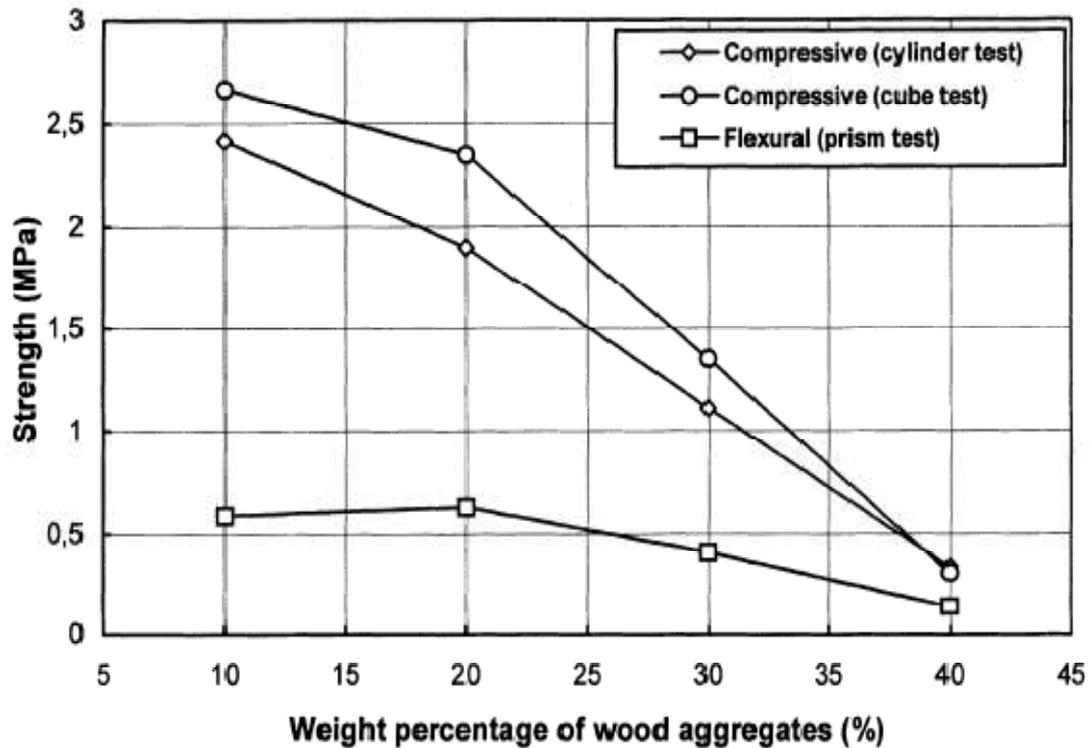


Figure I.10: Résistance mécaniques en fonction de la concentration de bois selon K. Al Rim et al [25]

B. Taallah et al.[26] déterminent les propriétés mécaniques et le comportement d'hygroscopicité de bloc de terre comprimée (CEB) chargé par des fibres de palmier dattier afin de valoriser les matériaux de construction locaux et de contribution à la réduction des coûts de logements. Une série de blocs a été fabriquée en utilisant un sol stabilisé avec du ciment, le sable broyé et les fibres, et compacté sous une charge statique en appliquant trois contraintes de compactage (1.50, 5 et 10 Mpa). Meilleur résultat de la résistance à la compression a été observé avec 0.05% de la teneur en fibres, 8% de teneur en ciment et la pression de compactage de 10 Mpa. D'autre part, en augmentant la teneur en ciment et en diminuant la teneur en fibres de palmier, il y a une diminution générale de l'absorption totale de l'eau de ces blocs.

F. Barreca et al [27] proposent et analysent une utilisation de la pierre d'olive afin d'améliorer les performances d'isolation thermique de mortier de ciment et de chaux et de réduire sa densité finale. Il a été observé que l'ajout de 70% du poids sec de la pierre d'olive a permis de réduire la conductivité thermique moyenne de mortier de ciment et de chaux par plus de 76%

et sa densité d'environ 30%. En effet, l'addition des pierres d'olive provoque une diminution de la conductivité thermique et de la densité mais aussi une augmentation de l'absorption d'eau. D'après leurs études, ils ont constaté que les caractéristiques thermophysiques améliorées résultant de l'addition des pierres d'olive au mortier de chaux et de ciment permettent l'utilisation de ces matériaux comme des composants de construction, comme des chapes isolants et légères pour sous sol, couches ou blocs isolants pour les murs.

Joseph Khedari et al [28] présentent une première investigation sur l'utilisation d'un nouveau matériau de construction léger, composé de ciment, de sable et de fibres de déchets de noix de coco et de durian. Ils ont étudié les propriétés thermique et mécanique de ce matériau. Leurs études expérimentales démontrent que l'ajout de ces fibres réduit la conductivité thermique et la résistance à la compression (Figure I.11, 12) des composites et leur composite satisfait à l'exigence de base des matériaux de construction, et ils peuvent être utilisés pour les murs et les toits.

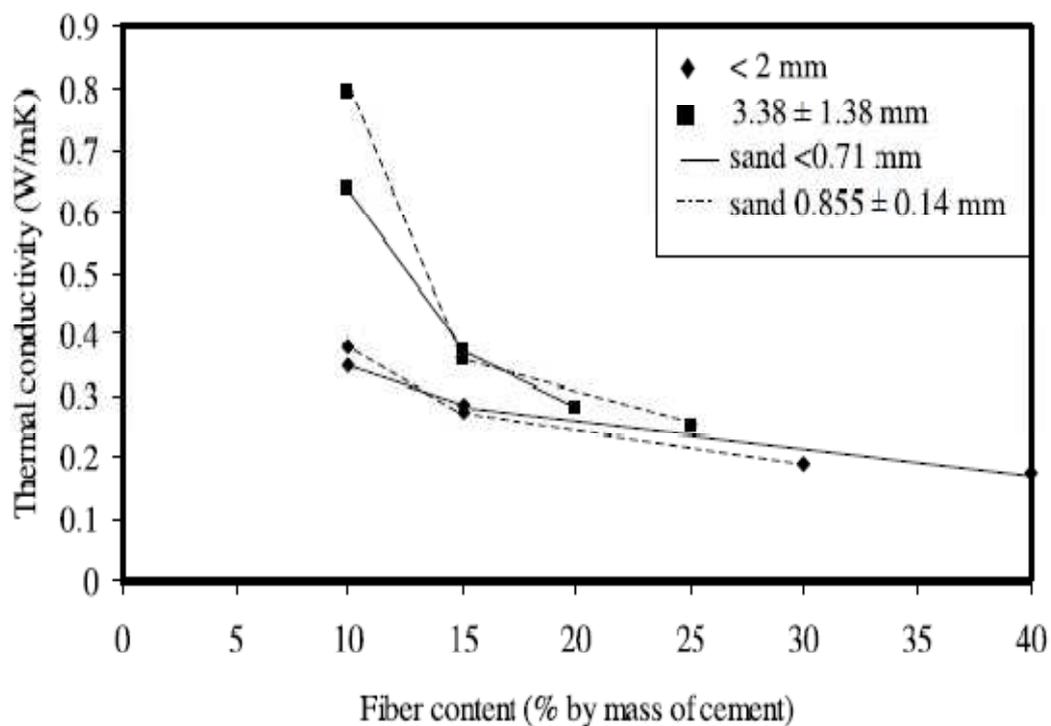


Figure I.11 : Conductivité thermique de composites en fonction de la teneur en fibres selon Joseph Khedari et al [28]

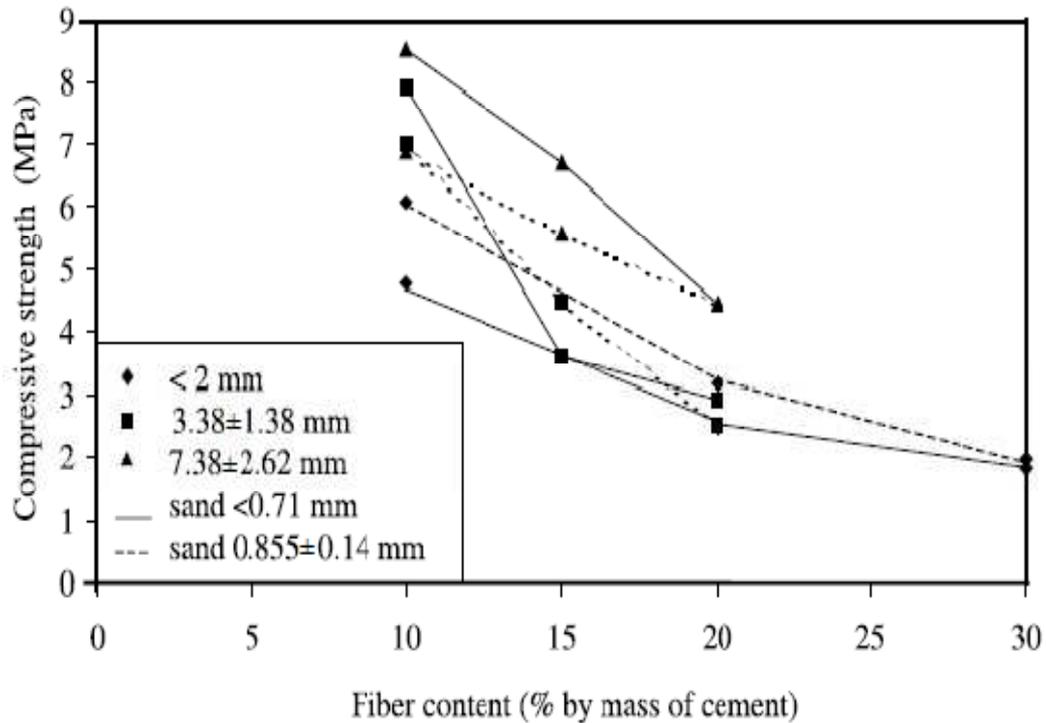


Figure I.12 : Résistance à la compression de composites en fonction de la teneur en fibres selon Joseph Khedari et al [28]

M. Chikhi et la [29] ont étudié un nouveau matériau composite à base de gypse et de fibres de palmier dattier (FPD), afin de l'utiliser pour l'isolation thermique dans le bâtiment. Ils ont étudié expérimentalement l'effet des fibres de palmier dattier sur la conductivité thermique, l'absorption de l'eau et les propriétés mécaniques des matériaux à base de gypse. Les résultats montrent que la conductivité thermique des composites diminue avec l'augmentation de la concentration de FPD. Les résistances de compression et de flexion des biocomposites peuvent être améliorées en ajoutant la teneur en fibres Adéquat. Ce nouveau genre de biocomposites montre les bonnes performances thermiques et mécaniques qui lui permettent d'être appliqué en tant que matériau d'isolation thermique.

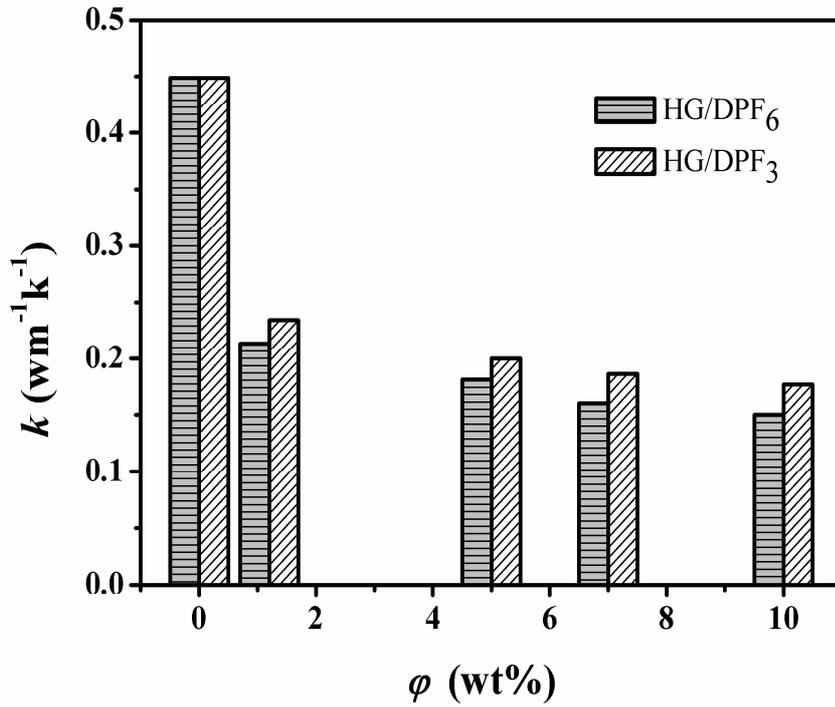


Figure I.13 : Conductivité thermique de composites gypse/fibres de palmier dattier en fonction de la teneur en fibres [29]

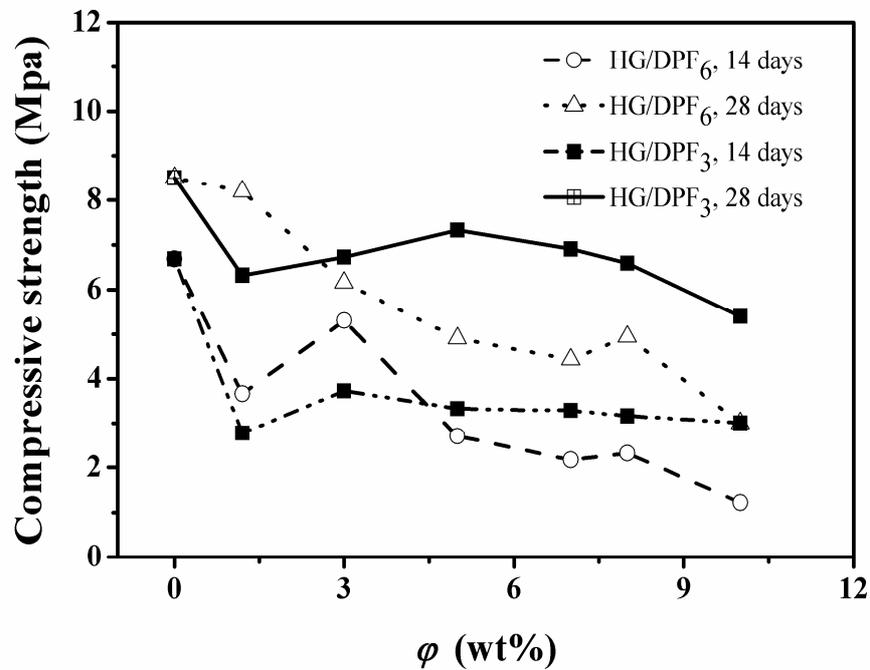


Figure I.14 : Résistance à la compression de composites gypse/fibres de palmier dattier en fonction de la teneur en fibres [29]

V. Matériaux composites mortier /bois de palmier dattier

V.1. Mortier

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient de liant (ciment ou plâtre ou chaux), de granulats fins dit charge (tel le sable, ce qui le distingue du béton) et de l'eau. En raison de sa granularité fine, il est plus léger que le béton [20, 30].

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. Ils sont utilisés en construction comme élément de liaison, de scellement, ou comme enduit. Ces matériaux, soumis à de fortes contraintes, résistent aux agressions chimiques, à l'humidité ainsi qu'aux fortes sollicitations mécaniques [30].

V.1.1. 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 [30].

V.1.1.1. Les liants

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

➤ 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 (issu du latin *Caementum*= « pierre naturelle ») est une poudre minérale définie selon la norme NF EN 197-1. C'est une matière inorganique finement broyée qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation. Après durcissement, il conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment est constitué d'un mélange de chaux, de silice, d'alumine, et d'oxyde ferrique issus de gisements naturels (calcaire et argile principalement). Après extraction, les composants sont mélangés dans des proportions proches de 80% en calcaire, et 20% en minéraux riche en silice et alumine pour obtenir le cru. Puis, le mélange est calciné à 1450 °C pour donner naissance au clinker. Enfin, le clinker est broyé, puis environ 5% de sulfate de calcium, sous forme de gypse ou d'anhydrite, sont additionnés pour obtenir un ciment Portland. Les ciments courants répondant à la norme NF EN 197-1 sont définis par leur composition (Tableau I.1).

Tableau I.1 : Composition des ciments courants (Extrait de la norme NF EN 197-1)

Dénomination	clinker	laitier	Pouzzolanes ou cendres	Calcaire silice ou schiste	Constituants ou secondaire ^a
CEMI	>95%				<5%
CEMII	65 à 94%	←	6 à 35%	→	<5%
CEMIII	5 à 64%	36 à 95%			<5%
CEMIV	45 à 89%		11 à 55%		<5%
CEMV	20 à 64%	18 à 50%	18 à 50%		<5%

^a : peuvent être du filler calcaire

- Propriétés mécaniques de ciment

Les propriétés mécaniques (résistance en compression, en traction, module d'Young, ...) évoluent continûment avec le durcissement du matériau. Par ailleurs, la croissance de ces caractéristiques est fortement accélérée par la chaleur. Le durcissement des pâtes de ciment s'accompagne d'un accroissement important des résistances mécaniques. Mais, il y a des paramètres principaux dont dépend la résistance de la pâte durcie comme la porosité et la composition du solide [31].

Le tableau I.2 montre des valeurs de propriétés mécaniques (l'énergie de rupture, module d'Young, rupture en traction, ténacité) de la pâte de ciment et du mortier à 28 jours.

Tableau I.2 : Comparaison entre les paramètres mécaniques de pâte de ciment, et de mortier

Matériau	E (GPa)	Ge (J/m ²)	Rt(Mpa)	K _{IC} (Mpa√m)
Pâte	21.6	9.3	5.5	0.45
Mortier	29.2	59.5	3.5	1.3

K_{IC} : La ténacité, la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure

V.1.1.2. Le sable

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. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide. Ils peuvent être [30]:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.

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

- 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.

V.1. 2. Différents types de mortiers

Dans les travaux publics différents types de mortier ont été utilisés:

V.1.2.1. Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

V.1.2.2. Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments. Trois catégories se distinguent de par leur utilisation dans la construction : la chaux vive (produit direct de la pyrolyse du calcaire), la chaux aérienne (ou éteinte, 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 trouvent leur application essentiellement dans le bâtiment, où leurs qualités sont appréciées pour les enduits.

V.1.2.3. Les mortiers bâtards

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais parfois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

V.2. Bois de palmier dattier

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est l'un des palmiers les plus cultivés par l'homme. Il résiste 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 [32]. Le palmier dattier peut atteindre un âge de plus de 100 ans. Chaque année dans des conditions de croissance normales une moyenne de 12-15 nouvelles feuilles (palmes) est formée par le palmier et par conséquent la même quantité peut s'attendre à couper dans le cadre du maintien de palmier. En effet, du point de vue économique et environnemental, l'utilisation de fibres de bois de palmier dattier est un projet prometteur. L'utilisation de fibres de bois de palmier dattier, comme renfort pour les composites, a été l'objet de plusieurs recherches [33].

V.2.1. Caractéristiques thermophysiques et mécaniques des fibres de bois de palmier dattier

Dans cette partie nous avons essayé de faire une synthèse sur les propriétés thermophysiques, diélectriques, mécaniques, et ainsi que la morphologie de certaines parties de palmier dattier trouvées dans la littérature.

V.2.1.1. Structure et morphologie

D'après les études de Agoudjil et al.[33], la figure I.15 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).

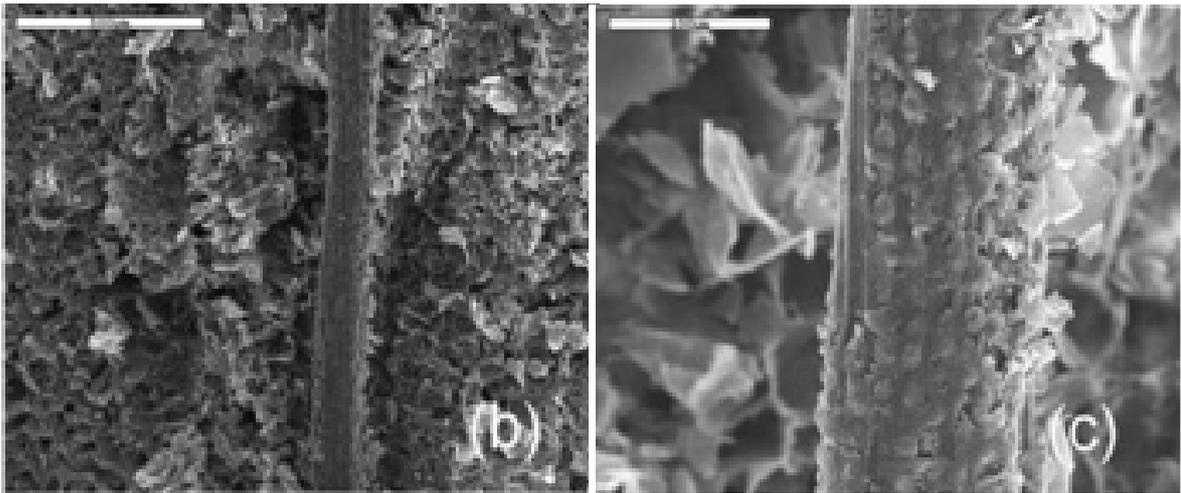


Figure I.15: Des images MEB d'échantillon de DN pétiole dans une direction transversale des fibres [33].

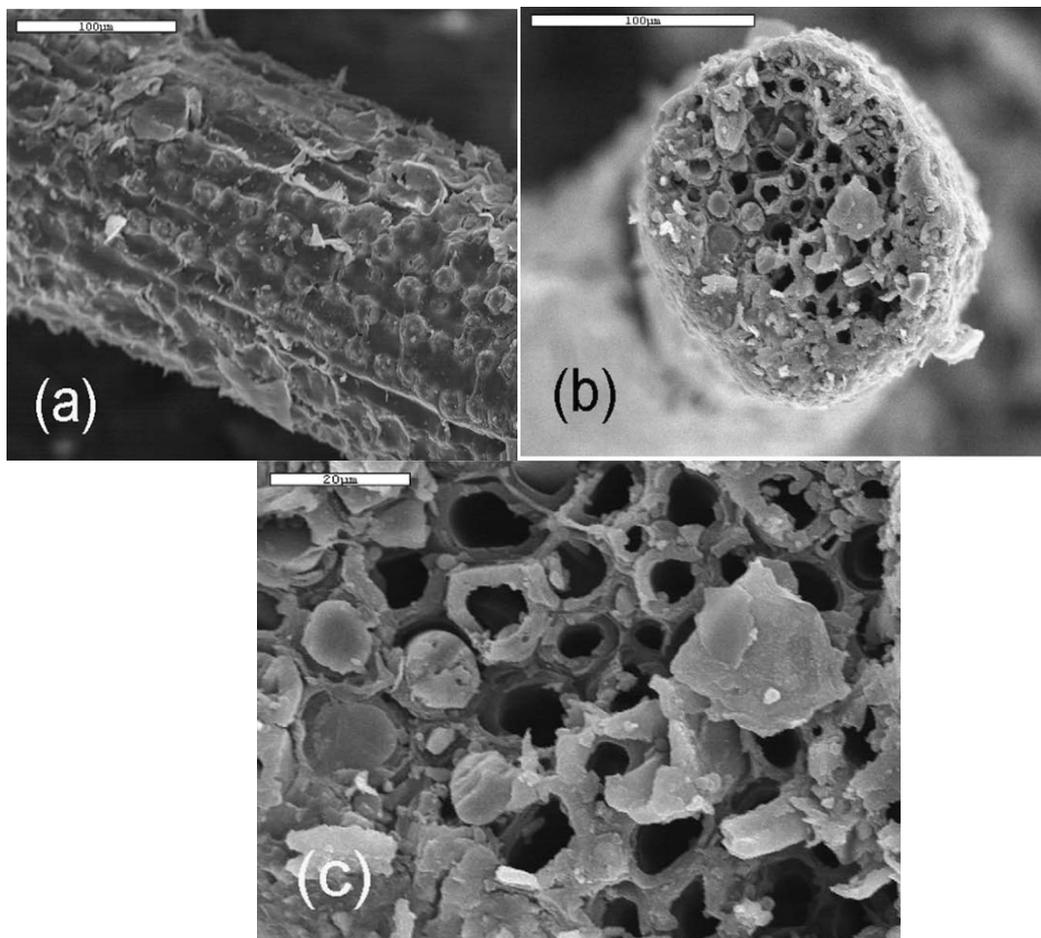


Figure I.16 : Des images MEB pour une seule fibre de pétiole : (a) une coupe longitudinale, (b) une coupe transversale.

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.16).

Une coupe transversale d'une fibre de pétiole (Figure I.16 b et c) révèle 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).

V.2.1.2. Propriétés thermophysiques

Le tableau I.3 montre les propriétés thermophysiques et diélectriques de diverses variétés de palmier dattier [33].

Selon le tableau I.3, 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 $0.085 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. La grappe est le moins isolant.

Tableau I.3: Propriétés thermophysiques et diélectriques du palmier dattier (Pétioles et grappes) [33].

Variétés	Direction de fibres	k ($\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	a ($\times 10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	ϵ_r
DNP	⊥	0.083 ± 0.003	2.29 ± 0.20	8.09 ± 0.26
MDP	⊥	0.073 ± 0.0033	3.13 ± 0.49	24.70 ± 1.61
EGP	⊥	0.072 ± 0.002	2.76 ± 0.24	2.58 ± 0.08
DNG	⊥	0.085 ± 0.004	1.91 ± 0.21	5.81 ± 0.08
MDG	⊥	0.084 ± 0.005	2.07 ± 0.30	5.70 ± 0.1
EGG	⊥	0.074 ± 0.004	2.29 ± 0.30	5.13 ± 0.09

Une comparaison entre les propriétés de l'échantillon le moins isolant (grappe) et les propriétés de quelques isolants naturels a été présentée dans la figure I.17.

La figure I.17 montre que le bois de palmier dattier possède une conductivité thermique proche de celle du sisal, mais cette valeur est supérieure à celle d'autres isolants (comme le liège). D'autre part, elle est inférieure à la conductivité thermique de chanvre et de banane.

La masse volumique de la grappe est inférieure à celle de banane et de sisal mais elle n'est pas loin de la masse volumique d'autres isolants tels que le liège et le chanvre.

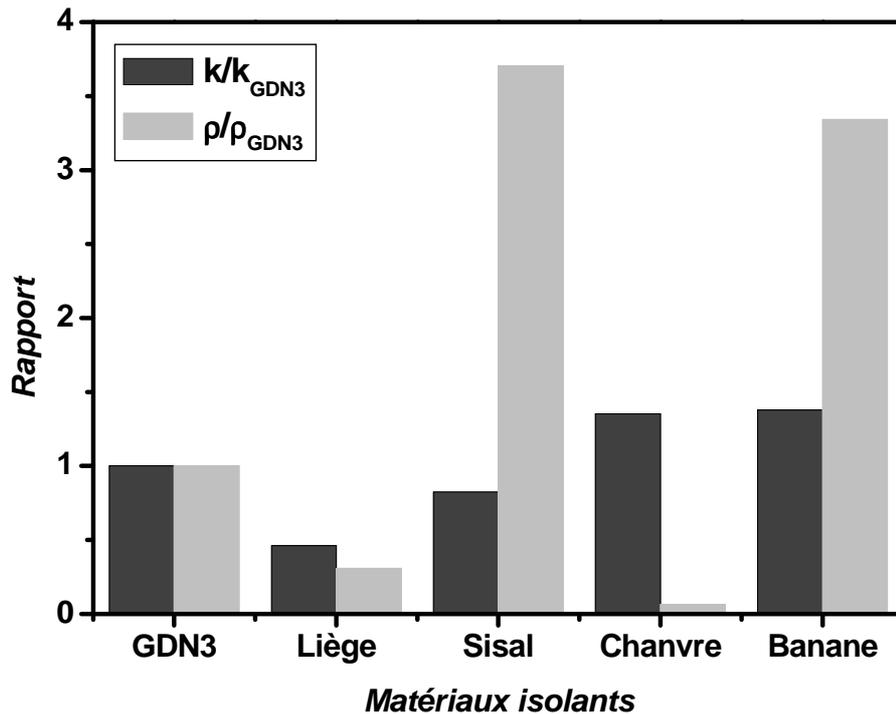


Figure. I.17 : Comparaison entre la conductivité thermique et la masse volumique de plusieurs matériaux isolants: les propriétés de sisal, chanvre, liège et de banane sont tirées de la littérature [34, 35].

Selon cette comparaison (la figure I.17), on peut constater que la grappe a de bonnes propriétés d'isolation thermique (conductivité thermique faible, légèreté).

V.2.1.3. Propriétés mécaniques

Les auteurs de [36] ont déterminé les propriétés mécaniques de quatre types de fibres de surface de palmier dattier. Les résultats sont présentés dans le tableau I.4. D'après ce tableau, les fibres de Dokhar sont les plus résistantes. En outre, l'humidité augmente légèrement la résistance et l'allongement à la rupture des fibres. Par contre à l'état sec, les fibres ont un module d'élasticité supérieur à celui de l'état humide.

Tableau I.4 : Propriétés mécaniques de quatre types de fibres de surface de palmier dattier[36]

Variété	Sec			Humide		
	Rt	A (%)	E(GPa)	Rt	A(%)	E(GPa)
Dokar	290±20	11±2	5.2±3	300±20	12±2	3.55±2
Elghers	88.75±20	11.1±2.5	3.5±1.2	90.10±18	12±3	3.10±1.5
DegletNour	72.34±18	8.7±2.2	3.15±1.5	74.34±1.5	9.5±2.5	2.3±2
DeglaBida	71.15±16	7.5±2.3	2.5±1	73.19±13	8.5±2.7	2.10±1

Rt : Résistance à la traction

A : Allongement à la rupture

E : Module d'élasticité

V.2.1.4. Propriétés physiques

Le tableau I.5 présente les propriétés physiques principales des fibres de surface de palmier dattier (FSPD), pour plusieurs variétés (Dokar, Elgars, D-Nour et D-Bida).

Tableau I.5 : Propriétés physiques de Fibres de palmier dattier [32]

Propriétés	Max-Min
Diamètre (mm)	0.1-1
Masse volumique absolue (kg/m ³)	1300-1450
Masse volumique apparente (kg/m ³)	512.21-1088.8
Teneur en eau naturelle	9.50-10

V.2.1.5. Composition chimique

Le tableau I.6 montre les principaux constituants organiques des fibres de Dokar (FD) et d'autres fibres naturelles (noix de coco, sisal).

Tableau I.6: *Constituants organiques des fibres de Dokar, et d'autres fibres naturelles*[32]

Matière	Cendre (%)	Cellulose (%)	Hémicellulose(%)	Lignine(%)
FD	1.2	43	8	35
Noix de coco	1.44	32-43	0.15-0.25	40-45
sisal	1.13	66-72	12	10-14

D'après le tableau I.6, les fibres de bois de palmier dattier présentent des taux en cellulose et hémicellulose relativement faibles par rapport à celui des fibres de sisal. Par contre, les taux de cellulose et de la lignine se rapprochent de celui des fibres de Noix de coco. Il faut noter que la cellulose est l'élément essentiel du point de vue résistance.

Le tableau I.7 montre l'analyse des matières minérales de fibres de Dokar faite par Kriker Abdelouahed [32]. Selon son analyse, le pourcentage de chlore (Cl) est de 8630 ppm, le pourcentage de soufre (S) est de 2.13 et le reste de la composition est illustrés sur le tableau I.7.

Tableau I.7 : *Analyse minéralogique de la poudre de fibre de Dokar* [32]

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
%	48.04	6.12	2.51	0.05	4.88	14.21	1.81	2.8	0.42	0.45	18.08

VI. Conclusion

Ce chapitre est dédié à l'étude bibliographique sur l'isolation thermique et les matériaux composites à base des fibres naturelles. Le choix des matériaux naturels pour l'isolation thermique est justifié par plusieurs critères physiques, environnementaux,...etc. Par ailleurs, l'étude bibliographique présentée dans ce chapitre montre que les caractéristiques thermophysiques et mécaniques intrinsèques des constituants du composite étudié dans ce travail, représentent des propriétés adéquates pour application comme isolant thermique.

De ce fait, le chapitre suivant est consacré à la présentation des différents dispositifs et méthodes de caractérisation des propriétés thermophysiques et mécaniques de composites à base de mortier et de bois de palmier dattier.

Références

- [1] I. Ceyte, "État, acteurs privés et innovation dans le domaine des matériaux de construction écologiques : Le développement du béton de chanvre depuis 1986," Thèse de Master, Institut d'Études Politiques de Lyon, 2007, pp. 191.
- [2] C. Magniont, "Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources," Thèse de doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010, pp. 343.
- [3] M.A. BoukliHacène, N. E. C. Sari, and B. Benyoucef, "La construction écologique en Algérie: Question de choix ou de Moyens?," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 14, pp. 627 - 635, 2011.
- [4] T. T. Nguen, "Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre," Thèse de doctorat, Université de Bretagne-Sud, 2010, pp. 168.
- [5] C. Terrible, V. Vincent, and F. Florio, "Déchets du bâtiment et des travaux publics,," *dans le Revue : Technique de l'ingénieur*, c5600, Août 2006.
- [6] "L'efficacité énergétique dans le bâtiment," *Portail Algérien des énergies renouvelables (articles 3746)*, 2014.
- [7] M. Dahli and R. Toubal, "Matériau isolant thermique à base de déchets ménagers et oléicoles,," *Revue des Energies renouvelables*, vol. 13, pp. 339-346, 2010.
- [8] "Isolation thermique des bâtiments," *Portail Algérien des Energies Renouvelable*, 2012. <http://portail.cder.dz./spip.php?article2854>.
- [9] P. Meukam, "Valorisation des des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments," Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004, pp. 157.
- [10] Dr. Mohammad S. Al-Homoud, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Building and Environment*, vol. 40, pp. 353-366, 2005.
- [11] J.-P. Oliva, *L'isolation écologique: conception, matériaux, mise en oeuvre: terre vivante*, mens, france,2001,2007.

- [12] A. M. Papadopoulos, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments," *Energy and Building*, vol. 37, pp. 77-86, 2005.
- [13] MM.fragos and Trouilleux, *Le guide de l'isolation: Fine Media*, Paris, 2012. contacte@finemedia.fr.
- [14] L.F. Cabeza, A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, and I. Fernandez, "Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 630–636, 2010.
- [15] 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.
- [16] P. Mukhopadhyaya, "Isolation thermique haute performance : toujours plus," *Institut de recherche en construction du CNRC*, pp. 1-6, juillet , 2010.
- [17] "Guide des matériaux isolants," *Espace info: Energie C.A.U.E. de la Haute-Loire*, 16 rue Jean Solvain, 43000 Le Puy En Velay. www.eie43.fr.
- [18] 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.
- [19] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite.," Thèse de Doctorat, Université De Limoges, 2007, pp. 137.
- [20] D. Taoukil, A. E. bouardi, T. Ajzoul, and H. Ezbakhe, "Effect of the Incorporation of Wood Wool on Thermo Physical Proprieties of Sand Mortars, KSCE," *Journal of Civil Engineering*, vol. 16, pp. 1003-1010, 2012.
- [21] A. Djoudi, M.M. Khenfer, A. Bali, E.H. Kadri, and G. Debicki, "Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete," *International Journal of Physical Sciences*, vol. 7, pp. 2845-2853, 2012.
- [22] S. Mounir, Y. Maaloufa, A. b. Cherki, and A. Khabbazi, "Thermal properties of the composite material clay/granular cork," *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 183-190, 2014.

- [23] F. Hernandez-Olivares, M. R. Bollati, M. d. Rio, and B. Parga-Landa, "Development of cork gypsum composites for building applications," *Construction and Building Materials*, vol. 13, pp. 179-186, 1999.
- [24] M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M.M. Khenfer, A. Bali, and M. Quéneudec, "Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling,," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 662-668, 2007.
- [25] K. Al Rim, A. Ledhem, O. Douzane, R.M. Dheilily, and M. Queneudec, "Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites," *Cement & Concrete Composites*, vol. 21, pp. 269-276, 1999.
- [26] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, and A. Kriker, "Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 59, pp. 161-168, 2014.
- [27] F. Barreca and C. R. Fichera, "Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation," *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 507-513, 2013.
- [28] J. khedari, B. suttisonk, N. pratinthong, and J. Hirunlabh, "New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity," *Cement and Concrete composites*, vol. 23, pp. 65-70, 2001.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] T. Mahmoud, "Etude de matériaux minéraux renforcés par des fibres organiques en vue de leur utilisation dans le renforcement et la réparation des ouvrages tels que les ponts,," Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 2005, pp. 177.
- [32] K. Abdelouahed, "Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec," Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2005, pp. 154.

- [33] 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.
- [34] T. Behzad and M. Sain, "Measurement and prediction of thermal conductivity for Hemp fiber reinforced composites," *Polymer Engineering and Science*, vol. 47, pp. 977-983, 2007.
- [35] G. Kalaprasad, P. Pradeep, G. Mathew, C. Pavithran, and S. Thomas, "Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low density polyethylene composites reinforced with sisal and glass intimately mixed sisal/glass fibres," *Composite Science and Technology*, vol. 60, pp. 2967-2977, 2000.
- [36] A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M.M. Khenfer, and M. Chabannet, "Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate,," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, pp. 554-564, 2005.

**Chapitre II : Etude
expérimentale des
composites Mortier/Bois de
palmier dattier**

I. Introduction

Ce chapitre s'articule sur deux parties. Dans la première partie, nous nous intéressons aux différents matériaux utilisés pour élaborer les composites à base du mortier et de bois de palmier dattier. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de la méthode de mise en œuvre de ces composites en fonction de la taille des charges et leurs concentrations, des dispositifs de mesures, et des méthodes de caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques des composites étudiés.

II. Matériaux utilisés

II.1. Sable

Le sable utilisé est de type artificiel concassé gris de taille comprise entre 0.01mm et 5 mm, le rôle du sable est de stabiliser la pâte de ciment pour éviter les fissures de composite.

II.2. Ciment

II.2.1. Ciment portland

Le ciment utilisé pour élaborer les composites est un ciment portland composé CPJ-CEMII/A32.5 de provenance de la cimenterie d'Ain Touta en Algérie.

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre très fine, composée d'oxydes minéraux dont les deux principaux sont la chaux (CaO) et la silice (SiO₂). Il réagit avec l'eau en donnant des hydrates stables qui lui donnent une résistance mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation d'une pâte durcissent progressivement à l'air ou dans l'eau [1].

➤ Composition chimique de ciment

L'analyse chimique du ciment CPJ-CEM II/A 32.5 a été fournie par la cimenterie Aîn Touta et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.1.

Tableau II.1: Composition chimique de ciment Portland d'Ain Touta en % massique [2].

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mg O	K ₂ O	Na ₂ O
(%)	60.18	21.90	5.73	3.13	1.85	0.83	0.19

➤ Propriétés physiques et mécaniques de ciment utilisé

Les principales propriétés physiques de ciment CPJ-CEM II/A 32.5 sont résumés dans le tableau II.2 :

Tableau. II.2: Propriétés physique et mécaniques de ciment portland composé [2].

Propriétés	Masse volumique (kg/m ³)	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	Début de prise (min)	R _c ^a Minimale à 28 jours (Mpa)	R _c ^a Moyenne à 28 jours (Mpa)
CPJ-CEM II/A	3034	3859	175	32.5	43

^a: Résistance à la compression

II.2.2. Ciment prompt (VICAT)

Le ciment prompt est utilisé pour le surfacage des composites. Le ciment prompt (VICAT) est conforme aux normes NF P 15–314 et NF P 15–317 (Agréé Prise Mer). Il présente plusieurs avantages, à savoir: prise rapide, résistances initiales élevées (6 Mpa à 1heure), résistance à la corrosion (eau de mer, eaux séléniteuses, eaux pures et acides), et un retrait limité. Les caractéristiques techniques de ciment prompt sont présentées dans le tableau II.3:

Tableau. II.3 : Caractéristiques techniques de ciment prompt (VICAT) [3].

Aspect	Couleur	Surface spécifique Blaine ^a	Temps de prise (à 20°C)
Poudre	Gris beige	5000	Environ 2 minutes

^a : Sa mesure permet de déterminer la finesse du ciment ; elle est exprimée en cm²/g.

II.3. Adjuvant

L'adjuvant utilisé dans ce travail est le **MEDAFLOW 30**, il est conçu à base de poly carboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Il permet d'améliorer considérablement la fluidité de composites, d'éviter la ségrégation, les pores et le risque de fissuration, de faciliter la mise en œuvre et ainsi d'augmenter la durabilité.

Les caractéristiques de l'adjuvant de MEDAFLOW30 sont présentées dans le tableau II.4 :

Tableau. II.4: Caractéristiques de MEDAFLOW 30 [4].

Aspect	Couleur	Ph	Densité	Chlore	Extrait sec
liquide	brun clair	6-6,5	1.07±0,01	< 0.1g/l	30%

II.4. Eau de gâchage

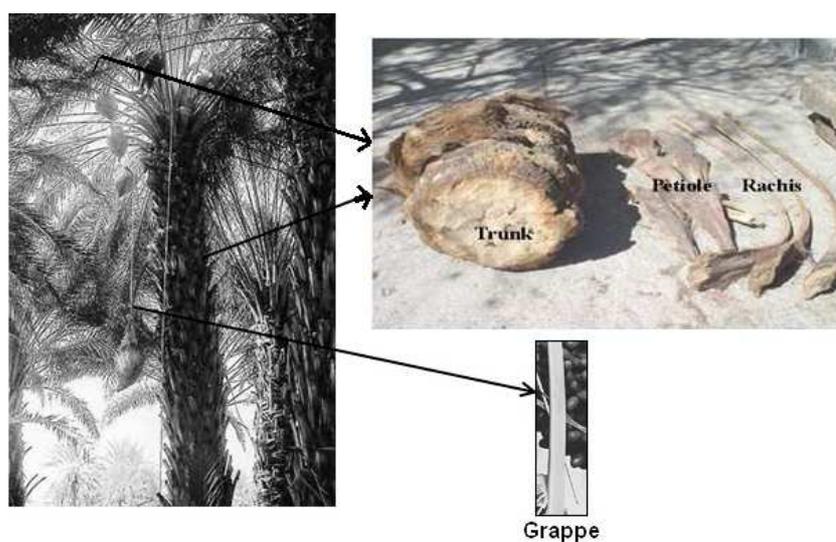
Suivant les lieux de préparation du mortier, l'eau utilisée est une eau potable de robinet de la ville de Batna. La composition chimique (en mg/l) de l'eau utilisée est présentée dans le tableau II.5:

Tableau. II.5: Composition chimique de l'eau de gâchage [2].

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	CL ⁻	NO ₃	SO ₄	HCO ⁻³	pH	salinité
242	125	31	536	755	14.5	755	124	7.75	2799

II.5. Bois de palmier dattier

Le bois de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) récolté des oasis de Laghrou (Biskra-Algérie) a été utilisé comme un renfort dans cette étude. Les parties utilisées sont le pétiole, la grappe et le rachis, présentés dans la figure II.1.

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

Selon les études expérimentales effectuées sur le bois de palmier dattier par Agoudjil et al [5], il a été constaté que les parties renouvelables de l'arbre de palmier dattier (le pétiole, le rachis, la grappe) possèdent une conductivité thermique plus faible que le tronc du palmier. Par conséquent, notre travail est porté sur l'utilisation des parties renouvelables de palmier dattier (les fibres de pétiole, de rachis et de la grappe) pour élaboration des composites à base de mortier et de ces fibres.

Le bois de palmier dattier a été séché dans des conditions naturelles, puis soumis à un broyage mécanique à l'aide d'un broyeur (voir la figure II.2) afin d'obtenir des petites dimensions. Il a subi deux niveaux de broyage ; le concassage qui permet d'obtenir des particules de taille inférieure au centimètre et le broyage grossier pour obtenir des particules de l'ordre du millimètre.



Figure. II.2: Procédé du broyage du bois de palmier dattier

➤ **Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique permet de déterminer les différents diamètres de grains qui constituent les échantillons. De ce fait, l'analyse consiste à séparer et à classer les grains de bois selon leur diamètre à l'aide de la série de tamis suivante en (mm): 2.5 , 3.15 , 4.5 , 6.3 , 8 , 10 , 12.5 , 16 , 20 , 25 , 31.5. On définit:

- **Refus:** la quantité de matériau retenue par le tamis
- **Tamisât:** la quantité de matériau passée à travers le tamis.

Le principe de l'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibration de la tamiseuse (Figure. II.3). Les pourcentages ainsi obtenus seront exploités sous forme graphique (Figure. II.4).



Figure. II.3: *Appareil de tamisage (Retsch).*

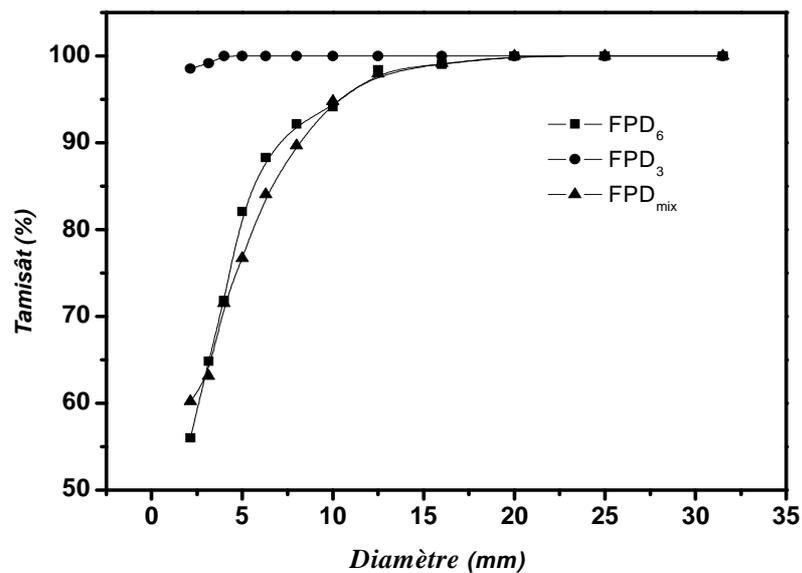
Le poids des tamisât successifs permet de déterminer les pourcentages du tamisât (Tableau. II.6) correspondant à chacun des tamis utilisés.

Tableau II.6: Résultats des tamisât cumulés de trois échantillons de bois.

Tamis (mm)	Tamisât cumulés (%) ^a		
	Echantillons		
	Grosses	Fines	mélange
31.5	100	100	100
25	100	100	100
20	100	100	100
16	99.05	100	99.15
12.5	98.42	100	97.95
10	94.17	100	94.79
8	92.14	100	89.68
6.3	88.29	100	84.02
5	82.09	100	76.69
4	71.84	100	71.52
3.15	64.83	99.16	63.11
2.15	56.02	98.55	60.22

^a : Le pourcentage massique du matériau passant à travers un tamis.

La figure II. 4, présente la distribution de la granulométrie de ces trois tailles :

**Figure II.4:** Distribution de la taille de différentes fibres de bois de palmier dattier

D'après cette figure, on distingue trois diamètres différents du bois de palmier dattier, les fibres fines, avec un diamètre moyen de 3 mm (FPD_3), les fibres grosses, avec un diamètre moyen de 6mm (FPD_6) et le mélange de deux types de fibres (50% de fibres fines+50% de fibres grosses), noté FPD_{mix}

En effet, trois tailles différentes de bois de palmier dattier ont été utilisées dans cette étude, FPD_3 , FPD_6 et le mélange FPD_{mix} , présentés dans la figure II. 5.



Figure. II.5: *Fibres de bois de palmier dattier FPD_3 , FPD_6 , FPD_{mix}*

III. Essais et mesures

III. 1. Absorption du bois de palmier dattier

Le but de cette partie consiste à déterminer la capacité d'absorption des fibres utilisées dans ce travail, ainsi que la cinétique d'absorption. Pour cela, des mesures ont été réalisées sur deux échantillons FPD_3 , FPD_6 entièrement sec. Ils ont été séchés au préalable dans une balance d'analyse d'humidité (voir la figure II.6) à $T= 70^{\circ}C$ jusqu'au poids constant.



Figure. II.6: Analyseur d'humidité OHAUS MB200.

Le choix de cette température est lié au séchage conventionnel (température entre 50 °C et 100° C).



Figure. II.7: Dispositif de saturation des fibres de bois de palmier dattier FPD₃, FPD₆

Dans le procédé de saturation, l'eau est absorbée sous l'effet de capillarité pendant différentes durées. Les échantillons (FPD₃, FPD₆) sont posés sur le dispositif qui se compose d'un papier filtré superposé sur un tamis de 0.05mm d'ouverture, ces derniers sont juste articulés au-dessus d'une surface libre de l'eau dans un récipient. Pour l'échantillon (FPD₃), on ajoute une

assiette perméable pour le peser directement et éviter la perte des particules fines (voir la figure II.7).

Le suivi de la masse est effectué par pesée à chaque instant à l'aide de l'analyseur d'humidité jusqu'à la saturation. L'eau absorbée représente le poids d'eau qu'un échantillon peut absorber jusqu'à sa saturation. Donc l'absorption est définie comme une quantité d'eau absorbée à l'instant (t) par rapport à la masse sèche de l'échantillon [6].

$$\text{Taux d'absorption}(\%) = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

D'où - t- instant où s'effectue la pesée (minutes ou heures)

$m(t)$: La masse de l'échantillon après l'absorption (en gramme), à l'instant t.

m_s : La masse sèche en gramme

III.2. Cinétique de séchage du bois de palmier dattier

L'objectif du procédé de séchage est de diminuer le plus rapidement possible la teneur en eau existante dans le bois. Le séchage a été réalisé à l'aide d'une balance d'analyse d'humidité (Figure. II.6) à une Température $T = 70^\circ\text{C}$.

Le principe de fonctionnement de cet appareil est basé sur deux procédés:

- Le séchage d'un échantillon jusqu'au poids constant à l'aide de l'énergie infrarouge (irradiateurs halogène).
- Mesurer le changement du poids de l'échantillon (selon le temps réglé) à l'aide d'une balance intégrée de précision (0.001gramme) durant tout le procédé de séchage.

Après un procédé de séchage, l'analyseur d'humidité peut déterminer la substance sèche qui reste de la substance totale préalablement pesée (solide) et calcule l'humidité (perte de poids).

La cinétique de séchage est étudiée à travers deux courbes, représentant :

- la teneur en eau massique $H(\%)$ en fonction du temps
- le pourcentage de pertes massiques en fonction du temps

La teneur en eau massique (taux d'humidité) du bois est égale à la masse d'eau comprise dans ce bois pendant le séchage par rapport à la masse anhydre (la masse sèche):

$$H(\%) = \frac{m^*(t) - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{II.2})$$

m_s : La masse anhydre de l'échantillon (ou $H(\%)=0$).

$m^*(t)$: La masse de l'échantillon après le séchage, à l'instant t.

Ainsi que, le pourcentage massique de perte d'eau est calculé par la formule:

$$\% \text{ perte} = \frac{m_0 - m^*(t)}{m_0} \times 100 \quad (\text{II.3})$$

m_0 : La masse initiale de l'échantillon (avant le séchage).

III.3. Elaboration des composites

III.3.1. Proportion des composants

La préparation des éprouvettes des composites à base de bois de palmier dattier et du mortier est effectuée selon la méthodologie de fabrication des bétons légers (comme le béton de bois). L'objectif est d'obtenir un matériau composite, répondant aux recommandations RILEM sur les bétons légers et permettant une utilisation comme un isolant dans le bâtiment. De ce fait, dans ce travail, nous avons préparé notre composite en jouant sur la composition de béton de bois (voir le tableau II.7)[7]:

Tableau. II.7: Composition massique de béton de bois pour $1m^3$ de mélange

Bois	Ciment	Sable	Eau
170 kg	350 kg	200 kg	250 kg

Les proportions des composants utilisées dans les mélanges sont présentées dans les tableaux II.8 et 9. Les tableaux 8 et 9 présentent la quantité (en kilogramme et en pourcentage) de mélange de quatre éprouvettes d'un volume cubique ($15 \times 15 \times 15$) cm^3 .

Tableau. II.8: Composition massique en kilogramme des différents échantillons de mortier de fibres.

Fibres (%)	Ciment (kg)	Sable (kg)
0	17.81	6.75
5	11.4	4.205
10	11.4	4.205
15	11.4	4.205
20	11.4	4.205
25	11.4	4.205
30	11.4	4.205

Tableau. II.9: Composition massique en pourcentage des différents échantillons de mortier de fibres.

Fibres (%)	Ciment (%)	Sable (%)
0	73	27
5	69	26
10	66	24
15	62	23
20	58	22
25	55	20
30	51	24

III.3.2. Mise en œuvre des échantillons

Les échantillons sont obtenus par un gâchage de ciment CPJ-CEMII/A32.5, sable (0/5mm), et de l'eau pour plusieurs concentrations massiques de fibres de bois de palmier, 5% ,10% ,15% ,20% ,25% , 30%. Afin d'étudier l'effet de la taille des fibres, trois tailles de fibres de palmier dattier ont été utilisés (FPD₃, FPD₆, et FPD_{mix}). La préparation des mélanges est effectuée en ajoutant les fibres, le ciment et le sable dans un mélangeur de vitesse 40 tour/minute (Figure. II.8), à l'état sec pendant 3 minutes à vitesse lente. Un mélange à sec est nécessaire pour homogénéiser le mélange. L'eau de gâchage est ensuite ajoutée

progressivement en conservant le malaxage à vitesse lente pendant trois minutes, jusqu' à ce que le mélange devienne plus malléable. L'homogénéisation du mélange est assurée par un malaxage à vitesse lente pendant trois minutes puis une minute à vitesse rapide.



Figure. II.8: Malaxeur

Ensuite, le mélange est versé dans des moules cubiques de volume $(15 \times 15 \times 15) \text{ cm}^3$. Les moules sont remplis en trois couches, suivie d'un picage surfacique pour chaque couche.



Figure. II.9: Moules cubiques de volume $(15 \times 15 \times 15) \text{ cm}^3$



Figure. II.10 : Echantillons après démoulage.

En effet, trois types de composites ont été réalisés :

MFPD₃ : sable+ciment+FDP₃

MFPD₆ : sable+ciment+FDP₆

MFPD_{mix}: sable+ciment+FDP_{mix}

III.3.3. Séchage

Le séchage des échantillons a été réalisé à l'air libre pendant 48 heures dans les moules et 28 jours après le démoulage dans les conditions du laboratoire (T = 35 °C) et une humidité relative (HR) de (25 %).

III.3.4. Masse volumique

Après démoulage, les échantillons ont été pesés et leurs dimensions ont également été mesurées après chaque semaine jusqu'à 28 jours à l'aide d'une balance électrique de précision 1 mg et un pied à coulisse de vernier de l'erreur 0.05mm, afin de suivre l'évolution de la masse volumique des échantillons.

C'est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume qui est calculée par la formule suivante (en considérant le composite comme un matériau homogène):

$$\rho(\text{kg.m}^{-3}) = \frac{M}{V} \quad (\text{II.4})$$

Avec,

M : la masse totale de l'échantillon en kilogramme.

V : le volume de l'échantillon en mètre cube.

III.4. Mesures des propriétés thermophysiques

Les mesures Thermophysiques ont été effectuées à l'état sec et à l'état humide en utilisant le dispositif commercial ISOMET2114 (Applied précision) de précision de $0.001\text{W. m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Figure. II. 11), qui est basé sur le principe du fil chaud. La mesure est basée sur l'analyse de la réponse de la température du matériau analysé à des impulsions de flux. Le flux de chaleur est excité par une résistance électrique de chauffage inséré dans la sonde, qui est en contact thermique direct avec l'échantillon testé. L'évaluation de la conductivité thermique et la capacité calorifique volumique est basée sur les enregistrements de températures échantillonnées périodiquement en fonction du temps.



Figure. II.11 : Dispositif de mesure des propriétés thermophysiques (ISOMET 2114).

III.4.1. Etat sec

A l'état sec, les mesures ont été effectuées après le séchage des échantillons dans une étuve de type JOUAN (voir la figure II. 12) à une température de 80°C pendant 24 heures.



Figure. II.12: *Etuve permanente 24h/24h type JOUAN.*

III.4.2. Etat humide

Dans le second état, les mesures ont été prises pour des échantillons humides pour étudier l'effet de l'humidité sur les propriétés thermophysiques des matériaux composites.



Figure. II.13: *Echantillon de mortier de FPD (MFPD) immergé totalement dans l'eau.*

La teneur en eau absorbée est déterminée par immersion totale des échantillons pour différentes tailles (grosses, fines, mélange) pendant 2 min, 5min, 10min, 30min, 60min et 24h.

III.5. Mesures des propriétés mécaniques

III.5.1. Surfaçage des échantillons

Les surfaces des échantillons sont hétérogènes. Un surfaçage s'avère donc indispensable afin de garantir la planéité des surfaces et l'application d'une sollicitation axiale homogène sur l'ensemble de la surface. La préparation de mélange de surfaçage s'effectue par mélanger les matériaux présentés dans le tableau II.10.

Tableau. II.10: Composition des matériaux utilisés pour le surfaçage de 0.225 m^2 .

Composition	Formulation	Quantité (en g)
Ciment prompt	85%	850
Sable<1mm	15%	150
Adjuvant MEDAFLOW30	5% de ciment	42.5
Eau	50% de ciment	425

En fait, le mélange est effectué par malaxage à sec du ciment, de sable et de retardateur de prise pour homogénéiser le mélange. Ensuite, l'eau est ajoutée au mélange et malaxé pendant 1 minute à une vitesse du malaxeur de 60 tour/minute (Figure II.14).



Figure II.14 : Malaxeur (ELE International limited)



Figure II.15: *Surfaçage des échantillons*

III.5.2. Résistance à la compression

La caractérisation mécanique est effectuée après le surfaçage des échantillons. La résistance de compression est mesurée à l'aide d'une machine de compression de la norme NFEN196-1, de type **Controlab** de précision 0.001MPa et de vitesse de chargement 0.5 Mpa/second.



Figure. II.16: *Appareil d'essai de la résistance de compression (Controlab).*

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés et la méthode de préparation des composites à base de mortier et de fibres de palmier dattier, ainsi que les appareils de mesures utilisés. L'étude granulométrique a été effectuée pour étudier l'influence de la taille de fibres de palmier dattier (FPD) sur les propriétés thermiques et mécaniques des composites.

Les résultats expérimentaux obtenus au cours de ce travail seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

Références

- [1] T. Mahmoud, "Etude de matériaux minéraux renforcés par des fibres organiques en vue de leur utilisation dans le renforcement et la réparation des ouvrages tels que les ponts," Thèse de Doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, pp. 177.
- [2] 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, Ecole Nationale Polytechnique, 2005, pp. 154.
- [3] Normes standart de réalisation de ciment Prompt Vicat, *NFP 15-314 et NF P15-317*.
- [4] Medcaflon, "Fiche technique conforme à la norme EN934-2, Tab3.1 et Tab3.2, NA774."
- [5] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and and M. Fois, "Renewable materials to reduce buildings heat loss: characterization of date palm wood,," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [6] H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, and M.O.W. Richardson, "Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites,," *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 1674–1683., 2007.
- [7] V. Cerezo, "Propriétés mécaniques,thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales:approche expérimentale et modélisation théorique," Thèse de Doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, pp. 226.

Chapitre III : Résultats et discussion

I. Introduction

Ce chapitre est dédié à l'analyse des résultats obtenus des composites élaborés à base de mortier renforcé par des fibres de bois de palmier dattier.

Dans cette partie nous discutons la cinétique des phénomènes de l'absorption de l'eau et de séchage du bois de palmier dattier, puis on s'intéresse à l'influence de la concentration, de la taille des fibres de palmier dattier et de l'humidité sur les propriétés thermophysiques et mécaniques de ces composites. Les résultats obtenus ont été présentés et comparés à ceux existants dans la littérature pour une application d'isolation thermique.

II. Effet de l'eau sur les fibres de bois de palmier dattier

L'eau dans le bois se trouve généralement sous trois formes: l'eau liquide (l'eau libre) qui remplit partiellement ou totalement les cavités cellulaires, la vapeur d'eau dans les cavités cellulaires et l'eau dans les parois cellulaires (l'eau liée). L'eau liée est associée avec la structure de ces parois surtout à des faibles degrés d'humidité du bois. C'est l'eau qui est à l'origine des variations physiques du bois tel le retrait en cas de séchage et de gonflement en cas de saturation [1].

II.1. Absorption

Une des caractéristiques importantes des fibres végétales est le pouvoir absorbant de ces fibres, qui peuvent contenir des quantités d'eau non négligeable du fait de leur importante porosité. La cinétique d'absorption d'eau des fibres FPD₃, FPD₆ est présentée dans la figure III.1.

Donc, la figure III.1 montre l'évolution de l'absorption d'eau des échantillons de fibres de palmier dattier (FPD) en fonction du temps d'immersion. Nous remarquons que l'absorption de l'eau atteint 209% pour FPD₃, après 40mn, et 174% après 160mn pour FPD₆. Ensuite, la variation de l'absorption d'eau est peu importante. Il est également montré d'après la Figure III.1 que les fibres fines (FPD₃) absorbent plus d'eau (jusqu'à la saturation) que des fibres grosses FPD₆. En outre, les fibres (FPD₃) absorbent une grande quantité d'eau en peu de temps. Ceci est dû à leur petite surface [2]. D'après ces résultats, on peut suggérer que les fibres grosses sont les plus appropriés pour les composites à être utilisés dans des environnements humides.

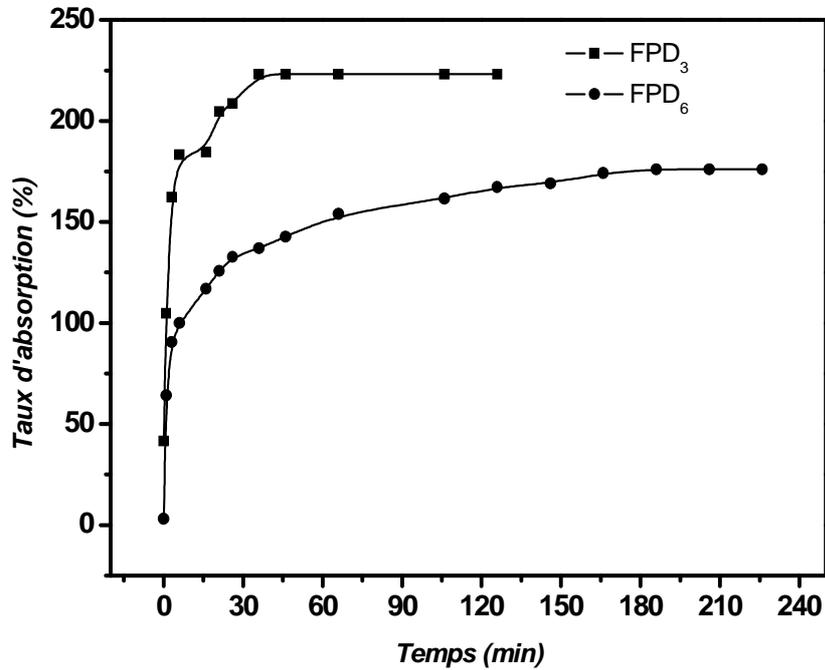


Figure. III.1: Absorption de l'eau en fonction du temps d'immersion des échantillons FPD₃, FPD₆.

Par ailleurs, les fibres de palmier dattier possèdent une énorme capacité d'absorption de l'eau. Elles peuvent absorber jusqu'à trois fois son poids sec. Ceci est généralement dû à sa structure poreuse. De ce fait, la vitesse de l'absorption d'eau dans les matériaux composites est liée à la durée de remplissage en eau des vides présents dans le FPD. Le caractère hydrophile de FPD conduit à une absorption élevée de l'eau par les composites renforcés par ces fibres.

La diffusion de l'humidité dans le bois a eu lieu en raison du gradient d'humidité entre la surface et le centre; l'eau migre alors d'un milieu plus concentré vers le moins concentré [3].

Le tableau III.1 montre l'absorption de l'eau jusqu'à la saturation de FPD étudié dans ce travail (FPD_{3,6}) en comparaison avec d'autres fibres naturelles telles que le sisal, Eucalyptus [4, 5], la banane et le liège [4].

Tableau. III.1 : Absorption d'eau jusqu'à saturation de certaines fibres naturelles

Fibres	Taille des fibres (mm)	Taux d'absorption(%)
Sisal	0.2-0.227	110-240
Banane	0.2	407
Liège	0.2	85-105
Eucalyptus	0.2	643
FPD ₃	2.5-3.15	241
FPD ₆	3.16-16	176

Il est constaté que l'absorption de l'eau dans les fibres de palmier dattier est similaire à celle de sisal. Cependant, il est moins important que les fibres de banane, mais plus important que le liège. Selon plusieurs auteurs, l'absorption de fibres naturelles dépend de la taille des fibres et de leur composition chimique [6-8]. En effet, la teneur élevée en cellulose de FPD cause une augmentation de la concentration de l'eau comme il est rapporté par H.N. Dhakal et al [7].

II.2. Désorption

Les figures III.2, III.3 montrent les variations de l'humidité et de la perte de masse des échantillons FPD₃, FPD₆ en fonction du temps pendant le séchage à 70°C.

Selon la figure III.2, les teneurs en eau sont initialement importantes, environ 400% pour l'échantillon FPD₃, 160% pour l'échantillon FPD₆. Puis, on observe que la teneur en eau diminue au cours du temps jusqu'à l'état anhydre des échantillons où $H(\%) \approx 0\%$.

Pour comprendre ces comportements, le mécanisme de séchage est discuté dans les paragraphes suivants. Initialement, le matériau contient une quantité d'eau homogène dans tout l'échantillon. Deux zones sont définies dans le matériau : une zone diffusionnelle et une zone à teneur en eau initiale. La zone diffusionnelle, située à la surface du matériau, permet l'évaporation d'eau et son évacuation vers le milieu extérieur. La zone à teneur en eau initiale se situe dans la partie la plus éloignée de la surface [9].

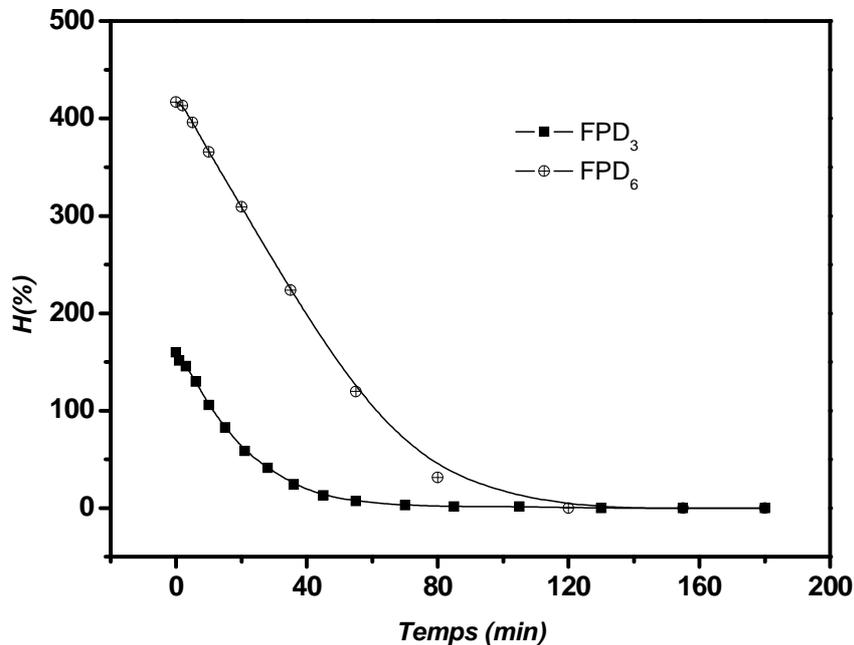


Figure.III.2 : Variations de l'humidité de FPD en fonction du temps

Pendant le séchage, après l'évaporation de l'eau de la zone diffusionnelle dans les premières minutes, l'eau initiale migre vers cette zone puisque il est nécessaire d'alimenter la surface pour maintenir l'équilibre hydrique. A partir d'une teneur en eau critique, l'eau liquide ne peut plus rejoindre la surface et la vitesse de séchage décroît (la variation de l'humidité est moins importante à partir d'environ 70 mn, selon la figure III.2), ce qui traduit la diminution de la teneur en eau jusqu'à l'état anhydre.

La figure III.3 montre que pour les premiers instants, la perte d'eau des deux échantillons (FPD_3 , FPD_6) est importante, cela est dû à la facilité d'extraction de l'eau des cavités cellulaires du bois (l'eau libre et vapeur d'eau). Puis, la perte d'eau varie lentement à cause de la difficulté d'extraire l'eau associée à des parois cellulaires du bois (l'eau liée). Enfin, à un certain temps elle se stabilise. La stabilisation de perte de masse est liée à l'extraction de l'humidité résiduelle (l'eau libre ou l'eau liée) dans ces fibres sous l'effet de la température et ceci permet de stabiliser la masse des fibres.

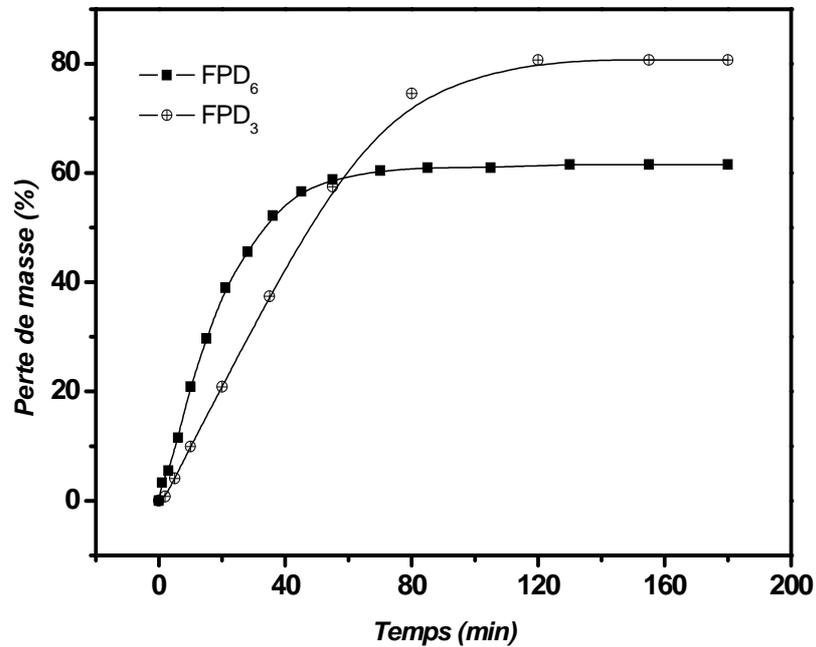


Figure.III.3 : Variations de la perte de masse de FPD en fonction du temps

Ces phénomènes de l'absorption et de désorption de fibres de palmier dattier sont dus au caractère hygroscopique des fibres. De ce fait, l'hygroscopie est une caractéristique du bois très importante puisqu'elle rend le matériau sensible aux conditions climatiques environnementales telles que l'humidité et la température. En outre, les variations de la taille des fibres permettent d'avoir également une idée sur la cinétique du phénomène d'absorption et de désorption d'eau dans les fibres. Les fibres fines absorbent plus facilement de l'eau, donc leur taux d'humidité est plus important que les grosses fibres.

Par conséquent, d'après cette étude, nous concluons que :

- Le bois du palmier dattier est très sensible à l'eau comparé aux autres fibres naturelles utilisées dans l'isolation thermique.

- Les facteurs qui affectent le comportement d'absorption et de désorption des fibres naturelles sont : la composition chimique, la surface spécifique et la taille des fibres, la durée de l'exposition à l'eau, la température de séchage et la durée de séchage, ...etc.

III. Propriété thermophysiques de composites à base du mortier et des fibres de palmier dattier (MFPD)

III. 1. Masse volumique

La figure III.4 montre l'évolution de la masse volumique des échantillons en fonction de la concentration des fibres pendant 28 jours de séchage à l'air.

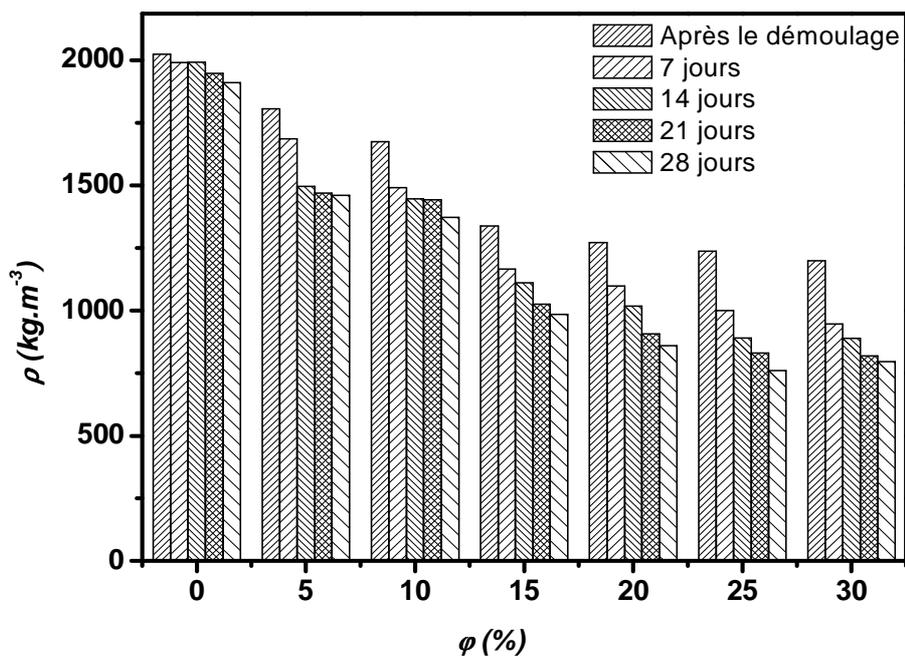


Figure. III.4: Evolution de la masse volumique en fonction de la concentration de FPD pendant 28 jours pour le composite MFPD₃

D'après la figure III.4, la masse volumique des échantillons diminue avec l'augmentation de la concentration de fibres. Après 7 jours de séchage, elle diminue de $1991.7 \text{ kg. m}^{-3}$ pour le mortier sans fibres à $946.74 \text{ kg. m}^{-3}$ pour le composites MFPD₃ avec une concentration en FPD de 30%. Même comportement de la masse volumique a été observé pour les deux autres composites MFPD₆ et MFPD_{mix}. Cette diminution est due à la masse volumique faible des inclusions (FPD).

D'autre part, la diminution de la masse volumique du mortier sans fibres pendant les 28 jours de séchage n'est pas importante comparée à celle du mortier renforcé par les fibres. Par exemple, pour le mortier sans fibres, elle diminue de 5.57%, tandis que, pour le mortier renforcé par 5%, 15%, 30% de FPD, la diminution est de l'ordre 19.14%, 26.48%, 33.55%, respectivement. Nous constatons clairement, l'effet de l'ajout de FPD sur les variations de la masse volumique de composites pendant le séchage. Il est clair que les composites renforcés par les FPD perdent rapidement de l'eau par l'évaporation par rapport au mortier pur, et ceci permet de diminuer la masse volumique des composites MFPD. Cela est du au caractère hydrophile de la FPD (elle stocke une grande quantité de l'eau) et sa sensibilité à l'air ambiante.

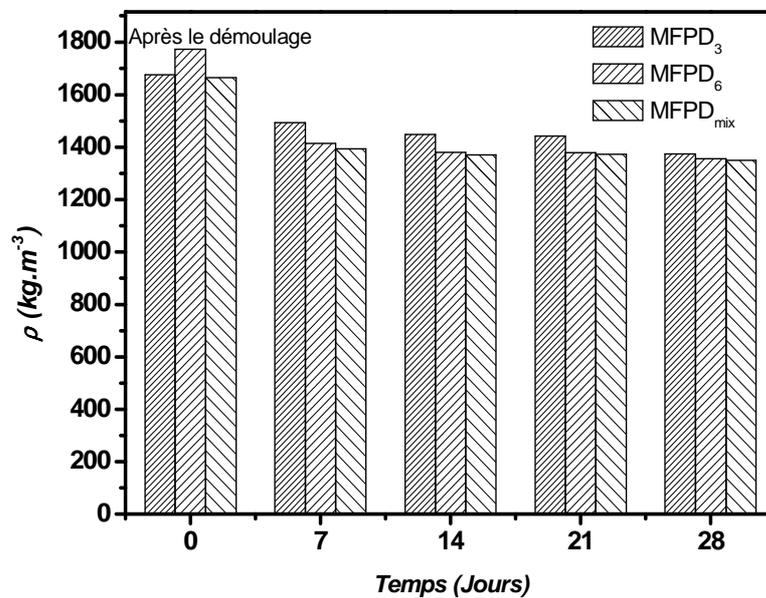


Figure. III.5 : Evolution de la masse volumique en fonction du temps de composites

MFPD₃, MFPD₆, MFPD_{mix} pour la teneur en fibres de 10%.

Par ailleurs, pour chaque concentration, la masse volumique diminue en fonction du temps. A titre d'exemple, nous prenons la concentration de fibres 10% (voir la figure III.5), après 7 jours, nous avons observé que la masse volumique diminue de $1675.21 \text{ kg. m}^{-3}$ à $1493.48 \text{ kg. m}^{-3}$, de $1773.61 \text{ kg. m}^{-3}$ à $1413.1 \text{ kg. m}^{-3}$, de $1665.4 \text{ kg. m}^{-3}$ à $1393.48 \text{ kg. m}^{-3}$ relatif aux MFPD₃, MFPD₆, MFPD_{mix}, respectivement. Ce qui correspond à un allègement de l'ordre 10.84%, 20.33% et 16.33 % pour les composites MFPD₃, MFPD₆, MFPD_{mix}, respectivement. Cet allègement est lié d'une part à la faible masse volumique des inclusions, comme il est mentionné précédemment, et d'autre part, à l'augmentation de l'entraînement d'air dans la matrice en fonction de la composition.

III.2. Résistance des composites à l'eau

La figure III.6 présente l'absorption de l'eau de composite MFPD₃ en fonction du temps et de la concentration des fibres.

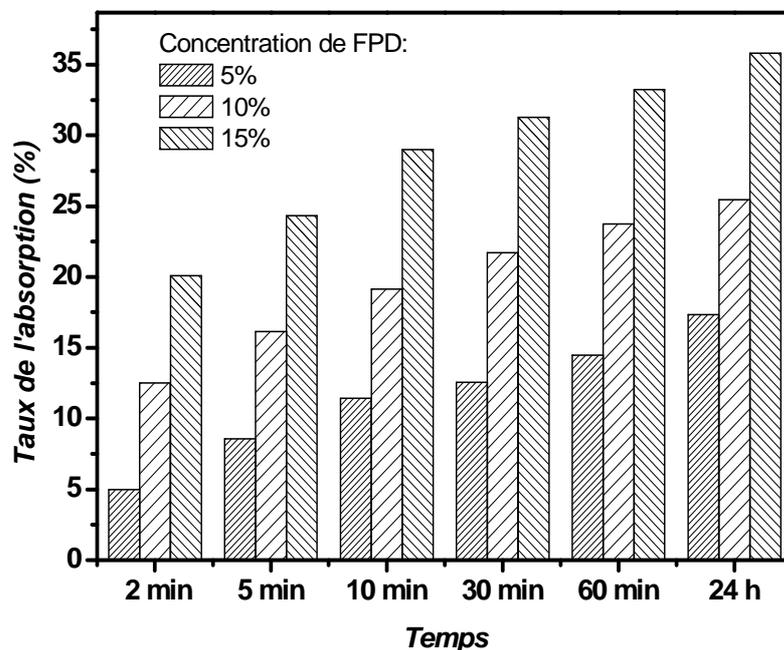


Figure. III.6 : Absorption de l'eau en fonction de temps d'immersion et de la teneur en FPD₃

La figure III.6 montre que, pour chaque concentration, l'absorption de l'eau augmente avec le temps. La vitesse d'absorption de l'eau augmente rapidement pendant les premiers temps (2mn, 5 mn), ensuite, vers les 10 mn cette vitesse commence à diminuer. Par exemple, pour la teneur en fibres de 5%, l'absorption augmente de 71.4% durant les cinq premières minutes d'immersion dans l'eau, après, l'absorption augmente de 33.37%, 10%, 15% pendant 10 mn, 30mn, 60mn, respectivement.

Les échantillons étudiés peuvent absorber plus d'eau s'ils sont restés dans l'eau pour une durée très longue jusqu'à la saturation. La période d'absorption initiale est prédominante pour caractériser les matériaux en termes de durabilité, car cette période traduit le remplissage des plus gros capillaires qui sont des chemins privilégiés pour la pénétration des fluides gazeux et liquides.

Il est observé aussi que l'ajout de fibres dans le mortier produit une augmentation de l'absorption de l'eau. Cela est dû au pouvoir hydrophilique des fibres de palmier dattier, et aussi au mortier qui contient des vides qui sont remplis d'eau. Par ailleurs, plus le matériau est poreux (proportion de fibres plus élevée), plus l'absorption est importante. L'ajout de fibres induit dans la matrice une porosité supplémentaire qui, elle-même, favorise l'absorption d'eau. Ce résultat est rapporté par M. Chikhi et al [2], qui ont étudié l'effet de l'eau sur les composites de gypse renforcé de FPD. Ils ont révélé que la teneur en eau des composites dépend fortement de la capacité d'absorption d'eau de FPD.

Des comportements similaires ont été rapportés par D. Taoukil et al [10], qui ont étudié l'effet de l'eau sur le mortier de sable renforcé par les résidus de bois. D'après leurs résultats, ils ont constaté également que l'absorption de l'eau augmente avec le temps et avec l'augmentation de la concentration de fibres. Dans un autre travail de D. Taoukil et al[11], l'effet de l'eau sur le mortier renforcé par la laine de bois a été étudié. Ils ont noté également que le caractère hygroscopique élevé de la laine de bois constitue un inconvénient; elle conduit à un fort retrait et à un gonflement des composites.

En effet, les matériaux naturels montrent essentiellement une sensibilité à l'humidité plus élevée, ceci pose une problématique lorsque le matériau est exposé dans un environnement avec une humidité élevée ou s'il est en contact avec de l'eau.

Ces phénomènes sont susceptibles de provoquer des dommages qui peuvent affecter la durabilité des matériaux de construction. Une exposition excessive à l'humidité peut provoquer la corrosion biologique, à savoir la dégradation par des bactéries, des moisissures et des champignons agissant sur le matériau [12].

Afin de rechercher des améliorations sur la sensibilité de composites à la présence de l'eau, Boudarina et al. [13] ont pensé au traitement des copeaux de bois avant de les incorporer dans le béton. Le traitement est un enrobage superficiel au ciment choisi à partir de la littérature. Les copeaux sont enrobés donc par un lait au ciment (ciment + eau) et laissés bien séchés avant leur utilisation. Ils ont montré que l'absorption d'eau de ces composites est considérablement réduite après ce traitement.

III. 3. Conductivité thermique

La conductivité thermique k ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) est une grandeur physique importante qui caractérise la capacité isolante d'un matériau. Plus le coefficient k est faible, plus le pouvoir isolant du matériau est grand. Sa valeur dépend de plusieurs facteurs. Dans cette partie nous discutons les différents paramètres qui affectent la conductivité thermique des composites étudiés dans ce travail.

III.3. 1. Etat sec

III. 3.1.1. Effet de la concentration et de la taille de FPD

La figure III.7 montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres de trois types de composites MFPD₃, MFPD₆, MFPD_{mix}.

Selon la figure III.7, on observe que l'addition de FPD, dans la matrice de mortier, réduit la conductivité thermique du composite. Cette réduction est prévue, car les fibres de palmier ont une conductivité thermique plus faible par rapport à celle de la matrice du mortier.

Par ailleurs, le fait que les fibres sont noyées dans le composite, cela produit de l'air et de la porosité dans la matrice et réduit la masse volumique. Ainsi, le premier avantage de l'utilisation de fibres naturelles est la légèreté du composite. Cet effet a déjà été noté par Aouadja et al. [14] sur le béton renforcé par des résidus de bois.

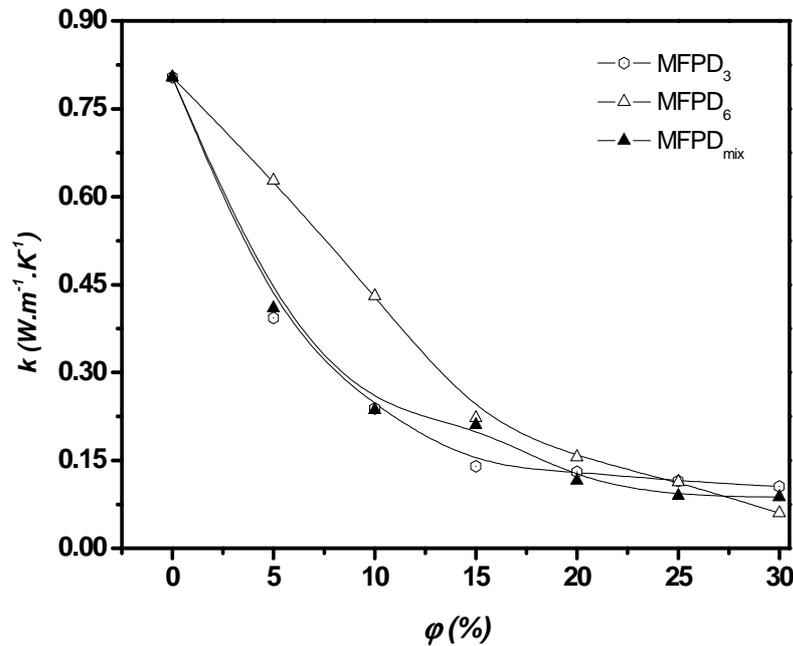


Figure. III. 7: Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres

Pour les concentrations de fibres inférieures à 15%, la conductivité thermique de composites MFPD₆ est supérieure à celle de composites MFPD₃ et MFPD_{mix}. La conductivité thermique du matériau poreux est régie par les vides dans l'échantillon. Ces vides se produisent à partir de l'emballage de fibres. En général, les fibres courtes sont plus difficiles à aligner et à emballer densément que les grosses fibres [15]. Ainsi, pour une teneur en fibres donnée, du mortier chargé en fibres courtes résulte une augmentation du nombre de vides, ce qui génère une masse volumique plus faible ainsi qu'une faible conductivité thermique des composites.

Pour $\varphi > 15\%$, il s'avère que l'influence de la taille des fibres sur la conductivité thermique du composite est négligeable.

De ce fait, d'après de la Figure III.7, la diminution de la conductivité thermique est d'environ 92.5% pour les échantillons MFPD₆, 87% pour les échantillons MFPD₃ et MFPD_{mix}, pour la teneur en fibres de 30%. Cette diminution est liée à la différence importante entre les conductivités thermiques des matériaux utilisés (fibres et matrice) et au caractère isolant des fibres du palmier dattier, qui ont une conductivité thermique de $0.083 \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [16]. Un

comportement similaire a été rapporté par A. Ledhem et al. [17], ils ont étudié l'effet des composants (tels que l'argile, des amendes de schistes, de ciment et de copeaux de bois) sur les performances des composites durcis. D'après leurs résultats, la conductivité thermique décroît avec l'augmentation de la teneur en bois et la réduction de la conductivité thermique est d'environ 85% pour le pourcentage massique de fibre de bois d'environ 30%.

Selon les résultats obtenus, on peut dire que l'effet de la concentration de fibres sur les propriétés thermique est plus significatif que l'effet de la taille. Un comportement similaire a été rapporté par les auteurs de [18] qui ont étudié l'impact de la taille des particules de liège sur la conductivité thermique du béton à base de ciment. Leurs résultats affirment que l'effet de la taille des particules de liège sur la conductivité thermique du béton est moins important par rapport à l'effet de la concentration de ces particules. Ils ont constaté que la réduction de la conductivité thermique est d'environ 16% et 30%, pour les composites avec les concentrations de liège de 10%, 20%, respectivement. D'autre part, l'effet de la taille sur la conductivité thermique de composites est peu significatif. Les conductivités thermiques de composites est d'environ $0.96 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $0.97 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $1.07 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, pour les tailles de particules, (3-5mm),(3-8mm) et (6-14mm),respectivement.

L'évolution de la conductivité thermique de la figure III.7 a montré aussi qu'au-delà de la concentration de 20% de FPD, la diminution de la conductivité thermique de composites était relativement faible. Pour cette raison, il est apparu utile de limiter la teneur en fibres autour de cette valeur.

En fait, à partir des résultats obtenus dans ce travail, nous pouvons clairement supposer que l'ajout de fibres de palmier dattier pourrait considérablement améliorer l'isolation thermique des composites. Ce résultat est confirmé par plusieurs auteurs [11, 19, 20]. F. Barreca et al [19] ont étudié l'effet de l'incorporation de la pierre d'olive sur les propriétés thermiques de mortier de ciment et de chaux. Ils ont montré que l'ajout de 70% de pierre d'olive conduit à réduire la conductivité thermique de mortier de plus de 76%. Le même comportement a été rapporté par Bederina et al, et D. Taoukil et al [19,20], qui ont étudié l'effet de l'ajout de copeaux de bois, et de la laine de bois sur les propriétés thermiques des bétons. Ils ont conclu que l'ajout de fibres naturelles améliore les caractéristiques d'isolation des bétons.

III.3. 2. Etat humide

III.3.2.1. L'effet de l'eau sur la conductivité thermique

La figure 8 montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de l'eau absorbée pour trois composites MFPD₆, MFPD₃ et MFPD_{mix}.

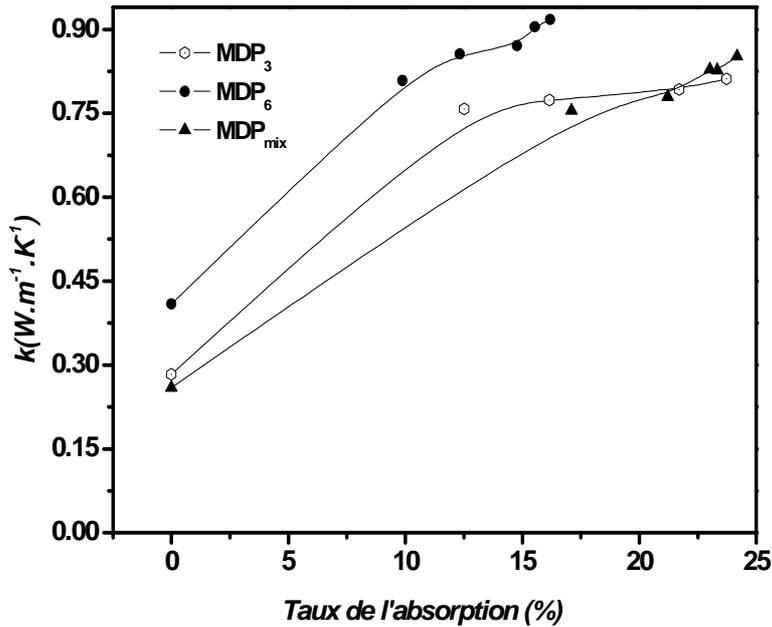


Figure. III.8: Conductivité thermique en fonction du taux d'humidité absorbée et de la taille des fibres pour une teneur de 10%.

Les courbes de la figure III.8 montrent clairement une augmentation de la conductivité thermique avec l'augmentation de l'eau absorbée. Les valeurs de conductivité thermique pour des échantillons saturés d'eau sont environ deux fois plus élevées que celles des matériaux secs. Ce résultat est évident puisque les fibres de palmier dattier ont une capacité d'absorption élevée de l'eau, ce qui conduit à une augmentation de la masse volumique des échantillons. L'eau étant un excellent conducteur, elle induit une augmentation de la conductivité thermique du composite, par rapport à l'air qui est un meilleur isolant.

Ce comportement est confirmé par Azra Korjenic et al.[12], ils ont déterminé la relation entre la conductivité thermique et l'humidité absorbée de différents isolants à base de fibres naturelles (jute, lin, chanvre) (Figure III.9) numériquement et expérimentalement.



Figure. III.9 : *Echantillons testés* [12].

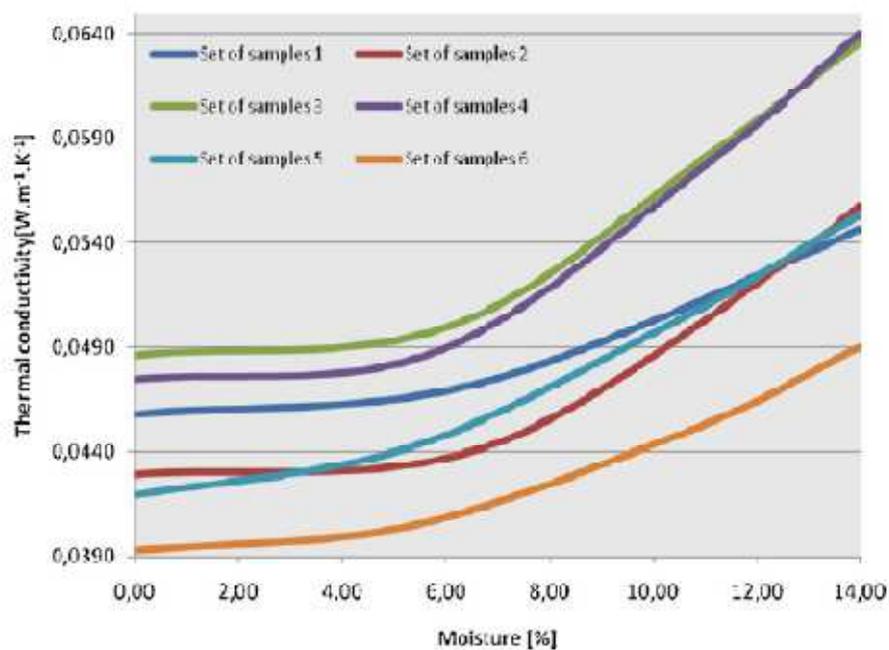


Figure III. 10: *Conductivité thermique en fonction de l'humidité absorbée des échantillons étudiés* [12].

Ils ont constaté également que la conductivité thermique des composites augmente avec l'augmentation de l'humidité absorbée (voir les figures III.10, 11).

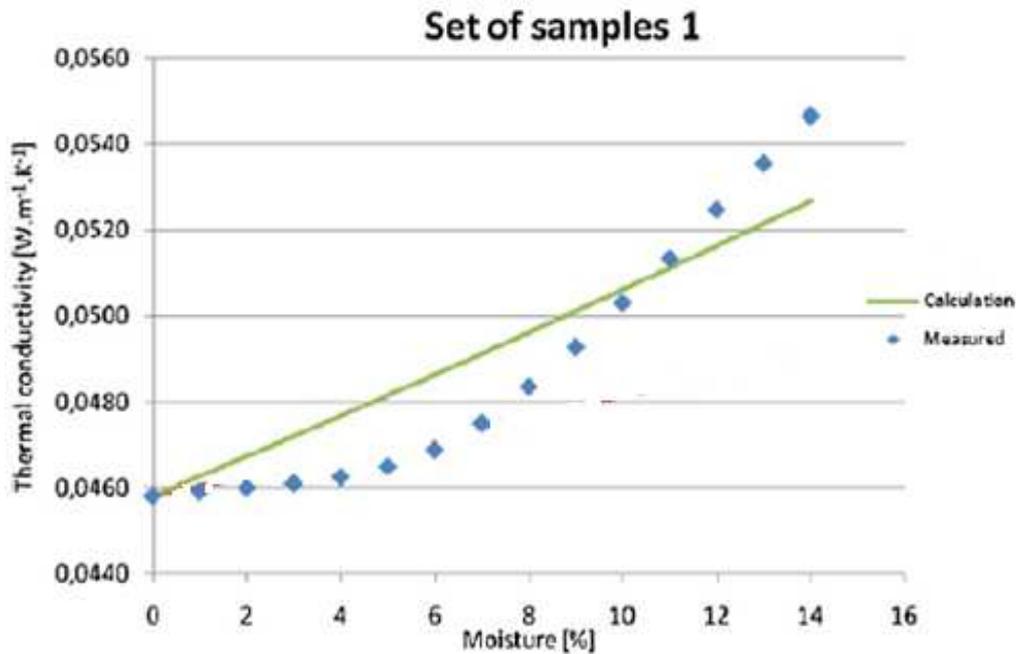


Figure III. 11: Comparaison entre la conductivité thermique et l'humidité, mesurée et calculée [12].

Par conséquent, le coefficient de la conductivité thermique augmente généralement avec une humidité élevée. Le taux de l'absorption de l'eau élevé, de composites renforcés par les fibres de palmier dattier (FPD), est dû à la porosité élevée de ces fibres. De ce fait, une valeur de porosité très élevée a une influence importante sur le comportement thermique et l'humidité des matériaux à base des fibres naturelles.

III.3.2.2. Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique

La figure III.12 montre la relation entre la conductivité thermique et la masse volumique des composites.

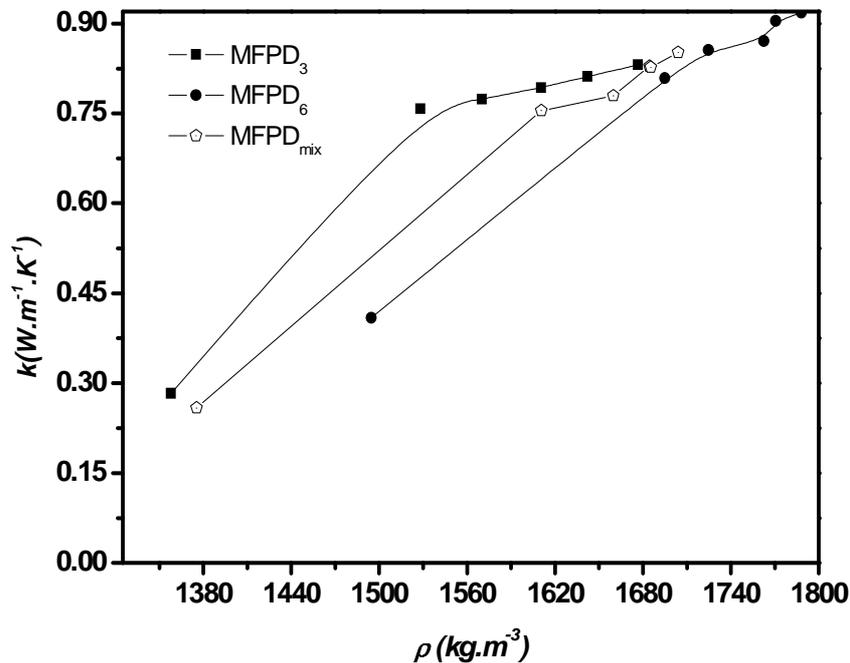


Figure. III.12: Conductivité thermique des composites en fonction de la masse volumique, pour une teneur de 10%.

D'après cette figure, On remarque que la conductivité thermique des composites augmente avec l'augmentation de la masse volumique. Cela montre une relation directe entre la masse volumique des composites et la conductivité thermique. L'augmentation de vides d'air dans le composite conduit à la diminution de la masse volumique, ce qui donne une résistance thermique plus élevée et une conductivité thermique plus faible. Cette dépendance (conductivité /masse volumique) est toujours vérifiée sur les matériaux avec une matrice minérale et des fibres végétales selon Alrim et al. [21] et Khedari et al. [22], qui ont utilisé la matrice de l'argile, et de ciment Portland, respectivement (figure III.13, 14)

Khedari et al. [22] ont constaté également que le taux des vides élevé (porosité élevé) conduit à la légèreté et à une diminution de la conductivité thermique de composite (la figure III. 13)

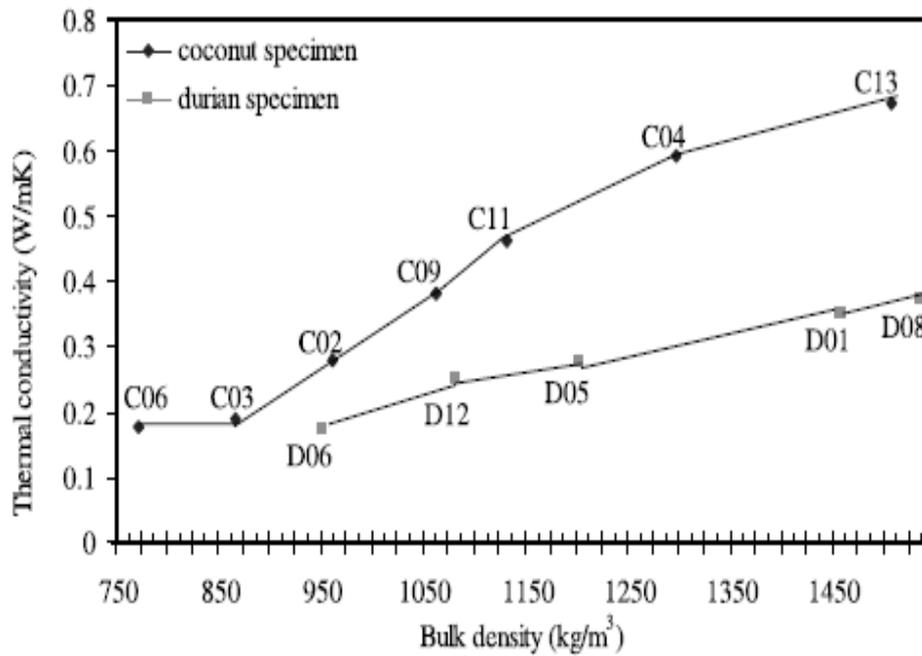


Figure III. 13: Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique de composites renforcés de noix de coco et durian [22].

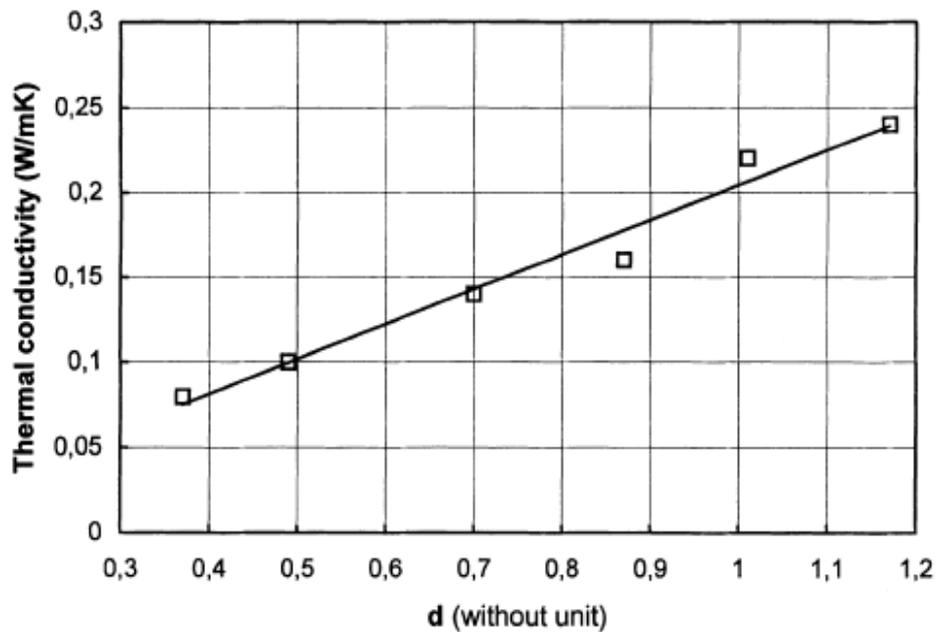


Figure III. 14: Conductivité thermique en fonction de la densité [21].

Il est important de noter que l'effet de la concentration du FPD a un impact plus important sur la conductivité thermique et la masse volumique des composites que l'effet de la taille de FPD. En outre, la présence d'eau conduit à l'augmentation de la conductivité thermique, donc de réduire des performances d'isolation des composites.

III. 4. Chaleur spécifique, diffusivité thermique et effusivité thermique de composites

III. 4. 1. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique d'un matériau est définie par la quantité de chaleur à apporter à 1kg du matériau pour élever sa température de 1°C (ou Kelvin). Elle s'exprime en Joules par kg et par degré Celsius (°C) (ou Kelvin, rappel: 0 °C = 273,15 K). C'est la capacité à emmagasiner de chaleur par rapport à son poids [23].

La figure III.15 montre l'évolution de la chaleur spécifique en fonction de la concentration de fibres pendant 28 jours de séchage naturel. D'après cette figure, on remarque que la chaleur massique augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. Généralement la chaleur spécifique du matériau composite, dépend de celles des matériaux qui le constituent.

Par ailleurs, d'après les résultats obtenus, la chaleur massique présente des valeurs importantes, spécialement pour les concentrations élevées de FPD. Plus la chaleur massique est élevée, plus les matériaux sont capable de stocker et de restituer des quantités importantes de chaleur (ou de fraîcheur en été), et ils seront moins sensibles aux variations de température du milieu extérieur, ils mettront du temps à s'échauffer ou à se refroidir [24].

En effet, une capacité thermique élevée traduit une forte inertie thermique ou une grande capacité à emmagasiner de la chaleur ce qui donne une aptitude au matériau à évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Elle joue aussi le rôle de régulateur de la température à l'intérieur de la structure [9]

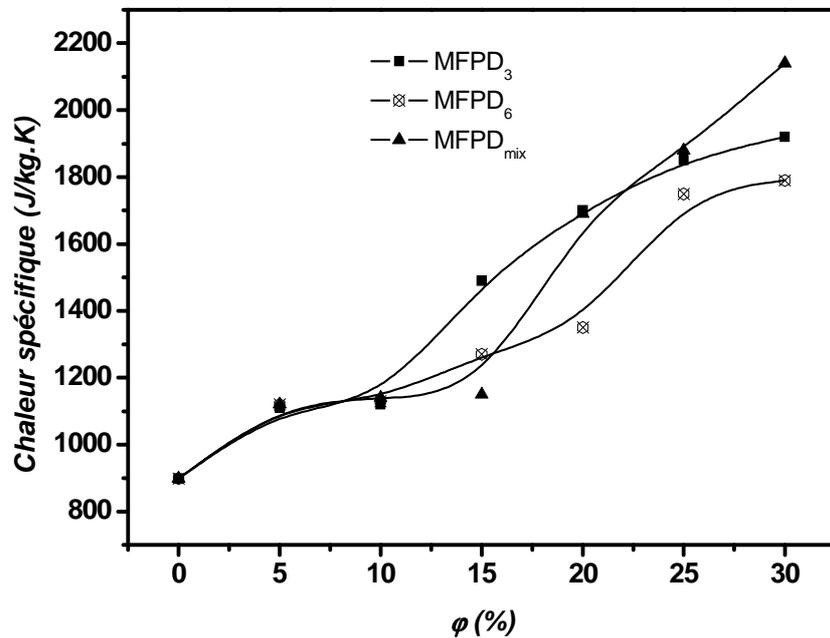


Figure. III. 15: Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la concentration de fibres.

.III.4.2. Diffusivité thermique et effusivité thermique

La diffusivité thermique caractérise la vitesse de propagation de la chaleur dans un matériau, tandis que, l'effusivité thermique (E_f) s'agit de la capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle mesure la rapidité avec laquelle un matériau absorbe et restitue la chaleur. Le coefficient (E_f) est calculé par la relation suivante :

$$E_f = \sqrt{\rho \times C_p \times k} \quad (\text{III.1})$$

Où, C_p : la chaleur spécifique, k : la conductivité thermique

Si (E_f) est élevée, le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie, sans se réchauffer. Au contraire, si E_f est plus basse, le matériau se réchauffe plus vite [23].

Les figures III.16, 17, montre l'évolution de la diffusivité et l'effusivité thermique de composites en fonction de la concentration des fibres FPD.

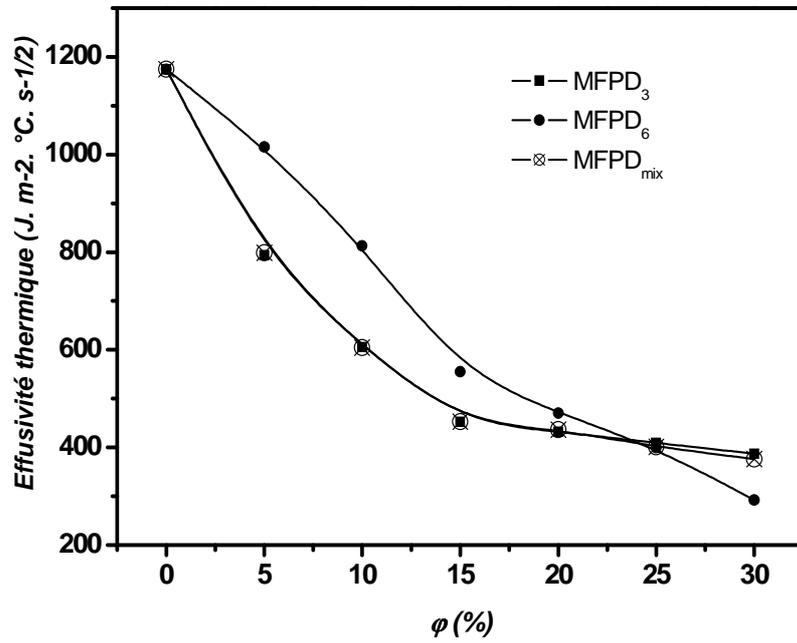


Figure III.16 : Effusivité thermique de composites en fonction de la concentration de FPD

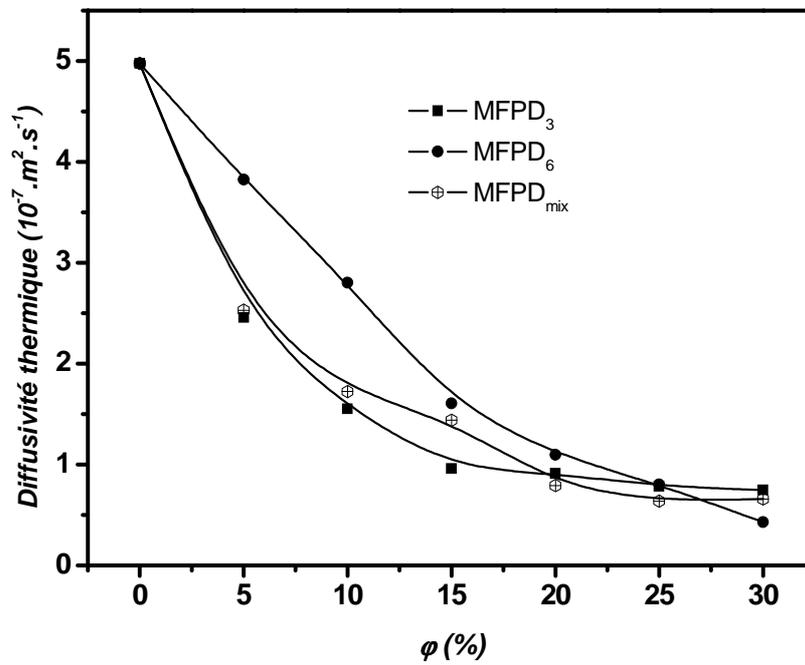


Figure III.17: Diffusivité thermique de composites en fonction de la concentration de FPD.

D'après ces figures, on remarque que la variation de la diffusivité (a) et l'effusivité thermique (E_f) de composites est similaire à l'évolution de la conductivité thermique, une diminution de ces deux propriétés (a , et E_f) avec l'augmentation de la concentration des fibres est observée. Cette diminution était attendue car la diffusivité et l'effusivité thermique des fibres de palmier dattier sont plus faible que celle de la matrice.

Les valeurs de (a) et de (E_f) de composites MFPD₆ sont supérieures à celles de composites MFPD₃ et MFPD_{mix} pour les concentrations faibles de FPD. Cela est du au fait que les conductivités thermiques des composites MFPD₆ sont supérieures à celles de deux autres composites comme il a été mentionné dans la section III. 3.1.1.

Le tableau III.2 compare les propriétés thermiques de composites renforcés par les fibres fines (FPD₃) pour les concentrations de 5%, 10%, 15% à l'état sec à celles d'autres matériaux de construction. Les résultats montrent que la conductivité thermique de notre composite est similaire à celle de béton cellulaire pour les concentrations 5% et 10% et proche de celle de béton léger. D'autre part, elle est supérieure à celle de béton de chanvre, et inférieur à la conductivité thermique de béton ordinaire.

Tableau. III.2 : Propriétés thermique de composite MFPD₃ et d'autres matériaux de construction

matériaux	k (W. m ⁻¹ .K ⁻¹)	a (10 ⁻⁷ .m ² .s ⁻¹)	E _f (J. m ⁻² . °C. s ^{-1/2})	C _p (J.kg ⁻¹ . °C)	ρ Kg. m ⁻³	ρ × C _p × 10 ³ (J.m ⁻³ . °C)
MFPD ₃						
5%	0.39328	2.45	793.61833	1096.7764	1460.17	1601.48
10%	0.23846	1.55	605.28895	1119.79884	1372.05	1536.42
15%	0.14002	0.95	452.30567	1485.26003	983.72	1461.08
béton de chanvre ^a (Evrard, 2008)	0.1	1.5	267	1530	440	/
Béton léger ^b	0.22-1.02	/	360-1600	1000-1100	600-2000	600-2200
Argile /liège ^c	0.22-0.404	2.14- 2.74	518-936.75	/	1043-1785	/
Béton cellulaire ^a	0.14-0.23	2.7	237-429	1000	400-800	400-800
Béton ordinaire ^a	1.6-2.1	/	1960-2350	1100	2200-2400	2400-2640

^a : source: [9], ^b : source: [23], ^c : source: [25]

D'après ce tableau, L'effusivité thermique de composite MFPD₃ est supérieure à celle d'autres matériaux comme le béton de chanvre, le béton cellulaire et inférieure à l'effusivité thermique de béton ordinaire et le brique extrudée, mais elle est dans la gamme des valeurs enregistrées pour le composite Argile/liège et le béton léger. Par ailleurs, la diffusivité thermique faible observée permet au composite d'amortir la diffusion de chaleur extérieure.

Les résultats indiquent que le composite MFPD₃ possède des valeurs importantes de l'effusivité thermique par rapport à d'autres matériaux comme le béton de chanvre et le béton cellulaire qui présentent des valeurs faibles de coefficient (E_f), entre 237 et 429 J. m⁻². °C. s^{-1/2}, et cela diminue la capacité de stockage de ces matériaux selon A.D. TRAN LE [9].

En effet, on peut dire que les composites MFPD présentent une capacité de stockage de chaleur importante, particulièrement pour la concentration de fibres de 5%.

D'après les résultats obtenus, les composites de mortier renforcés de bois de palmier dattier étudiés possèdent des propriétés thermiques intéressantes, particulièrement pour les concentrations faibles de FPD. Ceci permet de les utiliser comme des matériaux d'isolation thermique.

IV. Propriétés mécaniques

IV.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des propriétés les plus importantes de matériaux de construction. La figure III.18 montre la variation de la résistance à la compression des échantillons en fonction de la teneur en fibres.

D'après la figure III.18, on remarque que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la concentration de FPD; par exemple, pour la concentration de 5% en FPD, la résistance à la compression des composites diminue d'environ 92% pour le composite MFPD₃, 91.90% pour MFPD₆ et 85% pour MFPD_{mix}. Ce comportement est dû à l'augmentation de la teneur en fibres qui conduit à une faible masse volumique des échantillons.

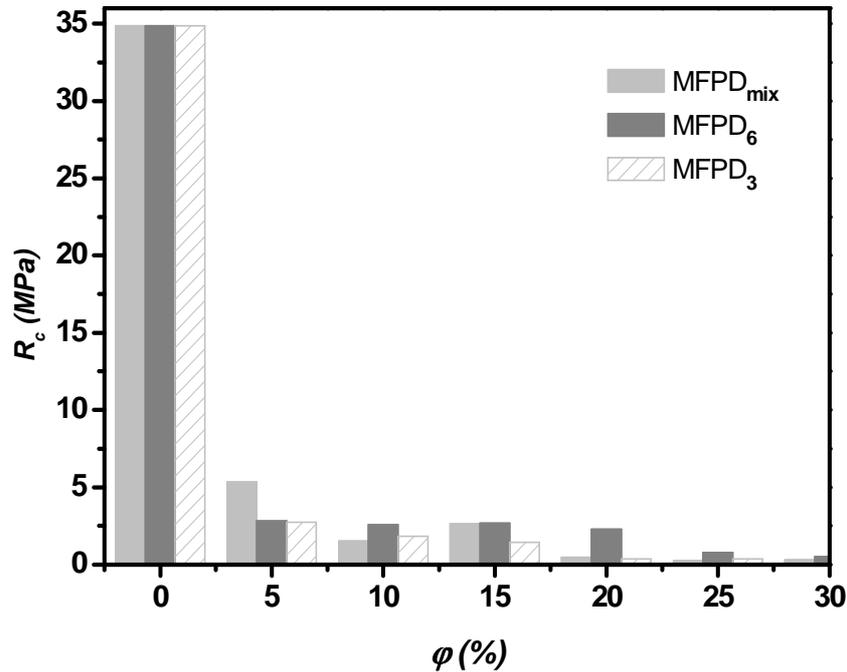


Figure. III. 18: Résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres

En fait, à une concentration élevée de fibres, si la fibre est rigide, le compactage de la fibre devient difficile et les vides sont introduits dans le composite [15]. La résistance maximale à la compression a été obtenue pour MFPD_{mix} qui reste très inférieure à celle du mortier sans fibres. Pour les composites fibres-mortier, la résistance à la compression optimale est obtenue avec une concentration plus faible. Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux [26]. Les auteurs de [26] ont étudié les propriétés mécaniques de béton renforcé par les fibres de bois de palmier, ils ont constaté également que la résistance à la compression optimale est obtenue avec une teneur en fibres plus faible. Cela peut être expliqué par le fait que les fibres introduisent des défauts minimaux dans la matrice, et donnent une distribution plus uniforme dans le béton [26].

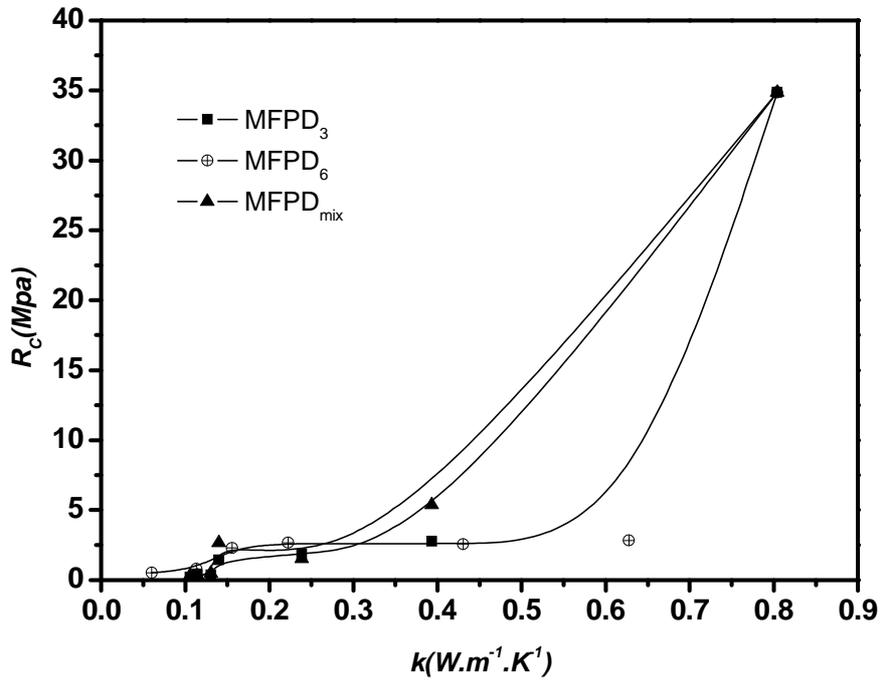


Figure. III. 19: Résistance à la compression en fonction de la conductivité thermique

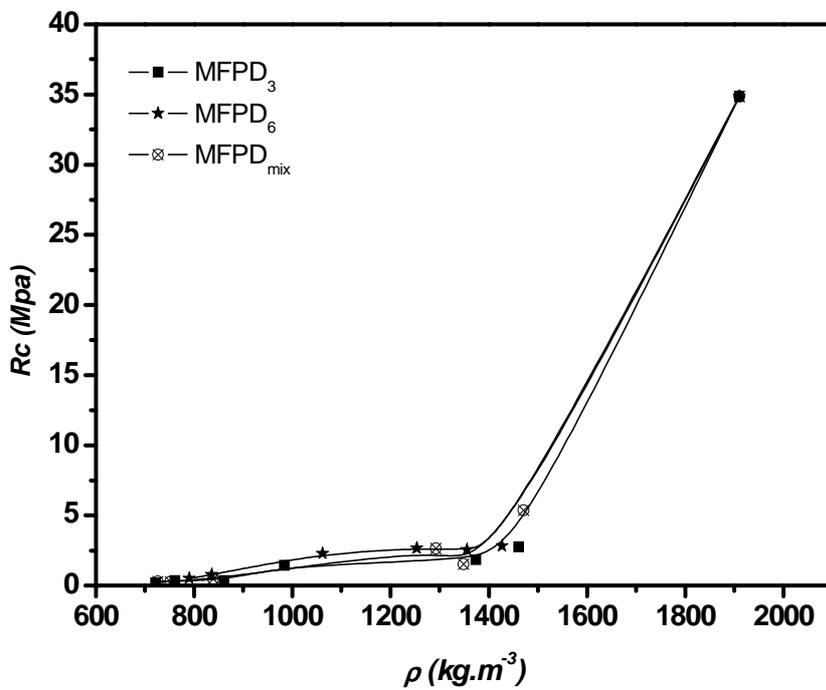


Figure. III.20: Résistance à la compression en fonction de la masse volumique

Les figures III.19 et III.20 montrent clairement que la résistance à la compression diminue avec la diminution de la conductivité thermique et la masse volumique de composites, et cela est lié à l'augmentation de la concentration de fibres.

Pour les valeurs de conductivité thermique $0.3932 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $0.6278 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $0.3933 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, relatifs aux MFPD₃, MFPD₆, MFPD_{mix}, respectivement, la résistance à la compression de composites MFPD_{mix} est supérieure à celles de composites MFPD₃ et MFPD₆.

Pour les conductivités thermiques inférieures à $0.39 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, et $0.63 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, les valeurs de la résistance à la compression de composites MFPD₆ sont les plus élevées que celles des composites MFPD₃, MFPD_{mix}, qui présentent des valeurs de la résistance presque similaires. Ce comportement peut être du à la résistance interfaciale entre fibre /fibre et fibre/matrice, et ainsi à la distribution des fibres dans la matrice [27]. Théoriquement, l'addition de fibres de palmier dattier dans une matrice à base de ciment permettrait de réduire la résistance à la compression du composite. L'augmentation de la porosité (diminution de la masse volumique) du matériau composite à la suite de l'addition de fibres est le principal facteur responsable de la diminution de la résistance à la compression, ce qui est en accord avec les résultats de la littérature [28].

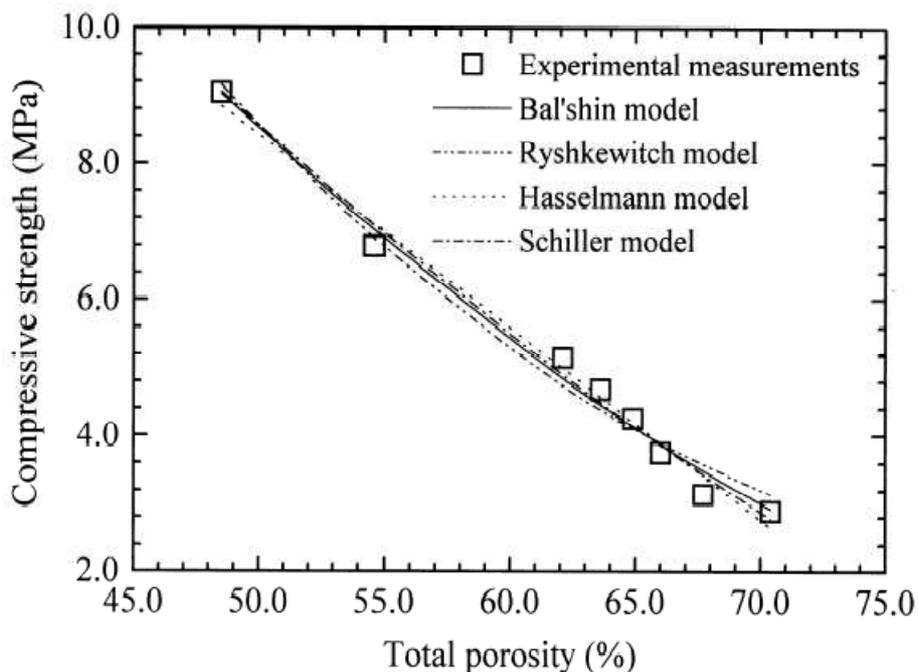


Figure III.21: Résistance à la compression en fonction de la porosité totale de composites [28]

Les auteurs de [28] ont déterminé la relation entre les propriétés mécaniques et thermiques de composites Argile-ciment-bois, expérimentalement et théoriquement. Ils ont noté que les propriétés thermiques et mécaniques de composite dépendent fortement de sa microstructure, particulièrement, de sa structure poreuse. Leurs résultats montrent que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la porosité de composite (Figure III.21).

Il faut garder à l'esprit également que le mélange de mortier renforcé de fibres a été fait avec plus d'eau que le mélange sans fibres. En effet, les mortiers renforcés de fibres sont plus poreux et donc moins résistant que du mortier sans fibres.

Par conséquent, la diminution de la résistance à la compression est liée à ces trois facteurs[11]:

- (i) la faible résistance mécanique des inclusions,
- (ii) l'augmentation de la porosité de la matrice en raison de l'entraînement d'air,
- (iii) l'adhésion pauvres, entre les fibres et la matrice,

IV.2. Corrélation entre la résistance à la compression, la conductivité thermique et la masse volumique des composites

La masse volumique, la résistance mécanique et la conductivité thermique sont des paramètres cruciaux pour déterminer le point optimal et choisir le type de matériaux de construction isolant. La connaissance du niveau de résistance suffisante pour une utilisation donnée est donc nécessaire pour l'exploitation optimale des qualités d'isolation et de légèreté.

La figure III.22 illustre les relations entre la résistance à la compression d'une part et la conductivité thermique d'autre part avec la masse volumique de composite: $R_c = f(\rho)$ et $k = f(\rho)$. Cette figure montre que la conductivité thermique et la résistance à la compression diminuent avec la diminution des valeurs de la masse volumique (et de l'augmentation de la teneur en fibres). Il est clair que cette diminution est accompagnée par une perte de la résistance mécanique à la compression.

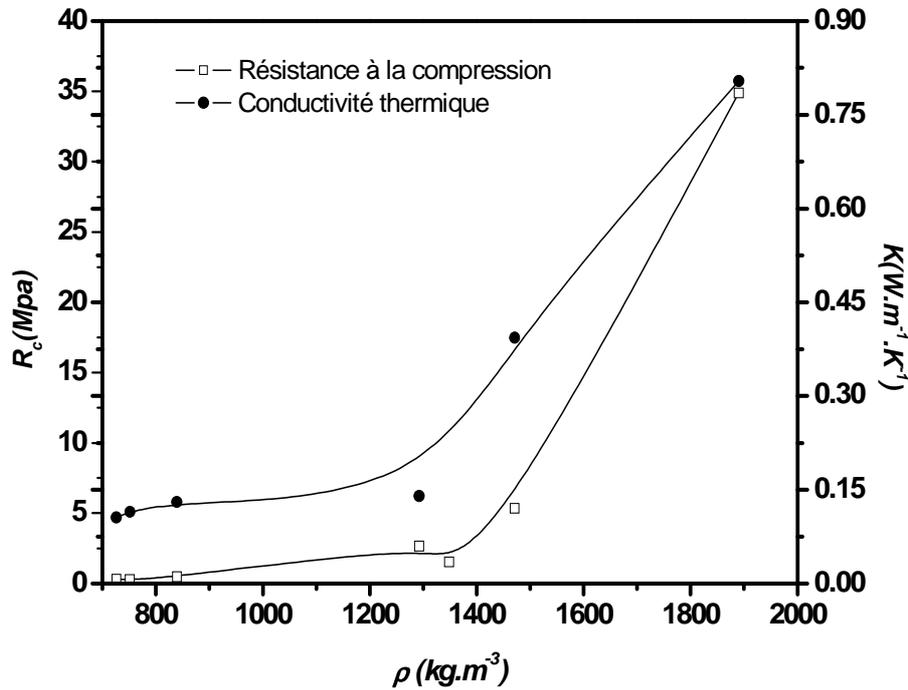


Figure. III. 22: *Résistance à la compression et conductivité thermique en fonction de la masse volumique des composites MFPD_{mix}.*

Les résultats obtenus dans cette étude pour les teneurs en fibres de 5%, 10%, 15% sont résumées dans le tableau III.3. Il est constaté que notre matériau composite mortier/FPD satisfait les exigences thermiques et mécaniques des matériaux de construction comme les bétons structurels et isolants, selon la classification fonctionnelle de RILEM [29] (voir tableau III.4).

A partir des données présentées dans les tableaux III.3 et III.4, pour des teneurs en fibres de 5%, pour le composite MFPD_{mix}, la résistance à la compression et la conductivité thermique sont proche de 5 Mpa et $0.39\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, respectivement. Ces propriétés sont tout à fait comparables à celles des bétons de granulats légers comme des matériaux de structure et d'isolation ($R_c > 3.5\text{MPa}$, $k < 0.75\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Tableau .III.3: *Propriétés des composites.*

	MFPD ₆			MFPD ₃			MFPD _{mix}		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
R _c (Mpa)	2.82	2.56	2.67	2.75	1.83	1.44	5.36	1.52	2.64
k (W.m ⁻¹ . K)	0.63	0.43	0.22	0.39	0.24	0.14	0.39	0.24	0.14
ρ(kg/m ³)	1427	1356	1254	1476	1374	984	1471	1349	1293

Tableau. III.4: *Classification fonctionnelle de béton léger [29]*

	Béton de granulats légers		Béton cellulaire autoclavé	
	Classe II	Classe III	Classe II	Classe III
	Structurel et isolant	isolant	structurel et isolant	isolant
R _c (Mpa)	> 3.5	> 0.5	> 2.5	> 0.5
k(W.m ⁻¹ . K ⁻¹)	< 0.75	< 0.30	< 0.75	< 0.3

Pour les teneurs en fibres de 5%, 10%, 15%, pour MFPD₆, les propriétés des composites satisfont aux exigences mécaniques et thermiques de béton autoclavé, en tant que matériaux de structure et d'isolation (R_c > 2.5Mpa, k < 0.75 W. m⁻¹.K⁻¹).

Les autres composites peuvent être utilisés comme isolants porteurs, avec R_c > 0.5Mpa et k < 0.30 W.m⁻¹.K⁻¹.

Ainsi, en conclusion, la teneur en fibres optimale se situe dans la gamme [5 % - 15 %]. Pour ces teneur en fibres, la résistance mécanique et la conductivité thermique sont compatibles avec l'utilisation des composites étudiés dans le domaine de l'isolation thermique des bâtiments. On peut dire que le mortier renforcé de FPD satisfait les exigences mécaniques et thermiques des matériaux de construction, et il pourrait être utilisé pour les murs et autres éléments de construction.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté le comportement thermophysique, mécanique et l'absorption de différents composites à base de mortier et de fibres de palmier dattier. L'influence de différents facteurs sur ces propriétés, comme la concentration et la taille de fibres et l'humidité, a été discutée. Dans un premier temps, les propriétés thermophysiques et mécaniques des biocomposites ont été mesurées et analysées. L'essai de l'absorption de composites a été également effectué. Nous avons conclu que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la concentration de fibres, tandis que l'effet de leur taille sur les propriétés thermiques est moins significatif. La conductivité thermique des composites est fortement influencée par l'absorption d'eau.

Pour les propriétés mécaniques, nous avons constaté que l'ajout de fibres de palmier dattier a un effet défavorable sur les résistances à la compression de composites, il conduit à la diminution de ces dernières. Cependant, des valeurs de résistance mécanique intéressantes ont été obtenues à des concentrations faibles de fibres (5%, 10% et 15%) et les valeurs obtenues sont compatibles avec l'utilisation de ces matériaux comme des isolants porteurs.

En effet, pour une concentration de fibres inférieure à 15%, les composites satisfont aux exigences thermiques et mécaniques des matériaux de construction et ils pourraient être utilisés comme nouveaux matériaux biocomposites pour l'efficacité énergétique dans les bâtiments.

Références

- [1] A. Govin, "Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment - Modification de l'hydratation du ciment par le bois," Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet de saint Etienne, 2004, pp. 216.
- [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] J. Khazaei, "Water absorption characteristics of three wood varieties," *Cercetări Agronomice în Moldova*, vol. 134, 2008.
- [4] S. J. F. Pacheco-Torgal, "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review,," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 575-581, 2011.
- [5] V. Agopyan, H. Savastano Jr, V.M. John, and and M. A. Cincotto, "Developments on vegetable fibre-cement based materials in: São Paulo, Brazil: an overview,," *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, pp. 527-536, 2005.
- [6] Z. Li, X. Wang, and L. Wang, "Properties of hemp fibre reinforced concrete composites,," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, pp. 497–505, 2006.
- [7] H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, and M.O.W. Richardson, "Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites,," *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 1674–1683., 2007.
- [8] S. Migneault, A. Koubaa, F. Erchiqui, A. Chaala, K. Englund, and M. P. Wolcott, "Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites," *Composites: Part A*, vol. 40, pp. 80-85, 2009.
- [9] 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. 209.
- [10] D. Taoukil, A. Albouardi, T. Ajzoul, and H. Ezbakhe, "Caractérisation mécanique et hydrique d'un béton allégé avec les résidus de bois," *revue internationale d'héliotechnique*, n° 43, pp. 1-7, 2011.

- [11] D. Taoukil, A. Albouardi, T.Ajzoul, and and A. H. Ezbakhe, "Effect of the incorporation of wood wool on thermophysical properties of sand mortars, KSCE," *Journal of Civil Engineering*, vol. 16, pp. 1003-2010, 2012.
- [12] A. Korjenic, V. Petranek, J. Zach, and J. Hroudova, "Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 2518-2523, 2011.
- [13] M. bederina, T. Bouziani, and M.M.khenfer, "Absorption de l'eau et son effet sur la durabilité des bétons de sable allégés par ajout de copeaux de bois," *INVACO2 : Séminaire International, Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction, Université Amar Téliidji, Laghouat,Algérie, 23-25 Novembre 2011*.
- [14] F. Z. Aouadja, M. Mimoune, and and M. Laquerbe, "Etude experimentalesur les bétons à base de résidus de bois," *Revue Algérie-Equipement*, pp. 24-27, 1995.
- [15] J. Khedari, B. Suttisonk, N. Pratinthong, and J. Hirunlabh, "New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity,," *Cement&Concrete Composites*, vol. 23, pp. 65-70, 2001.
- [16] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and and M. Fois, "Renewablematerials to reduce buildings heat loss: characterization of date palm wood,," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [17] A. Ledhem, R.M. Dheilily, M.L Benmalek, and and M. Quéneudec, "Properties of wood-based composites formulated with aggregate industry waste,," *Construction and Building Materials*, vol. 14, pp. 341-350, 2000.
- [18] D.K. Panesar and B. Shindman, "The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork," *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, pp. 982-992, 2012.
- [19] F. Barreca and C. R. Fichera, "Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation," *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 507-513, 2013.
- [20] M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M.M. Khenfer, A. Bali, and M. Quéneudec, "Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 662-668, 2007.

- [21] K. Al Rim , A. Ledhem , O. Douzane, R.M. Dheilily, and M. Queneudec, "Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites,," *Cement & Concrete Composites*, vol. 21, pp. 269-276, 1999.
- [22] J. Khedari, N. Nankongnab, J. Hirunlabh, and S.Teekasap, " New low-cost insulation particle boards from mixture of durian peel and coconut coir,," *Building and Environment*, vol. 39, pp. 59-65, 2004.
- [23] J.-P. Oliva, *L'isolation écologique : conception, matériaux, mise en œuvre, terre vivante, mens, France*, 2007.
- [24] V. Cerezo, "Propriétés mécaniques,thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales:approche expérimentale et modélisation théorique," Thèse de Doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, pp. 226.
- [25] S. Mounir, Y. Maaloufa, A. b. Cherki, and A. Khabbazi, "Thermal properties of the composite material clay/granular cork," *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 183-190, 2014.
- [26] A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M.M. Khenfer, and M. Chabannet, "Mechanical propertiesof date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dryclimate,," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, pp. 554-564, 2005.
- [27] F. Parres, J.E. Crespo-Amorós, and A. Nadal-Gisbert, "Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires," *Construction and Building Materials*,, vol. 23, pp. 3182-3188, 2009.
- [28] A. Bouguerra, A. Ledhem, F. de Barquin, R.M. Dheilily, and M. Quéneudec, "Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, ciment, and wood aggregates," *Cement and Concrete Research*, vol. 28, 1998.
- [29] RILEM, "Functional classification of lightweight concrete, Recommendation of RILEM LC 2," pp. 281–283, 1978.

Chapitre IV : Modélisation théorique et numérique de la conductivité thermique des composites

I. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents modèles théoriques et numériques utilisés pour déterminer la conductivité thermique des matériaux hétérogènes. Il est composé de deux parties, dans la première partie, on s'intéresse aux modèles théoriques. La deuxième partie est dédiée à la présentation d'une synthèse sur les modèles numériques, ainsi qu'une discussion des modélisations numériques de plusieurs auteurs, sera présentée.

II. Modèles théoriques et numériques pour la prédiction de la conductivité thermique des composites

La conductivité thermique est une propriété importante dans de nombreuses applications des matériaux composites, par exemple, dissipateur de chaleur, disque de frein des trains et des voitures, etc. [1]. De ce fait, l'information sur la conductivité thermique des matériaux est nécessaire pour déterminer les conditions optimales pendant le traitement des matériaux et analyser le transfert de chaleur dans les matériaux au cours des applications pratiques [2].

La conductivité thermique effective des matériaux composites est une fonction complexe de leur géométrie, de la conductivité thermique des différentes phases, de la répartition des inclusions dans le milieu, et du contact entre l'inclusion et de la matrice [3, 4].

En effet, la modélisation de la conductivité thermique effective de matériaux hétérogènes est d'un grand intérêt dans de nombreuses applications de transfert de chaleur. Pour cela, des différents modèles analytiques et numériques qui peuvent être utilisés pour déterminer la conductivité thermique des composites sont présentés dans les sections suivants.

II.1. Modèles théoriques

Les études théoriques sur la conductivité thermique effective des composites ont été poursuivies pendant plus de 100 ans [1]. De nombreux modèles théoriques et semi-empiriques ont été proposés pour prévoir la conductivité thermique effective des composites à deux composants [5-10].

Les modèles théoriques de prédiction de la conductivité thermique se divisent en quatre grandes familles, les modèles de premier ordre, le deuxième ordre, le troisième et quatrième ordre [11]. Cette classification a été développée pour des matériaux composites définis comme des matériaux à deux phases (solide-solide) comportant des inclusions (phase 2) dispersées dans la matrice (phase 1). Le gradient de température ainsi que le flux thermique dans le matériau sont isotropes.

Les principales théories utilisent un développement mathématique basé sur plusieurs critères essentiels:

- 1- Les phases des constituants sont macroscopiquement isotropes et homogènes.
- 2- Les inclusions sont toutes de même forme.
- 3- Il y a un contact parfait entre les deux phases.
- 4- Le composite est constitué de deux phases non poreuses.
- 5- Les phénomènes de transfert par convection et rayonnement sont négligés (milieu non poreux et opaque).

Pour les modèles de premier ordre, en 1912, O. Wiener [11, 12] propose des équations qui donnent une valeur de la conductivité thermique effective de deux milieux et cela en appliquant l'analogie électrique pour un circuit série ou parallèle dans le cas d'un problème de transfert thermique dans un matériau hétérogène. Les deux phases sont supposées arrangées parallèlement l'une à l'autre. La conductivité thermique effective est alors bornée par les deux valeurs k_{inf} et k_{sup} .

Le modèle de second ordre prend en considération la perturbation entre les phases du composite et la géométrie des inclusions (sphère, cylindre, fibre,...), et introduit dans les modèles un facteur relatif à la géométrie. On peut citer dans cette catégorie ; le modèle de Bruggemen, le modèle de Hatta et Taya, le modèle de Hashin et Shtrikman, ..., etc.

Le modèle de troisième et quatrième ordre prend lui aussi en compte la perturbation entre les phases du composite et la géométrie des inclusions. Ils font apparaître un terme relatif à une fonction statistique de répartition.

Il existe d'autres modèles pour prédire la conductivité effective des composites, ce sont les modèles semi-empiriques. Parmi les modèles semi-empiriques les plus utilisés, le modèle de Nielsen et Lewis.

Un autre modèle basé sur l'homogénéisation auto cohérente a été utilisé par plusieurs auteurs [13-15] pour déterminer la conductivité thermique des composites. Le principe est d'assimiler un matériau hétérogène à un matériau homogène équivalent dont on doit déterminer les caractéristiques. Ce matériau homogène doit avoir le même comportement thermique global, répondre aux mêmes conditions aux limites que le milieu hétérogène et respecter le principe de conservation de l'énergie entre le milieu hétérogène et le milieu homogénéisé.

Parmi ces modèles, on présente quelques modèles utilisés dans notre étude comme suit:

II.1.1. Modèle de Hashin et Shtrikman

Hashin et Shtrikman ont développé un modèle de prédiction de la conductivité thermique effective pour les matériaux composites macroscopiquement homogène, isotrope et constitués de deux phases [16]. La conductivité thermique s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{k_{eff}}{k_m} = \frac{1 + (d-1)\varphi_{ch}\beta}{1 - \varphi_{ch}\beta} \quad (IV.1)$$

$$\beta = \frac{k_{ch} - k_m}{k_{ch} + (d-1)k_m} \quad (IV.2)$$

Avec, d : représente la dimension du système et définit la forme des charges dans le cas d'une dispersion sphérique ($x = y = z$) $d = 3$, pour les cylindres $d = 2$ et donnée par l'équation (IV.3) dans le cas d'une ellipse.

$$d = \left(\frac{(1/x) + (1/y) + (1/z)}{(1/x)} \right) \quad (IV.3)$$

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

φ_{ch} : La concentration volumique de la charge.

k_{ch}, k_m : Les conductivités thermiques de la charge et de la matrice, respectivement.

II.1.2. Modèle de Hatta et Taya

Hatta et Taya ont développé un modèle de prédiction de k_{eff} pour des composites avec des fibres courtes de différentes orientations. Le principe de ce modèle est basé sur l'analyse d'une valeur équivalente de la conductivité thermique d'échantillon en régime stationnaire. Cette approche prend en compte la forme et les interactions entre les inclusions de différentes orientations [17]. La solution finale selon Hatta et Taya pour l'estimation de la conductivité thermique de ce type de composite est donnée par l'équation suivante :

$$k_{eff} = k_m \left(1 - \frac{\varphi_{ch} (k_{ch} - k_m) [(k_{ch} - k_m)(2S_{33} + S_{11}) + 3k_m]}{3(k_{ch} - k_m)^2 (1 - \varphi_{ch}) S_{11} S_{33} + k_m (k_{ch} - k_m) R + 3(k_m)^2} \right) \quad (IV.4)$$

Où S_{ij} est un facteur spécifique à la géométrie des inclusions et R est donné par :

$$R = 3(S_{11} + S_{33}) - \varphi_{ch}(2S_{11} + S_{33}) \quad (\text{IV.5})$$

Si les inclusions sont des fibres, ou cylindres, alors : $S_{11} = S_{22} = \frac{1}{2}$, $S_{33} = 0$

II.1.3. Modèle de Nielsen

Lewis et Nielsen ont modifié et ont adapté l'équation de Halpin-Tsai y compris l'effet de la forme des particules, l'orientation et le type de compactage de ces particules [18]. Ils ajoutent aussi dans le modèle un paramètre lié à l'effet maximal de compactage (ou de l'empilement) φ_{\max} des inclusions. Le modèle semi empirique de Nielsen s'écrit:

$$\frac{k_{eff}}{k_m} = \frac{1 + AU\varphi_{ch}}{1 - \psi U\varphi_{ch}} \quad (\text{IV.6})$$

Avec,

$$U = \frac{\frac{k_{ch}}{k_m} - 1}{\frac{k_{ch}}{k_m} + A} \quad (\text{IV.7})$$

$$\psi = 1 + \left(\frac{1 - \varphi_{\max}}{\varphi_{\max}^2} \right) \varphi_{ch} \quad (\text{IV.8})$$

φ_{\max} : représente la fraction volumique maximale de l'empilement des inclusions.

Le coefficient A dépend de la géométrie et de l'orientation des particules ; Nielsen donne des valeurs de A pour différents types d'inclusions (voir le tableau IV.1):

Tableau IV.1 : Différents types d'inclusions données par Nielson [18].

Types d'inclusions	Direction du flux	A
Cubes	quelconque	2.0
Fibres aléatoires	quelconque	1.58
Collectif de sphères	quelconque	$3.5/(\varphi_{\max} - 1)$
Fibres	perpendiculaire	0.5

II.1.4. Modèles par homogénéisation auto-cohérente (HAC)

Le modèle d'homogénéisation auto-cohérente permet l'estimation de la conductivité thermique des matériaux hétérogènes sur la base de la connaissance de la conductivité thermique de chaque composant et sa concentration.

Le matériau homogène est assimilé à un ensemble d'inclusions composites sphériques de taille variable [13-15]. Cette approche a été développée pour la caractérisation mécanique (élasticité et élastoplasticité) de matériaux hétérogènes et a été utilisé par Arnaud et al.[19] sur le chanvre en vrac, les bétons de chanvre et la laine de chanvre. Une autre application a été récemment mise en place pour les bétons lignocellulosiques.

Bouderina et al. [15] ont appliqué le HAC pour prédire la conductivité thermique de béton renforcé par les copeaux de bois. Cette application révèle une bonne correspondance avec les résultats expérimentaux. Selon A. Benazzouk et al. [14], la conductivité thermique de ciment renforcé de caoutchouc a été prédite, en utilisant le modèle HAC. Ils ont montré également une bonne correspondance de ce modèle avec les résultats expérimentaux. Bien que, le modèle de calcul considère la forme sphérique des particules qui est toutefois pas le cas pour les matériaux composites et les inclusions de caoutchouc ne sont pas composés uniquement des particules; ils contiennent aussi une proportion de fibres avec une orientation aléatoire dans la matrice. Néanmoins, l'approche de modèle tricomposite est suffisamment précise pour prédire l'influence des particules de caoutchouc sur la conductivité thermique des composites. Une autre application de ce modèle a été effectuée sur le béton de chanvre par V. Cerezo [13], il a constaté que les valeurs théoriques de la conductivité thermique sont très cohérentes avec les différentes mesures expérimentales. L'écart entre les valeurs théoriques et expérimentales est inférieur à 10%. Cet écart peut s'expliquer selon V. Cerezo par des imprécisions expérimentales. Il a conclu que le modèle HAC possède un caractère satisfaisant prédictif de la conductivité thermique du béton de chanvre.

Généralement le modèle HAC est constitué d'une inclusion sphérique plongée dans une matrice infinie qui possède les propriétés homogénéisées recherchées.

D'après la littérature, le modèle d'homogénéisation auto cohérente (HAC) est développé pour les cas suivants [13, 15]:

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

Dans le cas d'un matériau constitué d'inclusions simples, le modèle géométrique est constitué d'une inclusion sphérique de rayon R_1 et du matériau homogène soumis à un gradient de température uniforme unitaire \mathbf{G} à l'infini (voir la figure IV.1).

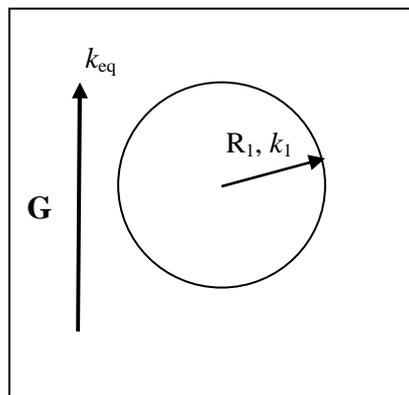


Figure IV.1 : Inclusion sphérique simple soumis à un gradient G unitaire

Le champ de température solution de l'équation de chaleur en coordonnées sphériques est de la forme :

$$T_i = \left(A_i r + \frac{B_i}{r^2} \right) \cos \theta \quad (i=1, eq) \quad (IV.9)$$

Ce qui donne un flux thermique dans chaque phase i de la forme [20]:

$$\phi_i(r, \theta) = -k_i \left[\left(A_i - \frac{2B_i}{r^3} \right) \cos \theta - \left(A_i + \frac{B_i}{r^3} \right) \sin \theta \right] \quad (IV.10)$$

Les conceptions aux limites imposent que :

Si, $r=0$ T_1 est finie donc $B_1=0$

Si, $r=\infty$ $(\overline{grad})_{eq}$ tend vers G donc $A_{eq}=1$

Si, $r=R_1$, T est continue donc $\frac{B_{eq}}{R_1^2} + R_1 = A_1 R_1$

Si, $r=R_1$, le flux ϕ_i est continue donc $k_{eq}(1 - \frac{2B_{eq}}{R_1^3}) = k_1 A_1$

On obtient donc un système de deux inconnues A_1 et B_1 , dont la solution est :

$$A_1 = \frac{3k_{eq}}{k_1 + 2k_{eq}} \quad (IV.11)$$

$$\frac{B_1}{R_1^3} = \frac{k_{eq} - k_1}{k_1 + 2k_{eq}} \quad (IV.12)$$

Ensuite, on suppose que le milieu est constitué de deux types d'inclusions simples 1 et 2 de concentrations volumiques φ_1 et φ_2 , telles que $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$

La conservation de flux dans l'ensemble du matériau s'écrit :

$$k_{eq}(gradT)_{eq} = \varphi_1 k_1 (gradT)_1 + \varphi_2 k_2 (gradT)_2 \quad (IV.13)$$

En considérant que les deux inclusions sont soumises au même gradient de température à l'infini :

$$(gradT)_{eq} = \varphi_1 (gradT)_1 + \varphi_2 (gradT)_2 \quad (IV.14)$$

On déduit donc la relation suivante :

$$k_{eq}(\varphi_1 (gradT)_1 + \varphi_2 (gradT)_2) = \varphi_1 k_1 (gradT)_1 + \varphi_2 k_2 (gradT)_2 \quad (IV.15)$$

Soit :

$$k_{eq}(\varphi_1 A_1 + \varphi_2 A_2) = k_1 \varphi_1 A_1 + k_2 \varphi_2 A_2 \quad (IV.16)$$

D'où

$$\varphi_1 \frac{k_1 - k_{eq}}{k_1 + 2k_{eq}} + (1 - \varphi_1) \frac{k_2 - k_{eq}}{k_2 + 2k_{eq}} = 0 \quad (\text{IV.17})$$

On pose les paramètres suivants : $\alpha = \frac{k_{eq}}{k_2}$, $\beta = \frac{k_1}{k_2}$

On obtient l'équation du second ordre suivant :

$$2\alpha^2 + \alpha(3\varphi_1 - 2 + \beta(1 - 3\varphi_1)) - \beta = 0 \quad (\text{IV.18})$$

La résolution de ce système permet de déduire k_{eq} . Dans le cas où k_1 est très faible devant k_2 (comme le cas de l'air), l'équation (IV.18) devient :

$$2\alpha^2 + \alpha(3\varphi_1 + 2) = 0 \quad (\text{IV.19})$$

Donc,

$$k_{eq} = (1 - \frac{3}{2}\varphi_1)k_2 \quad (\text{IV.20})$$

➤ Cas de HAC avec des inclusions bicomposites

Dans ce cas, le matériau composite est composé de deux constituants, un constituant 1 modélisé par une sphère de rayon R_1 , de conductivité k_1 , et de masse volumique, ρ_1 , entouré d'un constituant 2 de caractéristiques R_2 , k_2 , ρ_2 . Cette inclusion biocomposite est entourée d'une matrice de matériau homogène équivalent de caractéristiques k_{eq} et ρ_{eq} (voir la figure IV.2).

Même conditions dans le cas des inclusions simples :

- Le milieu est soumis à un gradient de température uniforme unitaire \mathbf{G} à l'infini.
- Le champ de température solution est de la forme de l'équation (IV.9).

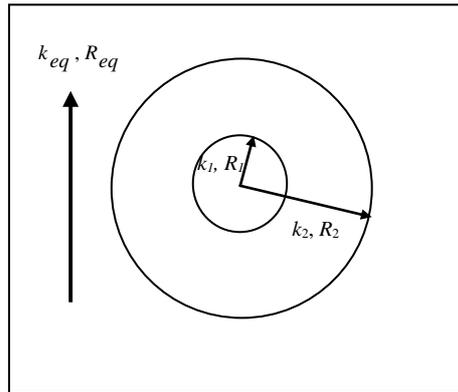


Figure IV.2 : Schéma de la cellule avec deux composants

L'équation de la chaleur est résolue en respectant les conditions aux limites c'est-à-dire, la continuité des flux et des températures aux deux interfaces. La conductivité thermique équivalente est donnée par la relation [13, 15]:

$$k_{eq} = k_2 \left(1 + \frac{\varphi}{\frac{1-\varphi}{3} + \frac{1}{\frac{k_1}{k_2} - 1}} \right) \quad (\text{IV.21})$$

φ : C'est la concentration volumique du constituant "1"

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

Dans le cas d'un matériau hétérogène composé de trois constituants, le modèle est constitué d'une sphère interne d'air (k_1, ρ_1), entourée d'une cellule sphérique de renfort (k_2, ρ_2), et elle aussi entourée par une enveloppe de la matrice (k_3, ρ_3), le tout étant plongé dans le matériau composite homogène équivalent dont les propriétés sont recherchées (voir la figure IV.3).

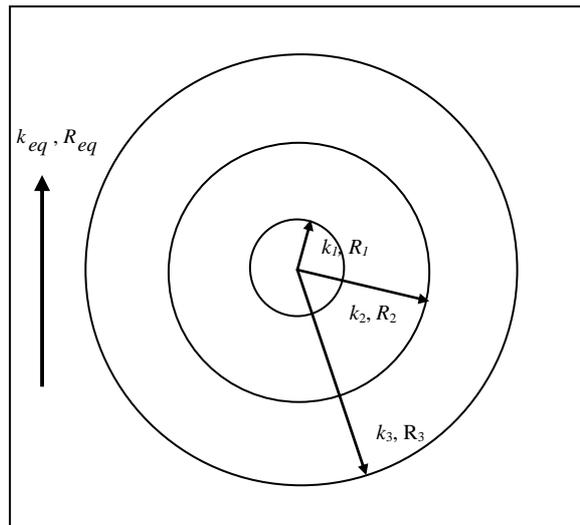


Figure IV.3 : Schéma de la cellule tri-composite

La même méthode peut être appliquée dans le cas d'une inclusion sphérique tricomposite avec les phases 1, 2, et 3.

La conductivité thermique équivalente k_{eq} du composite de la masse volumique ρ_{eq} est donnée par [13, 14]:

$$\frac{k_{eq}}{k_3} = \frac{\varphi}{\left(\frac{1-\varphi}{3}\right) + \frac{1 + \frac{\delta}{3}\left(\frac{k_1}{k_2} - 1\right)}{\frac{k_1}{k_3} - 1 - \frac{\delta}{3}\left(\frac{k_1}{k_2} - 1\right)\left(\frac{2k_2}{k_3} + 1\right)}} \quad (\text{IV.22})$$

Avec,

φ , et δ sont les concentrations volumiques de renfort et de la matrice respectivement.

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

II.2. Modèles numériques

Le développement des méthodes numériques a ouvert des champs d'applications très divers et plus particulièrement celui de la détermination des caractéristiques des matériaux hétérogènes.

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)[21, 22].

Au cours de ces dernières années, la méthode des éléments finis (FEM) a été souvent utilisée pour étudier le transfert de chaleur dans les matériaux composites [23].

La méthode FEM est une méthode générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique: problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions [24].

II.2.1. Modélisation numérique en deux dimensions

Eric W. Tiedje et al. [25], ont étudié l'influence de la forme et de l'orientation des particules sur la conductivité 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 examinées : une seule particule (figure IV.4) et plusieurs particules (Figure IV.5). 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.

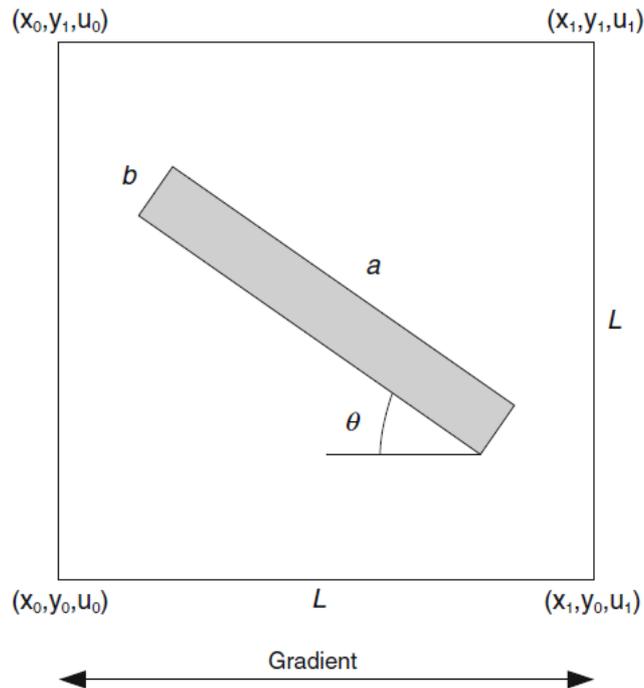


Figure IV. 4: Représentation schématique d'une simulation de composite de particule unique, rectangulaire [25].

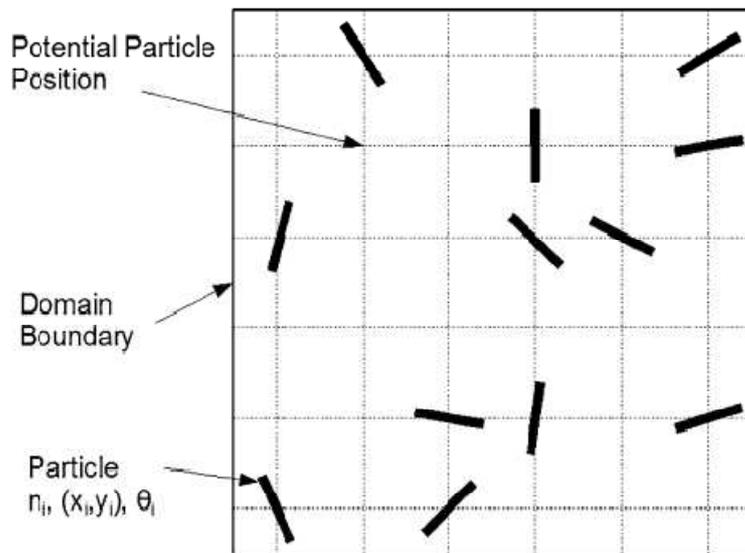


Figure IV.5: Illustration du système de distribution de particules [25].

La simulation d'Eric W. Tiedje et al.[25], 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. [26], les conductivités thermiques ont également été estimées par une méthode des éléments finis en utilisant le logiciel ABAQUS®. Les deux maillages choisis pour cette étude sont présentés sur la Figure IV.6; l'un représente le cas où l'orientation des particules de chènevotte est selon une direction donnée (Figure IV.6 a) et l'autre matérialise une orientation aléatoire en 2D (Figure IV.6 b).

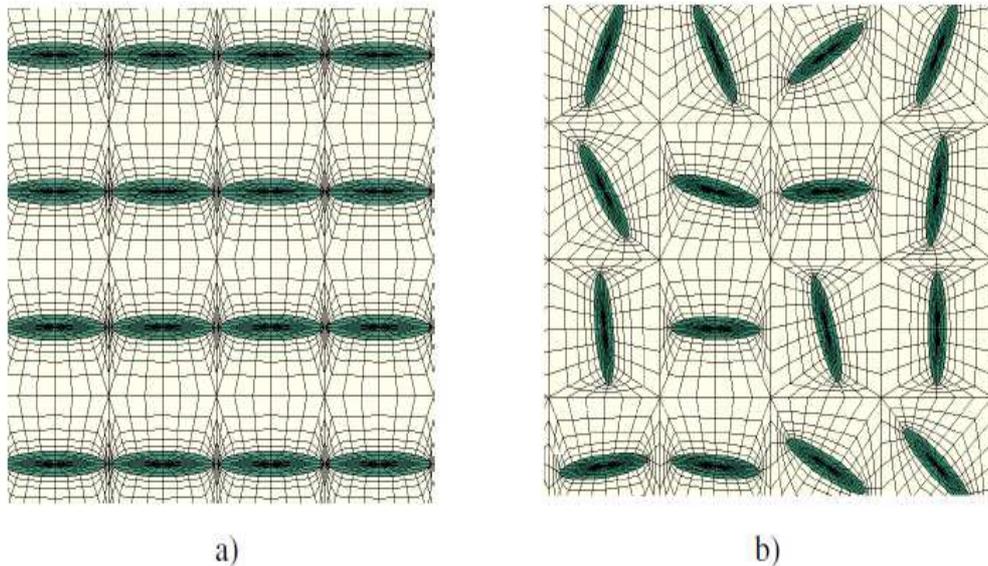


Figure IV.6: Maillages utilisés pour les résolutions par éléments finis : (a) orientation unidirectionnelle alignée ; (b) orientation aléatoire en 2D [26].

Pour une orientation parfaitement alignée (Figure IV.6a), la conductivité longitudinale, selon la direction principale des particules, et la conductivité transversale, selon la direction orthogonale à la précédente, sont calculées. Pour toutes ces configurations, la matrice est composée de 400 inclusions.

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. IV.7). Les résultats obtenus ont été également comparés aux résultats expérimentaux et aux estimations du comportement obtenu par 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.

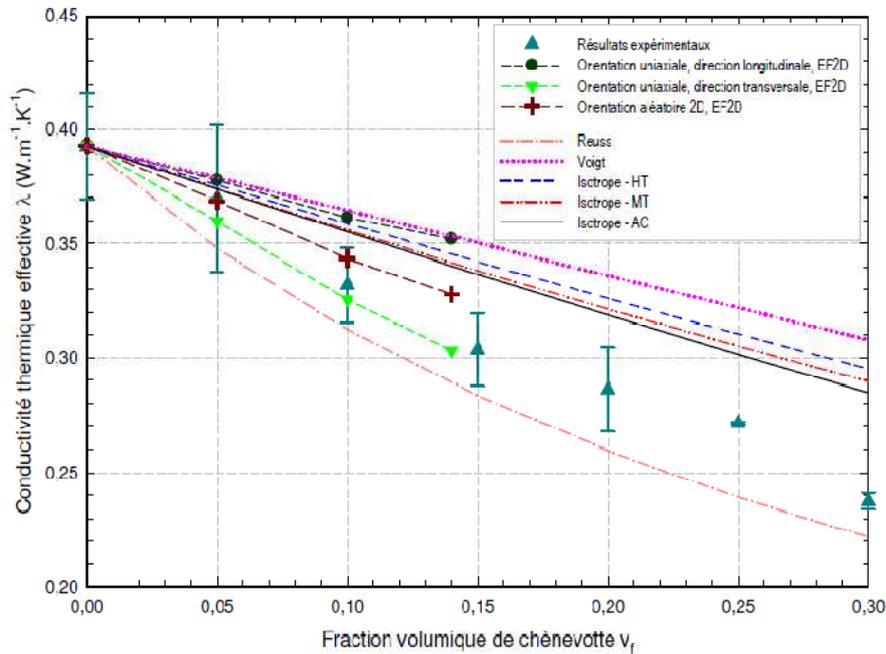


Figure. IV.7: Prédictions des conductivités thermiques du béton de chanvre en fonction de la fraction volumique de chanévotte [26].

II.2.2. Modélisation numérique en trois dimensions (3D)

W.-Z. Cai et al. [27], 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.

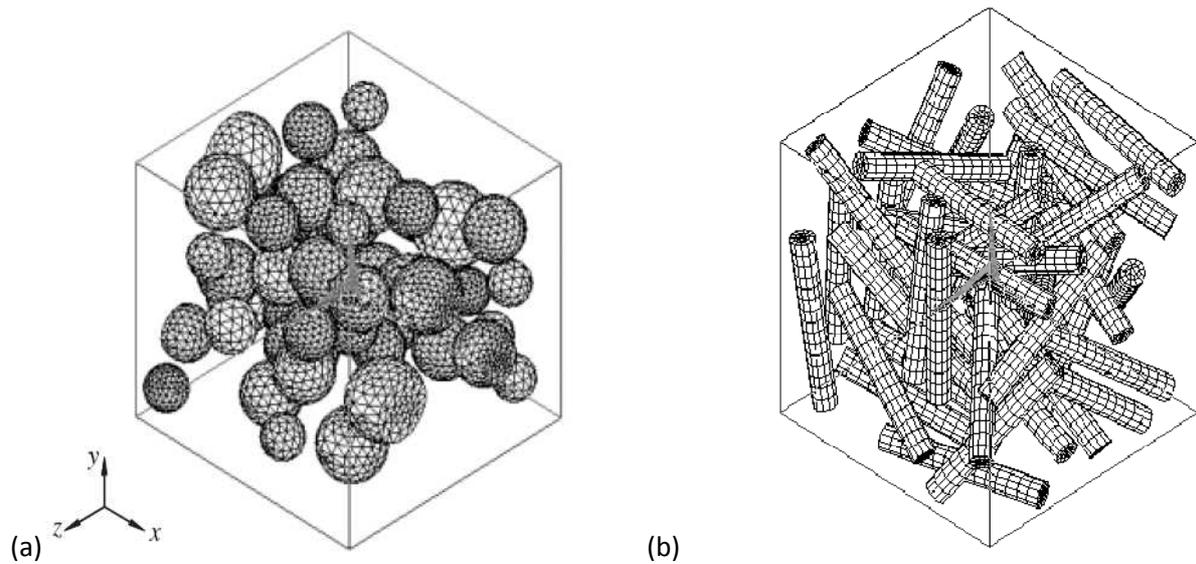


Figure IV.8: Exemples de modèles numériques en 3D avec une distribution quelconque de charges : (a) charges sphériques (b) fibres courtes [27].

La méthode EFM est capable de représenter systématiquement les caractéristiques micro-structurales des composites en tenant en compte de la fraction volumique en charges, de l'interaction entre les charges, de la géométrie, de l'orientation et de la dispersion des charges.

W.-Z. Cai et al. [27] 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 IV.9 où les valeurs numériques de la conductivité thermique effective ont été comparées aux valeurs expérimentales et aux modèles théoriques existants.

D'après la figure IV.9, 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 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.

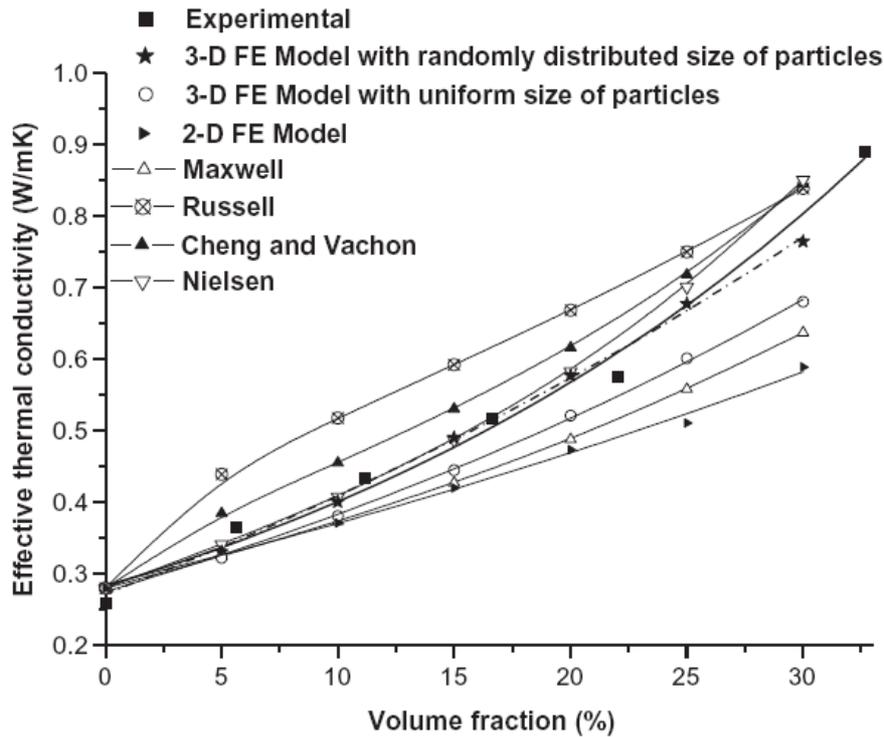


Figure IV.9. Comparaison des résultats numériques, des modèles théoriques et des valeurs expérimentales de la conductivité thermique effective du composite PTFE chargé avec du graphite [27].

Selon les études de Yibin Xu et al.[1], 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 IV.10).

Ils ont constaté d'après leur étude que les valeurs numériques de la conductivité thermique sont en bon accord avec les mesures expérimentales et le modèle analytique. Ils ont conclu aussi 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.

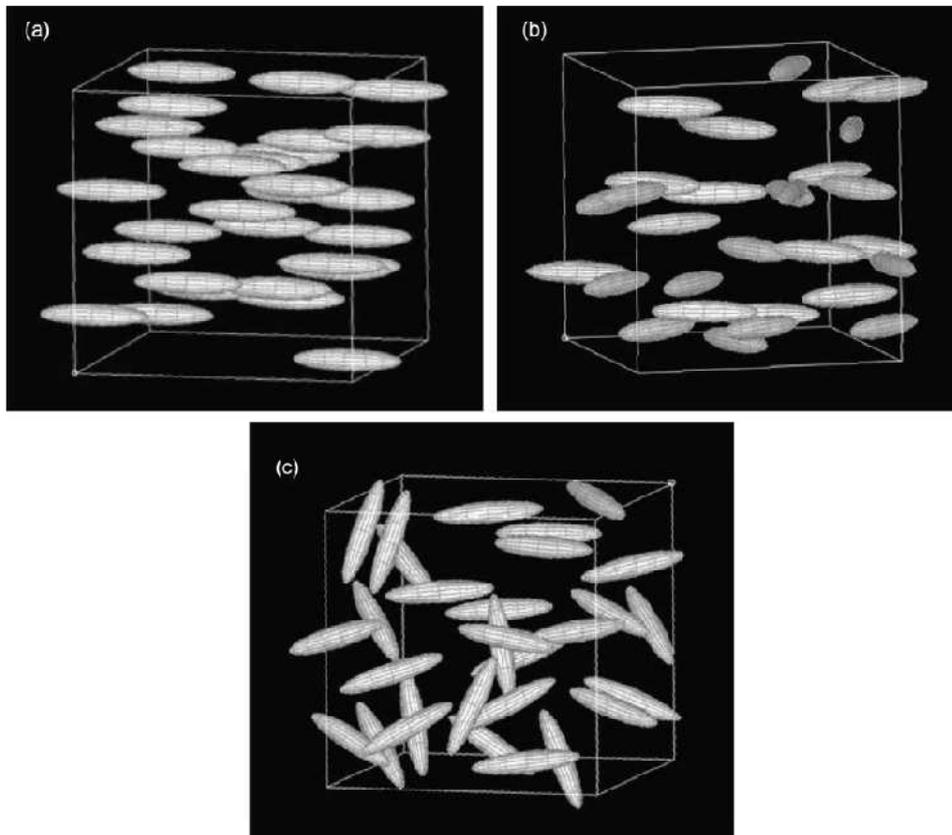


Figure IV.10: Modèles géométriques de composites générés automatiquement [1].

Une analyse par éléments finis en trois dimensions est développée par Öchsner et al.[28] 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 [28], la conductivité thermique des composites est fortement influencée par la concentration des charges et le type d'arrangement.

Les auteurs de [29] ont effectué une analyse numérique tridimensionnelle (3D) en utilisant le logiciel Comsol, pour déterminer la conductivité thermique effective des sphères de verre argentées dispersées dans une matrice d'éthylène-acétate de vinyle. La modélisation a été établie pour trois cellules élémentaires; cubique simple (SC), cubique centré (BCC), et cubique à faces centrées (FCC). L'effet de la résistance thermique de contact d'inclusion/matrice et le

rapport entre la conductivité thermique de la charge et celle de la matrice ont été pris en considération. Les détails de cette modélisation seront présentés dans le chapitre V.

Dans le chapitre V, nous allons établir une autre étude numérique tridimensionnelle (3D), pour déterminer la conductivité thermique de mortier renforcé par les fibres de bois de palmier. Notre choix s'est porté sur le logiciel Comsol Multiphysiques. En effet, cet outil de modélisation 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, 2D, 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. Par défaut le maillage est automatique et se compose de triangle en 2D et de tétraèdre en 3D. Les différentes étapes du processus de modélisation la définition de la géométrie, les propriétés des matériaux, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats sont intégrés dans une seule interface [30].

III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modèles théoriques et numériques qui peuvent être utilisés pour la détermination de la conductivité thermique des composites. Plusieurs modèles théoriques ont été proposés pour prédire la conductivité thermique des matériaux hétérogènes. Néanmoins, ces modèles parfois, ne sont pas valables surtout pour les 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, dans le chapitre suivant nous présentons une étude numérique effectuée sur un composite à base de mortier et des fibres de palmier dattier, et un autre composite d'une matrice polymère renforcée par les sphères de verre argentées, en utilisant le logiciel Comsol basé sur la méthode des éléments finis.

Références

- [1] 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.
- [2] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications,," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 251–283, 2003.
- [3] R. Pal, "On the Lewis–Nielsen model for thermal/electrical conductivity of composites,," *Composites: Part A*, vol. 39, pp. 718–726, 2008.
- [4] M. Wang, Q. Kang, and N. Pan, "Thermal conductivity enhancement of carbon fiber composites," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 418–421, 2009.
- [5] T. N. G. Tsao, "Thermal conductivity of two phase materials," *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 53, pp. 395-397, 1961.
- [6] S.C. Cheng and R. Vachon, "The prediction of the thermal conductivity of two and three phase solid heterogeneous mixtures," *International Journal. Heat Mass Transfer*, vol. 12, pp. 249-264, 1969.
- [7] J. C. Halpin, "Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 3, pp. 732-734, 1969.
- [8] M. chikhi, B. Agoudjil, M. Haddadi, and A. Boudenne, "Numerical modelling of the effective thermal conductivity of heterogeneous materials," *Journal of Thermoplastic Composite materials*, 2011.
- [9] A.Boudenne, L. Ibos, and Y. Candau, "Chapter : thermophysical properties of multiphase polymer systems, handbook of multiphase polymer systems (eds A.boudene,L.Ibos, Y.Candau and S.Thomas)," *John wiley and Sons, Ltd, Chichester,UK*, 2011.
- [10] T. Lewis and L.Nielsen, "Dynamic Mechanical Properties of Particulate-Filled Composite," *journal of polymer Science*, vol. 14, pp. 1449, 1970.
- [11] A. Boudenne, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère," thèse de Doctorat, Université Paris XII Val de Marne, 2003, pp. 163.
- [12] J. T. Mottram and R. Taylor, "Thermal Transport Properties," *International Encyclopaedia of Composite*, vol. 5, 1991.

- [13] V. Cerezo, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique," Thèse de Doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, pp. 225.
- [14] A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, and M. Quéneudec, "Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 573–579, 2008.
- [15] M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M. M. Khenfer, A. Bali, and M. Quéneudec, "Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 662-668, 2007.
- [16] 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.
- [17] H. Hatta and M. Taya, "Effective thermal conductivity of a misoriented short fiber composite," *J. Appl. Phys*, vol. 58, pp. 2478-2486, 1985.
- [18] R. C. Progelhof, "Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: a review," *Polymer engineering and science*, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [19] L. Arnaud, H. Monnet, C. Cordier, and F. Sallet, "Modélisation par homogénéisation autocohérente de la conductivité thermique de béton et laines de chanvre," *In: Proceedings of the Congrès français de thermique, Elsevier Ed. A. Lallemand et J.F. Leone*, pp. 543-8, 15-17 mai 2000.
- [20] A. Brini, "Modélisation multi-échelles du comportement et du vieillissement des mousses syntactiques immergées," Thèse de Doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, 2004, pp. 217.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.

- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] W.-Z. Cai, S.-T. Tu, and G.-L. Tao, "Thermal Conductivity of PTFE Composites with Three-dimensional Randomly Distributed Fillers," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 18, pp. 241-253, 2005.
- [28] A.Ochsner and T.Fiedler, "Geometrical properties of hollow sphere structures," *Engineering Materials*, pp. 31-46, 2009.
- [29] 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.
- [30] M. chikhi, "Métrologie et modélisation des transferts dans les composites naturels a faible cout pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires," Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, 2014, pp. 142.

Chapitre V : Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les composites

I. Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter l'approche numérique suivie pour déterminer la conductivité thermique des composites renforcés avec des différentes inclusions, soit en cas des charges sphériques ou des fibres. L'effet de différents paramètres comme la résistance de contact, la distance entre les inclusions, la concentration de charge,...etc., sur la conductivité thermique des composites a été étudié. En effet, le présent chapitre est composé de deux parties.

Dans la première partie, on s'intéresse à la présentation de l'approche numérique et mathématique utilisée par le logiciel COMSOL software pour estimer la conductivité thermique de matériaux composites à matrice polymère (EVA) renforcée par des sphères de verre argentées.

La deuxième partie est consacrée à l'étude numérique effectuée sur le matériau composite à base de mortier et de fibres de palmier dattier.

Partie (1) : Prédiction de la conductivité thermique de composites EVA/S-3000S2M

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

Le but de cette partie est d'essayer de développer un modèle numérique qui peut être utilisé pour les composites de mortier renforcé par des charges sphériques, comme le bois de palmier dattier. Il est nécessaire donc d'étudier d'autres matériaux de géométries simples pour effectuer des comparaisons et élargir, par la suite, le champ d'application de ce modèle.

1. Equation de chaleur

L'équation régissant la conduction de la chaleur dans un milieu continu est obtenue en appliquant le principe de conservation de l'énergie thermique et s'écrit [1]:

$$k\nabla^2 T + P = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{V.1})$$

Avec,

k : Conductivité thermique du matériau ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

C : Chaleur spécifique, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

ρ : Masse volumique du matériau, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

P : Terme source de chaleur, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$

T : Champ de température dans le matériau, K

Si on considère les hypothèses suivantes :

- Il n'y a pas de production interne de chaleur, donc $P = 0$.
- L'étude numérique est réalisée en régime permanent, donc; $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$

On aboutit à l'équation finale :

$$k\nabla^2 T = 0 \quad (\text{V.2})$$

Cette équation n'a de solution que pour des conditions physiques définies aux frontières du milieu et des conditions connues à un certain instant initial. Ces conditions déterminent la distribution de la température en tout point et à tout instant.

Pour les conditions aux limites, on suppose l'existence d'un flux de chaleur à la surface du milieu (condition de Neumann), nous pouvons donc utiliser l'équation de Fourier pour décrire le transfert de chaleur :

$$\phi = -k \times \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{V.3})$$

2. Modélisation mathématique

Afin de modéliser le transfert conductif au sein du composite, nous considérons trois cellules élémentaires correspondant aux trois arrangements (cubique simple (SC), cubique centré (BCC) et cubique à faces centrées (FCC)).

Par symétrie, seulement un seizième de la cellule original (Figure V. 1b-d-c) pour les trois cellules élémentaires (SC, BCC, FCC) est utilisé.

La figure V.1(a) montre le modèle cubique simple. Au centre de la cavité cubique de dimension $(2 \times b)^3$ se place une sphère conductrice de rayon r . La face inférieure ($z = -b$) et la partie supérieure ($z = b$) sont isothermes de températures θ_1 et θ_2 , respectivement. Les faces latérales sont adiabatiques.

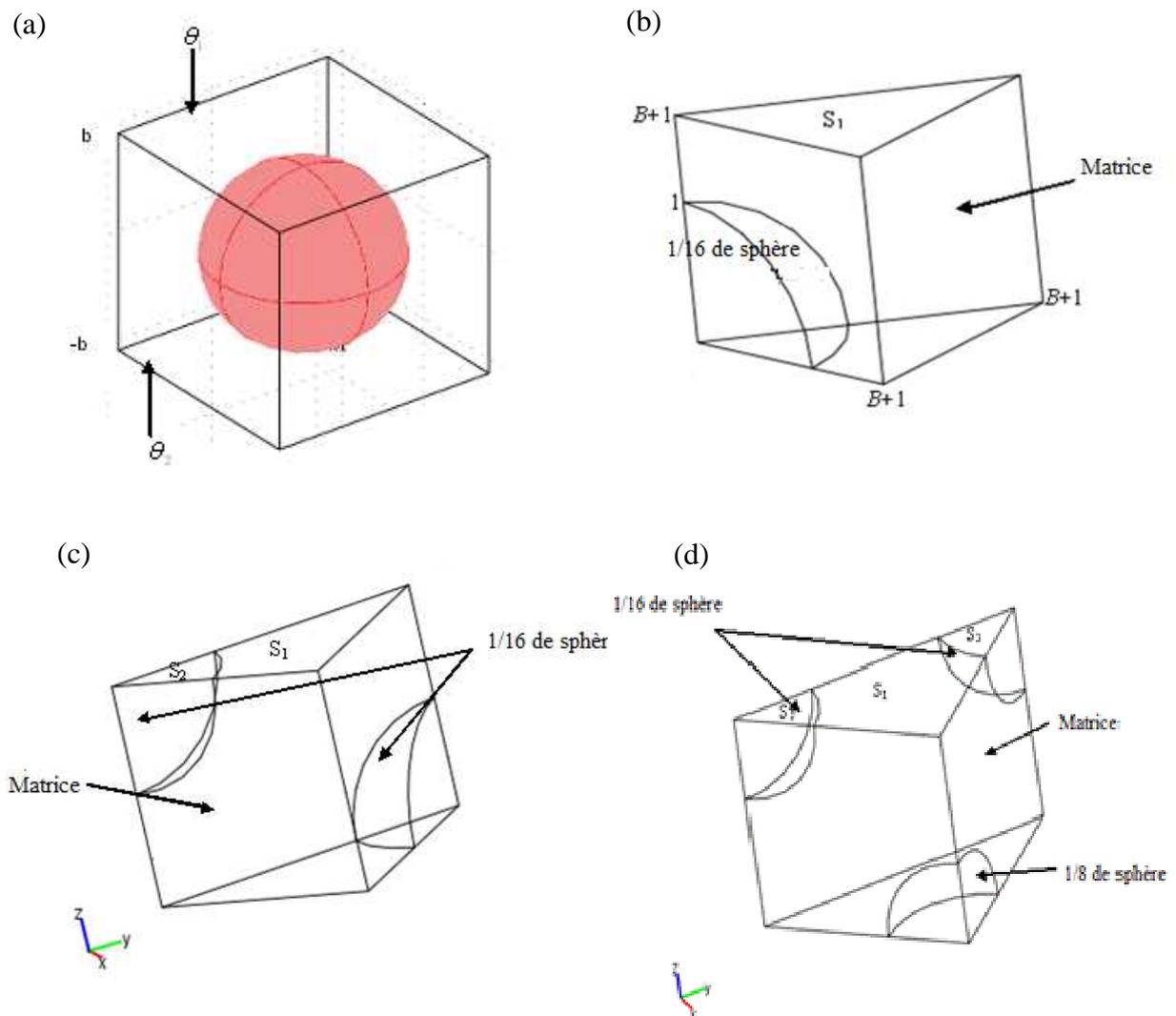


Figure V.1 : (a) modèle cubique simple, (b) cellule cubique simple (SC), (c) cellule cubique centrée (BCC), et (d) cellule cubique à faces centrées (FCC)

Afin de simplifier le problème et de réduire le temps de calcul, les grandeurs adimensionnelles sont définies comme suit [2].

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

$S = (2\tau - \theta_1 - \theta_2)/(\theta_1 - \theta_2)$, $T = (2\theta - \theta_1 - \theta_2)/(\theta_1 - \theta_2)$: Les températures de la charge et de la matrice.

$B = (2b - 2r)/2r$: Distance entre la charge et la matrice.

$D = k_m / k_{ch}$: Le rapport entre les conductivités thermiques des deux phases (la matrice et la charge).

$C = r_c k_m / r$: La résistance de contact réduite.

Avec,

r_c : La résistance de contacte, $m^2.K.W^{-1}$

$E = k_{eff} / k_m$: La conductivité thermique effective réduite.

L'adimensionnalisation des données géométriques et physiques permet d'exprimer la conductivité thermique effective réduite E en fonction des seuls paramètres B, C, D.

Dans la cellule élémentaire (Figure V.1b, c, d), les expressions de champs de température des faces extérieures non adiabatiques sont données par les équations (V.4):

$$S(X, Y, 0) = T(X, Y, 0) = 0, \text{ et } T(X, Y, B + 1) = 1 \quad (V.4)$$

La conductivité thermique effective pour chaque modèle est calculée en fonction du flux thermique traversant les cellules élémentaires:

2.1. Conductivité thermique effective du modèle cubique simple

Le flux thermique traversant la cellule élémentaire cubique simple est calculé en intégrant l'écoulement défini en chaque point sur la surface supérieure $Z = (B + 1)$

$$\phi = \frac{k_{eff} \times \Delta\theta \times \left(\frac{1}{2} \times b^2\right)}{b} = \frac{k_{eff} \times \Delta\theta \times b^2}{2b} = -k_m \iint_{S_1} \frac{d\theta}{dz} dx dy \quad (V.5)$$

En introduisant les paramètres adimensionnels et la température de la face inférieure de la cellule, l'équation (V.5) peut être réécrite sous la forme suivante:

$$\frac{k_{eff} \times \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) \times b}{2} = -\frac{k_m \times r^2}{2r} \int_0^{B+1} \int_0^{X=Y} \frac{d[(\theta_1 - \theta_2)T + (\theta_1 + \theta_2)]}{dZ} dXdY \quad (V.6)$$

Puis

$$\frac{k_{eff} \times b \times (\theta_2 - \theta_1)}{4} = -\frac{k_m \times r}{2} \times (\theta_1 - \theta_2) \int_0^{B+1} \int_0^{X=Y} \frac{dT}{dZ} dXdY \quad (V.7)$$

$$\frac{k_{eff} \times b}{2} = k_m \times r \int_0^{B+1} \int_0^{X=Y} \frac{dT}{dZ} dXdY \quad (V.8)$$

Et enfin:

$$\frac{k_{eff}}{k_m} = \frac{2 \times r}{b} \int_0^{B+1} \int_0^{X=Y} \frac{dT}{dZ} dXdY \quad (V.9)$$

En introduisant le paramètre B , on trouve:

$$E = \frac{k_{eff}}{k_m} = \frac{2}{(B+1)} \int_0^{B+1} \left(\int_0^{X=Y} \frac{dT}{dZ} \Big|_{Z=B+1} \right) dX \quad (V.10)$$

Le flux thermique dans la direction Z de la surface supérieure (S_1) de la cellule élémentaire est définie par :

$$Q_{SC} = \int_0^{B+1} \left(\int_0^{X=Y} \frac{dT}{dZ} \Big|_{Z=B+1} \right) dX \quad (V.11)$$

La conductivité thermique effective du modèle de SC est définie par:

$$E = \frac{2Q_{SC}}{1+B} \quad (V.12)$$

A partir de la valeur de B , on peut déduire la concentration volumique de la charge:

$$\varphi = \frac{\text{Volumede la charge}}{\text{volumede la celluleélémentaire}} \quad (V.13)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{6(B+1)^3} \quad (V.14)$$

2.2. Conductivité thermique effective de modèle BCC

Le flux de chaleur traversant le corps cubique centré est défini par:

$$\phi = \frac{k_{eff} \times \Delta\theta \times b^2}{2b} = -k_m \iint_{s_1} \frac{d\theta}{dz} dx dy - k_{ch} \iint_{s_2} \frac{d\theta}{dz} dx dy \quad (V.15)$$

En introduisant la température de la face inférieure de la cellule et les paramètres adimensionnels, on peut obtenir:

$$\begin{aligned} \frac{k_{eff} \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right) \times b^2}{2b} &= -\frac{k_m \times r^2}{2r} \iint_{s_1} \frac{d[(\theta_1 - \theta_2)T + (\theta_1 + \theta_2)]}{dZ} dXdY \\ &- \frac{k_{ch} \times r^2}{2r} \iint_s \frac{d[(\theta_1 - \theta_2)S + (\theta_1 + \theta_2)]}{dZ} dXdY \end{aligned} \quad (V.16)$$

$$\frac{k_{eff} \times b}{4} (\theta_2 - \theta_1) = \frac{k_m \times r}{2} (\theta_2 - \theta_1) \iint_{s_1} \frac{dT}{dZ} dXdY + \frac{k_{ch} \times r}{2} (\theta_2 - \theta_1) \iint_{s_2} \frac{dS}{dZ} dXdY \quad (V.17)$$

$$\frac{k_{eff}}{k_m} = \frac{2 \times r}{b} \left[\iint_{s_1} \frac{dT}{dZ} dXdY + \frac{k_{ch}}{k_m} \iint_{s_2} \frac{dS}{dZ} dXdY \right] \quad (V.18)$$

En utilisant le paramètre $D = \frac{k_m}{k_{ch}}$, ainsi, nous obtenons:

$$E = \frac{k_{eff}}{k_m} = \frac{2}{B+1} \left[\iint_{s_1} \frac{dT}{dZ} dXdY + \frac{1}{D} \iint_{s_2} \frac{dS}{dZ} dXdY \right] \quad (V.19)$$

Avec:

$$Q_{BCC} = \left[\iint_{s_1} \frac{dT}{dZ} dXdY + \frac{1}{D} \iint_{s_2} \frac{dS}{dZ} dXdY \right] \quad (V.20)$$

Alors, la conductivité thermique effective du modèle BCC est définie par:

$$E = \frac{2Q_{BCC}}{B+1} \quad (V.21)$$

D'après l'équation (V.12), nous pouvons déduire la concentration des charges comme suit:

$$\varphi = \frac{\pi}{3(B+1)^3} \quad (V.22)$$

2.3. Conductivité thermique effective de modèle FCC

En suivant les mêmes étapes ci-dessus, la conductivité thermique effective et le taux de charge sont obtenus et donnés par:

$$E = \frac{2Q_{FCC}}{B+1}, \text{ et } \varphi_{FCC} = \frac{2\pi}{3(B+1)^3} \text{ avec:}$$

$$Q_{FCC} = \left[\iint_{s_1} \frac{dT}{dZ} dXdY + \frac{1}{D} \iint_{s_2} \frac{dS}{dZ} dXdY + \frac{1}{D} \iint_{s_3} \frac{dS}{dZ} dXdY \right] \quad (V.23)$$

3. Modélisation numérique

Une modélisation numérique en trois dimensions en utilisant le logiciel Comsol a été réalisée pour le transfert de chaleur par conduction dans ce composite.

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 les températures θ_1 et θ_2 .
- Les faces latérales qui sont parallèles à la direction de l'écoulement de la chaleur sont adiabatiques.

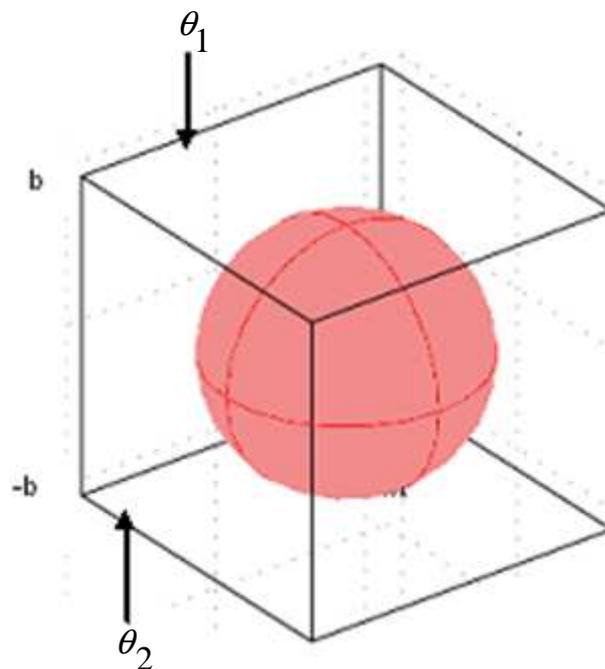


Figure V.2 : Cellule élémentaire et conditions aux limites

3.1. Propriétés de la matrice et de la charge

Dans cette étude, la résine de polymère d'éthylène-acétate de vinyle a été utilisée comme matrice avec des charges de poudre de verre argentée (S-3000S2M).

La méthode de préparation et les caractéristiques thermophysiques des charges et de la matrice ont été présentées dans des travaux antérieurs [3]. Les propriétés des polymères et des charges sont présentées dans le Tableau V.1:

Tableau V.1: Propriétés de la matrice et des charges [3].

Constituent	$k(\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$	$\rho(\text{g.cm}^{-3})$	$C_p(\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$
EVA	0.271	930	2482
S-3000-S2M	6.52	2600	764.375

3.2. Etapes de modélisation numérique

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

- **Définir le choix du modèle:** dans notre cas c'est le transfert de chaleur par conduction en régime stationnaire, les transferts de type radiatifs et convectifs sont négligeables.

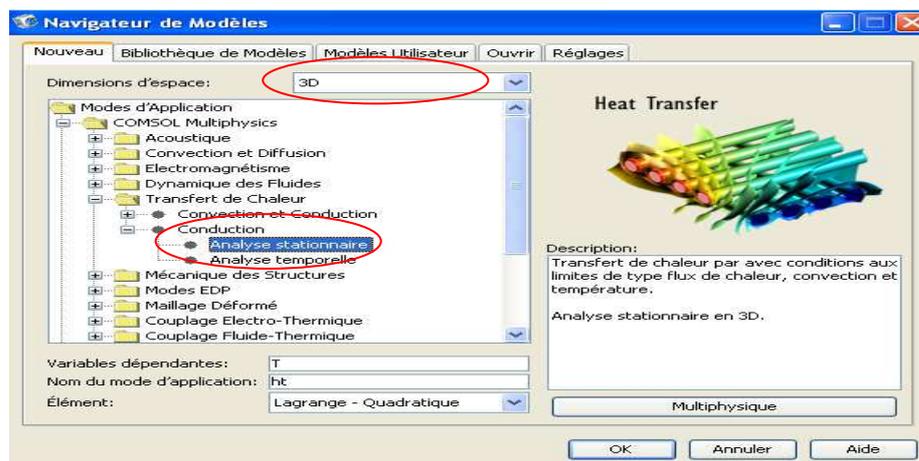
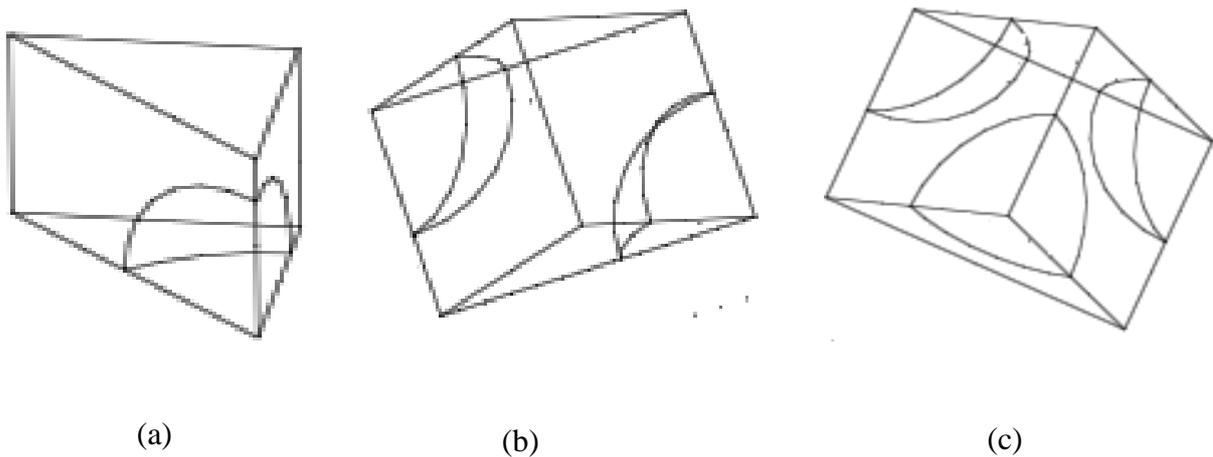


Figure V.3: Le choix du modèle.

➤ Le choix d'un volume élémentaire

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

Donc, pour la géométrie, selon les symétries, seulement un seizième de la cellule élémentaire est étudié (Figure V. 4).



Figures V.4 : Géométries étudiées, (a)SC, (b) BCC, (c)FCC

➤ Définition des propriétés de chaque sous domaine

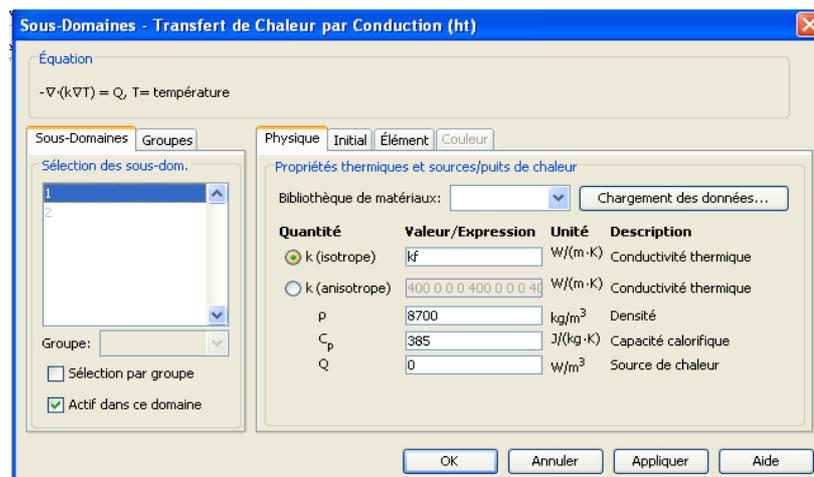


Figure V.5 : Définition des propriétés des sous domaines.

➤ **Introduire les conditions aux limites**

- Le flux de chaleur

$$n \cdot (k \nabla T) = q_0 + h(T_{\text{inf}} - T) + C_{\text{const}} (T_{\text{amb}}^4 - T^4) \quad (\text{V.24})$$

h : est un coefficient de transfert de chaleur par convection et C_{const} est une constante reliée à l'émissivité du matériau et donc reliée au phénomène de rayonnement. Dans notre étude, on prend en compte seulement la conduction thermique, donc, l'équation ci-dessus devient:

$$n \cdot (K \nabla T) = q_0 \quad (\text{V.25})$$

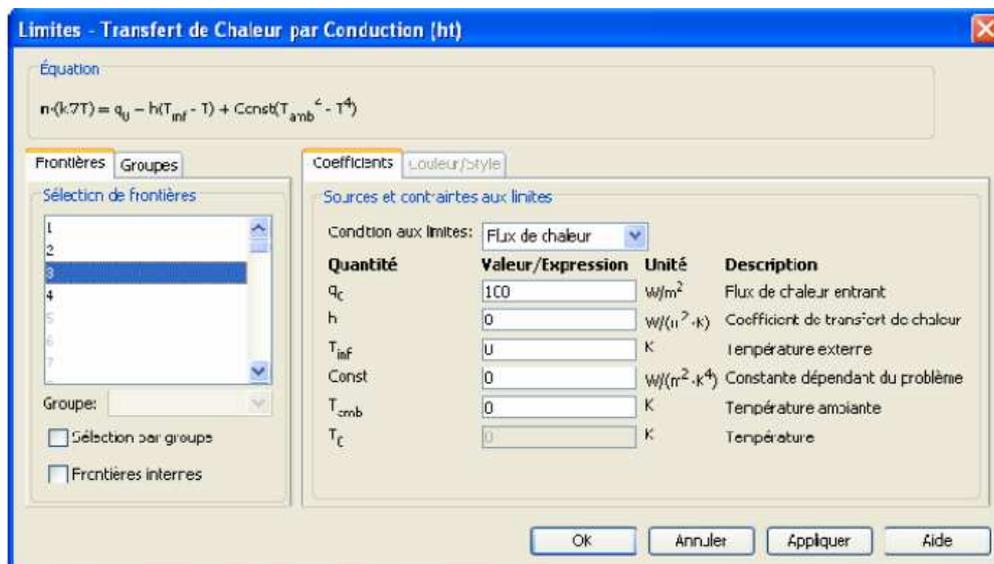


Figure V. 6: Définition des conditions aux limites.

- Les autres faces sont isolées ($n \cdot (k \nabla T) = 0$), pour produire un flux unidirectionnel.
- Introduire les températures de la surface supérieure et inférieure de la cellule.
- **Le maillage de la géométrie:** Le maillage permet de diviser le milieu continu en un nombre fini d'éléments. Le nombre d'éléments est entre 10000 à 90000 nœuds pour tous les modèles.

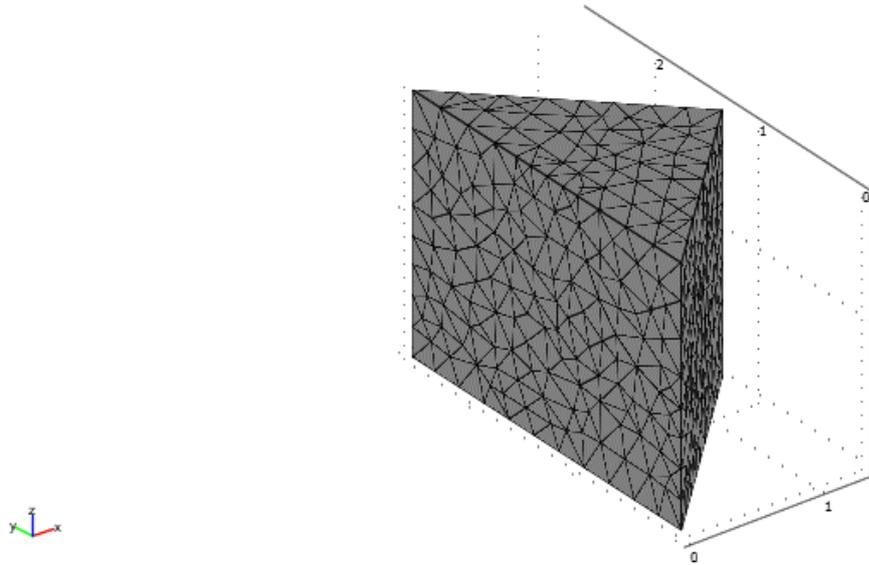


Figure V.7 : *Le maillage de la géométrie (modèle FCC).*

➤ **Post-traitement des données calculées**

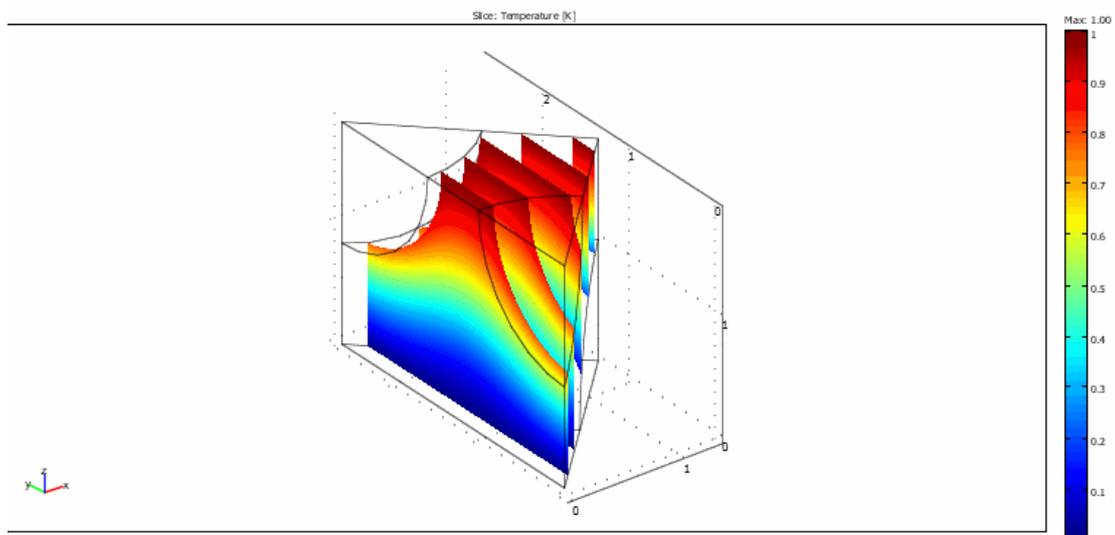


Figure V.8: *Grandeurs physiques calculées (modèle FCC).*

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

4. Résultats et discussions

4.1. Effet de la concentration volumique, des paramètres (C), (D) et (B)

La conductivité thermique effective comme décrite précédemment a été calculée en 3D par la méthode des éléments finis, en fonction de trois paramètres: B , C et D . Dans la figure V.9, nous présentons les résultats numériques du modèle FCC pour la concentration volumique $\varphi = 41.4\%$, en fonction de la résistance de contact C et le rapport D , avec $D = C = 10^a$, $a = \{-5, -4, -3, -2, -1\}$.

D'après la figure V.9, pour $D \in [10^{-2}, 10^{-1}]$, la conductivité thermique augmente très légèrement. D'un autre côté, une diminution significative de la conductivité thermique avec l'augmentation de la résistance de contact (C) a été observée.

Pour des faibles valeurs de ($D \in [10^{-5}, 10^{-2}]$), la variation de la conductivité thermique effective est presque négligeable. Le même comportement a été noté pour les modèles SC et BCC, ce qui montre le peu d'intérêt de choisir une charge plus conductrice. D'autre part, l'effet de la résistance de contact (C) sur la conductivité thermique est significatif.

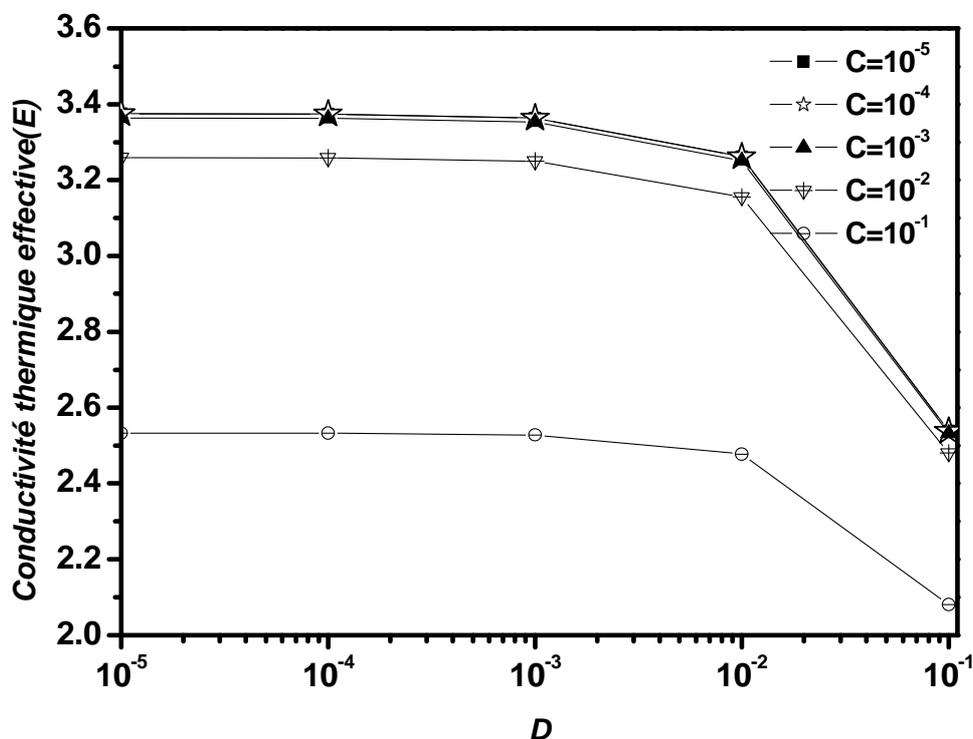


Figure. V.9: Conductivité thermique effective en fonction des paramètres

C et D , modèle FCC ($\varphi = 41.1\%$)

La Figure. V.10 montre l'effet de la distance entre la charge et la matrice (B) sur la conductivité thermique effective. A partir de la figure V.10, on observe une diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation du paramètre (B).

Pour des valeurs de paramètre (B) élevées (faible teneur en charge), la variation de la conductivité thermique effective de composite est peu significative. Cela peut s'expliquer par la présence d'une couche polymère isolante très importante entre deux sphères consécutives, ce qui empêche le transfert de chaleur dans le composite.

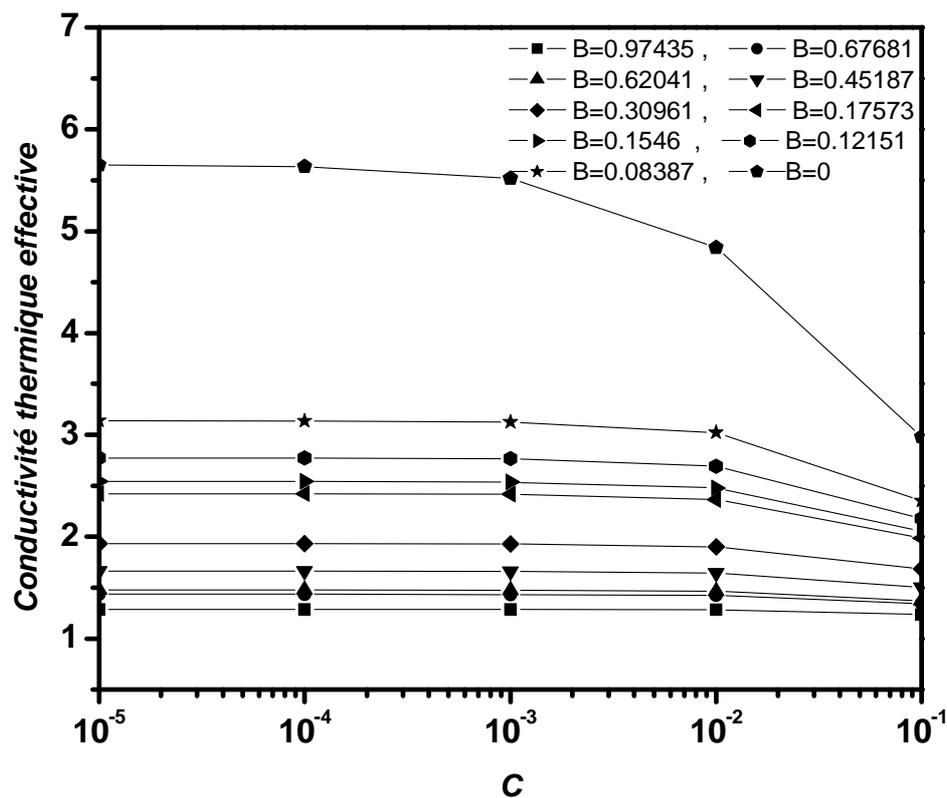


Figure. V.10 : Conductivité thermique effective en fonction de B et C , modèle SC.

Cependant, une diminution du paramètre (B) conduit à une augmentation plus importante de la conductivité thermique effective (E), et la valeur la plus élevée de la conductivité thermique est obtenue pour $B = 0$ (à une fraction volumique maximale de charge). Cela est dû au fait qu'il n'y a pas d'une couche isolante entre les sphères, ce qui favorise le transfert de chaleur dans le composite.

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

Les figures V.11 et V.12 montre l'évolution de la conductivité thermique des composites, pour le modèle cubique à face centrée (FCC), et le modèle cubique centré (BCC), pour différents valeurs de la résistance de contact (C). Un comportement similaire a été noté avec le modèle SC.

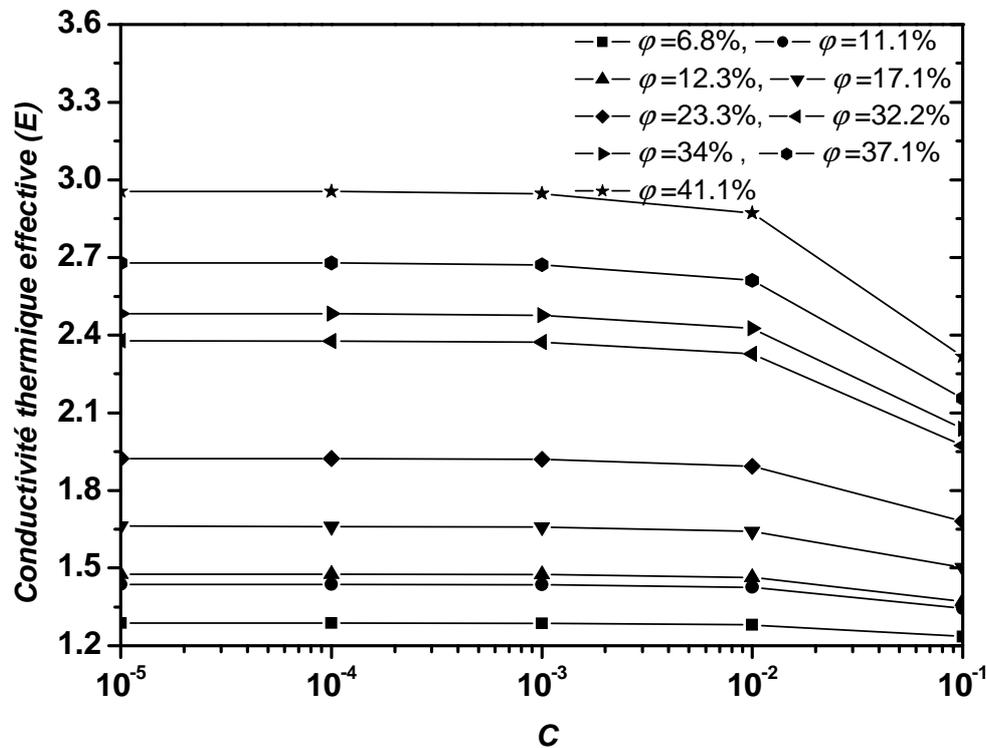


Figure. V.11: Conductivité thermique effective en fonction de la résistance de contact, pour le modèle FCC

D'après ces figures, pour toutes les concentrations de charges, les valeurs de la conductivité thermique calculées sont presque les mêmes pour les deux modèles de la FCC et BCC. La conductivité thermique maximale pour BCC, FCC et le modèle SC sont, respectivement, (2.967, 2.955, et 3.138) $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (pour $\phi = 41.1\%$). La faible différence de la conductivité thermique, entre les trois modèles peut s'expliquer par la différence de l'arrangement des sphères conductrices.

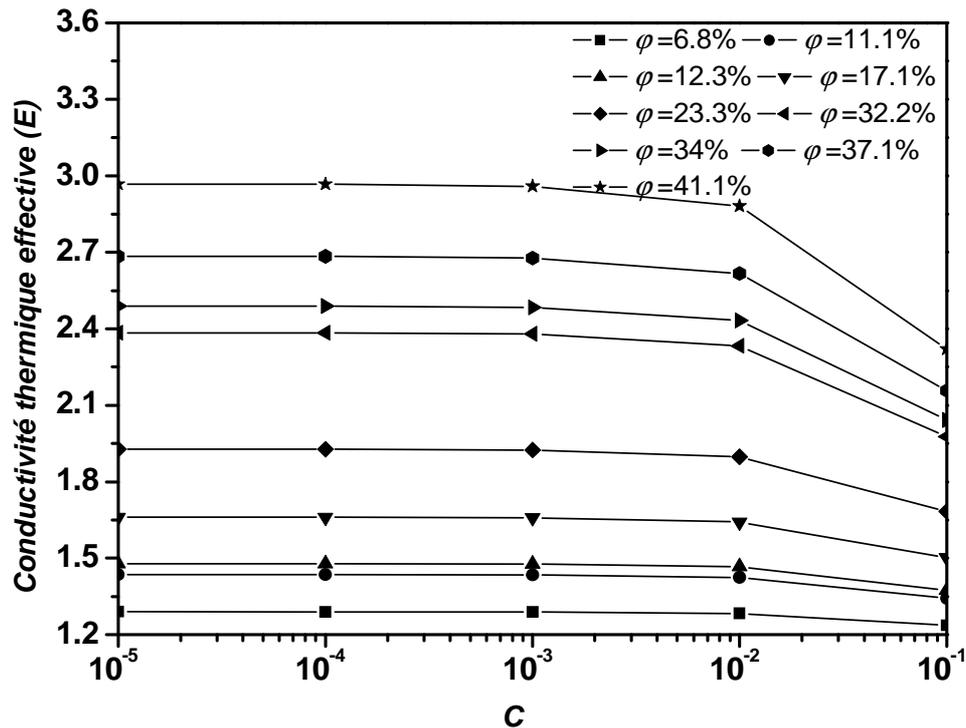


Figure. V.12: *Conductivité thermique effective en fonction de la résistance de contact, pour le modèle BCC*

Pour des faibles valeurs de la résistance de contact $C = [10^{-5}, 10^{-2}]$, la variation de la conductivité thermique effective est négligeable. Pour $C = [10^{-2}, 10^{-1}]$, la résistance de contact a une influence prépondérante sur la conductivité thermique effective et quand (C) augmente, on observe une diminution de la conductivité thermique. Cela montre que la diminution de la résistance thermique de contact (C), améliore le transfert de chaleur entre la matrice et des charges, et conduit à une augmentation de la conductivité thermique effective du composite.

4.2. Comparaison entre les résultats numériques, les mesures expérimentales et les modèles analytiques

Pour illustrer la différence entre les résultats numériques, les mesures expérimentales et les modèles analytiques, y compris l'effet de la teneur en charge sur la conductivité thermique effective, nous avons tracé dans la figure. V.13, la conductivité thermique effective (E) en fonction de la concentration volumique φ .

Dans la Figure. V.13, les valeurs de la conductivité thermique obtenues à partir de l'étude numérique pour trois modèles (BCC, FCC, et SC) sont comparées aux résultats

expérimentaux de la référence [3], et certains modèles théoriques (Lewis et Nielson, Hata et Taya).

Une augmentation significative de la conductivité thermique (E) avec l'augmentation de la teneur en charge a été observée, avec une évolution non linéaire. Cette augmentation était prévue, car la charge a une conductivité thermique significativement plus élevée que celle de la matrice polymère. Les conductivités thermiques effectives numériques sont presque les mêmes pour les deux modèles BCC et FCC.

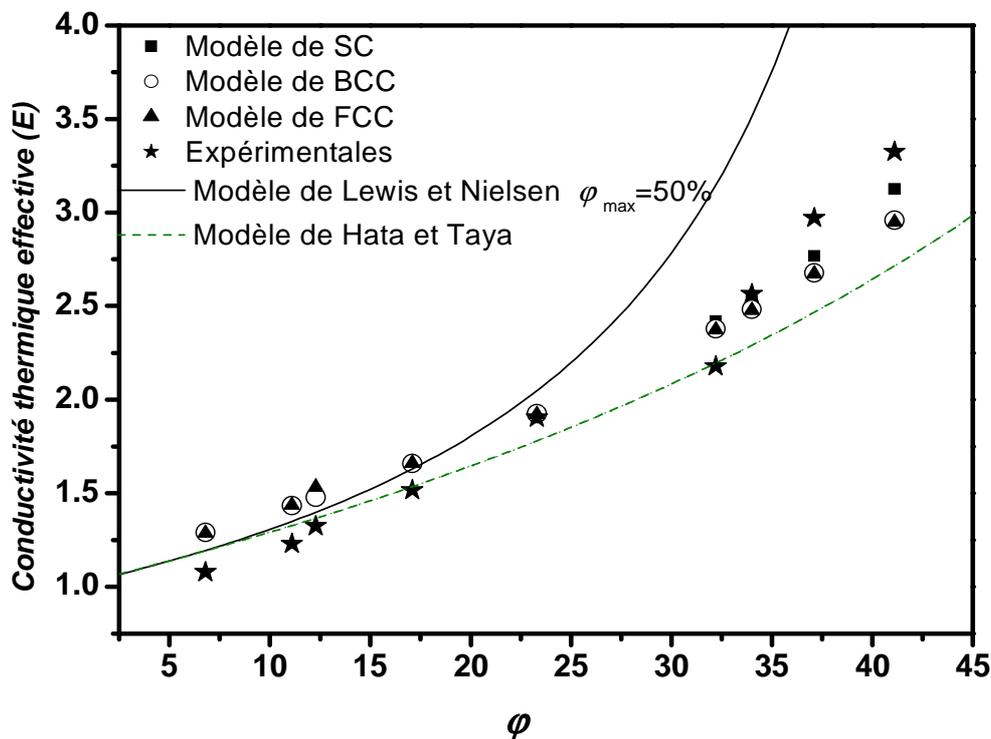


Figure. V.13. Conductivité thermique effective en fonction de la concentration, et comparaison avec les mesures expérimentales, et les modèles analytiques, $C=10^{-3}$

Ainsi, on peut noter que les valeurs numériques de la conductivité thermique sont en bon accord avec les valeurs mesurées, en particulier pour le modèle SC.

L'écart entre les valeurs numériques et expérimentales diminue avec l'augmentation de la concentration de la charge. Cela peut être dû à l'effet du paramètre B (Distance entre la charge et la matrice), c'est-à-dire, la différence entre les valeurs numériques de la conductivité thermique et les résultats expérimentaux diminue avec la diminution du paramètre (B). Ce résultat a été également rapporté par Karkri et al. [2]. Ainsi, il semble que la différence entre les valeurs calculées et mesurées de la conductivité thermique est peu importante à une faible

concentration de charge. Cela indique que le paramètre (B) joue un rôle fondamental pour comprendre le comportement de transfert de chaleur dans les composites. Pour $\varphi > 35\%$, un bon accord entre les valeurs numériques de la conductivité thermique et les résultats expérimentaux est observé pour le modèle SC, mais il existe des divergences entre les résultats expérimentaux et les valeurs numériques pour les deux autres modèles, FCC et BCC. Ceci montre l'effet du type d'arrangement de sphères conductrices.

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

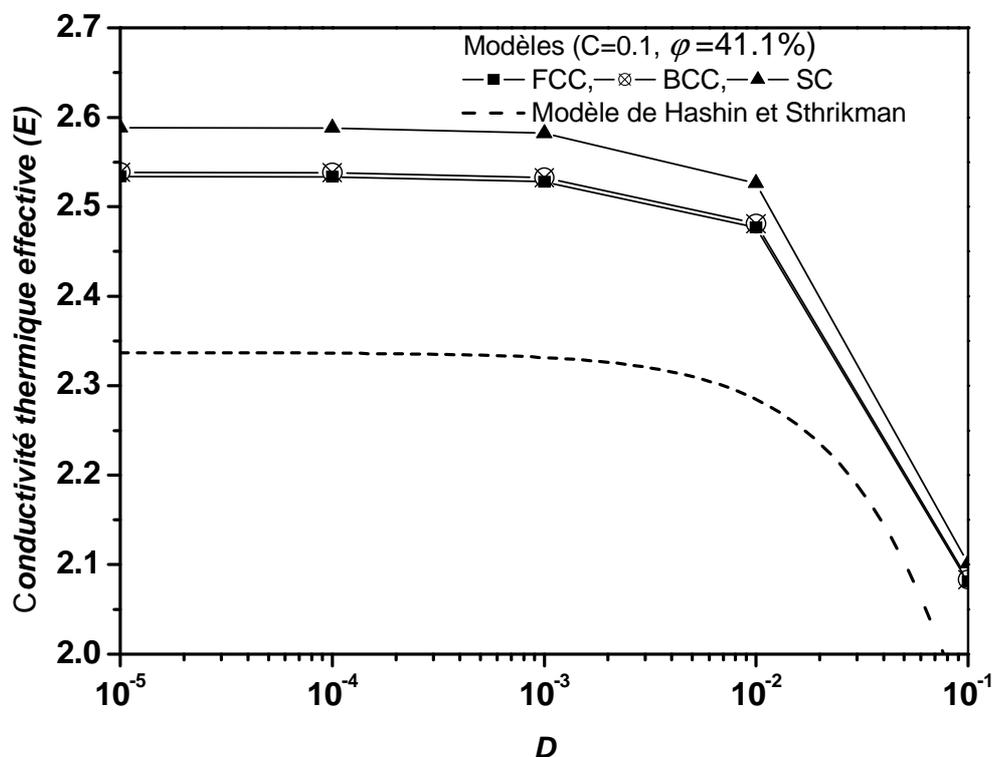


Figure. V.14 : Conductivité thermique calculée et modèle de Hashin et Sthrikman en fonction du rapport D , ($C=0.1$, $\varphi = 41.1\%$)

Dans la figure. V.14, les valeurs numériques de la conductivité thermique sont comparées au modèle de Hashin et Shtrikman. Pour $D \geq 10^{-3}$, on remarque que les conductivités thermiques analytiques et numériques augmentent très légèrement et tendent vers une valeur constante. De ce fait, l'utilisation d'une charge conductrice n'a pas d'intérêt pour améliorer la conductivité thermique des composites. Ceci peut être expliqué par la distribution discontinue de la charge, qui entrave le transport des phonons dans le matériau, et par l'effet dominant de la résistance de contact sur le flux de chaleur à travers l'interface (matrice / inclusion), i.e., lorsque la résistance de contact est importante, le transfert de chaleur à travers l'interface d'inclusion et de la matrice est empêché.

Pour $D \in [10^{-5}, 10^{-2}]$, il existe une différence entre la conductivité thermique effective numérique et le modèle de Hashin et Shtrikman, en particulier pour le modèle SC. Cette différence diminue pour $D \in [10^{-2}, 10^{-1}]$.

Partie (2): Prédiction de la conductivité thermique du composite FPD/Mortier

Dans la partie (1), nous avons présenté des modèles numériques permettant d'estimer la conductivité thermique des matériaux composites renforcés par des charges sphériques. Cette deuxième partie est consacrée à la modélisation numérique de la conductivité thermique des composites renforcés par des fibres de bois de palmier.

De ce fait, une autre analyse numérique tridimensionnelle (3D) est établie pour estimer la conductivité thermique de composite de mortier renforcé par les fibres de palmier dattier (FPD) en utilisant le logiciel Comsol.

1. Modélisation mathématique

Dans cette étude, seulement un huitième de la cellule élémentaire est modélisé (Figure V.15). Même grandeurs adimensionnelles décrites dans la partie (1) sont introduites dans cette étude numérique. Ces paramètres sont utilisés pour simplifier et réduire le temps de calcul, comme nous l'avons mentionné dans la partie (1). Section 2.

Le flux thermique qui traverse la cellule élémentaire est donné par la relation:

$$\phi = \frac{\Delta\theta}{k_{eff}} \times \alpha b^2 = -k_m \int_{s_1} \int \frac{d\theta}{dz} dy dx \tag{V.26}$$

$$\phi = k_{eff} \alpha b \Delta\theta = -k_m \int_0^b \int_0^{\alpha b} \frac{d\theta}{dz} dy dx \tag{V.27}$$

Avec, α : le rapport entre la longueur et le diamètre de fibres ($\alpha = \frac{L}{D}$)

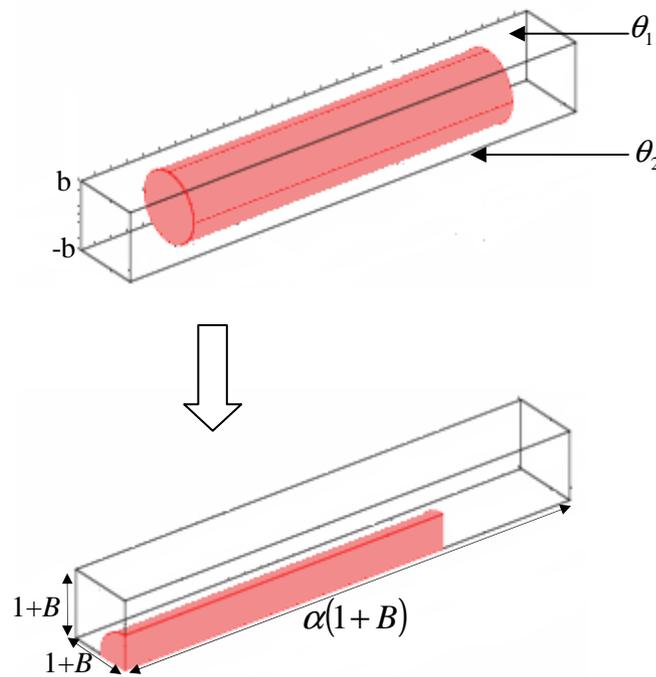


Figure V. 15 : Géométrie à modéliser.

En introduisant la température de la face inférieure de la cellule élémentaire de calcul, on obtient :

$$k_{eff} \alpha b \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - \theta_1 \right) = \frac{-k_m}{2r} \times r^2 \int_0^{1+B} \int_0^{\alpha(1+B)} \frac{d[(\theta_1 - \theta_2)T + (\theta_1 + \theta_2)]}{dZ} dY dX \tag{V.28}$$

Ensuite,

$$\frac{k_{eff}}{k_m} \alpha b \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right) = -r \times \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \int_0^{1+B} \int_0^{\alpha(1+B)} \frac{dT}{dZ} dY dX \quad (V.29)$$

$$E = \frac{k_{eff}}{k_m} = \frac{r}{b\alpha} \int_0^{1+B} \int_0^{\alpha(1+B)} \frac{dT}{dZ} dY dX \quad (V.30)$$

Enfin, la conductivité thermique effective du matériau modélisé est calculée par la relation (V.31):

$$E = \frac{Q}{\alpha(B+1)} \quad (V.31)$$

Avec,

$$Q = \int_0^{1+B} \int_0^{\alpha(1+B)} \frac{dT}{dZ} dY dZ \quad (V.32)$$

Où,

Q : Le flux de chaleur intégré sur la surface supérieure de la cellule élémentaire de calcul.

2. Modélisation numérique

2.1. Propriétés des fibres et de la matrice

Les propriétés thermophysiques de la matrice et des fibres de renforcement (FPD) sont présentés dans le tableau V.2.

La méthode de préparation et les caractéristiques thermophysiques de la matrice sont présentées dans les chapitres II et III.

Tableau V.2 : Propriétés de la matrice et de fibres

Matériaux	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	a (×10 ⁻⁷ .m ² .s ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)
FPD ^a	0.084	3.31	254
Mortier ^b	0.8039	4.9752	1908

^a : Source [4].

^b : Les propriétés du mortier sont mesurés au cours de notre travail.

Les concentrations volumiques des fibres (FPD) sont calculées par la relation suivante [5]:

$$\varphi_v = \frac{\varphi_m}{\varphi_m + \left(\frac{\rho_{\text{fibre}}}{\rho_{\text{matrice}}} \right) \times (1 + \varphi_m)} \quad (\text{V.33})$$

Avec,

φ_m : La concentration massique des fibres

φ_v : La concentration volumique des fibres

Tableau V.3: Concentration massique et volumique

φ_m (%)	5	10	15	20	25	30
φ_v (%)	29.64	46.96	60.15	65.29	71.49	76.33

2.2. Etapes de modélisation

En suivant les mêmes étapes, avec les mêmes conceptions aux limites présentées dans la partie (1). Section 2, et 3, pour le composite renforcé par les charges sphériques, nous avons effectué une étude numérique afin de déterminer la conductivité thermique de composite Mortier/FPD.

3. Résultats et discussion

3.1. Effet de la concentration sur la conductivité thermique

L'approche numérique décrite précédemment est utilisée pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux composites chargés par des inclusions cylindriques. Les résultats de la simulation numérique sont illustrés dans les figures V.16 et V.17, et V.18.

Dans la figure V.18, les valeurs de la conductivité thermique sont comparées à plusieurs modèles de prédiction théorique de la conductivité thermique ainsi qu'aux valeurs expérimentales.

D'après la figure V.16, On remarque une diminution non linéaire de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier dattier.

Cette diminution est principalement due à la faible conductivité thermique des inclusions comparée à celle de la matrice de mortier. Un résultat similaire a été rapporté par Thanh Hung Pham et al.[6]. Ils ont étudié numériquement et expérimentalement la conductivité thermique de composite à matrice de chaux renforcée par le chanvre, leurs résultats numériques montrent également 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 des deux phases (les inclusions et la matrice). Ainsi l'ajout de fibres naturelles génère une porosité et la présence d'air dans la matrice ce qui conduit à une faible masse volumique et une faible conductivité thermique.

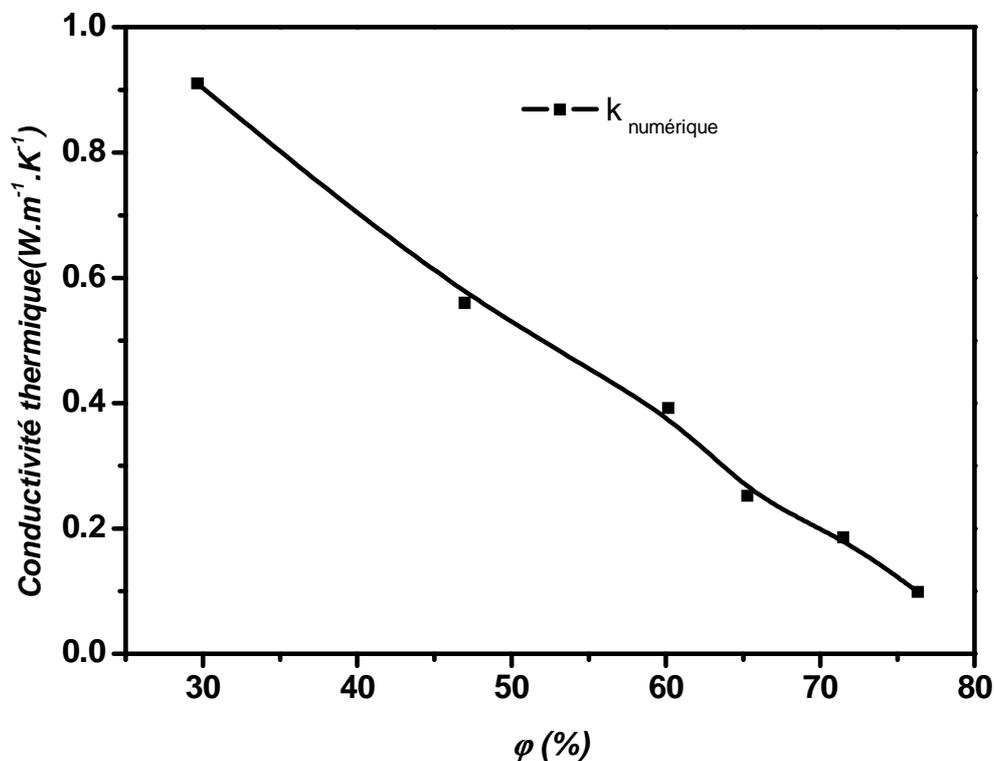


Figure V.16 : Conductivité thermique du composite calculée en fonction de la concentration volumique des fibres

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. Ce résultat est rapporté par Li et al. [7] et Mangal et al.[8] qui ont déterminé la conductivité

thermique et la diffusivité thermique du composite Lin/HDPE et les composites fibres de feuille d'ananas/PF, respectivement.

Ils ont constaté que la conductivité thermique des deux composites diminue en fonction de la concentration des charges. Selon les auteurs de [7,8], ces résultats sont dus à l'effet des faibles conductivités thermiques des charges naturelles comparées à celles des matrices.

Pour montrer l'effet du paramètre (B), nous avons tracé la courbe illustrée dans la figure V.17. D'après la figure V.17, on observe que l'écarte entre les valeurs numériques et expérimentales de la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la concentration (quand le paramètre B diminue). Il est intéressant donc de constater que le paramètre (B) apparaît comme une grandeur essentielle. Elle contribue au transfert de chaleur entre la matrice et les inclusions et influe significativement sur la valeur de la conductivité thermique de composite. Les écarts entre $k_{numérique}$ et $k_{expérimentale}$ diminuent quand (B) diminue, c'est-à-dire quand la concentration des fibres augmente. Cette influence est obtenue également dans l'étude de la partie (1) (pour le composite EVA/ S-3000S2M).

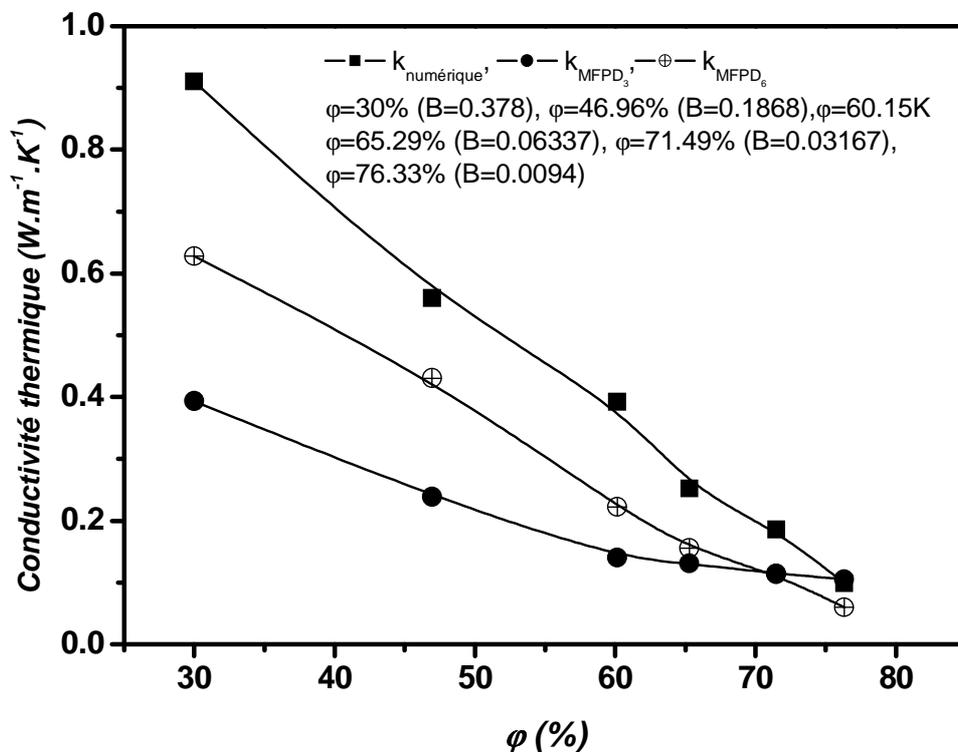


Figure V.17 : Conductivité thermique de composite en fonction de la concentration et de paramètre (B)

3.2. Comparaison entre les résultats expérimentaux, numériques et les modèles théoriques

La figure V.18 présente les résultats numériques de la conductivité thermique du composite, comparés aux résultats expérimentales et théoriques.

D'après la figure V.18, pour les concentrations 30 % et 60 %, 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. Il faut aussi rappeler que les fibres utilisés dans l'étude expérimentales sont soumis à un broyage mécanique, ce qui permet d'obtenir des différents tailles et formes de fibres ; c'est-à-dire; ces fibres ne sont pas homogènes ; et il est difficile de prendre en compte donc les différents tailles de fibres dans la simulation. En plus, avec ce broyage, on peut obtenir même des sphères (la poudre de bois). Donc, il est nécessaire de développer un autre modèle pour prédire la conductivité thermique, comme la modélisation hybride par exemple.

Par ailleurs, pour les concentrations supérieures à 60 %, 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 $0.084 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), cela se traduit par une diminution importante de la conductivité thermique du composite.

En outre, la courbe V.18 montre qu'au de la de 60 % de concentration volumique de fibres, la conductivité thermique des composites varie lentement. Tandis que, pour les concentrations faibles, l'évolution de la conductivité thermique est significative.

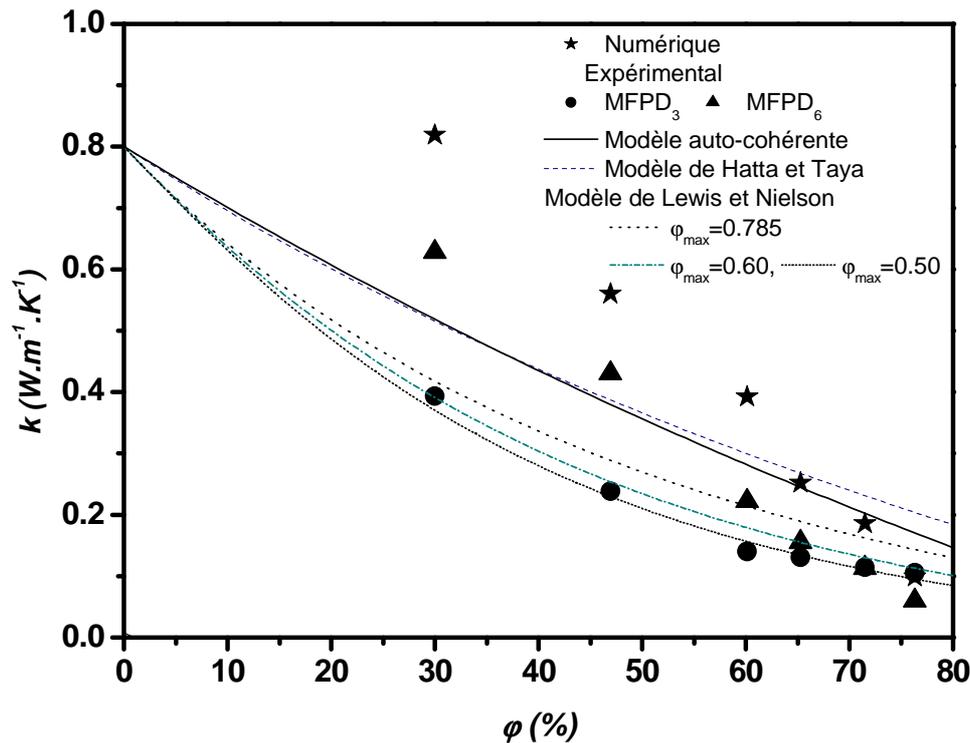


Figure V.18 : Comparaison entre les résultats numérique de la conductivité thermique, les résultats expérimentaux et les modèles théoriques.

En comparant les résultats expérimentaux aux modèles théoriques et numériques, toutes les modèles théoriques sont en cohérence avec les résultats expérimentaux et numériques, en particulier pour les concentrations élevées de fibres (FPD).

On remarque que le modèle de Lewis et Nielson est en bon accord avec les valeurs expérimentales de la conductivité thermique de composite MFPD₃, pour toutes les concentrations de fibres. En outre, il est en accord avec les valeurs expérimentales de composite MFPD₆, pour les concentrations supérieures à 50%. Ces comportements peuvent être expliqués par le fait que le modèle théorique de Lewis et Nielson prend en compte quelques paramètres pour prédire la conductivité thermique de composite comme la forme et l'orientation des charges.

Par ailleurs, on observe que le modèle de Hata et Taya et le modèle auto cohérente sont en accord avec le modèle numérique pour les concentrations élevées de fibres. Il est clair que le modèle de Lewis et Nielson donne une bonne estimation de la conductivité thermique par rapport aux autres modèles théoriques. Le modèle auto cohérente permet d'exprimer la conductivité thermique du composite Mortier/FPD en fonction des caractéristiques et des

concentrations volumiques des constituants pour une inclusion tricomposite. Ce choix d'inclusions sphériques imbriquées les unes dans les autres permet d'imposer la continuité de la matrice, qui est l'élément conducteur prépondérant dans le composite Mortier/FPD, ce qui conduit à l'augmentation de la conductivité thermique.

II. Conclusion

Dans cette étude, la conductivité thermique des composites à matrice polymère (EVA) chargée des sphères de verre argentées ainsi que de composite de mortier renforcé par des fibres de bois de palmier dattier a été étudié numériquement. La méthode des éléments finis en utilisant le logiciel COMSOL software a été utilisé pour déterminer les propriétés thermophysiques de ces composites et d'examiner comment ils sont influencés par des variations de plusieurs paramètres comme la résistance de contact, la distance entre les inclusions et la concentration volumique des inclusions.

La conductivité thermique obtenue numériquement a été comparées aux valeurs expérimentales et aux modèles de prédiction théorique.

Pour la partie (1), on peut conclure que la conductivité thermique effective des composites sont presque les mêmes pour les deux modèles de la FCC et BCC et les valeurs les plus élevées de la conductivité thermique effective sont obtenues pour le modèle SC. La conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la concentration de charges. La résistance de contact (C), et la distance entre les inclusions (B) ont un effet important sur la conductivité thermique.

Cependant, le paramètre (D) n'a pas d'effet significatif sur la conductivité thermique du composite.

Par ailleurs, les valeurs numériques de la conductivité thermique des modèles (FCC, BCC, SC) ont été trouvés en bon accord avec des modèles analytiques pour faible concentration de charge. En outre, les valeurs calculées de la conductivité thermique sont en bon accord avec les mesures pour toutes les concentrations volumiques de charges, en particulier pour la Modèle SC.

Concernant la partie (2), 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, particulièrement pour la teneur maximale en fibre

$\phi \approx 76\%$. D'autre part, les modèles théoriques sont en accord avec les valeurs expérimentales et numériques, en particulier pour les concentrations élevées de fibres. Il est noté aussi que le modèle de Lewis et Nielson donne une meilleure estimation de la conductivité thermique de composite, il est en bon accord avec les conductivités thermiques expérimentales de composite MFPD₃.

En outre, nous avons constaté que le paramètre (B) qui présente la distance entre les inclusions a une influence importante sur la conductivité thermique de composite.

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 dû 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, les différentes formes et tailles des fibres utilisées. Des facteurs qui rendent la modélisation numérique de la conductivité thermique des composites très difficile.

Pour cela, la modélisation de la conductivité thermique de composite Mortier /FPD ne donne pas une bonne estimation, en particulier pour les faibles concentrations de fibres. De ce fait, nous proposons de développer un autre modèle de simulation pour bien estimer la conductivité thermique de notre composite, en utilisant l'un des modèles numériques présentés dans le chapitre IV, qui prennent en compte plusieurs paramètres (la forme, l'orientation,...etc.).

Références

- [1] V. Cerezo, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique," Thèse de Doctorat, L'institut National des sciences appliquées de Lyon, 2005, pp. 225.
- [2] M. Karkri, A. Boudenne, L. Ibos, B. Garnier, and Y. Candau, "Numerical study of thermophysical properties of spheres composites materials," *High temperatures- High pressure*, vol. 40, pp. 61-84, 2011.
- [3] B. Agoudjil, L. Ibos, Y. Candau, J.C. Majesté, and Y. P. Mamunya, "Correlation between transport properties of Ethylene Vinyl Acetate/glass, silver-coated glass spheres composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, pp. 342- 351, 2008.
- [4] 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.
- [5] B. Agoudjil, "Etude des propriétés thermophysiques et électriques de matériaux hétérogènes," Thèse de Doctorat, Université Paris XII Val de Marne, 2006, pp. 199.
- [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] X. Li, L.G. Tabil, IN. Oguocha, and S. Panigrahi, "Thermal diffusivity, thermal conductivity, and specific heat of fax fiber-HDPE biocomposites at processing temperatures," *Compos Sci Technol*, vol. 68, pp. 1753-8, 2008.
- [8] R. Mangal, N. S. Saxena, MS. Sreekala, S. Thomas, and K. Singh, "Thermal properties of pineapple leaf fiber reinforced composites," *Mater Sci Eng A*, vol. 339, pp. 281–5, 2003.

Conclusion

I .Conclusion

Ce travail a été consacré au développement d'un nouveau matériau composite à base de fibres de bois de palmier dattier et de mortier en vue de l'utiliser dans le domaine d'isolation thermique dans le bâtiment. La partie expérimentale porte sur l'élaboration et la caractérisation mécanique et thermique de ce biocomposite. Parallèlement au travail expérimental, un modèle mathématique basé sur la méthode des éléments finis a été introduit afin de prédire la conductivité thermique effective des matériaux hétérogènes.

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

Etude expérimentale des biocomposites

Les résultats expérimentaux des propriétés thermophysiques et mécaniques, ainsi que de la cinétique de séchage et d'absorption des fibres de palmier dattier de composite Mortier/fibres de palmier dattier ont été présentés et analysés.

Concernant l'étude de séchage et de l'absorption de l'eau des fibres de bois de palmier dattier, on a constaté que le bois de palmier dattier est très sensible à l'eau comparé aux fibres naturelles utilisées dans l'isolation thermique. Ils présentent une énorme capacité d'absorption de l'eau et cela constitue un inconvénient lors de l'incorporation de ces fibres dans la matrice.

Plusieurs facteurs affectent le comportement d'absorption de ces fibres comme la composition chimique, la surface et la taille des fibres, la durée de l'exposition à l'eau,...etc.

Pour les propriétés thermophysiques, nous avons conclu que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la concentration de fibres, tandis que l'effet de la taille de fibres sur les propriétés thermiques est moins significatif. Ainsi, la conductivité thermique des composites est fortement influencée par l'absorption d'eau.

Concernant les propriétés mécaniques, nous avons constaté que l'ajout de fibres de palmier dattier a un effet défavorable sur la résistance à la compression des composites, il conduit à la diminution de ces derniers. Cependant, des valeurs de résistance mécanique intéressantes ont été obtenues à des concentrations faibles de fibres (5%, 10% et 15%).

Selon les recommandations de RILEM, Pour les teneurs en fibres de 5%, 10%, 15%, pour MFPD₆, les propriétés des composites satisfont aux exigences mécaniques et thermiques de béton autoclavé, en tant que matériaux de structure et d'isolation ($R_c > 2.5\text{Mpa}$, $k < 0.75\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Les autres composites peuvent être utilisés comme isolants porteurs, avec $R_c > 0.5\text{ Mpa}$ et $k < 0.30\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

En effet, pour un pourcentage de fibres inférieur à 15%, les composites satisfont aux exigences thermiques et mécaniques des matériaux de construction et ils pourraient être utilisés comme nouveaux matériaux biocomposites pour l'efficacité énergétique dans les bâtiments.

Etude numérique

La conductivité thermique effective de composite de polymère d'éthylène acétate de vinyle renforcé avec des charges de verre argentées S-3000S2M, et de composite de mortier renforcé par des fibres de bois de palmier dattier, a été estimée à l'aide du logiciel COMSOL qui est basé sur la méthode des éléments finis.

Pour le composite (EVA /S-3000S2M), trois modèles de géométries (SC, FCC, BCC) ont été étudiés. Il a été constaté d'après cette étude que la conductivité thermique effective sont presque les mêmes pour les deux modèles de la FCC et BCC et les valeurs les plus élevées de la conductivité thermique effective sont obtenus pour le modèle SC. La résistance de contact (C), et la distance entre les inclusions (B) ont un effet important sur la conductivité thermique. En outre, les valeurs numériques de la conductivité thermique des modèles (FCC, BCC, SC) ont été trouvées en bon accord avec des modèles analytiques pour faible concentration de charges.

Concernant le composite Mortier/FPD, il a été conclu 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. Il a été observé aussi que le modèle de Lewis et Nielson donne une meilleure estimation de la conductivité thermique de composite par rapport aux autres modèles théoriques.

La distance entre les inclusions (B) présente aussi un paramètre important qui influe sur la conductivité thermique des matériaux composites.

II. Perspectives

D'après les résultats obtenus au cours de ce travail, et en vue d'une future utilisation raisonnable de ces matériaux composites, nous recommandons de compléter cette recherche par les axes suivants:

- Traitement des fibres de palmier dattier pour limiter le problème de l'absorption de l'eau de ces fibres.
- L'étude de la durabilité de béton de fibres de palmier dattier.
- Ajouter certains produits argileux aux mortiers à base de ciment pour améliorer la compatibilité de ciment avec le bois comme la pouzzolane.
- Ajouter des adjuvants aux composites pour améliorer ces propriétés, surtout les propriétés mécaniques.
- Effectuer d'autres caractérisations mécaniques comme la caractérisation de la résistance à la flexion, à la traction,...etc.

D'après l'étude numérique effectuée, nous avons constaté que les méthodes numériques développées pour déterminer la conductivité thermique de composites présente des limites. Ils ne fournissent pas une bonne estimation de la conductivité thermique, en particulier pour les concentrations inférieures à 60%, car les hypothèses de ces méthodes ne prennent pas en compte plusieurs paramètres influençant sur les propriétés finales du matériau composite. De ce fait, La modélisation numérique pourrait être développée avec d'autres modèles en prenant en compte les différents paramètres comme l'orientation, la taille et la forme des fibres, pour bien prédire la conductivité thermique d'un matériau.

Annexes

Annexes

Tableau 1: *Masses volumiques des composites MFPD₃ pendant 28 jours de séchage.*

Temps (jour)	Concentration des fibres fines (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
	Masse Volumique (kg/m ³)						
0	2023.7	1805.79	1675.21	1338.19	1271.67	1236.76	1199.4
7	1991.7	1686.04	1491.42	1165.69	1098.26	1000	946.74
14	1992.88	1495.6	1446.68	1111.11	1017.44	890.53	890.2
21	1947.16	1469.2	1443.14	1026.39	906.43	830.86	818.45
28	1910.8	1460.17	1372.05	983.72	860.29	760.41	697.01

Tableau 2 : *Masses volumiques des composites MFPD₆ pendant 28 jours de séchage.*

Temps (jour)	Concentration des fibres grosse (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
	Masse Volumique (kg/m ³)						
0	2023.70	1650.42	1774.19	1509.97	1324.36	1153.84	1138.72
7	1991.70	1472.05	1414.95	1242.07	1192.95	1013.15	951.11
14	1992.88	1449.7	1382.00	1210.37	1135.05	850.57	835.22
21	1947.16	1439.16	1378.69	1175.59	1077.36	840.57	820.80
28	1910.8	1425.81	1356.93	1149.25	1062.13	836.25	789.24

Tableau 3: *Masses volumiques des composites MFPD_{mix} pendant 28 jours de séchage.*

Temps (jour)	Concentration des fibres mixtes (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
	Masse Volumique (kg/m ³)						
0	2023.70	1664.75	1665.21	1605.79	1153.95	1158.5	1218.84
7	1991.70	1498.55	1393.58	1324.36	896.89	970.67	912.1
14	1992.88	1478.26	1371.34	1346.59	857.54	846.04	789.47
21	1947.16	1467.83	1372.43	1320.00	816.67	823.96	773.52
28	1910.80	1472.05	1349.71	1293.69	840.11	750.73	747.35

Tableau 4: Les résultats de gain massique et de taux d'humidité de l'échantillon (A).

Séchage à l'état naturel		Absorption			Séchage à l'état saturé			
Temps (mn)	Msec (g)	Temps (mn)	Msat (g)	Taux d'absorption (%)	Temps (mn)	Msec (g)	H(%)	Perte (%)
0	4.72	0	4.36	0	0	3.94	447.22	0
2	4.73	1	6.17	41.51	1	3.92	444.44	0.51
5	4.55	3	8.93	104.82	3	3.84	433.33	2.54
10	4.5	6	11.44	162.38	5	3.76	422.22	4.57
20	4.47	16	12.35	183.26	8	3.64	405.55	7.61
30	4.44	21	12.38	184.63	12	3.49	384.72	11.42
40	4.42	26	12.41	204.59	17	3.31	359.72	15.99
50	4.41	36	13.28	208.71	23	3.09	329.16	21.57
70	4.40	46	13.46	223.16	30	2.84	294.44	27.92
90	4.40	66	14.05	223.16	38	2.56	255.55	35.02
110	4.39	106	14.09	223.16	47	2.25	212.50	42.89
130	4.39	126	14.09	223.16	57	1.92	166.66	51.27
		146	14.09	223.16	70	1.54	113.88	60.91
					85	1.26	75.00	68.02
					105	0.91	26.38	76.90
					130	0.74	2.77	81.22
					160	0.72	0	81.72
					180	0.72	0	81.72

Tableau 5 : Les résultats de gain massique et de taux d'humidité de l'échantillon (B).

Séchage à l'état naturel		Absorption			Séchage à l'état saturé			
Temps (mn)	Msec (g)	Temps (mn)	Msat (g)	Taux d'absorption (%)	Temps (mn)	Msec (g)	H(%)	Perte (%)
0	1.73	0	1.59	3.14	0	1.79	155.71	0
5	1.66	1	1.64	64.15	1	1.76	151.43	1.67
15	1.63	3	2.61	90.56	3	1.72	145.71	3.91
30	1.62	6	3.03	100	6	1.61	130.00	10.05
45	1.61	16	3.18	116.98	10	1.44	105.71	19.55
60	1.61	21	3.45	125.78	15	1.28	82.86	28.49
75	1.60	26	3.59	132.70	21	1.11	58.57	37.98
90	1.59	36	3.70	137.11	28	0.99	41.43	44.69
105	1.59	46	3.77	142.77	36	0.87	24.28	51.39
120	1.59	66	3.86	154.09	45	0.79	12.86	55.86
135	1.59	106	4.04	161.63	55	0.75	7.14	58.10
150	1.59	126	4.16	167.29	70	0.72	2.86	59.78
165	1.59	146	4.25	169.18	85	0.71	1.43	60.33

180	1.59	166	4.28	174.21	105	0.71	0	60.33
195	1.59	186	4.36	176.10	130	0.70	0	60.33
210	1.59	206	4.39	176.10	155	0.70	0	60.89
225	1.59	226	4.39	176.10	180	0.70	0	60.89

Tableau 6 : *Propriétés thermophysiques de composite MFPD₃*

Matériaux	k (W. m ⁻¹ .K ⁻¹)	a (10 ⁻⁷ .m ² .s ⁻¹)	E _f (J. m ⁻² . °C. s ^{-1/2})	C _p (J.kg ⁻¹ . ° C)	ρ × C _p × 10 ³ (J.m ⁻³ . °C)
0%	0.8039	4.97	1174.62703	898.22	1716.32
5%	0.39328	2.45	793.61601	1096.77	1601.48
10%	0.23846	1.55	605.28656	1119.79	1536.42
15%	0.14002	0.95	452.30567	1485.26	1461.08
20%	0.1305	0.9116	432.19092	1663.78	1431.34
25%	0.11456	0.7828	409.45603	1924.57	1463.46
30%	0.10578	0.7472	386.93477	2030.64	1415.38

Tableau 7 : *Propriétés thermophysiques de composite MFPD₆*

matériaux	k (W. m ⁻¹ .K ⁻¹)	a (10 ⁻⁷ .m ² .s ⁻¹)	E _f (J. m ⁻² . °C. s ^{-1/2})	C _p (J.kg ⁻¹ . ° C)	ρ × C _p × 10 ³ (J.m ⁻³ . °C)
0%	0.8039	4.9752	1174.62745	898.22064	1716.32
5%	0.62778	3.8242	1015.16062	1151.33152	1641.58
10%	0.43044	2.8036	812.9296	1131.45114	1535.3
15%	0.22236	1.6042	555.19355	1206.19534	1386.22
20%	0.15568	1.0942	470.62954	1339.51588	1422.74
25%	0.11318	0.802	399.68335	1687.82063	1411.44
30%	0.06032	0.4292	291.12613	1780.29497	1405.08

Tableau 8 : Propriétés thermophysiques de composite MFPD_{mix}

Matériaux	k (W. m ⁻¹ .K ⁻¹)	a (10 ⁻⁷ .m ² .s ⁻¹)	E _f (J. m ⁻² . °C. s ^{-1/2})	C _p (J.kg ⁻¹ . °C)	ρ × C _p × 10 ³ (J.m ⁻³ . °C)
5%	0.3933	2.5272	798.86	1102.29	1622.64
10%	0.2385	1.7214	604.12	1133.78	1530.26
15%	0.1400	1.4384	452.49	1130.49	1462.5
20%	0.1305	0.7909	436.25	1735.87	1458.32
25%	0.1146	0.6366	401.16	1870.87	1404.52
30%	0.1058	0.6586	375.75	1786.34	1335.02

Tableau 9: Résistance à la compression des composites

Résistance à la compression (MPa)			
Concentration (%)	MFPD _{mix}	MFPD ₆	MFPD ₃
0	34.87	34.870	34.870
5	5.356	2.820	2.750
10	1.521	2.560	1.830
15	2.642	2.671	1.443
20	0.473	2.300	0.370
25	0.264	0.795	0.356
30	0.300	0.516	0.197

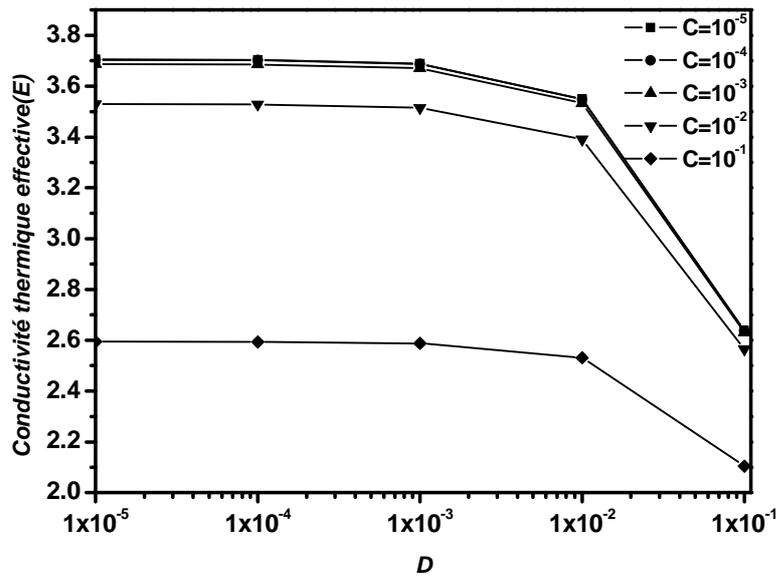


Figure 1 : Conductivité thermique effective en fonction des paramètres C et D , modèle SC ($\varphi = 41.1\%$)

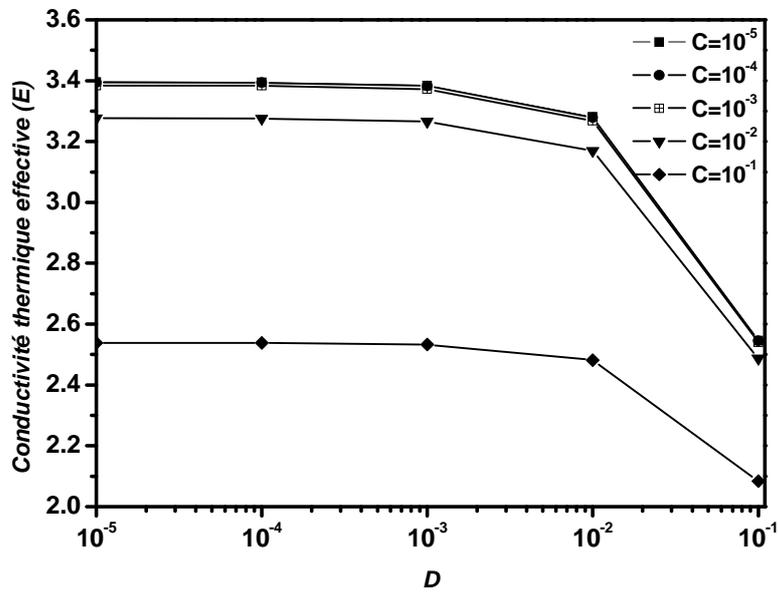


Figure 2 : Conductivité thermique effective en fonction des paramètres C et D , modèle BCC ($\varphi = 41.1\%$)

Titre du mémoire : DEVELOPPEMENT ET CARACTERISATION DE COMPOSITES NATURELS LOCAUX ADAPTES A L'ISOLATION THERMIQUE DANS L'HABITAT

Option : Physique Energétique.

Auteur : BENMANSOUR Nadia.

Mots clés : Isolation thermique, Thermique de l'habitat, Développement durable, Mortier, Propriétés thermiques, Propriétés mécaniques, Matériaux composites, Fibres de palmier dattier, Comsol.

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

Résumé:

L'objectif principal de ce travail consiste à contribuer à la valorisation des ressources naturelles et locales, tels que le bois de palmier dattier et le mortier, afin de les intégrer dans le domaine de l'isolation thermique des bâtiments.

Ce mémoire porte donc sur l'étude expérimentale des propriétés thermophysiques et mécaniques du mortier chargé du bois de palmier dattier en vue de l'utiliser dans les applications de l'isolation thermique des bâtiments. Trois types de fibres de palmier dattier ont été utilisés, ce qui permettra de mettre en évidence l'effet de la taille des fibres. Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de fibres de palmier dattier réduit la conductivité thermique et la résistance à la compression des matériaux composites, tout en réduisant le poids. En outre, la conductivité thermique des composites est fortement affectée par l'absorption de l'eau. L'influence de la concentration des FPD sur les propriétés mécaniques et thermiques du composite est plus significative que la taille des fibres. En effet, pour un pourcentage de fibres inférieur à 15%, les composites satisfont aux exigences thermiques et mécaniques des matériaux de construction et ils pourraient être utilisés comme nouveaux matériaux biocomposites pour l'efficacité énergétique dans les bâtiments. D'autre part, une étude numérique a été effectuée en utilisant la méthode des éléments finis pour prédire la conductivité thermique effective de composites. Cette approche numérique a été appliquée aussi pour estimer la conductivité thermique effective des biocomposites élaborés dans ce travail. En plus, une comparaison entre les résultats numériques, expérimentales et les modèles théoriques a été réalisée.

Report title: DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF COMPOSITE NATURAL LOCAL ADAPTED TO THERMAL INSULATION IN BUILDINGS

Keywords: Thermal insulation, Thermal building, Sustainability, Mortar, Thermal properties, Mechanical properties, Composite materials, Date Palm Fiber, Comsol.

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

Abstract:

The main objective of this work is to contribute to the enhancement of natural and local resources, such as the date palm wood and mortar, to integrate them in the field of thermal insulation of buildings.

This thesis therefore focuses on the experimental study of thermophysical and mechanical properties of mortar charged of date palm wood for use in applications of thermal insulation of buildings. Three types of palm date fibers were used, which will highlight the effect of fiber size. The results obtained show that the incorporation of date palm fibers reduces the thermal conductivity and the compressive strength of composite materials, while reducing the weight. In addition, the thermal conductivity of the composite is greatly affected by the absorption of water. The influence of the concentration of the DPF on the mechanical and thermal properties of the composite is more significant than the size of the fibers. Indeed, for a percentage of fibers less than 15%, the composite satisfy the thermal and mechanical requirements of building materials and they could be used as new biocomposite materials for energy efficiency in buildings. On the other hand, a numerical study was carried out using the finite element method to predict the effective thermal conductivity of composites. This numerical approach was also used to estimate the effective thermal conductivity of biocomposites developed in this work. In addition, a comparison between the numerical results, experimental and theoretical models was performed.