

# **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 : Physique Energétique**

Par

**Mourad CHIKHI**

## **METROLOGIE ET MODELISATION DES TRANSFERTS DANS LES COMPOSITES NATURELS A FAIBLE COUT POUR L'ISOLATION THERMIQUE DANS LES PANNEAUX SOLAIRES**

Soutenue le 24 Novembre 2013 devant les membres de jury :

Dr. Mounir Aksas	M.C.A	Université de Batna	Président
Dr. Messaoud Benounis	M.C.A	Université de Khenchela	Examineur
Pr. Hamid Satha	Pr.	Université de Guelma	Examineur
Dr. Abderrahim Boudenne	M.C. HDR	U. Paris-Est en France	Examineur
Dr. Fouad Khaldi	M.C.A	Université de Batna	Examineur
Dr. Boudjemaa Agoudjil	M.C.A	Université de Batna	Rapporteur

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

## **Remerciement**

*Ce travail de recherche a été mené au sein du laboratoire de physique énergétique appliquée à l'Université Hadj Lakhdar de Batna. Je tiens ici à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse.*

*Tout d'abord je tiens à remercier sincèrement mon directeur de thèse, Boudjemaa Agoudjil, pour m'avoir accueilli dans son équipe et m'avoir épaulé dans la réalisation de cette thèse. J'ai eu la chance de bénéficier d'un encadrant sérieux, attentif et pleins d'humour. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir fait confiance et de m'avoir permis de réaliser cette thèse dans la sérénité.*

*Je souhaite exprimer ma gratitude envers Abderrahim Boudenne qui a souvent été disponible pour m'écouter et discuter et 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... J'ai eu plaisir à travailler avec lui et ses conseils m'ont beaucoup apporté.*

*Mes remerciements vont également à Mounir Aksas qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse et aussi aux Messaoud Benounis, Hamid Satha, Abderrahim Boudenne et Fouad Khaldi, pour avoir accepté de participer au jury et m'avoir suggéré de nombreux conseils et pistes de réflexion.*

*Je suis également reconnaissant à Abdelkader Gherabli, pour son aide surtout pour avoir la matière première utilisée dans cette thèse.*

*Je tiens à remercier les personnels des laboratoires de CNERIB qui m'ont permis d'effectuer la partie expérimentale de cette thèse dans de très bonnes conditions.*

*Je tiens à exprimer toute ma sympathie et mon attachement à mes amis et à ma famille. Je remercie tout ceux qui se sont déplacés lors de ma soutenance et ont participé à préparer la réception, particulièrement la famille Chekired.*

*J'en profite pour exprimer ma profonde affection à mes parents pour leur générosité et pour l'ensemble de ce qu'ils m'ont apporté, sans oublier ma sœur et son fils Abdou.*

*Enfin, mes vifs remerciements s'adressent à ma chère femme F. Chekired. Merci pour ton soutien, ta patience et ta douceur...*

*Merci d'être à mes côtés tout simplement, et ce, pour mon plus grand bonheur...*

*A ma chère fille Meriem Aya*

*Et à l'esprit de ma mère.....*

# Table des matières

Introduction générale.....i

## Chapitre I. Composites naturels et isolation Thermique

I. Introduction..... 1

II. Isolation Thermique dans les panneaux Solaires..... 1

    II.1. Isolation Thermique..... 1

    II.2. Panneaux Solaires..... 1

III. Différents Types d’Isolants Thermiques ..... 2

    III.1. Isolants Synthétiques..... 2

        III.1.1. Le polyuréthane PUR et le polyisocyanurate PIR..... 2

        III.1.2. Le polystyrène expansé EPS ..... 3

        III.1.3. Le polystyrène extrudé XPS..... 3

        III.1.4. La mousse phénolique PF ..... 3

    III.2. Isolants d’origine minérale..... 3

        III.2.1. Laine de roche ..... 3

        III.2.2. Laine de verre..... 4

    III.3. Isolants d’origine végétale ..... 4

        III.3.1. Panneaux de fibres de bois ..... 4

        III.3.2. Laine de cellulose..... 5

        III.3.3. Le liège expansé ..... 5

        III.3.4. Le chanvre ..... 5

    III.4. Etude Comparative des isolants thermiques..... 5

        III.4.1. Critères de comparaison ..... 5

        III.4.2. Etude comparative..... 6

III.4.3. Analyse comparative du choix d'isolant .....	7
IV. Composites Naturels .....	8
IV.1. Composites.....	8
IV.2. Matériaux composites à base de Fibres Naturelles .....	9
IV.2.1. Enjeux .....	10
IV.3. Etat de l'art sur les composites naturels.....	11
IV.3.1. Matrice polymère et fibres végétales .....	11
IV.3.2. Matrice minérale et fibres végétales .....	12
IV.4. Composite Gypse/ fibre du bois de Palmier Dattier .....	13
IV.4.1. Bois de Palmier Dattier (phoenix dactylifera) .....	13
IV.4.2. Morphologie.....	15
IV.4.3. Composants du bois de palmier dattier .....	15
IV.5. Synthèse sur les caractéristiques mécaniques et physiques du Bois de Palmier Dattier .....	17
IV.5.1. Composition chimique .....	17
IV.5.2. Propriétés mécaniques.....	19
IV.5.3. Influence des traitements sur les caractéristiques mécaniques des BPD .....	20
IV.5.4. Propriétés thermophysiques .....	21
IV.5.5. Influence du traitement chimique sur la résistance thermique.....	23
IV.6. Matrice: Gypse.....	24
IV.6.1. Introduction.....	24
IV.6.2. Plâtre .....	25
IV.6.3. Le gypse .....	26
IV.6.4. Les produits de déshydratation du gypse .....	27
IV.6.5. Le taux de gâchage.....	29
IV.6.6. Origine des propriétés mécaniques du plâtre pris .....	30



V. Composite Gypse- Bois de Palmier Dattier .....	30
V.1. Composites à base de bois et de matériau inorganique .....	30
V.1.1. Composites bois-gypse.....	31
V.2. Méthodes de mise en œuvre de composites bois-gypse .....	32
V.2.1. Le procédé semi sec .....	32
V.2.2. Le procédé humide .....	32
V.3. Réponse du matériau à une sollicitation mécanique .....	33
V.3.1. Effet du bois sur la prise des matériaux inorganiques.....	34
V.3.2. Propriétés physiques et mécaniques des composites bois-gypse .....	34
VI. Conclusion.....	35

## **Chapitre II. Méthodes de prédiction de la conductivité thermique des composites**

I. Introduction à la conductivité thermique effective des composites.....	40
II. Modèles théoriques de la conductivité thermique .....	40
II.1. Discussion des différents Modèles théoriques.....	44
III. Méthodes expérimentales de mesures de $k$ effective .....	45
III.1. Les méthodes en régime stationnaire .....	46
III.2. Les méthodes en régime instationnaires.....	46
IV. Modélisation Numériques .....	47
IV.1. Introduction .....	47
IV.2. Modélisation des propriétés de transfert dans les matériaux composites .....	48
IV.3. Modélisation Numérique pour la détermination de $k$ par « Comsol » .....	50
V. Conclusion.....	50

### **Chapitre III. Modélisation numérique de la conductivité thermique dans les composites**

I. Introduction.....	55
II. Expérimental.....	55
III. Modélisation numérique.....	56
IV. Résultats et Discussions .....	59
IV.1. Effet de la taille des charges .....	63
IV.2. Effet de type des charges .....	67
V. Conclusion.....	68

### **Chapitre IV. Etude expérimentale**

I. Introduction.....	72
II. Matériaux utilisés .....	72
II.1. Bois du palmier dattier (BPD) .....	72
II.2. Broyage mécanique .....	73
II.3. Analyse granulométrique.....	74
II.4. Gypse .....	76
III. Préparation des composites .....	77
III.1. Choix du taux de gâchage .....	77
III.2. Calcul des masses de fibres et de matrice dans les composites .....	78
III.3. Mise en œuvre des échantillons .....	78
III.4. Essais et mesures .....	80
III.4.1. Résistance à l'eau .....	80
III.4.2. Essais mécaniques .....	80
III.4.3. Caractérisation thermophysique .....	84
IV. Conclusion .....	86

## **Chapitre V. résultats et Discussions**

I. Introduction.....	89
II. Effet de l'eau .....	89
II.1. Résistance à l'eau .....	89
II.2. Influence de l'humidité.....	91
III. Propriétés Mécaniques .....	96
III.1. Résistance à la compression.....	96
III.2. Résistance à la flexion.....	100
III.3. Comparaison avec les résultats mécaniques des composites à base de gypse .....	104
IV. Propriétés thermophysiques .....	105
IV.1. Conductivité thermique.....	105
IV.2. Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique.....	106
IV.3. Comparaison avec des composites naturels utilisés pour l'isolation thermique.....	109
IV.4. Corrélation entre propriétés thermiques et résistances mécaniques.....	110
IV.5. Corrélation expérimentale entre les propriétés .....	112
V. Conclusion.....	115

## **Chapitre VI. Etude technico-économique**

I. Introduction.....	119
II. Critères de choix des isolants .....	119
II.1. Propriétés thermiques .....	119
II.2. Propriétés techniques.....	119
II.3. Propriétés environnementales.....	120
II.4. Propriétés économiques.....	120
II.5. Qualité de l'isolant.....	120

III. Facteurs déterminant le choix des épaisseurs de l'isolant.....	121
III.1. Les températures .....	121
III.2. Conductivité de l'isolant .....	122
III.3. Déperditions admises .....	122
III.4. Prix de l'isolant .....	122
III.5. Prix de l'énergie .....	122
III.6. Taux d'amortissement .....	122
III.7. Temps d'utilisation.....	122
III.8. Fabrications commercialisées .....	123
IV. Les paramètres de calculs économiques de l'isolation .....	123
IV.1. Le coût de l'isolant.....	123
IV.2. Epaisseurs de l'isolant.....	124
IV.3. La durée de vie de l'isolant .....	125
V. Evaluation des coûts de fabrication du biocomposite .....	126
V.1. Diagramme général du procédé.....	126
V.2. Coût de la matière première et de son broyage .....	126
V.2.1. Bois de palmier dattier .....	126
V.2.2. Plâtre.....	127
V.3. Estimation du surcoût au mètre carré de panneau de biocomposite.....	127
VI. Application du biocomposite dans l'isolation thermique .....	128
VI.1. Panneaux solaires .....	128
VI.2. Comparaison des isolants appliqués pour les Panneaux Solaires .....	130
VI.3. Bâtiment .....	131
VII. Conclusion.....	134
<b>Conclusions générales et perspectives.....</b>	<b>136</b>

# **Introduction**

## **I. Introduction**

La diminution de la consommation énergétique des bâtiments constitue un enjeu majeur de ce début de siècle. La réalisation de bâtiments à faible consommation d'énergie est un processus complexe qui nécessite le développement d'outils performants d'assistance à leur conception, leur construction et leur maintenance.

D'après Blom *et al.* [1], jusqu'à 80 % de l'énergie mondiale est consommée dans les villes et a pour conséquence des quantités importantes d'émissions de gaz à effet de serre. L'industrie du bâtiment représente 50% de la consommation totale d'énergie, que ce soit lors de la construction, de la maintenance ou de l'exploitation des bâtiments (chauffage, rafraîchissement, éclairage etc.) [1]. La production de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) due à l'utilisation des carburants fossiles pour cet effet est maintenant reconnue comme cause majeure au réchauffement de l'atmosphère.

En Algérie, comme dans le reste de l'Afrique du nord l'installation des équipements de chauffage et de climatisation «grands consommateurs de l'énergie» dans les maisons est devenu très coûteuse faute d'isolation thermique. La consommation énergétique des bâtiments en Algérie est estimée à 40 % de la consommation globale [2]. Il serait toutefois possible de diminuer significativement cette consommation en renforçant l'isolation thermique des bâtiments existants et cela en utilisant pour les nouvelles constructions des matériaux de construction très isolants et à faible coût énergétique. C'est dans ce contexte, que le gouvernement algérien entend réaliser 3000 logements écologiques et la rénovation thermique de 4000 autres logements existants, ainsi que 20 % pour le tertiaire dans le cadre du programme quinquennal 2010/2014 [2].

L'intégration des énergies renouvelables tels que l'énergie solaire dans le bâtiment n'est pas seulement définie comme une application avantageuse dans le bâtiment, mais elle représente aussi une qualité de vie [3]. Parmi les applications d'énergie solaire, le chauffe-eau solaire. Notre intervention s'accroît sur l'isolation thermique dans les panneaux solaires en utilisant des matériaux appropriés et renouvelables.

Le choix de matériaux pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires repose sur la structure de leur matrice solide et sur la nature chimique de la substance qui la constitue : isolants fibreux, cellulaires et granulaires de nature minérale et organique. Pour les isolants fibreux ils se présentent sous deux formes, minérales et organiques [4]. La première forme est manufacturée à partir de matières amorphes fondues: roche (basalte en particulier), verre,

silice vitreuse et oxydes métalliques. Les principales dérivées sont les laines minérales et les isolants en fibres céramiques (silice alumine). La deuxième forme (isolants fibreux organique), peut être d'origine naturelle, comme les fibres ou laine de bois, la laine animale (mouton) ou manufacturés à partir de matières plastiques comme les fibres de polyester.

Les isolants cellulaires, ce sont les matériaux poreux à matrice solide consolidée contenant des cellules fermées ou ouvertes ou partiellement ouvertes, contenant de l'air ou un autre gaz ayant servi à l'expansion du matériau initial. Dans les panneaux solaires, ce sont les isolants cellulaires organiques qui sont les plus utilisés. Ils sont représentés par une grande diversité de matériaux plastiques alvéolaires et de mousses à base de produits carbonés : le polystyrène expansé et extrudé, le polyuréthane, le polychlorure de vinyle, la mousse phénolique et les mousses souples d'élastomère.

L'utilisation des matériaux naturels et locaux comme isolants représente une alternative prometteuse, aux systèmes actifs pour le chauffage ou la climatisation. L'usage des matériaux naturels, après transformation, répond à ces besoins par leur pouvoir isolant et parce qu'ils produisent relativement peu d'impacts négatifs sur l'environnement lors de leur production. Isoler à l'aide des matériaux naturels est une démarche écologique.

Le succès des matériaux composites provient de la possibilité d'obtenir des propriétés très diverses en fonction des caractéristiques des phases constituantes. La caractéristique effective d'un matériau composite ne dépend pas seulement des propriétés physiques de ses constituants, mais elle est également déterminée par la microgéométrie d'un tel système hétérogène. Il s'agit principalement des formes d'inclusions, de leurs répartition dans la matrice, de leur orientation par rapport aux contraintes externes (forces électriques, forces mécaniques, ...), et de leur fraction volumique (concentration).

Les matériaux composites se distinguent par leurs constituants. Parmi eux, les composites naturels qui sont en forte hausse grâce à leurs propriétés intrinsèques. Un autre contexte expliquant l'intérêt pour les composites naturels, est une certaine prise de conscience environnementale. Cette dernière s'exprime de deux manières. Les composites naturels sont de bons isolants thermiques compte tenu des propriétés physiques qu'ils possèdent. Ils permettent donc de réaliser des économies d'énergie substantielles. De plus, l'utilisation de fibres végétales s'inscrit dans une démarche de développement durable. Elle présente l'avantage d'utiliser une matière première renouvelable, contrairement aux charges synthétiques dont les ressources s'appauvrissent. Par ailleurs, ces fibres sont dégradables de

manière naturelle, ce qui n'est pas négligeable dans le contexte actuel de limitation des déchets.

Parmi les fibres végétales qui sont considérées comme déchet en Algérie, les fibres de bois de palmier dattier. En dépit de son important potentiel quantitatif en Algérie (210 000 tonnes de pétioles, 73 000 tonnes de folioles et 52 000 tonnes de grappes chaque année) [5,6], le bois de palmier n'est pas utilisé dans les différents secteurs industriels, et ceci faute d'une valorisation de ce matériau. 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 FBPD représentent un matériau de renforcement très efficace pour l'isolation thermique [5].

Dans ce mémoire nous nous intéressons au développement d'un nouveau biocomposite constitué de fibres naturelles dispersées dans une matrice gypse, en vue de l'utiliser comme isolant thermique dans les panneaux solaire (et/ou 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 FBPD sur les propriétés thermophysiques et mécaniques des composites ont été étudiées.

La problématique majeure de ce travail, c'est : Est-ce que ce nouveau biocomposite répondra aux critères de choix techniques et économiques pour son application pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires (et/ou bâtiment) ?

Parallèlement à ce travail expérimental, un modèle mathématique basé sur la méthode des éléments finis est introduit afin de prédire la conductivité thermique des matériaux hétérogènes.

Le but de la modélisation numérique, proposée dans cette étude, est d'élaborer un modèle numérique d'estimation de la conductivité thermique effective d'un matériau composite (deux phases) en utilisant la méthode des éléments finis. Le composite choisi est constitué de matrice polymère chargée par des particules métallique. Deux paramètres sont étudiés, la taille et la concentration des particules. Cette étude a permis d'évaluer l'approche numérique par rapport aux résultats expérimentaux.

L'approche numérique de la prédiction de la conductivité thermique effective des composites à base de polymères sera appliquée par la suite pour estimer la conductivité thermique effective des biocomposites élaborés dans ce travail.



Ce mémoire se structure selon le plan ci-dessous:

Dans le *premier chapitre* de ce mémoire, nous présentons tout d'abord quelques définitions concernant l'isolation thermique, les matériaux composites en se limitant aux composites renforcés par des fibres naturels. Une synthèse bibliographique sur les matériaux utilisés dans ce travail, les fibres de bois de palmier dattier et le gypse, en précisant leurs compositions chimiques, leurs caractéristiques thermiques et mécaniques. Ensuite, les méthodes de mise en œuvre des composite Bois de palmier dattier/ gypse sont présentées.

La *deuxième partie* de ce rapport est consacrée à la présentation et à l'analyse des différents outils de prédiction de la conductivité thermiques des matériaux composites. Les méthodes expérimentales, théoriques et numériques de prédiction de  $k$  sont discutées, en précisant leurs avantages, inconvénients et leurs limites d'application.

Une étude numérique effectuée sur des matériaux composites constitués d'une matrice (matériau homogène) et de renforts ayant des propriétés très différentes de celles de la matrice est présentée dans le *troisième chapitre*. L'outil utilisé pour la modélisation numérique de  $k$  est basé sur la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL. L'effet de la concentration, de la distribution spatiale et de la taille des fibres sur  $k$  des composites est étudiée. Les résultats numériques obtenus sont comparés aux résultats expérimentaux et théoriques.

Dans le *chapitre quatre*, nous nous intéressons à la mise en œuvre et au contrôle des échantillons de composites réalisés à base de gypse et de fibres naturelles (fibres de bois de palmier dattier). Les différents essais thermiques et mécaniques effectués sur les composites sont illustrés dans ce chapitre. Une étude granulométrique sur les fibres de bois de palmier dattier nous renseigne sur la taille des fibres utilisées.

Nous présentons dans le *cinquième chapitre* les résultats des mesures de propriétés thermophysiques et mécaniques et l'absorption d'eau des composites réalisés à base de gypse et de fibres de bois de palmier dattier. Dans cette partie nous discutons 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 ont été comparés à ceux existants dans la littérature pour une application d'isolation thermique.

Enfin, une étude technico-économique est présentée dans le *sixième chapitre* afin d'évaluer l'avantage technique et économique de l'utilisation des composites naturels dans l'isolation thermique. Une étude comparative technico-économique du biocomposite élaboré dans cette étude avec d'autres isolants de diverses origines est présentée dans ce chapitre.

## Références

- [1] I. Blom, L. Itard, A. Meijer, *Environmental impact of building-related and user-related energy consumption in dwellings*. Building and Environment, 2011, Vol. 46: pp. 1657-1669.
- [2] S. Rosiek, F.J. Batlles, *Renewable energy solutions for building cooling, heating and power system installed in an institutional building: Case study in southern Spain*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, Vol. 26: pp. 147-168,.
- [3] *Isolation thermique des bâtiments*, Portail Algérien des Energies Renouvelable, 2012. <http://portail.cder.dz./spip.php?article2854>.
- [4] C. Langlais, S. Klarsfeld, *Isolation thermique à température ambiante. Propriétés, Techniques de l'ingénieur Matériaux à propriétés thermiques. Matériaux pour l'énergie*, Vol. TIB536DUO, Editions T.I., 2004, be9860.
- [5] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, *Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood*. Energy and Buildings, Vol. 43, 2011: pp. 491-497.
- [6] 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 :**  
**Composites naturels et**  
**isolation Thermique**

## I. Introduction

Le but de ce premier chapitre est de présenter une synthèse bibliographique concernant les composites naturels et l'isolation thermique dans les Panneaux Solaires. La première partie est consacrée aux rappels des définitions de l'isolation thermique et des panneaux solaires. Cette partie se termine par une étude comparative des isolants thermiques afin de justifier le choix de cette étude. Dans la deuxième partie de ce chapitre, des généralités sur les composites naturels sont présentés. Ensuite, on se focalisera sur l'état de l'art des propriétés physiques, thermiques et mécaniques des constituants du composite Gypse/fibre du Bois de Palmier Dattier (BPD).

## II. Isolation Thermique dans les panneaux Solaires

### II.1. Isolation Thermique

L'objectif principal de l'isolation thermique dans les panneaux solaires est de diminuer les pertes par convection et ralentir ainsi le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Le choix du matériau à utiliser dépend de: sa résistance aux températures de fonctionnement, la permanence de ces caractéristiques dans le temps (conductivité thermique) et la résistance aux chocs, à l'humidité, au feu, à l'eau de pluie....etc. [1].

### II.2. Panneaux Solaires

Les panneaux ou capteurs solaires sont des dispositifs dont le principe de fonctionnement est basé sur la transformation de l'énergie solaire en chaleur. Les différents composants d'un capteur sont :

1. *Absorbeur* : Il a pour fonction d'absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur, tout en minimisant les pertes.
2. *Vitrage isolant* : La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur.
3. *Un isolant thermique* : limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur est primordial si on cherche à optimiser les performances de ce dernier. Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation arrière et latérale. On

place une ou plusieurs couches d'isolant, subsidiairement un coffrage étanche à l'eau et un système de support mécanique de l'ensemble.

Les différents isolants existants et les critères de choix de notre matériau sont exposés dans ce qui suit.

### **III. Différents Types d'Isolants Thermiques**

Différents types de matériaux isolants sont utilisés dans divers secteurs. Papadopoulos [1], présente un état de l'art sur les matériaux isolant issus de diverses sources. L'auteur de [1] évalue l'importance des matériaux isolants selon leurs caractéristiques intrinsèques.

Trois principales catégories d'isolants thermiques sont utilisées : les isolants en mousse synthétiques, les isolants à base de matériaux d'origine minérale et les isolants à base de matériaux d'origines végétales [2].

#### **III.1. Isolants Synthétiques**

Les isolants synthétiques sont généralement utilisés comme isolation par l'extérieur. Cabeza *et al.* [3] ont mesuré les propriétés d'isolation des panneaux de polyuréthane, polystyrène et laine de verre, pour utilisation comme isolant extérieur dans le bâtiment. Ils ont constaté que ces matériaux constituent un bon isolant avec des caractéristiques thermiques intéressantes. Néanmoins, il existe plusieurs types d'isolant synthétiques, nous citons quelques exemples :

##### **III.1.1. Le polyuréthane PUR et le polyisocyanurate PIR**

Il s'agit de panneaux à base de mousse expansée de polyuréthane ou de polyisocyanurate. La mousse polyuréthane se caractérise par un pouvoir isolant élevé. Cependant, il présente une faible résistance à la chaleur, au feu et au rayonnement ultraviolet. Les panneaux de polyisocyanurate présentent un meilleur comportement au feu que le polyuréthane mais ses propriétés mécaniques sont plus faibles.

### III.1.2. Le polystyrène expansé EPS

Il s'agit de panneaux à base de mousse expansée de polystyrène. La mousse de polystyrène expansée est obtenue à partir d'hydrocarbures (styrènes) expansés à la vapeur d'eau et au pentane. L'EPS ne peut pas être exposé à des températures excédant 70°C. Il résiste moins bien au feu.

### III.1.3. Le polystyrène extrudé XPS

Il s'agit de panneaux à base de mousse extrudée de polystyrène. Il se caractérise par sa structure cellulaire fermée et une surface d'extrusion qui permet son utilisation en milieu humide. Son coefficient de dilatation thermique est très élevé. Il résiste moins bien au feu et à une exposition prolongée à une température supérieure à 75°C.

### III.1.4. La mousse phénolique PF

Il s'agit de panneaux à base de mousse phénolique à structure cellulaire fermée. Elle possède un bon comportement au feu et un pouvoir isolant élevé.

## III.2. Isolants d'origine minérale

Parmi Les types d'isolants rencontrés, on trouve les laines minérales:

### III.2.1. Laine de roche

Les fibres de laine de roche sont liées à l'aide de résines synthétiques polymérisées pour former des rouleaux et des panneaux. La laine de roche est totalement perméable à la vapeur d'eau mais non hygroscopique. Elle est non capillaire et totalement perméable à l'air. Elle a une bonne stabilité thermique et une bonne résistance au feu. Elle est fortement compressible, mais elle possède une faible résistance au délaminage.

### III.2.2. Laine de verre

Les fibres de laine de verre sont liées à l'aide d'un produit thermodurcissant pour former des rouleaux et des panneaux. Elle est totalement perméable à la vapeur d'eau mais non hygroscopique. Elle est non capillaire et totalement perméable à l'air. Elle a une bonne stabilité thermique et un comportement au feu moins bon que le comportement de la laine de roche.

La gamme des isolants d'origine minérale ne se limite pas à ces deux laines. On trouve aussi : Le verre cellulaire, La perlite expansée et l'argile expansée. Chaque isolant possède sa propre mise en œuvre et ses propres caractéristiques.

### III.3. Isolants d'origine végétale

Les isolants d'origines végétales sont de plus en plus utilisés dans le domaine d'isolation et cela grâce à leurs caractéristiques intéressantes et leurs disponibilité. Pinto *et al.* [4] ont étudié les propriétés d'isolation d'un mur conçu d'un matériau isolant d'origine naturel (Epis de maïs) mélangé avec de la terre. Ces murs ont été utilisés par les *Tabique* (ancien peuple du Portugal) comme isolant extérieur de leurs maisons. [4] déduisent que ces murs possèdent des propriétés thermiques très intéressantes. Une synthèse bibliographique de quelques isolant d'origine naturelle est apportée par Jelle *et al* [5].

Parmi les matériaux isolants disponibles, on trouve :

#### III.3.1. Panneaux de fibres de bois

Ils sont obtenus à partir du défibrage de chute de bois résineux. Généralement, ces chutes sont transformées en pâte par adjonction d'eau, puis coulées, laminées et séchées pour produire des panneaux auto-agglomérés de diverses formulations, densité, profilage et épaisseurs. Ils sont utilisés comme isolant ou comme panneaux techniques complémentaires d'isolation. Ils sont difficilement combustibles.

### III.3.2. Laine de cellulose

Elle provient du papier recyclé. Le papier est défibré et réduit en flocons, puis stabilisé par incorporation de divers agents de texture et ignifugeants, variables selon les fabricants. La laine de cellulose se présente en panneaux isolants texturés ou en panneaux d'agencement. Elle est auto-extinguible.

### III.3.3. Le liège expansé

Le liège est réduit en granules puis expansé à la vapeur à haute température (300°C). L'aggloméré est ensuite découpé selon les épaisseurs désirées. Le degré d'isolation du liège expansé est principalement dû à la présence de l'air dans ces cellules intérieures. Il se présente en granules, en panneaux ou en éléments composites préfabriqués. Il est difficilement combustible.

### III.3.4. Le chanvre

Les particules issues de la partie centrale de la tige (chènevotte) qui sont entourées par les fibres longues (filasse) sont soumises à un traitement d'imprégnation par les silicates. Il existe plusieurs présentations : en granules de chènevotte, en granules et fibres longues (chanvre entier) ou en fibres longues seules (laine de chanvre). Il est difficilement inflammable.

## III.4. Etude Comparative des isolants thermiques

### III.4.1. Critères de comparaison

Le choix de l'isolant thermique doit prendre en considération la minimisation des pertes de chaleur. Néanmoins, d'autres critères interviennent dans le choix de l'isolant. Ces critères sont aussi bien liés à la technologie qu'à la mise en œuvre. Les caractéristiques physiques des isolants sont les premiers critères de choix. La conductivité thermique est la caractéristique principale de l'isolant. L'étanchéité à l'air et le comportement à l'eau sont également essentiels dans ce choix selon le domaine d'application [1].



D'autres critères permettent de distinguer les isolants, tel que, le comportement au feu et à la chaleur. La densité de fumée produite permet également de juger la performance au feu de l'isolant. Les propriétés mécaniques des isolants permettent également de les distinguer suivant l'utilisation.

Concernant la mise en œuvre des isolants, leur présentation en panneau rigide, en rouleau ou en vrac détermine la forme de support admissible. Le critère de durabilité d'un isolant permet de s'assurer de la pérennité de l'ouvrage.

Avec le développement de nouvelles réglementations, le comportement de l'isolant vis-à-vis l'environnement est devenu un des principaux critères de choix des isolants.

Dans le cas où le client souhaite recourir à des matériaux respectueux de l'environnement, des solutions performantes doivent lui être proposées. En effet, la variation du coût de l'isolant est proportionnelle à ses performances et l'épaisseur du panneau.

#### III.4.2. **Etude comparative**

Le tableau I.1 présente les principales caractéristiques déterminantes pour le choix d'un isolant [2].

**Tableau I.1 : Propriétés des matériaux isolants**

		$k$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Comportement à l'eau	Comportement à la chaleur	Propriétés mécaniques	Environnement
Isolants synthétiques	Polystyrène expansé <b>EPS</b>	0.032-0.046	Faible absorption	Tp <sub>max</sub> = 70°C	Bonne résistance à la compression	Non recyclable, dégagement de gaz toxique en cas d'incendie
	Polystyrène Extrudé <b>XPS</b>	0.028-0.041	Très faible absorption	Tp <sub>max</sub> = 75°C	Très bonne résistance à la compression	
	Polyuréthane <b>PUR</b>	0.022-0.038	Très faible absorption	Faible Résistance	Faible résistance au choc	
	Mousse phénolique <b>PF</b>	0.032	Sensible à l'humidité	Faible Résistance	Bonne résistance à la compression	
Isolants minérales	Laine de roche	0.034-0.045	Bonne Résistance	Bonne Résistance	Fortement compressible, Faible résistance au délaminage	Origine naturelle, difficilement recyclable
	Laine de verre	0.031-0.041	Non capillaire non hygroscopique	Bonne Résistance	compressible	
	Verre cellulaire	0.040-0.051	Etanche à l'eau	Bonne Résistance	Matériaux fragile	
Isolants végétales	Panneau de fibre de bois	0.044-0.052	sensible à l'eau	Bonne Résistance	Résiste la compression et le choc	Ressources renouvelables
	Laine de cellulose	0.040-0.045	sensible à l'eau, hygroscopique	Bonne Résistance	compressible	
	Liège expansé	0.040-0.047	sensible à l'eau	Bonne Résistance	Bonne résistance	
	chanvre	0.039	sensible à l'eau	Bonne Résistance	Bonne résistance	

### III.4.3. Analyse comparative du choix d'isolant

D'après le tableau I.1, en matière de conductivité thermique, les isolants d'origine synthétiques sont les plus performants. Cependant, leur production de fumée lors d'incendie est importante. Leur utilisation est possible dans les milieux humides et soumis à des efforts mécaniques. En générale, leur durabilité est satisfaisante, mais du point de vue environnement ce sont les matériaux les moins appropriés.

Les laines minérales possèdent des valeurs de conductivité thermique intéressante mais leur comportement à l'eau est faible. Leur comportement au feu et à la chaleur sont excellents. Leurs mise en œuvre est aisée et la présentation en rouleaux permet un usage sur de grande

surfaces aux formes variables. Cependant, leur caractère irritant pour la peau nécessite de prendre toutes les précautions.

Le verre cellulaire est un matériau performant mais son utilisation reste limitée à des cas spécifiques. Il est difficilement recyclable.

Comparer au niveau thermique avec les deux grandes catégories d'isolants ci-dessus, les matériaux d'origine végétale sont les moins performants. Mais, leurs comportements au feu et à la chaleur sont satisfaisants. Leur principal avantage réside dans le fait que ce sont des matériaux recyclables. Du point de vue de l'environnement, ce sont les matériaux les plus adéquats et leur utilisation ainsi que leurs caractéristiques sont en cours de développement. Ces caractéristiques leur permettent de conquérir les matériaux synthétiques dans plusieurs domaines.

A partir de cette analyse comparative, et vu nos critères de choix qui sont : les performances thermiques, le comportement au feu et à la chaleur, la résistance mécanique et issue d'origine naturelle, les isolants d'origine végétales sont les plus favorisés pour être appliqués dans les panneaux solaires.

Dans notre cas d'étude qui est l'isolation thermique dans les panneaux solaires, ces matériaux isolants vont être ajoutés comme renforts dans une matrice composée d'un autre matériau isolant pour former un composite isolant. Les caractéristiques de ce composite font l'objet de la partie suivante.

## **IV. Composites Naturels**

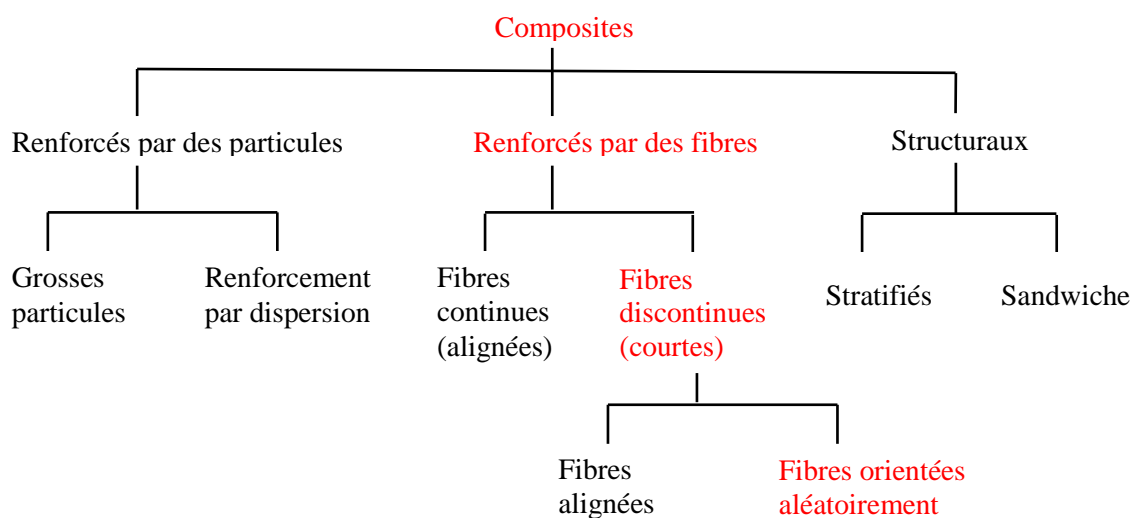
### **IV.1. Composites**

Les matériaux composites sont généralement des matériaux solides constitués à l'échelle microscopique par l'association de deux ou plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires. Cette association leur confère à l'échelle macroscopique un ensemble de propriétés physiques, que chacun des constituants pris isolément ne possède pas. Ces propriétés sont liées aux propriétés des matériaux qui les constituent, à leur distribution géométrique et à leurs interactions mutuelles [6].

Les matériaux composites peuvent associer des caractéristiques différentes, légèreté et résistance mécanique ou fragilité et ténacité. Un des constituants peut remplir la fonction de

matrice tandis que l'autre, immergé dans le premier, joue un rôle de renfort. Dans ce type de composite, la matrice est continue et enrobe une phase discontinue, le renfort, qui se présente sous forme de particules ou de fibres plus ou moins longues [7].

La figure I.1 présente une classification des matériaux composites. Nous distinguons trois catégories principales : les composites renforcés par des particules, les composites renforcés par des fibres et les composites structuraux. Chaque type de ces composites se divise à d'autres sous types [7].



**Figure.I.1** : Classification des différents types de composites

## IV.2. Matériaux composites à base de Fibres Naturelles

En fonction de la nature des constituants, les composites naturels sont classés en deux grandes classes : les composites à matrice polymérique et ceux à matrice minérale [8].

Nous nous intéressons plus précisément dans ce qui suit aux matrices minérales, comme le ciment ou le plâtre. Dans un premier temps, nous allons présenter les enjeux liés à l'utilisation de fibres naturelles.

#### IV.2.1. Enjeux

D'une manière générale, l'utilisation de fibres naturelles comme renforts de matériaux composites se justifie par :

- la valorisation d'une ressource locale: les composites à fibres naturelles ouvrant de nouvelles applications aux produits agricoles ;
- le développement des matériaux et des technologies prenant en compte l'impact sur l'environnement. Les fibres naturelles sont produites et se recyclent naturellement sur terre depuis des millions d'années (matériaux biodégradables et renouvelables par culture).

Le choix des fibres d'origine naturelles est guidé par :

- leur origine et leur fonction ;
- leur disponibilité : une fibre naturelle est considérée comme disponible si le volume de fibres présent sur le marché est suffisant pour réaliser des pièces industrielles. Sa production est liée à leur utilisation ;
- leur composition et leur structure souvent complexe. Bien que les matériaux composites soient souvent présentés comme originaux et innovants, le milieu naturel en offre déjà un large panel, que ce soit dans le monde végétal ou dans le monde animal. Une multitude de matériaux naturels, les uns rigides mais légers, comme les coquilles de noix, et les autres souples mais résistants, comme le bois, doivent leurs propriétés mécaniques à leur structure composite ;

Un matériau est dit biodégradable s'il est totalement décomposé par des micro-organismes (des bactéries par exemple) [8]. Les fibres naturelles sont biodégradables et doivent le rester à la suite des traitements qu'elles subissent pour une application de renfort d'un matériau composite (la vitesse de dégradation peut être, elle, modifiée). Le résultat de cette décomposition est la formation d'eau, de dioxyde de carbone et/ou de méthane et éventuellement de sous-produits non toxiques pour l'environnement.

Ces fibres sont considérées comme neutres vis-à-vis des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère puisque leur combustion ou leur biodégradation ne produit qu'une quantité de dioxyde de carbone égale à celle que la plante a absorbé pendant sa croissance. Les objets en composites à fibres naturelles sont donc plus faciles à recycler et, si leur matrice est biodégradable (biopolymères), ils sont compostables après broyage. Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont actuellement en cours de développement pour remplacer les

matériaux traditionnels, leurs applications sont encore limitées mais devraient s'élargir dans le futur, notamment dans le domaine de la construction [3].

Les fibres végétales utilisées comme renfort dans les matériaux composites présentent des avantages et des inconvénients. La biodégradabilité des fibres peut être considérée comme un avantage ou un inconvénient. Pour le recyclage, c'est un avantage. Par ailleurs, il n'existe pas de pièces industrielles à durée de vie illimitée, tout matériau étant voué à devenir déchet [7].

Parmi les avantages des fibres naturelles:

- Faible cout.
- Biodégradabilité.
- Neutre pour l'émission de CO<sub>2</sub>
- Ressource renouvelable.
- Pas de résidus après incinération.
- Propriétés mécaniques et spécifiques importantes.
- Demande peu d'énergie pour être produite.
- Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.
- Bon isolant thermique et acoustique.

Néanmoins, les fibres naturelles présentent plusieurs inconvénients :

- Absorption d'eau.
- Fibres anisotropes.
- Faible stabilité dimensionnelle.
- Renfort discontinu.
- Faible tenue thermique (200 à 300°C max).
- Variation de la qualité en fonction du lieu de croissance et des conditions météorologiques.

### **IV.3. Etat de l'art sur les composites naturels**

#### **IV.3.1. Matrice polymère et fibres végétales**

Les composites à matrice polymérique (CMP) sont généralement constitués d'une matrice de polymère et d'un renfort de fibres. Les matrices communément utilisées dans l'élaboration de composites à fibres naturelles sont les thermoplastiques, tel que le polypropylène et le polyéthylène [9-11], ou les thermodurcissables tel que le polyester [9,12]. L'utilisation des fibres végétales comme renforts est une application existante depuis de nombreuses

décennies. En 1908, par exemple, des composites associant une résine phénolique au coton ou au papier ont été développés pour la réalisation industrielle de panneaux et de tubes pour l'électronique [13]. Au cours des années trente, le Céloron (marque Tufnof), constitué de tissu de coton imprégné de résine phénolique, permettait la réalisation d'engrenages et de cames à longue durée de vie. Utilisable dans l'eau, ce matériau a été employé pour la fabrication de paliers d'arbres d'hélice, de pièces d'accastillage pour voiliers (joues de poulies, poupées de winch,...) ou dans des disjoncteurs de centrales électriques. Ces produits sont encore aujourd'hui disponibles [7]. En Inde, des maisons, des tôles de toitures, ont été conçus à partir de résine polyester/époxy renforcé par des fibres de jute et de sisal [14] L'entreprise Mercedes-Benz, utilise pour son modèle «classe A», un composite renforcé par des fibres de lin et de sisal, destiné aux garnitures intérieures de portières, de dossiers de sièges, aux supports de moquette ou à l'habillage du coffre. Pour cette application, des non-tissés à base de fibres végétales et de fibres thermoplastiques sont transformés par compression en température [7]. L'utilisation de ce matériau s'inscrit dans une démarche d'écoconception. En effet, la faible densité, le faible coût, la disponibilité et l'aptitude au recyclage de ces fibres encouragent le développement de nouvelles applications dans les composites. Les études techniques disponibles dans la littérature [12,15] rapportent que ces fibres ont un réel avantage concurrentiel face aux fibres de verre. Cependant, les fibres naturelles possèdent une absorption d'humidité élevée, qui peut être un problème majeur.

Les fibres naturelles possèdent donc un fort potentiel de développement comme agent de renfort dans les matrices polymères [12,16]. L'ensemble de ces études montre également que l'adhésion entre les fibres et la matrice joue un rôle primordial sur les propriétés mécaniques et thermiques du composite. Il est donc indispensable de connaître les interactions chimiques de surface entre les différents constituants des composites avant de réaliser une caractérisation mécanique ou thermique de l'ensemble [12].

#### IV.3.2. Matrice minérale et fibres végétales

Dans le domaine de l'habitat, le torchis est considéré comme le premier matériau composite de l'histoire. Il est composé d'une matrice (terre) et de renforts (fibres végétales). C'était le matériau de construction des habitations dès le néolithique. Les Celtes l'ont utilisé pour construire les murs de leurs maisons. Le torchis est une technique de construction du type ossature remplissage. Cependant, sous les tropiques, un insecte qui propage la terrible maladie

de Chagas se développe dans les murs de torchis et condamne toute promotion de cette technique dans les zones de basse altitude où cet insecte peut prospérer [7].

Les fibres végétales telles que le chanvre sont utilisées dans le bâtiment et la construction : la fibre pour l'isolation et la chènevotte (partie boisée du chanvre) en mélange avec des chaux ou des liants spécifiques pour confectionner des mortiers, des bétons de chanvre, ou des briques de chanvre. Les bétons de chanvre permettent de réguler l'hydrothermie et de garantir un confort d'isolation thermique. Une précision doit être apportée sur la désignation «béton de chanvre» qui correspond en fait à des mélanges de type chaux-chènevotte. Ils sont faciles à utiliser et apportent une bonne propriété acoustique. La chènevotte peut être exploitée dans tous les domaines de la construction : murs, doublages, cloisons, isolation de toiture et enduits. [16-18]

Le liège a été aussi utilisé comme un renfort dans les matrices cimentaires agissant comme isolant dans les constructions, [19,20]. Ghose *et al* [21] ont caractérisé les propriétés mécaniques et physiques d'un composite à base de ciment incorporés par des fibres longues de sisal. Les résultats montrent que ce type de composite présente une fissuration multiple après le test de flexion. Selon les auteurs de [21], ce comportement est dû à la faible compatibilité entre les fibres de sisal et le ciment.

Cunha *et al.* [22] présentent les résultats d'une étude expérimentale faite pour évaluer la durabilité du bambou, lors de son utilisation comme renforcement dans le béton. Les résultats montrent que les propriétés mécaniques après des cycles de temps, restent pratiquement les mêmes, attestant ainsi de la durabilité des bétons de bambou.

#### **IV.4. Composite Gypse/ fibre du bois de Palmier Dattier**

##### **IV.4.1. Bois de Palmier Dattier (*Phoenix dactylifera*)**

Le palmier dattier a été dénommé *Phoenix dactylifera* par Linné en 1753. *Phoenix* dérivé de *Phoinix*, nom du dattier chez les grecs de l'antiquité qui le considéraient comme arbre des phéniciens. *Dactylifera* vient du latin *dactylis*, dérivant du grec *dactylus*, signifiant doigt (en raison de la forme du fruit), associé au mot latin *fero*, porté, en référence aux fruits. Le *Phoenix dactylifera* résiste aussi bien à la chaleur, à la sécheresse et au froid. Il se trouve généralement sur la bande aride afro-asiatique qui s'étend de l'Afrique du Nord au Moyen-



Orient, plus précisément dans les Oasis du Sahara. Les phoenix sont des palmiers dioïques, il existe donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Ces dernières donnent une multitude de variétés de dattes. [23-25]

L'Algérie possède plus de 800 variétés de palmiers dattiers dans ses Oasis. Parmi les variétés les plus connues nous mentionnons (en appellation locale), le Dokar (le palmier mâle), la Deglette Nour, Elghers et la Degla bida. Les principales variétés de dattes algériennes et leur localisation sont représentées dans le tableau I.2.

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant plusieurs types de fibres [22]:

- fibres de bois par le broyage de son tronc.
- fibres de feuille au niveau des pédoncules.
- fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier.
- fibres de surface autour de son tronc.

**Tableau I.2 :** Principales variétés de dattes algériennes et leur localisation [26].

Variétés	Nombre de palmiers	Localisation
Ghars	2500000	Oued Righ, Zibens, Oued souf, Ouargla, M'zab, El golia.
Deglet Nour	1500000	Oued Righ, Zibens, Oued souf, Ouargla, M'zab, El golia.
Mech Degla	1500000	Oued Righ, Zibens, Oued souf.
Tilemson	500000	Touat, El Boléa, Gourara, Tidikelt.
Tin-Nacer	400000	Touat, El golia, Tidikelt.
Degla Beida	300000	Oued Righ, Zibens, Oued souf.
Tazerzait	100000	M'zab, Tidikelt, Saoura.
Tegaza	70000	Tidikelt, Touat, El golia, Hoggar.
Temjouhart	50000	El golia, Gourara, M'zab.
Takerboucht	42000	Tidikelt, Touat.
Tafezouine	35000	M'zab, Oued souf, Oued Righ,
Tanteboucht	10000	Oued Righ, Ouargla, Tidikelt.
Timedouel	8.000	M'zab, El golia.
Total des palmiers	7015000	

#### IV.4.2. Morphologie

Le palmier est une herbe géante de 20 à 30m de hauteur, au tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles, les feuilles sont pennées divisées et longues de 4 à 7m. Il appartient à la classe des monocotylédones (une feuille embryonnaire dans la graine). Les monocotylédones ont une organisation différente, ils n'ont pas de cambium (une couche mince située entre le bois et l'écorce), alors que le bois de palmier présentant une structure et des propriétés bien différentes de celle des autres arbres [25].

#### IV.4.3. Composants du bois de palmier dattier

Le bois de palmier dattier est constitué de plusieurs parties:

##### ➤ **Tronc**

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

##### ➤ **Couronne**

La couronne ou frondaison est l'ensemble des palmes vertes qui forment la couronne du palmier dattier. On dénombre de 50 à 200 palmes chez un palmier dattier adulte. Les palmes vivent de trois à sept ans, selon les variétés et le mode de culture. Elles sont émises par le bourgeon terminal ou « phyllophore », pour cela, on distingue: la couronne basale, la couronne centrale et les palmes du cœur [25].

##### ➤ **Palme**

La palme ou « Djérid » est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis. Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues [25].

##### ➤ **Fleurs**

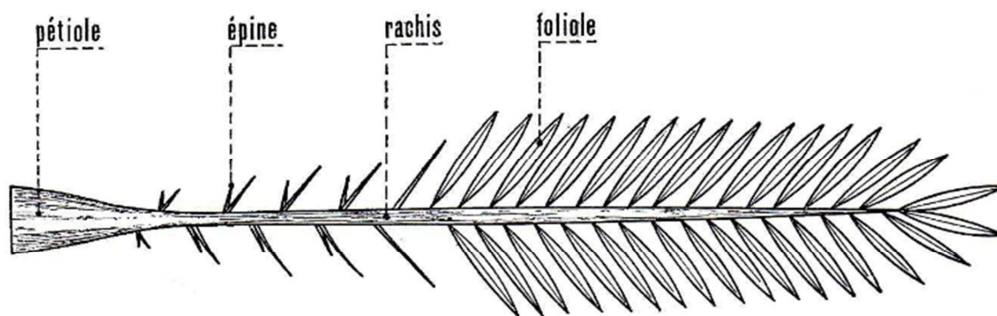
Le dattier est une plante dioïque, c'est-à-dire qu'il existe des dattiers mâles (*Dokar*) et des dattiers femelles (*Nakhla*). Seuls les dattiers femelles donnent des fruits, donc elles sont à l'origine des multiples variétés des dattes. De façon générale deux des trois carpelles,

uniovulés, avortent et les fruits sont monospermes ce qui peut s'expliquer par la grande densité des inflorescences [25].

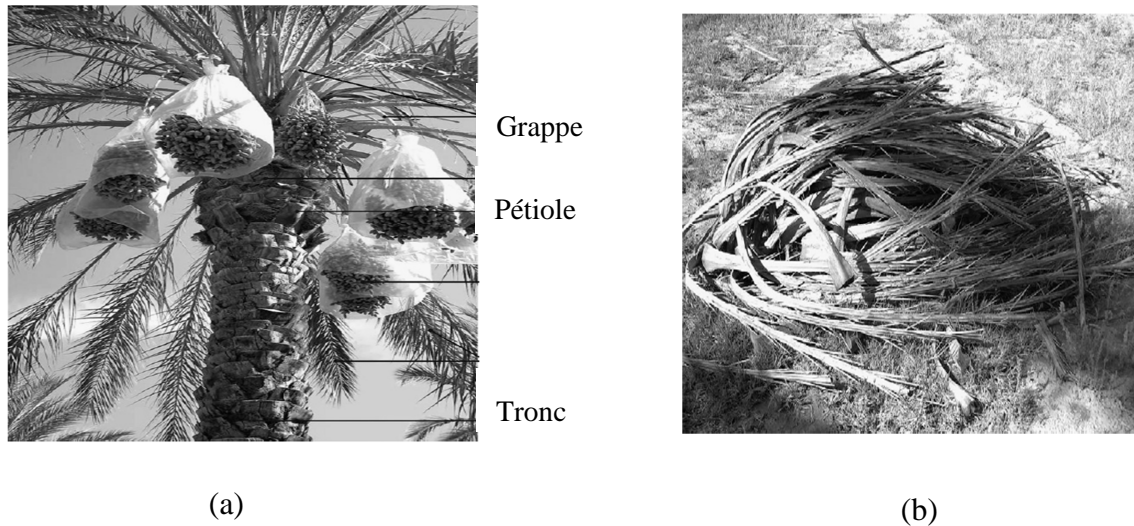
### ➤ Le fruit

Le fruit de dattier, la datte est une baie contenant une seule graine, vulgairement appelée noyau. La datte est constituée d'un mésocarpe charnu, protégé par un fin épicarpe, le noyau est entouré d'un endocarpe parcheminé, il est de forme allongée, plus ou moins volumineux, lisse ou pourvu de protubérances latérales en arêtes ou ailettes, avec un sillon ventral; l'embryon est dorsal, sa consistance est dure et cornée. La couleur de la datte est variable selon les espèces : jaune plus ou moins clair, jaune ambré translucide, brun plus ou moins prononcé, rouge ou noire [25]

La figure I.2 illustre les différents constituants d'une palme. Le grappe, pétiole et le tronc sont représentés dans les figures I.3a et 1.3b.



**Figure I.2.** Schéma d'une palme [25].



**Figure I.3 :** Bois de palmier dattier (pétioles, folioles et grappes) jetés comme déchet d'agriculture sans aucune valeur économique [23]

#### IV.5. Synthèse sur les caractéristiques mécaniques et physiques du Bois de Palmier Dattier

Plusieurs auteurs ont étudiés les propriétés morphologiques[23,27] mécaniques [25,16] et thermiques [23] du bois de palmier dattier (BPD). Certaines études sont focalisées sur les différentes variétés telles que Deglet Noor (DN), Mech Degla (MD), Elghers (EG) et dokar [23,15], d'autres s'intéressent aux parties du BPD telle que le pétiole (P), la grappe (G), le rachis et le tronc.

##### IV.5.1. Composition chimique

Le tableau I.3 présente la composition chimique du BPD. Les résultats montrent que le carbone (C) et l'oxygène (O), sont les principaux éléments dans ces matériaux. Il est noté aussi, que la quantité du Chlore (Cl) est élevée dans toutes les variétés du BPD sauf pour la partie pétiole de la variété Elghers, mais elle est inférieure à celle de la cendre du rachis. Ceci, peut être attribué à la nature du sol dont les palmiers dattiers sont plantés.

**Tableau I.3.** Composition Chimique du bois du palmier dattier (Pétioles et grappes).

Eléments Masse(%)	[23]		[28]		[29]			
	DN		MD		EG		Tronc	Rachis*
	P	G			P	G		
C	43.95	42.67	44.4	60.09	54.15	42.59	75.86	1.50
O	47.08	48.19	48.24	34.00	44.06	46.2	20.45	-
Na	0.23	0.03	0.27	0.07	0.11	0.98	-	6.79
Mg	1.52	0.04	1.73	0.14	0.53	0.23	0.15	3.53
Si	0.69	0.28	0.49	0.32	0.18	0.43	-	2.80
S	0.13	0.37	0.47	0.13	0.31	0.14	0.12	1.69
Cl	5.05	2.56	3.89	2.69	0.80	4.47	-	18.6
K	0.62	6.63	0.46	2.81	0.33	5.21	-	10.2
Ca	0.75	0.12	0.07	0.02	0.15	0.03	0.2	21.5

\*cendre du rachis.

Avec: Deglet Noor (DN), Mech Degla (MD), Elghers (EG), pétiole (P), la grappe (G).

Le tableau I.4 présente la composition chimique de quelques fibres naturelles. On peut constater que les quantités de cellulose et de l'hémicellulose du palmier dattier sont inférieures à celles des autres fibres naturelles sauf pour la fibre du coton qui possède une quantité d'hémicellulose faible. Par conséquent, le palmier dattier a une quantité importante en lignine comparée avec les autres fibres naturelles, tandis que la quantité de la cendre est similaire à celles du sisal et du chanvre.

**Tableau I.4 :** Compositions chimiques de quelques fibres naturelles.

Fibres	Cellulose (%masse)	Hémicellulose (%masse)	Lignine (%masse)	Cendre (%masse)	Réf
Palmier dattier (dokar)	43±2	8±2	35±5	1.2±0.3	[15]
Huile de palmiste	65	-	29	-	[16]
Banane	63-64	19	5	-	[16]
Chanvre	68	15	10	0.8	[16]
Sisal	65	12	9.9	2	[16]
Cotton	85- 90	5.7	-	0.6	[16]

#### IV.5.2. Propriétés mécaniques

Les propriétés physiques du BPD comparées avec celles des autres fibres naturelles sont exposées dans le tableau I.5. D'après ce tableau, la résistance à la traction et le module de Young des BPD sont significativement inférieures à celles des autres matériaux naturels, tandis que leur allongement à la rupture et la densité sont similaires à celles utilisées dans le domaine d'isolation thermique tel que le chanvre et le sisal.

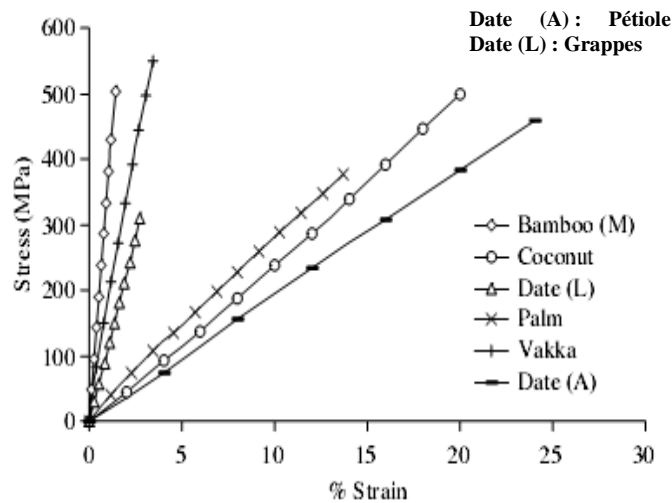
La figure I.4 présente l'effort en fonction du déplacement des BPD comparés avec d'autres matériaux naturels. Cette figure montre que les BPD possèdent des bonnes caractéristiques mécaniques.

**Tableau I.5.** Propriétés physiques de quelques fibres naturelles [16,30]

Fibres	$R_T$ (Mpa)	E (Gpa)	A (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	H (%)
Palmier dattier	97-196	2.5-5.4	2-4.5	1-1.2	12.08
Huile de palmiste	248	3.2	25	0.7-1.55	-
banane	500	12	5.9	1.35	10.71
chanvre	690	70	1.6	1.48	-
sisal	511-635	9.4-22	2-2.5	1.5	9.76
Cotton	287-597	5.5-12.6	7-8	1.5-1.6	-

$R_T$  : Résistance à la traction, E : Module d'Young, A : Allongement à la rupture,  $\rho$  : Masse volumique.  
H : Humidité présente dans les conditions atmosphériques normales.

La figure I.4 présente l'effort en fonction du déplacement des différentes fibres naturelles. Il a été constaté que, les fibres de bois de palmier dattier présentent une meilleure résistance à l'effort comparé aux autres fibres naturelles. Cela se traduit par une bonne ductilité, donc une bonne résistance mécanique.



**Figure I.4.** L'effort en fonction du déplacement (%) des différentes fibres naturelles [30].

#### IV.5.3. Influence des traitements sur les caractéristiques mécaniques des BPD

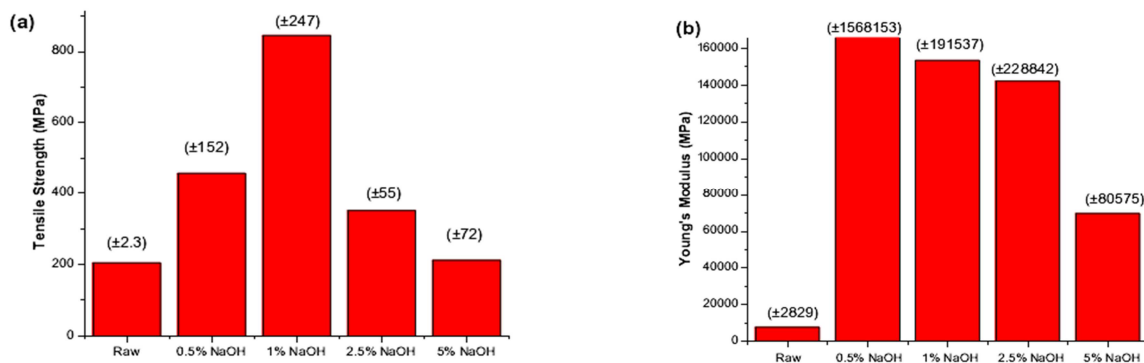
Lorsque les fibres naturelles sont utilisées comme renfort dans les matériaux composites, plusieurs problèmes apparaissent sur l'interface matrice/fibre à cause de l'incompatibilité. Parmi ces problèmes, faible résistance à la compression et à la flexion [31]. Donc, modifier la surface de la fibre naturelle par un traitement est un issu largement utilisé dans les recherches récentes pour améliorer la compatibilité et la force de la zone d'interface.

Alawar *et al* [27] ont étudié l'influence des traitements chimiques par NaOH et HCl à différents pourcentages sur la morphologie et les caractéristiques du bois de palmier dattier. Les résultats obtenus montrent que les FBPD traités à 1% de NaOH présente des meilleures performances mécaniques (figure I.5), ainsi qu'une bonne morphologie. Tandis que les pertes de poids dans les FPD traitées à 5% de NaOH sont plus importantes que dans les fibres brutes. Le tableau I.6 montre l'influence du traitement par HCl sur les FBPD. Ces résultats montrent que ce traitement diminue la résistance à la traction et agit négativement sur la morphologie des FDP [27].

**Tableau I.6.** Propriétés mécaniques avant et après traitement.

Type de traitement	R <sub>T</sub> (Mpa)	E (Mpa)
FBDP brute	275	845
0.3N HCl	105	3233

R<sub>T</sub> : Résistance à la traction (moyenne), E : Module de Young (moyenne)



**Figure I.5 :** Effet du traitement par NaOH sur: (a) la résistance à la traction ; (b) le module de Young des fibres de bois de palmier [27].

Z. Li *et al.* [32] ont rapporté que la longueur de la fibre de chanvre affecte directement l'homogénéité des bétons à base de ciment et par conséquent sa résistance. Cela explique la dispersion des résultats des résistances à la traction pour un même type de fibre végétale. Selon la littérature [32], la longueur des fibres n'est pas identique, ce qui explique la variation des résultats pour le même type de fibres. Tandis que la longueur des fibres est un paramètre qui influe directement sur la résistance des fibres.

#### IV.5.4. Propriétés thermophysiques

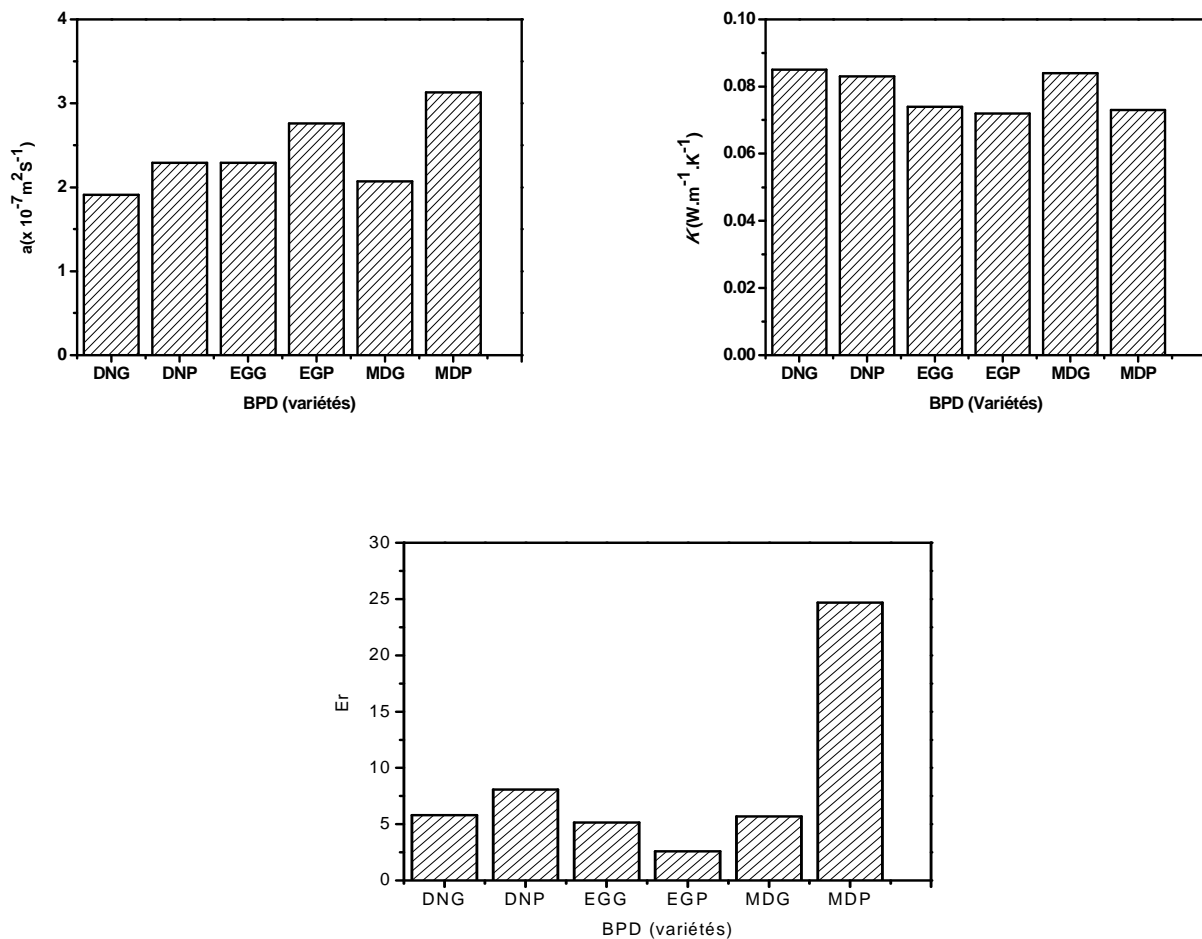
L'étude thermophysique est très importante pour notre cas d'étude. La plus part des recherches sur le BPD sont menés sur leurs caractéristiques mécaniques, peu ceux qui s'intéressent aux propriétés thermophysiques de ces matériaux. Agoudjil *et al* [23] ont étudié



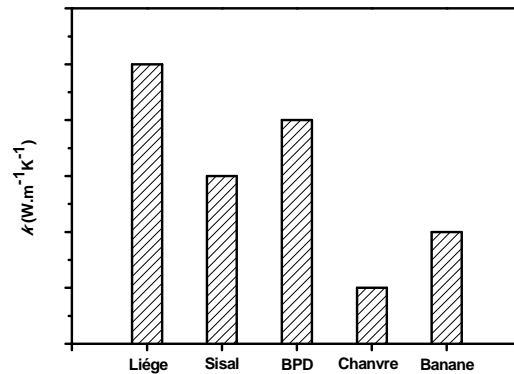
expérimentalement les propriétés thermophysiques, et diélectriques du bois de palmier dattier (*Phoenix dactylifera*. L) pour une application d'isolation thermique dans le bâtiment.

Selon les résultats d'Agoudjil *et al.* [23], l'effet de l'orientation des fibres sur la conductivité thermique est négligeable. Par contre, d'autre étude [33] ont montré que l'orientation des fibres induit une influence sur les propriétés thermiques. Selon les auteurs de [33], ce comportement est due au fait que les fibres orientées perpendiculairement au flux de chaleur augmentent la résistance thermique dans les fibres, dont une diminution de la conductivité thermique.

La figure I.6 montre les propriétés thermophysiques et diélectriques de diverses variétés de palmier dattier.



**Figure I.6 :** Propriétés thermophysiques et diélectriques du palmier dattier (Pétioles et grappes) [23].

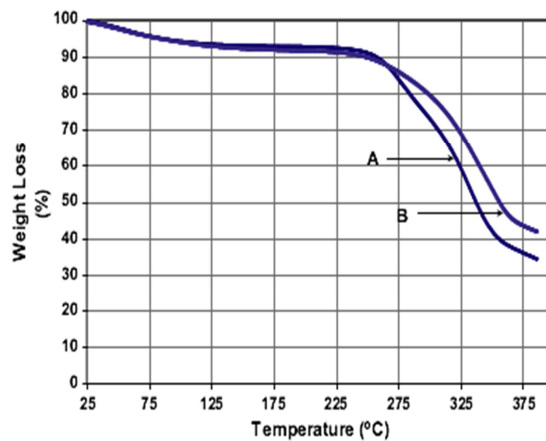


**Figure I.7 :** Comparaison entre conductivité thermique et la masse volumique des fibres de : palmier dattier (PDN), chanvre, liège, sisal et de banane [23].

La conductivité thermique du bois de palmier dattier (BPD) est comparée à celles des différentes fibres naturelles utilisées pour l'isolation thermique est illustrée dans la figure I.7. On remarque que, la conductivité thermique des BPD est inférieure à celle du liège et supérieure à celles des fibres de banane, le chanvre et le sisal. Mais ce résultat (la valeur de  $k$  du BPD) reste similaire à celui de ces fibres.

#### IV.5.5. Influence du traitement chimique sur la résistance thermique

La figure I.8 présente une analyse thermique du bois de palmier dattier traité dans une solution NaOH. On peut observer que les fibres traitées présentent une meilleure résistance à la dégradation thermique comparé au bois brut. D'après les résultats de [27,7] ils ont constaté que le NaOH améliore la résistance thermique des fibres naturelles.



**Figure I.8 :** *Courbes Thermogravimétrique du (A) brute et (B) solution NaOH (5%) des fibres de bois de palmier dattier [27].*

## IV.6. Matrice: Gypse

### IV.6.1. Introduction

Le gypse est le liant artificiel le plus ancien. Il était utilisé en Égypte, plus de 4500 ans, pour les pyramides. Les Grecs et les Romains l'ont peu utilisé dans leurs constructions monumentales. Les Arabes l'ont utilisé beaucoup en décoration. Le gypse est du sulfate de calcium avec ou sans molécules d'eau, généralement de couleur blanche (cependant, à cause des impuretés, il peut être un peu plus foncé) compact et tenace. Bien qu'il ait une masse volumique de  $2600 \text{ kg/m}^3$  il est très mou et on peut le marquer avec l'ongle. Il est aussi un peu soluble dans l'eau [34].

D'après des études géologiques, l'Algérie dispose d'abondantes ressources en gypse naturel dont la teneur dépasse les 75% requis pour la construction. Les grands gisements existent à Dahra (région du chellif), Djebel Chegga, Mostaganem, Arzew, Sidi Bel abbès, Habouch (montagnes mina) et les Babors. Les informations existantes sont très faibles mais le gypse est un minéral très commun dans la région méditerranéenne [35]. D'autre part, vue sa bonne propriété d'isolation thermique, le plâtre peut être considéré comme un matériau très adéquat à la construction dans ces régions chaudes du pays qui présentent une faible hygrométrie de

l'air, une pluviométrie courte et irrégulière et une sismicité pratiquement nulle. Il est donc plus qu'intéressant d'envisager l'introduction du plâtre et mortier de plâtre comme substituant au béton abusivement utilisé au sud.

#### IV.6.2. Plâtre

Le plâtre est issu du gypse, une roche très abondante de formes cristallines variées. Le gypse a pour formule  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . On utilise donc le terme de sulfate de calcium dihydraté, ou plus simplement dihydrate. Il peut provenir de gisements exploités sous forme de carrières, ou bien récupéré sous forme de sous-produit (phosphogypse).

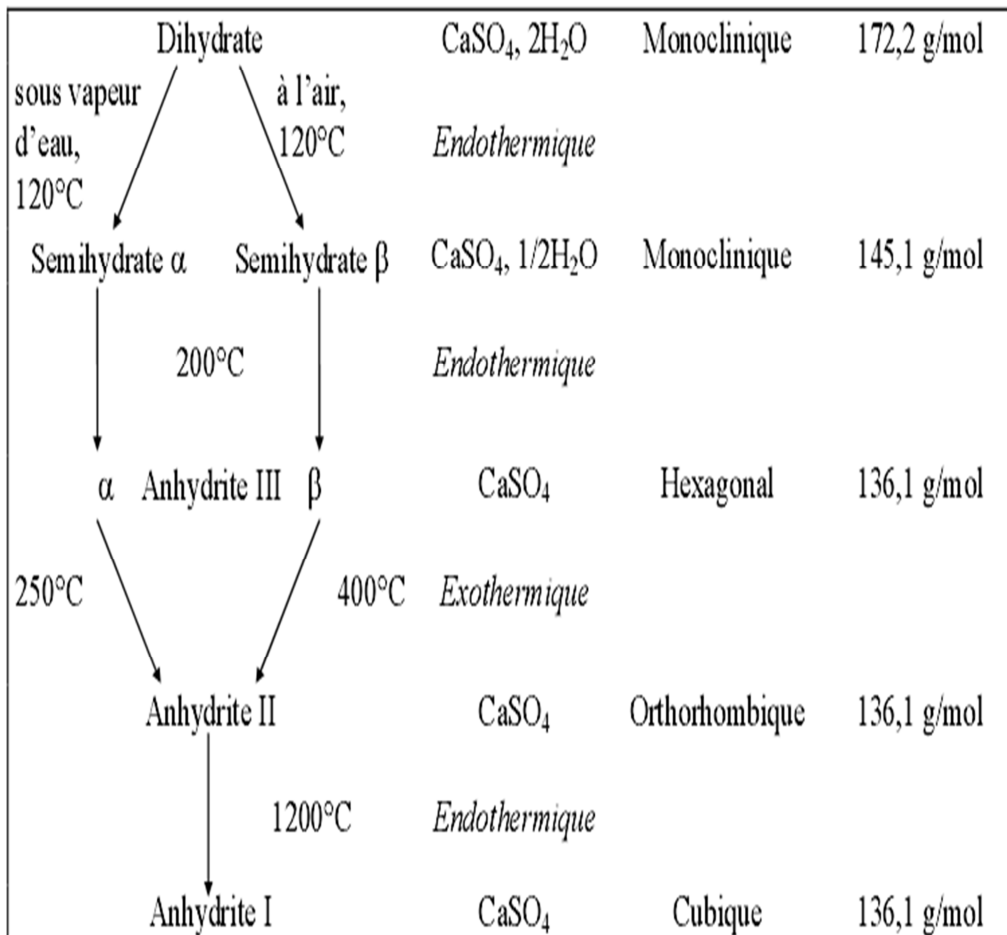


Figure I.9. La famille des hydrates de sulfate de calcium [36].

Le terme plâtre regroupe donc improprement le matériau de construction (il s'agit alors de gypse), mais aussi la poudre qui permet son élaboration. Elle est obtenue par déshydratation du gypse, ou cuisson. On obtient alors le sulfate de calcium semihydraté, ou semihydrate:  $\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$ . Cette étape conditionne les propriétés finales de réactivité, si la cuisson est insuffisante, il reste des incuits. Si la cuisson est mal contrôlée, il se forme des surcuits (anhydrites).

Le gâchage du plâtre consiste donc à rendre au semihydrate les 1.5 moles d'eau que la stoechiométrie impose pour l'obtention du gypse. Cette étape est également appelée prise et donne lieu au durcissement d'une patte blanche, au fur et à mesure de l'hydratation du plâtre.

#### IV.6.3. Le gypse

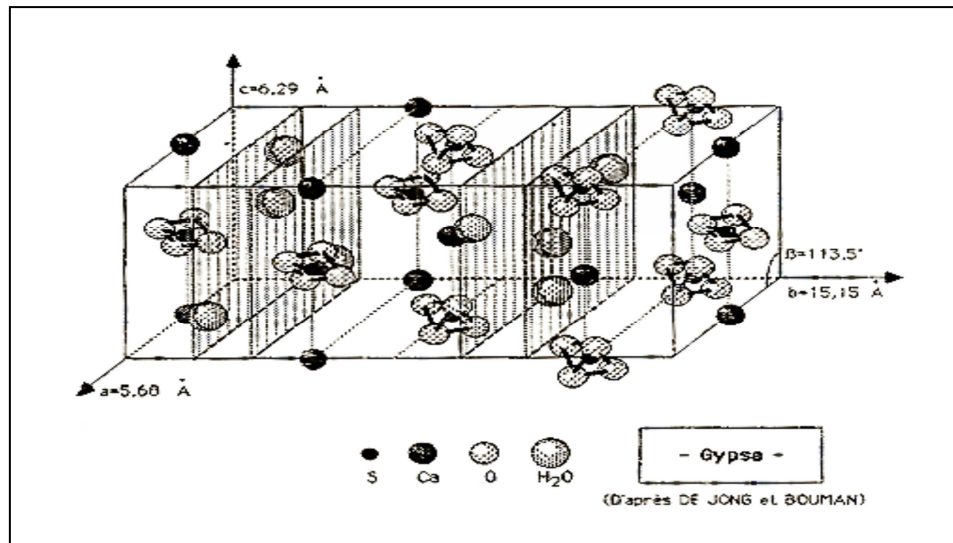
Le gypse est le matériau de base de la fabrication industrielle des plâtres. Il existe deux grandes catégories de gypses [37]:

- **Les gypses naturels:** le gypse qui se trouve dans la nature est sous forme d'une roche compacte, avec une porosité totale de l'ordre de 10 à 15%. C'est une roche sédimentaire provenant de l'évaporation intense, en milieu lagunaire, d'une eau riche en sulfate de calcium dissout. Formé à l'ère tertiaire (il y a 65 millions d'années), il est extrait dans des carrières à ciel ouvert ou souterraines. Les gypses naturels de grande pureté permettent d'obtenir des plâtres de qualité. Les principales impuretés des gypses sont la calcite, la silice et la dolomie.
- **Les gypses de synthèse:** diverses industries (chimiques, centrales thermiques, traitement des fumées...) produisent du gypse comme sous-produit. Ce gypse (désulfogypse, phosphogypse...), qui concentre les impuretés du minerai de base, pose souvent des problèmes de stockage et de préservation de l'environnement. Après purification, une utilisation comme matière première pour fabriquer du plâtre peut être envisagée, en particulier dans certains pays dépourvus de gypse naturel (Belgique, Pays Bas, Japon...).

La structure du gypse est complexe. La représentation de De Jong et Bouman consiste en une maille monoclinique ( $a \neq b \neq c$  ;  $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$ ) qui compte quatre entités  $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ . On peut également représenter le cristal par un empilement de feuillets d'ions  $\text{Ca}^{+2}$  et d'ions  $\text{SO}_4^{-2}$  séparés par des doubles couches d'eau.

Le faciès des cristaux de gypse est le plus souvent aciculaire. Toutefois, leur morphologie peut être modifiée par différents paramètres soit inhérents au cristal (structure, type de Liaisons, ...), soit externes (sursaturation, pH, température, ...). Les faces les plus étendues correspondant aux vitesses d'avancement les plus faibles, l'adsorption de composés étrangers agissant sur les vitesses de croissance peut grandement modifier le faciès des cristallites.

La figure I.10 illustre la structure cristalline du gypse d'après De Jong et Bouman (1938).



**Figure I.10 :** Structure cristalline du gypse d'après De Jong et Bouman (1938) [37].

#### IV.6.4. Les produits de déshydratation du gypse

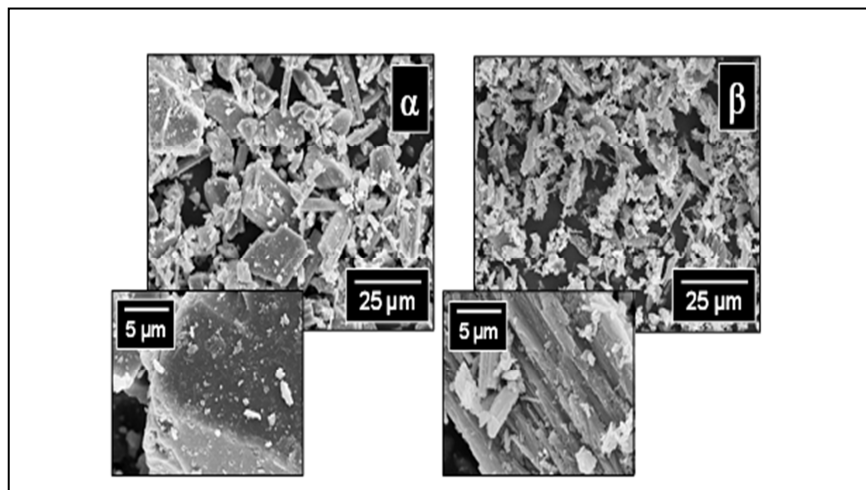
Le broyage et la cuisson ( $110\text{-}140 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de gypse naturel conduit à la formation de la poudre d'hémihydrate (appelée aussi semihydrate) de formule brute ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ). Ce matériau possède une structure cristalline très proche de celle du gypse, formé d'empilements de feuillets de  $(\text{Ca}^{+2}\text{SO}_4^{-2})$  et de molécules d'eau [38]. Selon les conditions de la pression et de la vapeur d'eau imposées, deux phases hémihydratées peuvent être obtenues.

- Le procédé par voie humide s'effectue sous pression saturante de vapeur d'eau, dans des autoclaves, sous 2 à 7 bars, pendant quelques heures. Dans ce cas, la formation d'hémihydrate est régie par un mécanisme de dissolution/recristallisation en milieu liquide. Une phase très bien cristallisée, non poreuse, constituée de cristaux bien

distingués et facilement indexables est obtenue (Figure 13.) C'est l'hémihydrate  $\alpha$ . Il nécessite un taux de gâchage faible ( $e/p \sim 0.4$ ) et donne lieu à des plâtres dits « durs », ayant de très bonnes résistances mécaniques (jusqu'à  $\sim 35$  MPa). Ils sont souvent utilisés pour la formulation de plâtres spéciaux (ex. moulages dentaires, fabrication des céramiques,...) [37].

- Le procédé par voie sèche, le plus utilisé, car moins coûteux est réalisé à la pression atmosphérique. L'eau du gypse s'élimine à l'état de vapeur sèche et nous obtenons un solide microporeux constitué d'un assemblage de microcristaux (Figure 13.), c'est l'hémihydrate  $\beta$ . Il nécessite un taux de gâchage ( $e/p$ ) important, en général  $e/p \geq 0.6$ . Il s'agit du composé principal des plâtres courants, de faible résistance mécanique et utilisés en tant que matériaux de construction [37].

La figure I.11 présente des images MEB des plâtres Prestia (usine Mériel du groupe Lafarge) obtenues respectivement par voie humide ( $\alpha$ ) et voie sèche ( $\beta$ ) [37].



**Figure I.11.** Images MEB des plâtres Prestia (usine Mériel du groupe Lafarge) obtenues respectivement par voie humide ( $\alpha$ ) et voie sèche ( $\beta$ ) [37].

Lorsque la température de cuisson est supérieure à  $150^{\circ}\text{C}$ , la déshydratation plus poussée du gypse provoque la formation d'anhydrite III, de formule brute  $(\text{CaSO}_4, \varepsilon \text{H}_2\text{O})$ , avec  $0.06 \leq \varepsilon \leq 0.11$ ). Cette variété est difficile à obtenir à l'état pur. Cette phase s'hydrate très facilement en gypse et peut jouer le rôle de catalyseur de l'hydratation de l'hémihydrate.

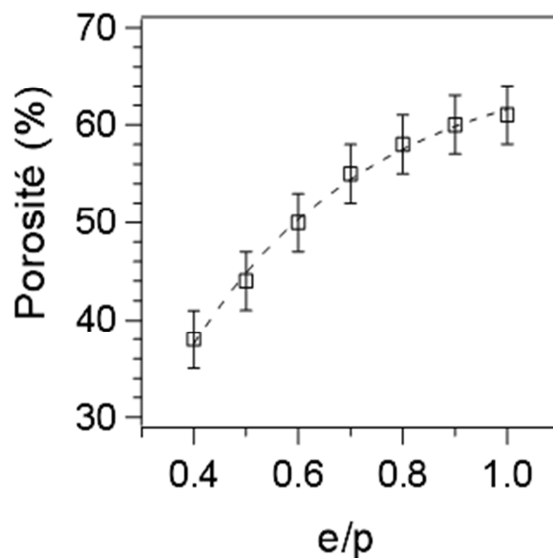
A des températures plus élevées, d'autres phases peuvent apparaître comme l'anhydrite II et I, très difficilement réhydratables. Ces différentes phases du système  $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  ne possèdent pas la même faculté de dissolution en fonction de la température. Dans le cas du gypse, il s'agit d'une véritable solubilité qui peut être obtenue soit par dissolution, soit par cristallisation [37].

#### IV.6.5. Le taux de gâchage

Le taux de gâchage ( $e/p$ ), est une grandeur importante dont dépendent en particulier la densité et la porosité du matériau final. Rappelons que la quantité d'eau stœchiométrique nécessaire pour hydrater l'hémihydrate en gypse est de 0.186g d'eau pour 1g d'hémihydrate (rapport des masses molaires correspondant à l'eau et à l'hémihydrate), ce qui correspond à un rapport massique eau/plâtre ( $e/p$ ) de 0.186.

Le gâchage du plâtre se fait avec des rapports  $e/p$  largement supérieurs au rapport stœchiométrique afin d'obtenir une pâte fluide, homogène et facile à manier.

L'eau en excès par rapport à la stœchiométrie provoque la formation de pores en s'évaporant. C'est pour cette raison que la quantité d'eau de gâchage initiale fixe la porosité finale du matériau (Figure I.12) [37].



**Figure I.12.** Evolution de la porosité du plâtre pris en fonction du taux de gâchage initial ( $e/p$ ), mesurée par porosimétrie au Mercure (Porosimètre Micromeritics Autopore III) [37].



Les résultats expérimentaux rapportés par les auteurs de [38] ont montré l'influence du taux de gâchage sur la conductivité thermique du plâtre pris ainsi que sur ses résistances à la compression et à la flexion. Les courbes obtenues ont permis de déduire que la conductivité aussi bien que les résistances mécaniques, varient en sens inverse de la quantité d'eau utilisée lors du gâchage.

Ashour et al. [39] ont indiqué que l'influence de l'eau existant dans les composites à base de gypse et de fibres naturelles est significative sur leurs propriétés thermiques. D'autre étude Panesar *et al* [40], ont rapporté que les propriétés thermiques et mécaniques des composites à base de matrices cimentaires chargées avec des fibres naturelles sont largement influencés par la teneur en eau. Selon ces auteurs, cette réaction est reliée à l'eau absorbée durant le procédé de mise en œuvre de ces composites.

#### IV.6.6. Origine des propriétés mécaniques du plâtre pris

Le plâtre pris est un matériau poreux, constitué principalement de cristaux de gypse enchevêtrés. Il doit sa bonne cohésion à cet enchevêtrement et aux interactions intercrystallines. Sa microstructure finale dépend de la porosité totale, de l'organisation de son réseau poreux (distribution de tailles de pores), de la texture cristalline (enchevêtrement, taille et faciès des cristaux) et des forces d'adhésion mises en jeu [37].

Par ailleurs, plusieurs auteurs [41] pensent que ce sont les points de contacts entre cristaux qui gouvernent la tenue mécanique de ce matériau. Ce phénomène est confirmé par la présence de cristaux de gypses désenchevêtrés et non cassés sur les faciès de rupture des échantillons de plâtre pris. En effet, au cours de la prise, les cristaux de gypse apparaissent, croissent et s'enchevêtrent pour former une structure solide continue et résistante [37].

### V. Composite Gypse- Bois de Palmier Dattier

#### V.1. Composites à base de bois et de matériau inorganique

Les composites de bois collés avec des substances minérales sont des produits dont 10 à 70% du poids est constitué de particules ou de fibres du bois et de 90 à 30% du poids de liant

minéral. Les propriétés des composites sont influencées significativement par le type de liant inorganique, la quantité de matériau en bois et par la masse volumique du panneau composite.

Les matériaux inorganiques utilisés sont le ciment Portland, la magnésie et le gypse. Les composites bois-inorganiques donnent des avantages uniques sur les matériaux en bois pour la construction des panneaux isolants, combinant les bonnes caractéristiques du bois et du matériau inorganique, donnant des produits servant comme barrières thermiques et résistants au feu et aux chocs mécaniques.

Le temps de durcissement de la plupart des liants inorganiques est long en comparaison avec les résines synthétiques utilisées habituellement pour la fabrication de panneaux de particules ou de fibres. Le ciment Portland a besoin approximativement de 8 à 24 heures, la magnésie de 4 à 6 heures et le gypse de 15 à 30 minutes à température ambiante [34].

Le volume de fabrication des panneaux composites bois-matériaux inorganiques est faible en comparaison avec les autres panneaux à base de bois avec liant synthétique. Cependant, la fabrication de panneaux composites avec le bois et les matériaux inorganiques a débuté en 1900 avec l'élaboration du panneau bois-magnésite, suivie de la fabrication du panneau bois-ciment en 1927 et finalement en 1982 avec la fabrication des panneaux gypse-particules de bois [34].

#### V.1.1. Composites bois-gypse

Le panneau en gypse et particules ou fibres de bois est un produit de création récent, fabriqué par un procédé économique où le gypse joue le rôle de liant des particules ou fibres. Les panneaux bois-gypse sont fabriqués par différents procédés, les principaux sont le procédé humide et le procédé semi-sec. La plupart de la production de panneaux bois-gypse est faite avec le procédé humide, cependant les vieilles technologies du procédé humide sont petit à petit remplacées par la technologie du procédé semi-sec de plus petite consommation d'eau et de coûts d'opération moindres [34].

## V.2. Méthodes de mise en œuvre de composites bois-gypse

### V.2.1. Le procédé semi sec

En contraste avec le procédé humide, le procédé semi-sec utilise une quantité d'eau relativement faible. Par conséquent, le procédé semi-sec a besoin de moins de temps pour le séchage dû à une réduction de la quantité d'eau.

Les propriétés du panneau gypse-particules produit par le procédé semi-sec sont similaires ou meilleures que les propriétés des placoplâtres, ou gypse-fibres. Par ailleurs, la dilatation linéaire de ces produits gypse-particules est plus petite que celle des panneaux de résines synthétiques.

Dans le procédé conventionnel de fabrication de placoplâtres, la pâte de gypse est utilisée à l'état liquide avec de grandes quantités d'eau. Le rapport eau/gypse est compris entre 0.7 et 0.9 (masse/masse), bien qu'un rapport eau/gypse de 0.15 à 0.19 (masse/masse) soit suffisant pour obtenir une réaction complète de l'hydratation du gypse. L'excès d'eau doit s'éliminer mécaniquement ou lors du séchage.

La fabrication de panneaux gypse-particules par le procédé semi-sec est similaire au procédé de fabrication des panneaux agglomérés avec résines synthétiques. Dans ce procédé, les particules fournissent la quantité d'eau suffisante pour l'hydratation du gypse. La teneur en humidité des particules est de 50 à 70%. Le séchage des particules est fait avec un simple tube séchoir. Dans le procédé semi-sec, la quantité d'eau est de 30% du poids total de l'ébauche, ce qui signifie 30% moins d'eau en comparaison avec le procédé humide. On économise en coûts de production car le séchage des particules n'est pas nécessaire. On peut utiliser différents types de particules, différentes espèces du bois, de conifères de faible masse volumique jusqu'aux feuillus de haute masse volumique [34].

### V.2.2. Le procédé humide

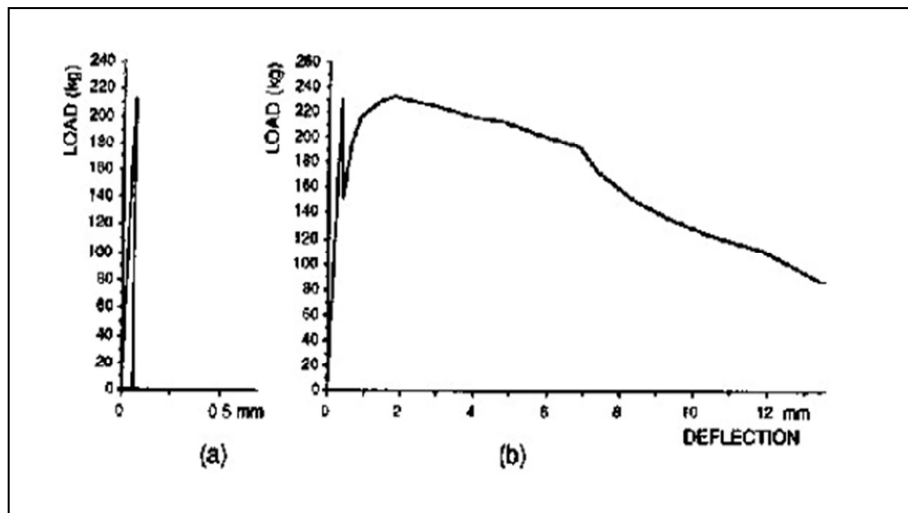
Dans le procédé humide, le matériau inorganique sec est additionné aux fibres sèches. On mélange les matériaux, on ajoute l'eau, donnant une ébauche humide qui sera pressée à l'aide de rouleaux compresseurs continus. Initialement, la quantité d'eau dans l'ébauche pressée est de 70%. Dû à cette grande teneur en humidité, une grande quantité d'énergie est nécessaire

lors du séchage. Cependant, après plusieurs recherches sur ce problème, le niveau d'humidité a été réduit progressivement jusqu'à 50%.

Le procédé humide peut être aussi utilisé pour fabriquer des panneaux en gypse et en particules où le gypse, les particules et les retardateurs sont mélangés pour la formation de l'ébauche, qu'est pressée pendant 60 minutes par des rouleaux compresseurs [34].

### V.3. Réponse du matériau à une sollicitation mécanique

Le gypse est un matériau élastique présentant une rupture fragile sous une contrainte trop élevée. En incorporant dans le gypse des fibres végétales, on observe en général une modification de ce comportement (voir Figure I.13), avec l'apparition d'une fissure, puis une propagation contrôlée de celle-ci (tests de flexion trois et quatre points).



**Figure I.13 :** *Comportement en flexion trois points de: (a) gypse pur et (b) de composite gypse/fibres de sisal [37].*

Ce comportement est attribué à la présence des fibres qui jouent le rôle de «pont» entre les faces des fissures, auquel s'ajoute un transfert de charges de la matrice vers les fibres au travers de mécanismes de liaison divers (adhérence, friction, ...) [37].

### V.3.1. Effet du bois sur la prise des matériaux inorganiques

La plupart des espèces ne réagissent pas favorablement aux matériaux inorganiques. Un problème qui limite la fabrication de panneaux bois-liants inorganiques est le faible niveau de compatibilité du bois avec le matériau inorganique. Quelques espèces de bois peuvent donner d'excellents panneaux avec les matériaux inorganiques. Par ailleurs, il y a des espèces qui ne peuvent pas être utilisées de manière satisfaisante [30].

Il a été remarqué que, la compatibilité entre les fibres et les matrices joue un rôle primordial sur les résultats finaux des propriétés des composites. Cela est justifié par la différence (trouvée par plusieurs études [30]) entre les valeurs des propriétés d'un matériau lorsqu'il est incorporé par des fibres naturelles. Les études de [39,42] montrent que les résultats des propriétés du gypse se différencient pour une même concentration des fibres. Cette différence est liée à la compatibilité entre matrice/fibre.

Selon la littérature [37], l'information concernant cette caractéristique du gypse est pauvre. Sans doute parce que les problèmes relatifs à la prise sont plus sensibles sur le ciment. Les échelles de temps de prise sont en effet disproportionnées, le temps de prise du plâtre se mesurant en dizaines de minutes, celui du ciment en jours.

L'influence de molécules organiques sur la prise du plâtre n'a été étudiée que dans le but de maîtriser les temps de prise et de les adapter aux méthodes de mise en œuvre. Il a été constaté par Alawar *et al* [27] que le PH influence sensiblement les temps de prise.

On peut donc retenir que la présence de molécules organiques diverses dans l'eau de gâchage peut introduire des perturbations de la cristallisation du gypse, entraînant dans certains cas une chute des résistances mécaniques du matériau. Les extractibles aqueux du bois sont donc susceptibles d'avoir de tels effets.

### V.3.2. Propriétés physiques et mécaniques des composites bois-gypse

L'information sur les propriétés physiques et mécaniques des panneaux bois-liants inorganiques est très limitée. Généralement les panneaux composites en bois avec liants inorganiques sont décrits dans la littérature comme des produits à faible absorption d'eau, bonne stabilité dimensionnelle, faible conductivité thermique, bonne résistance au feu et

bonnes propriétés acoustiques. Par contre les propriétés mécaniques de ces composites sont plus faibles que celles des panneaux fabriqués à partir de résines synthétiques.

## **VI. Conclusion**

Ce chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les matériaux naturels constituant le composite étudié. Le choix des composites naturels pour l'isolation thermique se justifie par plusieurs critères, les performances thermiques, le comportement au feu et à la chaleur, la résistance mécanique, issue d'origine naturelle et le faible coût.

L'étude bibliographique présentée dans ce chapitre montre que les caractéristiques thermophysiques et mécaniques intrinsèques des constituants du composite choisi, représentent des propriétés adéquates pour application comme isolant thermique. D'une part, le plâtre représente un matériau très répandu dans le domaine de construction avec des caractéristiques intéressantes, comme présenté au-dessus. D'autre part, les fibres de bois de palmier dattier possèdent des propriétés d'isolation qui leur permettent d'être utilisées comme renfort dans la matrice gypse.

Comme l'isolation thermique des matériaux est estimée par sa conductivité thermique, le chapitre suivant est consacré aux différentes méthodes d'estimation de la conductivité thermique des composites. Ces méthodes sont présentées et analysées, en précisant leurs avantages et leurs inconvénients.

**Références**

- [1] A.M. Papadopoulos, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments," *Energy and Buildings*, vol. 37, pp. 77–86, 2005.
- [2] P. Amadio, "Etude et Définition d'une enveloppe complexe de bâtiment", *projet de fin d'étude*, Génie Civil. INSA Strasbourg, 2007.
- [3] L.F. Cabeza, A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, I. Fernandez, "Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 630–636, 2010.
- [4] J. Pinto, A. Paivaa, H. Varumd, A. Costaa, D. Cruza, S. Pereira, L. Fernandese, P. Tavaresf, J. Agarwal, "Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 1985–1990, 2011.
- [5] B. P. Jelle, "Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 2549-2563, 2011.
- [6] A. Boudenne, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère", *Thermique et Systèmes Energétiques*, thèse de doctorat. Université Paris XII Val de Marne, 2003.
- [7] D. SEDAN, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite," *Matériaux Céramiques et Traitements de Surface*, thèse de doctorat. Université de Limoges, 2007.
- [8] C. Magniont, "Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agro-ressources", *Génie Civil*, thèse de doctorat. Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.
- [9] Y. Li, L. Ye, "sisal fiber and its composites: a review of recent developments," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 2037-2055, 2000.
- [10] N. Le Moigne, T. Budtova, "A statistical analysis of fibre size and shape distribution after compounding in composites reinforced by natural fibres," *Composites: Part A*, vol. 42, pp. 1542-1550, 2011.

- [11] R. Satyana, R S. Mukherjee, C. Pavithran & S. G. K. Piuai, "Natural Fibre-Polymer Composites," *Cement & Concrete Composites*, vol. 12, pp. 117-136, 1990.
- [12] K. Bledzki, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Prog. Polym. Sci*, vol. 24, pp. 221-274, 1999.
- [13] C. Baley, "Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites," *Technique d'ingénieur*, N2220, 2005.
- [14] V. K. Mathur, "Composite materials from local resources," *Construction and Building Materials*, vol. 20, pp. 470-477, 2006.
- [15] A. Kriker, G. Debicki, M. Bouziane, M. Chabannet, "Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates," *Cement & Concrete Composites*, vol. 30, pp. 639-648, 2008.
- [16] M. J. John, R. D. Anandjiwala, "Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites," *Polymer composites*, vol. 29, issue 2, pp. 187-207, 2008.
- [17] V. Cerezo, "Propriétés Mécaniques, Thermiques et Acoustiques d'un matériau à base de particules Végétales: approche expérimentals et Modélisation Théorique", thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [18] X-y. Zhou, H.-g. Li, C-l. Lu, "An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 1070-1074, 2010.
- [19] K. Sanada, Y. Shindo, "Thermal conductivity of polymer composites with close-packed structure of nano and micro fillers," *Composites: Part A*, vol. 40, pp. 724-730, 2009.
- [20] N. Sotghi, "Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation", thèse de Doctorat. Université Mentouri-Constantine, 2010.
- [21] W.S. Ghose, D.C. Working, J.W. Connell, J.G. Smith, Y.P. Sun, "Thermal conductivity of ethylene vinyl acetate copolymer/nanofiller blends," *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 1843-1853, 2008.
- [22] S. Cunha, "Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement," *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 981-989, 2008.



- [23] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [24] K. Riahi, B. BenThayer, "Date-palm fibers media filters as a potential technology for tertiary domestic wastewater treatment," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, pp. 608-613, 2009.
- [25] G. Peyron, "Cultiver le palmier dattier," *G.R.I.D.A.O, Montpellier*, pp. 109-129, 2000.
- [26] A. Bessas, K. Mohamed, "Dosage biochimique des composés phénoliques dans les dattes et le miel récoltés dans le sud Algérien". Université Djillali Liabes, pp. 81, 2008.
- [27] A. Alawar, K. Al-Kaabi, "Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement," *Composites: Part B*, vol. 40, pp. 601-606, 2009.
- [28] K. Riahi, A.B. Mammou, A.B. Ammar, M.H. Jaafoura, "Biosorption characteristics of phosphates from aqueous solution onto *Phoenix dactylifera* L. date palm fibers," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170(2-3), pp. 511-519, 2009.
- [29] R. Khiari, M.N. Belgacem, E. Mauret, "Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica* - a comparison with other wood and non-wood fibre sources," *Bioresource Technology*, vol. 2, pp. 775-780, 2010.
- [30] M. Mohan, A. Rao, "Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo," *Composite Structures*, vol. 77, pp. 288-295, 2007.
- [31] J. Khedari, N. Pratinthong, J. Hirunlabh, "New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity," *Cement & Concrete Composites*, vol. 23, pp. 65-70, 2001.
- [32] Z. Li, X. Wang, L. Wang, "Properties of hemp fibre reinforced concrete composites," *Composites: Part A*, vol. 37, pp. 497-505, 2006.
- [33] T. Behzad, M. Sain, "Measurement and prediction of thermal conductivity for hemp fiber reinforced composites," *Polymer Engineering and Science*, vol. 7, pp. 977-983, 2007.

- [34] R. E. Herrera, "Panneaux en gypse et particules de bois renforcés avec du ciment portland," *sciences du bois*, Thèse de Doctorat. Centre de recherche sur le bois, Université Laval, 2009.
- [35] Ministère d'Energie et des Mines, plâtre en Algérie, 2008. <http://www.mem-algeria.org>.
- [36] P. Boustingorry, "Elaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté-Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse", *Génie des Procédés*, thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2002.
- [37] H. JAFFEL, "Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre," *Physique des matériaux*, thèse de Doctorat. Ecole Polytechnique, Université Paris-Saclay, 2006.
- [38] C. Bezou, "Etudes des caractéristiques cristallographiques, thermodynamiques et microstructurales des produits de déshydratation du gypse", thèse de doctorat. Université de Bourgogne, 1991.
- [39] T. Ashour, H. Georg, W. Wu, "Performance of straw bale wall: A case of study," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 1960-1967, 2011.
- [40] D.K. Panesar, B. Shindman, "The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork," *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, pp. 982-992, 2012.
- [41] H. M. lamine, "Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction", thèse de magistère, physique Energétique. Université Mentouri-Constantine, 2010.
- [42] F. Hernandez-Olivares, M. del Rio, B. Parga-Landa, "Development of cork gypsum composites for building applications," *Construction and Building Materials*, vol. 13, pp. 179-186, 1999.

# **Chapitre II : Méthodes de prédiction de la conductivité thermique des composites**

## I. Introduction à la conductivité thermique effective des composites

Le sujet de la conductivité thermique effective des matériaux composites est l'un des problèmes classiques dans les milieux hétérogènes. Récemment, il a reçu une attention considérable en raison de l'importante croissance des systèmes à haute température, par exemple, l'automobile, les structures spatiales, ... etc.

L'information sur la conductivité thermique des matériaux est également nécessaire pour déterminer les conditions optimales pendant le traitement des matériaux, ainsi que pour analyser le transport de chaleur dans les matériaux pendant les applications pratiques [1].

La conception des matériaux composites dans les différentes applications exige une compréhension approfondie du transfert de chaleur par conduction dans ces matériaux. Cette compréhension est basée sur le développement des modèles micromécaniques ayant pour objectif de prédire avec précision la conductivité thermique effective de composites [2].

Dans ce chapitre, les outils de prédiction de  $k$  sont présentés et analysés. Les outils les plus utilisés sont les méthodes expérimentales, théoriques et numériques.

## II. Modèles théoriques de la conductivité thermique

La modélisation de la conductivité thermique effective de matériaux hétérogènes est d'un grand intérêt dans de nombreuses applications de transfert de chaleur. Progelhof *et al.*[3] et Carson *et al.*[4] ont fourni des synthèses sur les méthodes théoriques les plus pertinentes.

La conductivité thermique des matériaux hétérogènes est fortement affectée par sa composition et sa structure. Il n'existe pas de modèle unique qui est applicable à tous les types de structure [5].

Les premiers travaux relatifs au transfert macroscopique en milieu hétérogène avec contact parfait entre phases et auxquels se réfèrent encore de nombreux auteurs aujourd'hui, sont dus à Maxwell (1873) et Rayleigh (1892) [6].

L'approche de Maxwell, initialement associée à un problème de conduction électrique dans un milieu hétérogène constitué de sphères dispersées dans un milieu continu, a abouti à la formulation de la conductivité effective d'un milieu homogène équivalent [7].

Les modèles théoriques de prédiction de  $k$  se divisent en trois grandes familles, les modèles de premier ordre, le deuxième ordre et le troisième et quatrième ordre.

Le modèle de premier ordre est un modèle qui suppose que le gradient de température et le flux de chaleur sont isotropes et homogènes. Basé sur les travaux de O. Wiener [8], la valeur de la conductivité thermique est calculée en appliquant l'analogie électrique pour un circuit série ou parallèle à un problème de transfert thermique dans un matériau hétérogène. Les deux phases sont supposées arrangées parallèlement l'une à l'autre [6]. La conductivité thermique effective est alors bornée par les deux valeurs  $k_{inf}$  et  $k_{sup}$ , avec:  $k_{inf} \leq k_{eff} \leq k_{sup}$ .

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. Le modèle de Bruggeman prend en compte la forme des charges supposées isolées. Bruggeman donne un seuil de validité du modèle allant jusqu'à  $\phi_f = 0.33$ , qui correspond selon lui au seuil de percolation [9].

Hashin et Shtrikman en 1965, s'inspirent de l'approche de Maxwell et en utilisant l'hypothèse de la perturbation, développent un modèle pour différents types d'inclusions [10]. La distribution des tailles prise par Hashin et Shtrikman n'est pas aléatoire mais elle a des caractéristiques particulières et la conductivité thermique des charges est supérieure à celle de la matrice ( $k_f > k_m$ ). Les charges sont des sphères de conductivité  $k_m$  et de rayon  $r_m$  entourés par une coquille de conductivité  $k_f$  et de rayon  $r_f$ . La distribution est telle qu'elle remplit tout le volume avec  $\phi_f = r_m^3 / r_f^3$ .

Hatta et Taya (1985) [11], proposent une analogie basée sur les propriétés mécaniques des matériaux pour prédire  $k_{eff}$  pour des fibres courtes de différentes orientations, la forme et les interactions entre les inclusions. Le modèle de Hatta et Taya est élaboré pour l'estimation de la conductivité thermique des composites chargés par des inclusions de fibres courtes ou sous forme d'ellipsoïde.

Les modèles de troisième et quatrième ordre sont des modèles plus généraux que celui de Hashin et Shtrikman. Pour calculer la conductivité thermique moyenne du matériau composite, ils introduisent un paramètre qui prend en compte la statistique de perturbation autour de chaque particule. Une expression théorique plus générale de la conductivité thermique effective pour des dispersions tridimensionnelles est alors établie.

D'autres modèles sont utilisés 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 (1970) [8]. Ils proposent un modèle semi-empirique qui prend compte la forme, la distribution et plusieurs types d'inclusions. Ils ajoutent dans le modèle semi-empirique un paramètre qui est celui de l'effet maximal de la fraction volumique  $\varphi_{max}$  des charges.

Le modèle proposé par Agari [9] permet la prédiction de la conductivité thermique d'un composite assemblé parallèlement ou en série. Ce modèle semi-empirique peut être appliqué pour des systèmes à phases multiples et pour tous les types d'inclusions.

Tous les modèles théoriques et semi-empiriques présentés ci-dessus sont regroupés dans le tableau II.1.

**Tableaux II.1 : Modèles de prédiction de  $k$  effective des composites [12].**

Modèles	Equation	Remarque
<i>Modèles de premier ordre</i>		
Parallèle	$k_{sup} = k_m(1-\varphi) + k_f \varphi$	$k_f / k_m < 10$  $k_{low} < k_{eff} < k_{sup}$
Séries	$\frac{1}{k_{low}} = \frac{(1-\varphi)}{k_m} + \frac{\varphi}{k_f}$	
<i>Modèles du deuxième ordre</i>		
Maxwell	$k = k_m \frac{2k_m + k_f - 2\varphi(k_m - k_f)}{2k_m + k_f + \varphi(k_m - k_f)}$	1- Valide pour les sphères dispersées dans une matrice 2- Pas valide aux concentrations finies des particules 3- Interaction entre les particules n'est pas prise en compte

Bruggeman	$1 - \varphi = \frac{k_f - k}{k_f - k_m} \left( \frac{k_m}{k} \right)^{\frac{1}{d}}$	<p>1-d = 3 pour sphériques 2-d = 2 pour charges cylindriques</p>
Hatta et Taya	$k = k_m \left[ 1 - \varphi \frac{(k_m - k_f) [(k_f - k_m) (2S_{33} + S_{11}) + 3k_m]}{3(k_f - k_m)^2 (1 - \varphi) S_{11} S_{33} + k_m (k_f - k_m) R + 3k_m^2} \right]$ <p>ou:</p> $R = 3(S_{11} + S_{33}) - \varphi(2S_{11} + S_{33})$	<p>1- <math>S_{11} + S_{22} + S_{33} = 1</math>                  2- disque: <math>S_{11} = S_{22} = 0, S_{33} = 1</math>                  3- sphère: <math>S_{11} = S_{22} = S_{33} = 1/3</math>                  4- fibres, tiges ou cylindre long:  <math>S_{11} = S_{22} = 1/2, S_{33} = 0</math>                  5- Fibres courtes orientées aléatoirement (longueur L et diamètre D)  <math display="block">\begin{cases} S_{11} = \frac{\alpha}{2(\alpha^2 - 1)^{3/2}} [\alpha(\alpha^2 - 1)^{1/2} - \cosh^{-1} \alpha] \\ S_{33} = 1 - 2S_{11} \\ \alpha = \frac{L}{D} \end{cases}</math>                  6- Sphères dispersées aléatoirement dans une matrice continue, <math>R = 2 - \varphi</math></p>
Hashin et Shtrikman	$k = k_m \left( 1 + \frac{\varphi}{\frac{1 - \varphi}{3} + \frac{k_m}{k_f - k_m}} \right)$	<p>Pour les charges sphériques</p>
<b>Modèles du troisième et quatrième ordre</b>		
Torquato	$\frac{k_c}{k_m} = \frac{1 + \varphi \beta - (1 - \varphi) \zeta \beta^2}{1 - \varphi \beta - (1 - \varphi) \zeta \beta^2}$ <p>Ou : <math display="block">\beta = \frac{k_f - k_m}{k_f + (d - 1)k_m}</math></p>	<p>1-d = 3 Pour les sphères et 2 pour les cylindres 2- <math>\xi</math> : Paramètre microstructural à trois points, <math>0 &lt; \xi &lt; 1</math></p>
<b>Modèles semi-empiriques</b>		
Géométrie moyenne	$k = k_f^\varphi . k_m^{(1 - \varphi)}$	<p>Généralement elle donne une bonne estimation de k.</p>
Agari	$\log k = \varphi C_2 \log k_f + (1 - \varphi) \log(C_1 k_m)$	<p>1- Pour tous types d'inclusions dans la matrice. 2- Pour les systèmes à multi-phase</p>

		3- Pour les deux faibles et forte $\varphi$ 4- $C_1$ et $C_2$ sont obtenus par raccordement des données expérimentales 5- $C_1$ représente l'effet de particules sur la structure polymérique 6- $C_2$ représente la capacité des particules de créer une chaîne continue
Lewis et Nielsen	$k = k_m \frac{1 + A B \varphi}{1 - B \psi \varphi}$ $\psi = 1 + \frac{(1 - \varphi_{\max}) \varphi_f}{\varphi_{\max}^2}$ $B = \frac{k_f / k_m - 1}{k_f / k_m + A}$	1- Prendre en compte : ➤ La fraction maximum des charges ( $\varphi_{\max}$ ) ➤ Forme et orientation des charges $A = \lambda_E - 1$ 2- $\lambda_E$ : Coefficient d'Einstein

## II.1. Discussion des différents Modèles théoriques

Les modèles de prédiction théorique de la conductivité thermique effective de premier ordre basé sur l'analogie électrique donne des solutions qui ne sont pas en accord avec les valeurs mesurées. D'autre part, les modèles du second ordre tels que celui de Bruggement, Hatta, Hashin sont valables à des faibles concentrations des charges [8]. Tandis que, la conductivité thermique effective des composites est influencée par plusieurs paramètres qui ne sont pas prises en compte tels que la taille des charges, la géométrie des inclusions, l'orientation des fibres et le contact entre la matrice et les inclusions. Des facteurs qui rendent la modélisation théoriques de la conductivité thermique des composites très difficile [8].

Garnier *et al.*[12] rapportent que la modélisation théorique des propriétés des matériaux polymères chargés en particules métalliques est une tâche très difficile et demande la connaissance de plusieurs paramètres qui sont parfois difficile à obtenir (paramètres liés à la microstructure, la résistance thermique de contact,...). D'autres travaux de la modélisation mathématique, de la caractérisation expérimentale à l'échelle microscopique ainsi que



l'analyse microstructurale peuvent améliorer le modèle de prédiction des propriétés des polymères chargés par des particules métalliques.

Enfin, aucun modèle théorique est complet pour prédire la conductivité thermique des composites avec précision, chose qui rend les techniques expérimentales un moyen indispensable pour valider les modèles théoriques.

### III. Méthodes expérimentales de mesures de $k$ effective

Récemment, les techniques expérimentales de mesure de la conductivité thermique connaissent un important progrès. Pour accéder à cette mesure, il est généralement nécessaire de recourir à des techniques d'excitation, fondées sur la méthodologie suivante. Une des faces (parfois tout l'échantillon) de l'échantillon à étudier est soumise à un flux thermique d'une durée dépendant de la nature du milieu étudié. Un suivi de l'évolution de la température en fonction du temps permet alors de déduire la conductivité thermique. La relation liant la variation de la température et l'évolution du temps dépend du modèle thermique utilisé pour identifier cette dernière. Le choix d'une méthode de mesures de la conductivité thermique dépend de certains paramètres. En effet, lorsque le choix de la combinaison matériau-précision se pose de manière précise, de nombreux paramètres sont à prendre en compte [13]:

- Le type de produit : milieu granulaire, milieu semi-infini.
- Le type de régime thermique soit stationnaire, transitoire, ou quasi établi.
- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique, ...)
- Les dimensions et les rapports de dimensions.
- La simplicité de la méthode.
- Les tolérances (ou précisions) de certains paramètres.

Afin de classifier les méthodes de mesures, les définitions de l'excitation et le temps temporel s'imposent. En première analyse, l'excitation repose sur deux méthodes: Les méthodes photothermiques, et les méthodes électrothermiques. Une deuxième distinction entre les différentes méthodes s'appuie sur la définition du régime thermique temporel du milieu. Ainsi, il apparut deux types: Les mesures stationnaires, et instationnaires [13].

### III.1. Les méthodes en régime stationnaire

Ces méthodes sont conçues pour mesurer les conductivités thermiques des milieux isolants [14]. Elles consistent à supposer le milieu en équilibre thermique, et soumis à un flux stationnaire en fonction du temps. Le principe de mesure repose sur l'exploitation des mesures de la température en divers points du milieu, ainsi en s'appuyant sur la loi de Fourier et les conditions aux limites nous pouvons déterminer les grandeurs physiques du milieu. Le champ d'application de ces méthodes est limité. Dans la littérature, on peut citer certaines méthodes: la méthode de la plaque chaude gardée [15], la méthode de la barre [13], la méthode des boîtes [16], et la méthode du flux radial [13]. D'une façon générale, ces méthodes de mesure présentent des difficultés expérimentales tel que:

- L'existence de résistance de contact.
- Les fuites axiales et radiales.
- Les difficultés de mesure de la température surtout celles de la surface.

Ces méthodes de mesure ne sont pas destinées à mesurer toutes les grandeurs physiques. En effet, avec ces méthodes, seules la conductivité thermique et la résistance de contact sont mesurées, limitant ainsi leurs champs d'application.

Cette technique est particulièrement adaptée à la détermination de la conductivité thermique de matériaux isolants. Ce type de méthode est difficile à mettre en œuvre et pose beaucoup de problèmes d'ordre expérimentaux comme:

- Atteindre le régime permanent qui est particulièrement long et peut atteindre une durée de 24h.
- Obtenir un flux unidirectionnel dans l'échantillon.
- Mesure de ce flux et les températures avec précision.

### III.2. Les méthodes en régime instationnaires

Le champ de leur application est très vaste, grâce à plusieurs avantages: mesures directes des paramètres thermophysiques du milieu, la durée d'excitation thermique est courte, et elles sont faciles à mettre en œuvre. Les mesures de la conductivité thermique par les méthodes instationnaires consistent à exploiter des signaux de températures répartis dans un milieu en

régime transitoire. Le principe de mesure s'appuie sur un modèle développé à partir de l'équation de conservation de l'énergie qui permet de trouver une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées.

Ces méthodes constituent un progrès incontestables dans la caractérisation thermophysique des milieux et donnent de bons résultats de mesures. En contreparties de ses bons résultats, ces méthodes présentent un défaut dû à un grand nombre de limitations liées aux difficultés d'analyse des données obtenues, problème de mise au point de matériaux à étudier, et au problème de l'évaluation de la précision de la méthode.

Parmi les méthodes instationnaires utilisées pour les mesures de la conductivité thermique, on trouve: méthode fil chaud [17,18], ruban chaud [19]et Hot Disk [20].

En plus des inconvénients cités au-dessus concernant les méthodes expérimentales, la mesure de la conductivité thermique effective des matériaux hétérogènes est un processus relativement complexe. Elle dépend principalement de deux facteurs très importants [8]:

- La précision est souvent limitée par l'échantillon lui-même particulièrement pour les matériaux anisotropes (homogénéité des matériaux).
- Avec des matériaux réels, il est très difficile d'isoler et de manipuler la structure et la composition des échantillons et d'examiner les effets de chaque variable individuellement.

## **IV. Modélisation Numériques**

### **IV.1. Introduction**

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. La performance des méthodes numériques a été démontrée par plusieurs auteurs [21,22]. 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), la méthode des moments (MM), la méthode de Monté Carlo [21,22].

Toutes ces méthodes numériques sont décrites et discutées dans de nombreux manuels. C'est à la méthode des éléments finis, employée dans notre travail, que nous nous intéresserons plus particulièrement. La MEF 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. Par ailleurs, elle s'adapte bien aux milieux hétérogènes, notamment pour le calcul des propriétés thermiques notamment la conductivité thermique des matériaux composites. [23].

#### IV.2. Modélisation des propriétés de transfert dans les matériaux composites

Ramani and Vaidyanathan [24] ont utilisé une technique basée sur les éléments finis pour prédire la conductivité thermique effective d'un composite chargé avec des particules sphériques et parallélépipédiques. Ils ont introduit l'effet des caractéristiques microstructurales telles que, la résistance thermique d'interface, la fraction volumique et la dispersion des charges. Selon les auteurs de [24], la conductivité thermique du composite est passée de 0,32  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  à 2.09  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour une charge sphérique de poudre de cuivre avec une fraction volumique croissante.

Une analyse par éléments finis en trois dimensions est développée par Öchsner *et al.*[25] 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 [25], ils ont conclu que la conductivité thermique des composites est fortement influencée par la concentration des charges et le type d'arrangement.

Yue *et al.*[26] ont utilisé le modèle cubique à faces centrées (CFC) pour prédire la conductivité thermique de trois matériaux composites, le Cu/PP, AlN/IP et le TCA (Ag-époxy) à différentes concentrations des charges. Trois types de résistance sont pris en compte dans la simulation, à savoir, charge/charge, charge/matrice et matrice/matrice. Selon les auteurs de [26], la conductivité thermique des composites augmente avec l'augmentation des concentrations des charges. Les résultats numériques de prédiction de  $k$  [26] est en bon accord avec les résultats expérimentaux lorsque la distance entre deux charges est importante.

Arambakam *et al.*[27] ont développé un modèle de simulation en 3D pour étudier l'effet des paramètres microstructuraux sur la performance des matériaux isolants fibreux exposés à l'écoulement de chaleur par conduction.

La conductivité thermique effective d'un milieu isolant constitué de différents matériaux comme l'aluminium, l'acier inoxydable, le verre et le polypropylène, associé avec l'air (considéré comme fluide interstitiel) est déterminée par simulation. Les résultats de cette étude [27] montrent que, si la conductivité thermique du matériau solide est proche de celle de l'air, l'influence des paramètres microstructurales de la structure fibreuse sur les performances d'isolation du milieu est négligeable. Ils ont aussi noté que, le diamètre des fibres affecte considérablement les performances d'un matériau isolant. Il a également été observé que l'augmentation du diamètre de la fibre augmente la transmission de chaleur par rayonnement à travers les matériaux d'isolation.

Néanmoins, selon les auteurs de [27], le modèle de simulation présente des limites. Premièrement, le modèle proposé n'est valable que pour le cas de transfert par conduction, les autres modes de transfert étant négligeables. Par ailleurs, lorsque la température augmente, la convection et le rayonnement contribuent au transfert de chaleur dans le composite, chose qui influe sur la conductivité thermique du composite. Deuxièmement, l'algorithme de génération de structure doit être calibré avec l'expérience pour obtenir une valeur de «*d*» (diamètre admissible entre les fibres) appropriée. Ce paramètre influe sur la conductivité thermique du composite.

Des études analytiques portant sur les effets de l'orientation de la fibre et la longueur des fibres sur la conductivité thermique sont rapportés par les auteurs de [28,29].

Des procédures d'essai améliorés et des simulations numériques macroscopiques plus avancées ont été développés par les auteurs de [30,31], pour étudier le transfert de chaleur combiné, conduction-rayonnement à travers des milieux fibreux tenant en compte les effets de températures de fonctionnement et de la pression sur les performances des composites isolants à haute température.

D'après la synthèse présentée ci-dessus, l'étude numérique présente des limites et il faut introduire des hypothèses qui régissent ces lacunes dans le modèle numérique. Il est constaté que, la modélisation numérique des propriétés de transferts dans les matériaux

hétérogènes est influencé par plusieurs paramètres: la concentration des charges, le type de flux de charges, les résistances de contacts, les propriétés microstructurales...etc.

Donc, on peut conclure que, pour bien prédire la conductivité thermique d'un matériau composite, la modélisation numérique recommande un soin plus particulier des paramètres influençant sur leurs propriétés.

#### IV.3. Modélisation Numérique pour la détermination de $k$ par « Comsol »

L'objectif de cette étude est d'établir un modèle numérique qui nous permet de déterminer les propriétés thermophysiques des matériaux composites.

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

### V. Conclusion :

Nous avons présenté et discuté dans ce chapitre les différents outils de prédiction de la conductivité thermique des matériaux composites. D'après cette synthèse bibliographique, il a été constaté qu'aucun modèle théorique ne permet la prédiction des propriétés thermiques (notamment la conductivité thermique) des matériaux hétérogènes d'une manière parfaite. Tous les modèles théoriques d'estimation de  $k_{eff}$  divergent aux fortes concentrations et qu'aucun des modèles présentés ne prend en compte la taille des particules. Seul la forme ou la concentration en charges ainsi que les conductivités des deux constituants sont données

dans les quelques modèles présentés au-dessus. D'autre part, Les méthodes expérimentales peuvent se rapprocher de la réalité mais avec un soin plus particuliers.

Les méthodes numériques sont très utiles et offrent un champ d'application plus large, mais les résultats peuvent divergés de la réalité, car les hypothèses introduites peuvent négliger d'autres paramètres influençant les propriétés finales du matériau composite.

Dans le chapitre suivant nous présentons une étude numérique d'un matériau composite, afin de prédire sa conductivité thermique.

## Références

- [1] B. Zalba, L. F. Cabeza, 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.
- [2] X.-Q. Fang, "Scattering of thermal waves and non-steady effective thermal conductivity of composites with coated particles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 925-931, 2009.
- [3] R.C. Progelhof, R. R. Reutsch., "Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: a review," *Polym. Eng.Sci*, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [4] J.K. Carson, D.J. Tanner, A.C. Cleland, "Predicting the effective thermal conductivity of unfrozen, porous foods," *J. Food Eng*, vol. 75, pp. 297-307, 2006.
- [5] J. Wang, "A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 3075-3083, 2006.
- [6] A. Boudenne, "Étude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère," *thèse de Doctorat, Université Paris XII Val de Marne*, 2003.
- [7] D. Kumlutas, I.H. Tavman "A numerical and experimental study on thermal conductivity of particle filled polymer composites," *J Thermoplast Compos*, vol. 19, pp. 441-455, 2006.
- [8] M. Chikhi, B. Agoudjil, M. Haddadi, A. Boudenne, "Numerical modelling of the effective thermal conductivity of heterogeneous materials," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol.26, pp. 336-345, 2013.
- [9] A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, E. Gehin, JC. Majeste, "Thermophysical properties of polypropylene/aluminum composites," *J Polym Sci B: Polym Phys*, vol. 42, pp. 722-732, 2004.
- [10] D. Bigg, "Thermal conductivity of heterophase polymer compositions in thermal and electrical conductivity of polymer materials," *Adv Polym Sci*, vol. 119, pp. 1-30, 1995.



- [11] M. Taya, "Effective thermal conductivity of a misoriented short fiber composite," *J. Appl. Phys.*, vol. 58, pp. 2478-2486, 1985.
- [12] B. Garnier, B. Agoudjil, A. Boudenne, "Metallic particle filled polymer micro composites," *Polymer composites* Volume 1, DOI: 10.1002/9783527645213.ch19, 2012.
- [13] M. Filali, "Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques: modélisation et mesures," *these de Doctorat*, Institut National Polytechnique De Toulouse, 2006.
- [14] E. Coment, "Contribution a la mise au point de techniques de mesures de propriétés thermophysiques par sondes à chocs," *thèse de doctorat*, École supérieure d'arts et métiers, 2001.
- [15] J. Xaman, L. Lira, J. Arce, "Analysis of the temperature distribution in a guarded hot plate apparatus for measuring thermal conductivity," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 617-623, 2009.
- [16] P. Meukam, "Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments", *thèse de Doctorat*. Université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [17] A. Franco, "An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 2495-2504, 2007.
- [18] R. Coquard, D. Quenard, "Experimental and theoretical study of the hot-wire method applied to low-density thermal insulators," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 4511-4524, 2006.
- [19] P. Meukam, "Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low cost hot strip," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 1932-1938, 2004.
- [20] Y. He, "Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor Part 1. Theoretical considerations," *Thermochimica Acta*, vol. 436, pp. 122-129, 2005.
- [21] H.W. Zhang, H.L. Xing, H. Muhlhaus, "A DEM study on the effective thermal conductivity of granular assemblies," *Powder Technology*, vol. 205, pp. 172-183, 2011.

- [22] 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.
- [23] J.K. Carson, D. J. Tanner, A.C. Cleland, "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.
- [24] K Ramani, A Vaidyanathan, "Finite element analysis of effective thermal conductivity of filled polymeric composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 29, pp. 1725-1740, 1995.
- [25] A. Ochsner, T. Fiedler, "Geometrical properties of hollow sphere structures", *Engineering Materials*, pp. 31-46, 2009.
- [26] C. Yue, Y. Zhang, Z. Hu, J. Liu, Z. Cheng, "Modeling of the effective thermal conductivity of composite materials with FEM based on resistor networks approach," *Microsystem Technologies*, vol. 16, pp. 633-639, 2010.
- [27] R. Arambakam, Vahedi Tafreshi, B. Pourdeyhimi, "A simple simulation method for designing fibrous insulation materials," *Materials and design*, vol. 44, pp. 99-106, 2013.
- [28] P. Furmanski, "Influence of different parameters on the effective thermal conductivity of short-fiber composites," *Journal of Thermoplast Compos*, vol. 4, pp. 349-62, 1991.
- [29] S. Fu, Y. Mai, "Thermal conductivity of misaligned short-fiber-reinforced polymer composites," *J Appl Polym Sci*, vol. 88, pp. 1497-505, 2003.
- [30] B. Zhang W. Xie, S. Du, S. Zhao, "An experimental study of effective thermal conductivity of high temperature insulations.," *J Heat Trans-Trans ASME*, vol. 130, pp. 34504, 2008.
- [31] B. Zhang, S. Zhao, X. He, "Experimental and theoretical studies on high temperature thermal properties of fibrous insulation," *J Quant Spectrosc Radiat*, vol.109, issue 7, pp. 1309-1324, 2008.

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

## I. Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons présenté et analysé les différentes techniques de prédiction de la conductivité thermiques des matériaux composites. Dans ce chapitre nous allons présenter l'étude numérique effectuée sur des matériaux composites constitués d'une matrice (matériau homogène) et de renforts ayant des propriétés très différentes de celles de la matrice. Les caractéristiques des matériaux: la concentration, la distribution spatiale, la forme des particules de la charge déterminent les caractéristiques moyennes effectives du matériau composite. Si on considère le comportement du matériau composite comme isotrope, en régime permanent ce matériau peut être représenté par un matériau homogène équivalent. Donc on peut décrire le comportement thermique équivalent d'un matériau composite à l'aide d'une seule conductivité thermique. Dans cette étude, on va estimer cette conductivité à l'aide du logiciel COMSOL pour ensuite comparer les résultats numériques aux résultats expérimentaux et théoriques.

Ce chapitre est constitué de quatre points: (1) présenter la méthode expérimentale de préparation des composites polymères, les matériaux utilisés (matrices et charges); (2) le modèle numérique de prédiction de la conductivité thermique effective ; (3) comparaison des résultats numériques obtenus aux modèles théoriques et aux résultats expérimentaux ; (4) étude de l'effet de taille des charges sur  $k$ . Enfin, ce chapitre se termine par une conclusion.

## II. Expérimental

Afin de comparer Les valeurs numériques de la conductivité thermique effective des composites obtenues dans cette étude à celles de l'expérimentales, un résumé du travail expérimental effectué dans des études antérieures [1, 2] est présenté. Deux différents polymères ont été utilisés comme matrice. Le premier composite constitué d'une matrice copolymère EVA chargée de sphères  $\text{BaTiO}_3$  de 105 nm de diamètre. Le deuxième composite est constitué d'une matrice polypropylène (PP) chargée de particule de cuivre Cu de diamètre 234 nm. La morphologie des composites a été observée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB). Les surfaces observées ont été obtenues en brisant les échantillons à la température de l'azote liquide (cryo-fracture). Une bonne dispersion des particules dans les polymères a été observée. Les particules de  $\text{BaTiO}_3$  sont dispersées aléatoirement et entourées par la matrice polymère. La forme des particules est irrégulière. Selon les auteurs de [1], les résultats du MEB indiquent un mélange assez bon

avec quelques régions d'agrégation de particules. Pour les mesures de la conductivité thermique, les échantillons de dimensions de 44mm×44mm×3mm ont été réalisés à température ambiante. Les méthodes de préparation et de caractérisation thermophysiques des composites ont été présentées dans la littérature [1, 3]. Les propriétés des polymères et des particules de renforcement sont regroupées dans le tableau III.1.

**Tableau III. 1:** Propriétés thermophysiques des matrices et des charges [1,3].

Matériaux	$k$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$a$ ( $\times 10^{-7}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	$\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$C_p$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
EVA 2840	0.271±0.004	1.174±0.049	0.93	2482
BaTiO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	2.7	-	0.6	-
PP <sup>b</sup>	0.24±0.01	1.66±0.04	0.91±0.001	1731±85
Cu <sup>b</sup>	389	1.14×10 <sup>-4</sup>	0.896	381

BaTiO<sub>3</sub> : Titane de Barium, Cu : cuivre, EVA : Ethylène Vinyle Acétate, PP : Polypropylène.

<sup>a</sup> valeur à partir de la référence [1], <sup>b</sup> valeur à partir de la référence [3].

### III. Modélisation numérique

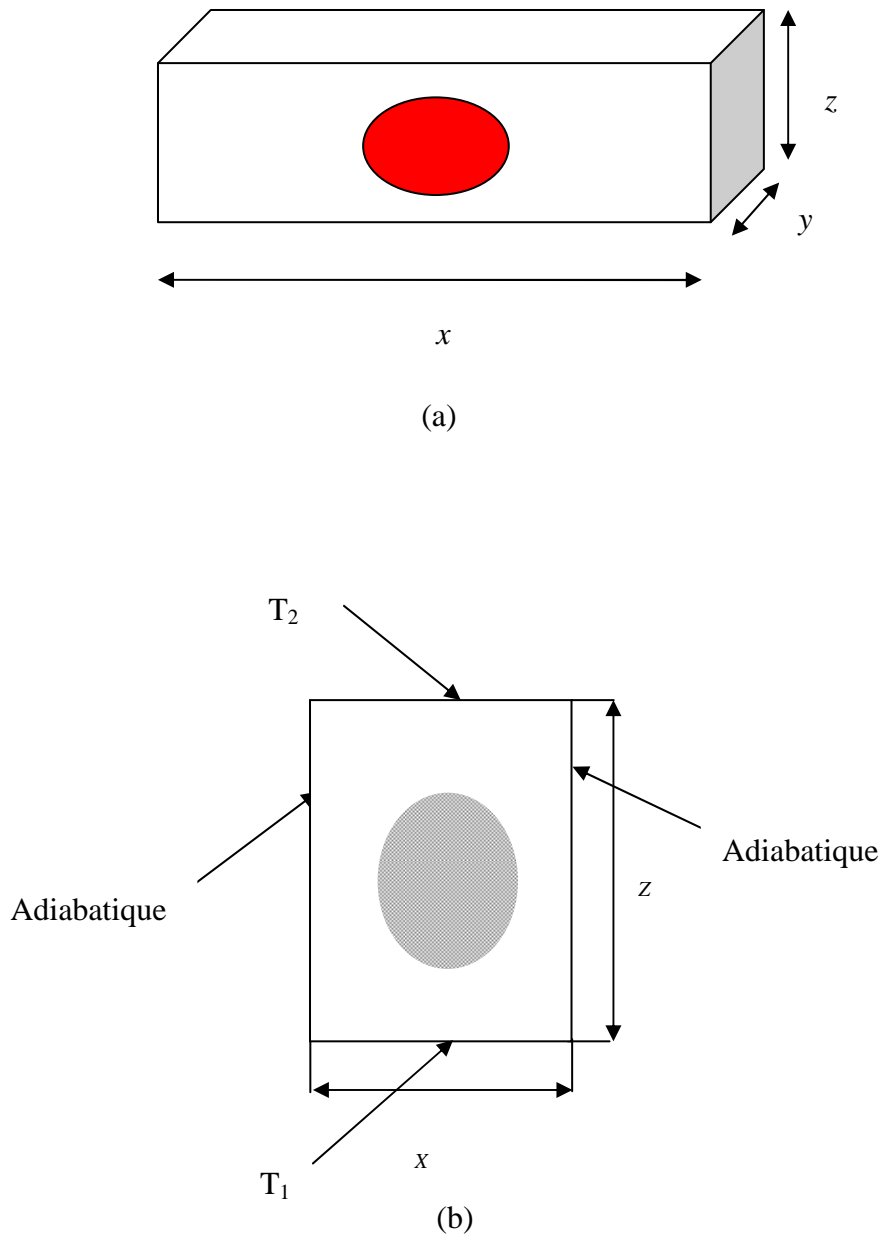
L'objectif de cette étude est d'estimer la conductivité effective des matériaux hétérogènes. Afin de modéliser le transfert conductif au sein du composite, nous considérons une cellule élémentaire du composite étudié. Il s'agit de matrices polymères chargées par différentes particules à différentes concentrations volumiques.

La cellule élémentaire est représentée par le modèle parallélépipède (PL). Dans le centre du PL est placée une sphère de rayon  $r$ . La cellule élémentaire est illustrée dans la figure III.1a.

Le domaine de température dans le matériau composite a été défini par la résolution numérique de l'équation de Laplace (équation 1) en utilisant une formulation d'éléments finis, imposant les conditions aux limites suivantes:

- Les faces perpendiculaires à la direction du flux de chaleur sont isothermes ;
- Les faces parallèles à la direction du flux de chaleur sont adiabatiques;
- Les transferts par rayonnement et convection sont négligeables;
- La résistance de contact thermique entre matrices et charges est négligeable;
- La dispersion des particules sphériques dans les matrices est homogène;

La figure III.1b montre les conditions aux limites de la cellule élémentaire.



**Figure III.1:** Cellule élémentaire: a) Vue 3D; b) Section 2D et conditions au limites.

Le flux de chaleur qui traverse la face chaude vers la face froide est calculé à partir de l'intégration de l'équation de Laplace (équation 1) appliquée aux frontières de la cellule élémentaire du composite.

$$Q = \int_A k \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \quad (1)$$

Avec :

$Q$  est le flux de thermique ;  $k$  est la conductivité thermique du composite ;

$\frac{\partial T}{\partial z}$  est la variation de températures selon la direction  $z$ .

$x$  et  $y$  représentent la surface d'échange.

Pour simplifier le problème et minimiser le temps de calcul, quelques hypothèses sont utilisées :

$$x \times y \times z = V_{ch}/\varphi_{ch} \quad (2)$$

$$V_m = (V_{ch}/\varphi_{ch}) \quad (3)$$

Avec :

$V_{ch} = \frac{4}{3}\pi r^3$  : Volume des charges sphériques;

$r = d/2$  : Rayon des charges ;

$V_{comp} = X \times Y \times Z$  : Volume du composite ;

$V_m = x \times y \times z$  : Volume de la matrice élémentaire ;

$2x > d$  ;  $2y > d$

Avec :  $x$ ,  $y$ ,  $z$  sont les dimensions de la cellule élémentaire, et  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  sont les dimensions du composite,  $d$  est le diamètre de l'inclusion.

On note que l'épaisseur de la matrice calculée ( $z$ ) pour résoudre l'équation de la chaleur (1), doit être supérieure à celui du diamètre des charges, dans le cas contraire, le dimensionnement de la matrice doit être changé dans le sens de conserver les hypothèses posées.

Pour le calcul de la conductivité thermique effective, on introduit la valeur du flux calculé à partir du logiciel COMSOL, dans l'équation (4). Donc si on connaît le flux, la conductivité thermique effective est calculée à partir de l'équation (4) :

$$k = \frac{Q}{A} \frac{L_z}{(T_1 - T_2)} \quad (4)$$

Où la surface d'échange  $A = x \times y$  (m<sup>2</sup>);  $z$  est calculé,

$\Delta T = T_1 - T_2$  (°K) est la variation de la température

La conductivité thermique effective du composite est donnée par la formule suivante :

$$k = (Q \times z) / (x \times y \times (T_1 - T_2)) \quad (5)$$

#### IV. Résultats et Discussions

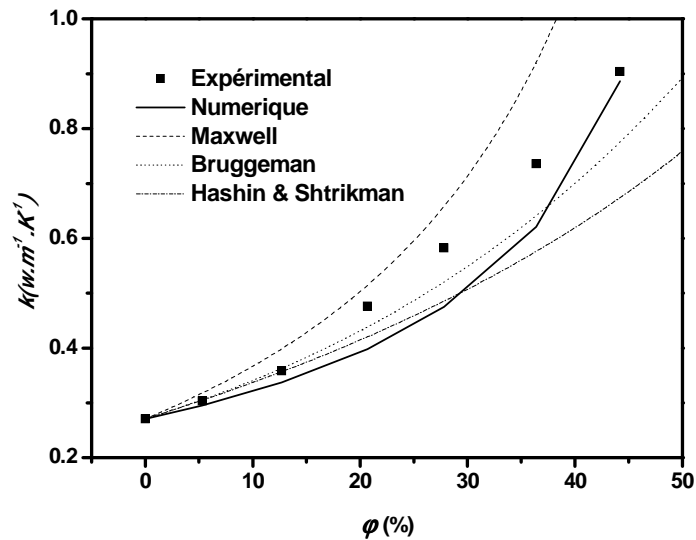
L'approche numérique décrite dans la section III.3 est utilisée pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux composites chargés par des inclusions sphériques. Les résultats de la simulation numérique sont illustrés dans les figures III.2 et III.3.

Dans ces figures, les valeurs de la conductivité thermique obtenue à partir de l'étude numérique sont comparées à plusieurs modèles théoriques de prédiction de la conductivité thermique ainsi qu'aux résultats expérimentaux. On remarque pour les deux figures une augmentation non linéaire de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en charge. Cette augmentation est principalement due à la conductivité thermique assez élevée des inclusions comparée à celle de la matrice polymérique.

**Tableau III.2 :** Valeurs numériques et expérimentales de  $k$  du composite EVA/BaTiO<sub>3</sub>.

$\phi$ (vol%)	$k$ numérique	$k$ expérimental [2]
0	0.271	0.271
5.3	0.295	0.303
12.7	0.337	0.358
20.7	0.398	0.476
27.8	0.474	0.582
36.4	0.620	0.736
44.2	0.886	0.904





**Figure III.2 :** Comparaison entre les résultats numériques, résultats expérimentaux et les modèles théoriques de prédiction de  $k$  du composites  $EVA/BaTiO_3$ .

Le tableau III.2 présente les valeurs numériques obtenues dans cette étude et les valeurs expérimentales de la conductivité thermique du composite  $EVA/BaTiO_3$ . Pour des concentrations inférieures à 20 (vol%) des particules de  $BaTiO_3$ , notre modèle numérique prédit correctement les mesures expérimentales de  $k$ . Ce résultat montre que l'influence de la résistance de contact entre les particules de  $BaTiO_3$  et le polymère EVA n'a pas d'influence sur le comportement thermique du composite. Pour les concentrations supérieures à 20%, le modèle numérique ne prédit pas bien les valeurs expérimentales du composite étudié. On note que cela est fortement lié aux résistances de contact entre fibre/fibre et fibre/matrice.

En comparant ces résultats aux modèles théoriques de prédiction de  $k$ , le modèle numérique développé dans cette étude prédit mieux la conductivité thermique pour des teneurs de charges inférieures à 20%. Pour des concentrations inférieures à 20%, les particules sont bien dispersées dans la matrice polymère et ils ne sont pas en interaction entre elles. Pour les teneurs supérieures à 20%, l'interaction entre les particules de  $BaTiO_3$  permet la formation d'une chaîne conductrices induisant une augmentation importante de la conductivité thermique effective du composite. Le modèle de Bruggeman [4] prédit assez bien les valeurs de la conductivité numérique des composites. Donc, il a été constaté que, pour des

concentrations supérieures à 20%, les modèles théoriques ne prennent pas en compte l'interaction entre les inclusions et la matrice.

Ce résultat est rapporté par Yue *et al* [5] qui ont utilisé l'étude numérique basée sur un modèle cubique à faces centrées (CFC) pour prédire la conductivité thermique effective des séries d'échantillons de matériaux composites. Les matériaux composites concernés dans l'étude de [5] sont, Cu/PP, AlN/PI, et TCA (Ag-époxy) à différentes concentrations de charges. Ils ont pris en considération trois types de résistance de contact, charges/charges, charges/matrice et matrice/matrice. Ils ont constaté que l'augmentation des concentrations des charges augmente la conductivité effective du composite et que leur modèle prédit correctement  $k$  expérimentale pour des concentrations faibles ( $<30\%$ ). Ils interprètent ce résultat par la bonne dispersion des charges dans la matrice, de telle sorte que pour des faibles concentrations, la distance entre les fibres est grande (relatif à l'échelle du composite). Donc la résistance de contact n'intervienne pas pour ce domaine de concentration ( $\phi < 30\%$ ). Contrairement aux concentrations plus élevées ( $\phi > 30\%$ ), leur modèle ne prédit pas bien les résultats expérimentaux. Selon les auteurs de [5], cela est dus aux résistances de contacts.

Selon notre étude, on peut conclure que, pour les faibles concentrations des charges ( $\phi < 20\%$  vol) le paramètre le plus influant sur la conductivité thermique effective des composites est la conductivité thermique des matériaux constituant ces composites. Ce comportement est déduit à partir des résultats de la littérature, lorsque la conductivité thermique des charges est plus élevée que celle de la matrice, la conductivité effective du composite augmente et vice versa. Ce résultat est rapporté par Li *et al.* [6] et Mangal *et al.* [7] qui ont mesuré la conductivité thermique et la diffusivité thermique du composite Lin/HDPE et les composites fibres de feuille d'ananas/PF, respectivement. Ils ont montré que la conductivité thermique des deux composites diminue en fonction de la concentration des charges. Selon les auteurs de [6, 7], ces résultats sont dus à l'effet des faibles conductivités thermiques des charges naturelles comparées à celles des matrices.

D'autre part, les charges possédant des conductivités thermiques plus élevées que celles des matrices, augmentent la conductivité effective du composite. Ce résultat est soutenu par les auteurs de [1, 3] qui ont constaté que la conductivité thermique effective des composites à base de polymère et de renforts métalliques augmente en fonction de la concentration des charges de.

Pour les concentrations élevées ( $\phi > 20$  % vol), en plus de l'effet de la concentration des charges, la conductivité thermique des composites est influencée par d'autres paramètres qui favorisent l'augmentation de la résistance de contact. Parmi ces paramètres, la taille des charges [1, 8, 9] et leur forme [10].

Le tableau III.3 présente les valeurs numériques obtenues dans cette étude et les valeurs expérimentales de la conductivité thermique du composite PP/Cu. Ces résultats montrent que pour des fractions volumiques de particules de Cu inférieures à 20 (vol%), les résultats numériques estiment bien les résultats expérimentaux. Pour des teneurs supérieures à 20 (vol%), l'écart entre ces deux valeurs est important. 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 de conduction thermique de Cu qui se traduit par une augmentation importante de la conductivité thermique du composite. On remarque un comportement identique que celui du composite EVA/ BaTiO<sub>3</sub> discuté au dessus.

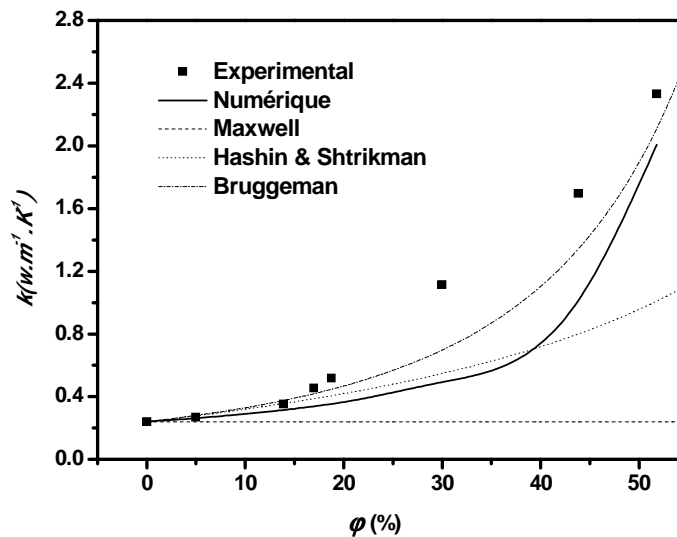
Ce phénomène n'est pas pris en compte dans la modélisation numérique qui suppose une distribution homogène des particules dans la matrice et une résistance de contact négligeable.

La figure III.3 montre que tous les modèles théoriques estiment d'une manière correcte les valeurs de la conductivité thermique pour des concentrations inférieures à 20 (vol%). Pour des fractions volumiques supérieures à 20%, les résultats numériques divergent de celles des résultats des modèles théoriques. On note aussi que le modèle de Bruggeman prédit assez bien la conductivité thermique des composites.

Un comportement similaire a été rapporté par J.K. Carson [11], qui a comparé les résultats expérimentaux de la conductivité thermique d'un système composé de polymère de gel hydraté chargé par des particules d'Aluminium à un taux inférieure à 0.6 (vol%) aux modèles de prédiction de  $k$ . Il a conclu que l'augmentation de la teneur des inclusions d'Aluminium dans la matrice polymère augmente sa conductivité thermique d'une manière importante et rapide. Il a noté que l'augmentation de la conductivité thermique effective des composites est liée à la grande différence entre les conductivités thermiques des charges et matrice.

**Tableau III.3** : Valeurs numériques et expérimentales de  $k$  du composite PP/Cu.

$\varphi$ (vol%)	$k$ numérique	$k$ expérimental [2]
0	0.240	0.240
4.96	0.262	0.268
13.89	0.314	0.351
16.96	0.338	0.454
18.74	0.353	0.517
29.97	0.492	1.114
43.82	1.013	1.695
51.78	2.007	2.333

**Figure III.3** : Comparaison entre les résultats numériques, résultats expérimentaux et les modèles théoriques de prédiction de  $k$  du composites PP/Cu.

#### IV.1. Effet de la taille des charges

L'effet de la taille des inclusions sur les propriétés thermiques des matériaux composites a été étudié par de nombreux auteurs [12-14]. Afin d'étudier l'influence de la taille des inclusions sur la conductivité thermique effective, des particules sphériques avec différentes tailles et de conductivité thermique  $k_2$  sont incorporés dans une phase continue de conductivité thermique

$k_1$ . Pour cela, nous avons utilisé le modèle physique 2D (décrit dans la section III.3) pour étudier l'influence de la taille des charges sur la conductivité thermique des composites.

La figure III.4 présente les résultats numériques de la conductivité thermique des composites EVA/BaTiO<sub>3</sub> à différentes tailles d'inclusions.

D'après la figure III.4, le composite chargé avec de petites particules de BaTiO<sub>3</sub> présente une conductivité thermique plus élevée que celle du composite chargé avec de grosses particules pour la même concentration de charges. Donc, on peut dire que la conductivité thermique des composites diminue avec l'augmentation de tailles des particules. Ce résultat peut être relié au fait que les petites particules génèrent moins de vide et présentent une meilleure dispersion par rapport aux particules larges.

Ce résultat est similaire aux travaux de Boudenne *et al* [3], qui indiquent que les valeurs expérimentales de la conductivité thermique les plus élevées sont fournies par la matrice polypropylène chargée avec des particules de cuivre (Cu) de petite taille pour la même concentration des charges.

Ce comportement est aussi rapporté par plusieurs travaux qui ont étudié l'effet de taille des renforts métalliques et minérales sur les composites à matrice polymères [3,14,15].

Néanmoins, ce résultat ne peut pas être généralisé. Un effet inverse que celui présenté dans notre étude des tailles de particules sur  $k$  du composite a été rapporté par S. Choi et J. Kim [16] qui ont étudié l'effet de la taille des inclusions sur la conductivité thermique des composites à base d'Epoxy renforcés par des particules d'oxyde d'Aluminium et des particules de nitrite d'Aluminium. Leur résultat montre que la conductivité thermique des composites contenant des particules larges est plus élevée que celle des composites contenant des petites particules. Selon les auteurs de [16], ce comportement est lié à la résistance thermique de conduction, qui dépend des interfaces charges/matrice.

D'autres auteurs [8, 17] ont indiqué que la conductivité thermique des composites ne dépend pas de la taille des particules. Agoudjil *et al.* [8] ont démontré par des mesures expérimentales que la variation de tailles des particules de verre revêtues en argent dans la matrice EVA n'influe pas sur la conductivité thermique effective du composite.

Nogales *et al* [18] ont déduit que la taille des particules en diamant n'influe pas sur les propriétés thermophysiques des composites à matrice polymère. Selon les auteurs de [18], ce

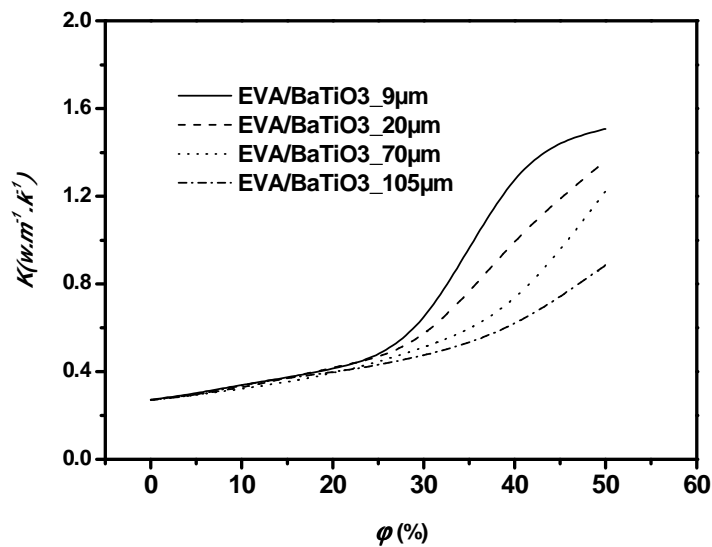
résultat est fortement relié à l'effort et à la résistance de contact induit par les matrices et les renforts.

Par conséquent, il n'existe pas de règle générale à propos de l'effet de la taille des charges sur les propriétés thermique des composites.

Nous avons constaté à partir de notre études, que (voir figure III.4), pour des faibles concentrations (inferieures à 20 vol%), l'effet de la taille des inclusions sur la conductivité thermique des composite est négligeable. Tandis que, pour des concentrations supérieures à (20 vol%), la conductivité thermique des composites est influencée par la taille des inclusions, la concentration et le type des charges. Un comportement similaire est observé dans l'étude de Choi *et al* [16].

**Tableau III.3 :** Effet de la taille des charges de  $BaTiO_3$  sur  $k$  du composite EVA/ $BaTiO_3$ .

$\phi$ (vol %)	$d$ ( $\mu m$ )			
	9	20	70	105
0	0.271	0.271	0.271	0.271
5	0.303	0.297	0.294	0.295
10	0.339	0.328	0.321	0.337
20	0.413	0.417	0.394	0.398
30	0.649	0.573	0.511	0.474
40	1.275	0.992	0.738	0.620
50	1.507	1.361	1.225	0.886



**Figure III.4 :** Effet de la taille des particules de  $BaTiO_3$  sur la conductivité thermique des composites EVA/ $BaTiO_3$ .

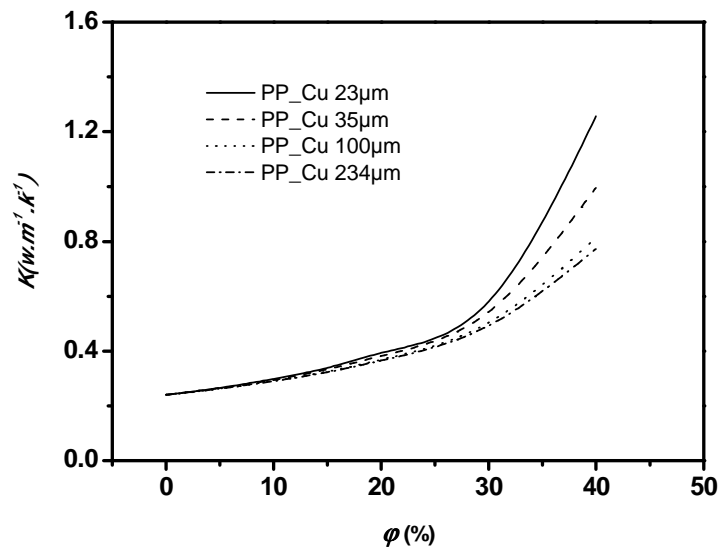
La figure III.5 présente les résultats numériques de la conductivité thermique des composites PP/Cu à différentes tailles d'inclusions. On remarque que, le composite à base de PP chargé avec de petites particules de Cu présente une conductivité thermique plus élevée que celle du composite chargé avec de grosses particules pour la même concentration de charges.

Il a été observé que (voir figure III.5), pour des faibles concentrations ( $\phi < 30\%$ ), l'effet de taille des inclusions sur la conductivité thermique des composite est négligeable. Tandis que, pour des concentrations supérieure à 30 %, la conductivité thermique des composites est influencée par la concentration des inclusions et leur taille. Ce résultat à été aussi rapporté par Boudenne *et al.*[3] qui ont étudié l'effet de la taille des particules sphériques de cuivre (Cu) sur la conductivité thermique de la matrice PP. Ils ont constaté que la taille des particules a un effet significatif sur la conductivité thermique des composites

Choi *et al* [16], ont aussi montré que la taille de particules d'aluminium possèdent un effet significatif sur la conductivité thermique effective du composite polymère à base d'époxy.

**Tableau III.4 :** Effet de la taille des particules de Cu sur  $k$  du composite PP/Cu.

$\phi$ (vol%)	$d$ ( $\mu\text{m}$ )			
	23	35	100	200
0	0.240	0.240	0.240	0.240
5	0.265	0.264	0.262	0.262
10	0.298	0.294	0.290	0.289
15	0.339	0.332	0.325	0.322
20	0.393	0.381	0.368	0.364
30	0.581	0.543	0.504	0.493
40	1.256	0.996	0.813	0.773



**Figure III.5 :** Effet de la taille des particules de Cu sur la conductivité thermique des composites PP/Cu.

#### IV.2. Effet de type des charges

Afin de bien comprendre l'effet du type de charges sur la conductivité thermique effective des composites à base de polymère, l'effet du BaTiO<sub>3</sub> sur la matrice EVA et les charges de Cu sur la matrice PP est étudié et analysé. Les propriétés thermophysiques des charges et des matrices sont données dans le tableau III.1.

La conductivité thermique des renforts de BaTiO<sub>3</sub> ( $k_{BaTiO_3}$ ) représente dix (10) fois la conductivité thermique de la matrice EVA. L'incorporation de faible concentration de BaTiO<sub>3</sub> ( $\phi < 30\%$ ) induit une faible évolution de  $k_{EVA}$ . Pour des concentrations plus élevées ( $\phi > 30\%$ ), l'évolution de  $k_{EVA}$  est plus significative. Pour  $\phi = 40\%$ , l'évolution de  $k_{EVA}$  est de trois (3) fois.

Pour le composite PP/Cu, la conductivité de Cu ( $k_{Cu}$ ) représente 1620 fois la conductivité de la matrice PP  $k_{PP}$ . L'ajout de faible teneur en Cu ( $\phi < 30\%$ ) produit une légère augmentation de  $k_{PP}$  et pour des concentrations supérieures ( $\phi > 30\%$ ),  $k_{Cu}$  atteint une augmentation de quatre (4) fois seulement.

Ce comportement est observé par plusieurs études [15,19]. Ces auteurs ont prédit la conductivité thermique effective des composites polymères chargés par des particules



métalliques utilisant la mesure expérimentale et l'étude numérique. Ils ont déduit que, la conductivité thermique des composites à base de polymères varie lentement pour les faibles concentrations des charges. Tandis que, pour des teneurs d'ajouts plus élevées, l'évolution de  $k$  est significative.

On remarque que, pour les mêmes conditions de tailles et de concentrations de renforts, les valeurs des conductivités thermiques effectives des deux composites EVA/BaTiO<sub>3</sub> et PP/Cu sont similaires. Ce comportement nous permet de conclure que, l'augmentation de la conductivité thermique effective des composites ne dépend pas de types de charges (charges conductrices ou isolantes), mais elle dépend fortement de la compatibilité des renforts avec la matrice. Ce résultat est en accord avec le travail de Zimmer *et al* [20] qui ont étudié numériquement et expérimentalement l'effet des charges (à conductivités thermiques élevées) de nanoparticules d'aluminium et de carbone sur la conductivité thermique de la matrice époxy. Leur résultat indique que l'effet de ces ajouts sur la conductivité thermique de l'époxy est faible.

On peut conclure que, l'effet de la compatibilité entre la matrice et la charge sur la conductivité thermique effective des composite est plus significative que le type de charges.

Il est à noter que, les surfaces interfaces de contact entre les inclusions et la matrice ont aussi une grande influence sur la conductivité thermique des composites.

Selon les résultats de [16] la différence (l'écart) entre les valeurs expérimentales et numériques est due à deux principaux paramètres, à la taille des particules et au degré de dispersion des particules dans le composite. Si les inclusions ne sont pas bien dispersées dans la matrice, les particules larges induisent des vides qui diminuent la conductivité thermique des composites.

## V. Conclusion

Dans cette étude, les conductivités thermiques de la matrice EVA chargé par des particules sphériques de BaTiO<sub>3</sub> et de la matrice PP chargé avec de la poudre de Cu ont été étudiés numériquement. La méthode des éléments finis a été utilisée pour estimer la conductivité thermique effective de ces matériaux composites et d'étudier l'influence de la taille et de la fraction volumique des particules de renforcement. La conductivité thermique obtenue

numériquement a été comparée aux modèles théoriques et aux résultats expérimentaux. Les résultats obtenus montrent qu'en dessous de la concentration de 20% (vol%) de charges, le modèle numérique développé dans notre étude prédit assez bien la conductivité thermique des composites. Au dessus de 20% (vol%) de charges, les résultats numériques divergent des résultats expérimentaux. Cet écart peut être attribué au fait que la modélisation numérique ne prend pas en considération la résistance thermique interface, qui est un facteur qui influe fortement la conductivité thermique des matériaux composites. La taille des particules présente aussi un paramètre important qui influe sur la conductivité thermique effective des matériaux composites. Il est important de retenir que, la conductivité thermique diminue lorsque la taille des particules augmente. Par ailleurs, il est très utile d'utiliser le modèle numérique proposé dans cette étude pour étudier l'effet de la taille des particules sur la conductivité thermique des matériaux composites.

Il a été constaté à partir de cette étude que, l'effet de la compatibilité entre la matrice et la charge sur la conductivité thermique effective des composite est plus significative que le type de charges.

## Références

- [1] B. Agoudjil, L. Ibos, Y. Candau, and J.-C. Majesté, "A comparative analysis of dielectric, rheological and thermophysical behaviour of ethylene vinyl acetate/BaTiO<sub>3</sub> composites," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, pp. 055407, 2008.
- [2] B. Agoudjil, "Etude des propriétés thermophysiques et électriques de matériaux hétérogènes," *Thèse de Doctorat*, Université Paris XII Val de Marne, France, 2006.
- [3] A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, J. C. Majeste, and E. Géhin, "Electrical and thermal behavior of polypropylene filled with copper particles," *Composites: Part A*, vol. 36, pp. 1545-1554, 2005.
- [4] R. C. Progelhof, J. L. Throne, and R. R. Reusch, "Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: a review," *Polym. Eng.Sci*, vol. 16, pp. 615-625, 1976.
- [5] C. Yue, Y. Zhang., Z. Hu, J. Liu, Z. Cheng, "Modeling of the effective thermal conductivity of composite materials with FEM based on resistor networks approach," *Microsystem Technologies*, vol. 16, pp. 633–639., 2010.
- [6] X. Li, L.G Tabil, IN. Oguocha, 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.
- [7] R. Mangal, N. S. Saxena, MS. Sreekala, S. Thomas , K. Singh, "Thermal properties of pineapple leaf fiber reinforced composites.," *Mater Sci Eng A*, vol. 339, pp. 281–5, 2003.
- [8] B. Agoudjil, L. Ibos, J. C. Majesté, Y. Candau, and Ye. P. Mamunya, "Correlation between transport properties of Ethylene Vinyl Acelate/ glass, silver-coated glass spheres composites," *Composites: Part A*, vol. 39, pp. 342-351, 2008.
- [9] W. Zhou, S. Qi, C. Tu, H. Zhao, C. Wang, and J. Kou, "Effect of the Particle Size of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the Properties of Filled Heat-Conductive Silicone Rubber," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 104, pp. 1312-1318, 2007.
- [10] Q. Xue, "The influence of particle shape and size on electric conductivity of metal-polymer composites," *European Polymer Journal*, vol. 40, pp. 323-327, 2004.

- [11] J. K. Carson, S. J. Lovatt, D. J. Tanner, and A. C. Cleland, "An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations," *International Journal of Refrigeration*, vol. 26, pp. 873-880, 2003.
- [12] Y. Jiang, K. Tohgo, and H. Yang, "Study of the effect of particle size on the effective modulus of polymeric composites on the basis of the molecular chain network microstructure," *Computational Materials Science*, 2010.
- [13] W. Zhou, C. Wang, T. Ai, K. Wu, F. Zhao, and H. Gu, "A novel fiber-reinforced polyethylene composite with added silicon nitride particles for enhanced thermal conductivity," *Composites: Part A*, vol. 40, pp. 830-836, 2009.
- [14] Ye P. Mamunya, W. Davydenko, P. Pissis, EV. Lebedev, "Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders.," *Eur Polym J*, vol. 38, pp. 1887–97, 2002.
- [15] D. Kumlutas and I. Tavman, "A numerical and experimental study on thermal conductivity of particle filled polymer composites," *J Thermoplast Compos*, vol. 19, pp. 441-55, 2006.
- [16] S. Choi, J. Kim, "Thermal conductivity of epoxy composites with a binary- particle system of Aluminum oxide and aluminum nitride fillers, " *Composites part B: Engeneering*, vol. 51, pp. 140-147, 2013.
- [17] D. Bigg, "Thermally conductive polymer compositions," *Polymer Composites*, vol. 7, pp. 125-140, 1986.
- [18] S. Nogales, H.J. Bohm, "Modeling of the thermal conductivity and thermomechanical behavior of diamond reinforced composites," *International Journal of Engineering Science Special Issue: Micromechanics of Materials*, vol. 46, pp. 606-619, 2008.
- [19] Y. Xu, G. Ray, B. Abdel-Magid, "Thermal behavior of single-walled carbon nanotube polymer–matrix composites," *Composites: Part A*, vol. 37, pp. 114–121, 2006.
- [20] M. Zimmer, X. Fan, J. Bao, R. Liang, B. Wang, C. Zhang, J. Brooks, "Through-Thickness Thermal Conductivity Prediction Study on Nanocomposites and Multiscale Composites," *Materials Sciences and Applications*, vol. 3, pp. 131-138, 2012.

# **Chapitre IV :**

## **Etude expérimentale**

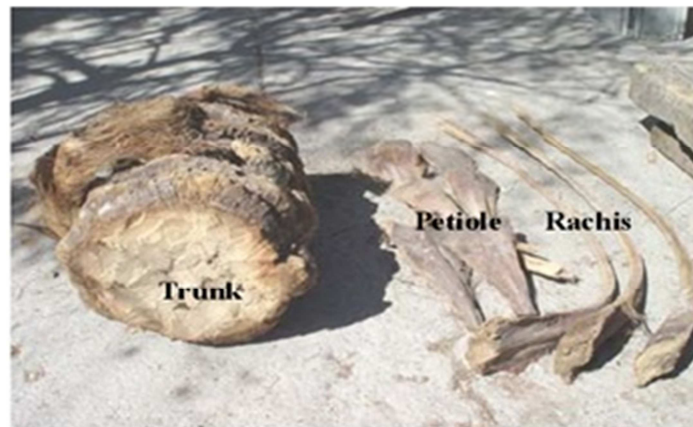
## I. Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'élaboration et au contrôle des échantillons composites réalisés à base de gypse et de fibres naturelles (fibres de bois de palmier dattier). La méthode de mise en œuvre de ces composites en fonction de la taille des charges et de leurs concentrations est présentée. Une étude de la granulométrie de deux différentes tailles des fibres de bois palmier dattier utilisées nous renseigne sur leur influence sur le gypse. Les différentes méthodes d'essais pour étudier l'influence de l'eau, mesurer les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux composites sont décrites dans ce chapitre.

## II. Matériaux utilisés

### II.1. Bois du palmier dattier (BPD)

Le matériau naturel utilisé dans cette étude comme renfort est le bois de palmier dattier (FBPD), récolté des oasis de Laghrou (Biskra, Algérie). Les parties des BPD utilisées dans ce travail sont le pétiole, la grappe et le rachis, présentées dans la figure IV.1.



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

## II.2. Broyage mécanique

Le bois utilisé a été séché dans des conditions naturelles, puis passé à l'étape du broyage, afin de produire des petites dimensions de fibres.

Le broyage consiste à réduire les morceaux de matériaux solides d'une taille donnée à une taille plus petite. Le principe est la fragmentation des morceaux par l'action mécanique de pièces plus résistantes, généralement métalliques. Les équipements à utiliser dépendent des dimensions souhaitées.

Afin d'obtenir des petites dimensions, le bois de palmier dattier utilisé dans ce travail a été soumis à deux niveaux de broyage, le concassage et le broyage grossier,

**Le concassage** : il permet d'obtenir des particules de taille inférieure au centimètre, et est souvent utilisé en pré-broyage. Il se subdivise en concassage primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire. Ce dernier est assimilable au broyage grossier.

**Le broyage grossier** : il permet d'obtenir des particules de l'ordre du millimètre.

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



**Figure IV.2** : Opération du broyage du bois de palmier dattier.

### II.3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer les différents diamètres de fibres 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 suivants (en mm) : 2.5, 3.15, 4,5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5. On appelle :

- Refus sur un tamis: la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- Tamisât (ou passant): la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. La figure V.3 présente le tamiseur utilisé dans cette étude.



**Figure IV.3 :** *Appareil de tamisage du bois de palmier dattier.*

Le principe de l'essai consiste à :

- Fractionner au moyen d'une série de tamis les fibres en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.
- Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.



## Les résultats

- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille, soit  $R_1$  la masse de ce refus.
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés.
- Les masses des différents refus cumulés  $R_i$  sont rapportées à la masse totale de l'échantillon  $m_1$ .
- Les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus, sont inscrits sur la feuille d'essai. Le pourcentage des tamisât cumulés sera déduit.

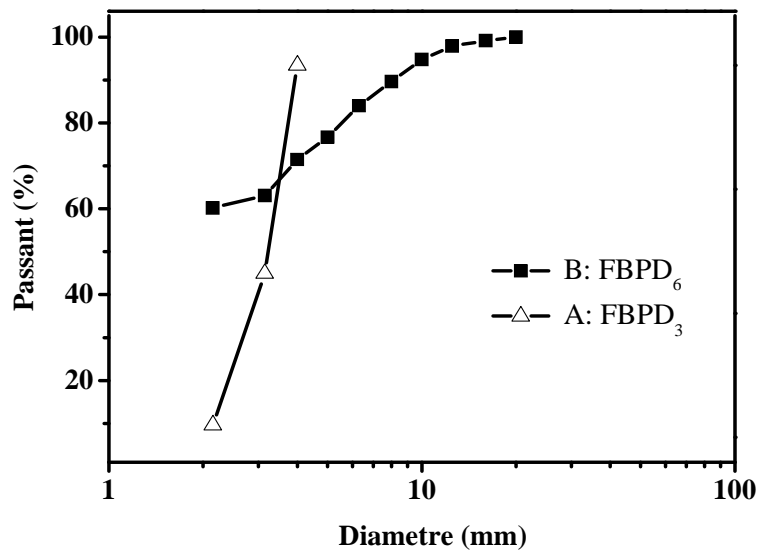
Les résultats du tamisage des fibres de palmier dattier sont présentés dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1** : Les résultats des tamisât cumulés des deux échantillons de FBPD.

Tamis (mm)	Tamisât cumulés *(%)	
	Echantillons	
	B	A
31.5	100	100
25	100	100
20	100	100
16	99.05	100
12.5	98.42	100
10	94.17	100
8	92.14	100
6.3	88.29	100
5	82.09	100
4	71.84	100
3.15	64.83	99.16
2.15	56.02	98.55

\* (%): Le pourcentage massique du matériau passant à travers un tamis.

Deux tailles différentes de BPD sont utilisées dans cette étude. La figure IV.4 présente la distribution de la granulométrie des fibres suivant la norme NF P18-560.



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

D'après la figure IV.4, on distingue deux diamètres différents du bois de palmier dattier, (A) avec un diamètre moyen de 3mm, et (B) avec un diamètre moyen de 6mm.

Les propriétés thermophysiques, morphologiques et la composition chimique du bois palmier utilisés dans cette étude ont été présentées dans des travaux antérieurs [1].

#### II.4. Gypse

La matrice utilisée est du gypse de type Knauf commercialisé par la société Knauf Algérie®. Sa composition chimique est présentée dans le Tableau IV.2 ci-dessous. D'après l'analyse de la composition chimique, le gypse utilisé est constitué principalement de  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ . La quantité des éléments Ca et S est plus importante que celle des Si et Mg.

**Tableau IV.2 : Composition chimique du gypse.**

Eléments	Masse %
O	48.86
Mg	0.87
Al	0.80
Si	1.32
S	21.46
Ca	26.68
Total	100.00

### III. Préparation des composites

#### III.1. Choix du taux de gâchage

Pour déterminer le taux de gâchage adéquat (e/p), il faut prendre en compte Les conditions suivantes :

- sachant que plus le rapport (e/p) est élevé, plus le plâtre durci obtenu présente des résistances faibles.
- (e/p) influence l'ouvrabilité de la pâte au cours de prise.
- La pâte de plâtre doit être facile à travailler pour qu'elle puisse s'étaler correctement sous la forme des moules. Dans ce cas, un taux de gâchage élevé assurera une bonne ouvrabilité.
- Afin de choisir le meilleur taux de gâchage (rapport e/p) on a procédé à plusieurs essais. Pour le rapport e/p= 0.5, il s'est produit une pate sec et difficile à travailler. Le rapport e/p=0.6 produit une pate bonne à travailler, donc une ouvrabilité meilleure.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.3.

**Tableau IV.3 : Taux de gâchage du gypse.**

Taux de gâchage (e/p)	0.5	0.6
Observations sur l'ouvrabilité	Pate difficile à travailler	Bonne ouvrabilité

### III.2. Calcul des masses de fibres et de matrice dans les composites

A partir de la loi des mélanges :

$$\rho_c = \rho_f + \rho_m \quad (1)$$

Avec

$$\varphi_f(\%) = \frac{m_f}{m_f + m_m} \quad (2)$$

On aboutira à

$$m_f = m_m [\varphi_f / (1 - \varphi_f)] \quad (3)$$

Avec:  $m_f$  et  $m_m$  sont respectivement les masses des fibres et de la matrice (gypse+eau);  $\varphi_f$  est la fraction massique utilisée.

Pour un taux de gâchage de  $e/p= 0.6$ , les masses de fibres calculés sont regroupés dans le tableau IV.4.

**Tableau IV.4 :** *Masses de fibres et de matrices correspondantes aux fractions massiques.*

$\varphi_f$ (%masse)	$m_f$ (g)	$m_m$ (g)
1.2	19.44	1639.67
3	49.48	1700.34
5	84.20	1772.63
7	120.43	1849.92
8	139.13	1890.35
10	177.77	1975.22

### III.3. Mise en œuvre des échantillons

Les composites étudiés ont été préparés avec six fractions massiques (voir tableau IV.4) de fibres de palmier dattier. La préparation des échantillons a été effectuée en trois étapes: (i) le gypse est mélangé avec de l'eau dans un malaxeur de type Perrier avec un taux de gâchage de 0.6 et à température ambiante pendant 5 minutes, (ii) les fibres sont ajoutées et le mélange est malaxé pendant 5 minutes, (iii) le mélange est versé rapidement dans les moules qui correspondent aux différents essais.

Le malaxeur de type Perrier utilisé pour préparer le composite à base de gypse et de bois de palmier dattier est illustré dans la figure IV.5.

Le mélange récupéré du malaxeur est versé dans les moules correspondant aux essais recommandés (voir figure IV.6).



**Figure IV.5 :** *Malaxeur automatique de type Perrier.*



(a)



(b)

**Figure IV.6 :** *Moules pour essais: (a) Mécaniques (40 mm × 40 mm × 160 mm);  
(b) Thermiques (150 mm × 150 mm × 50 mm).*

Deux séries d'échantillons constitués d'une matrice de gypse et de fibres de bois de palmier dattier (BPD) ont été réalisées. La première série de composites comprend une matrice de gypse avec des concentrations massiques de 0, 1.2, 3, 5, 7, 8 et 10 % de petites fibres de bois de palmier dattier possédant un diamètre moyen de 3 mm (G/BPD<sub>3</sub>). La deuxième série contient les composites réalisés en utilisant les mêmes concentrations avec des fibres (grosses) de diamètre moyen de 6 mm (G/BPD<sub>6</sub>).

On note pour ce qui suit : GH/FBPD<sub>3</sub> correspond au gypse renforcé par les fibres de 3 mm (A), et GH/FBPD<sub>6</sub> pour le gypse renforcé par les fibres de 6 mm (B).

### III.4. Essais et mesures

#### III.4.1. Résistance à l'eau

Les essais de la teneur en eau ont été réalisés suivant la norme ASTM D 570, 2002, qui analyse l'évolution de poids du matériau après immersion dans l'eau. Les échantillons de composites ont été séchés à 65°C pendant 7 jours pour obtenir un poids constant [2]. La capacité d'absorption d'eau des composites a été mesurée à 14 et à 28 jours. Le gain de masse est calculé en utilisant la formule 4 [3]:

$$H(\%) = \frac{w_m - w_d}{w_d} \times 100 \quad (4)$$

Avec,  $H(\%)$  est la teneur en eau (humidité) (%), le poids humide  $w_m$  (g) au temps (t) et  $w_d$  le poids sec (g).

#### III.4.2. Essais mécaniques

Les essais de résistance à la compression et à la flexion ont été effectués selon la norme NF EN 1015-11, 2000. Pour chaque concentration, trois échantillons ont été préparés et testés à différents âges (14 et 28 jours). Les échantillons secs ont été séchés à 65°C jusqu'à atteindre un poids constant.

Les échantillons de composites après rupture par flexion sont présentés dans la figure IV.7



**Figure IV.7 :** Echantillons de GH/FBPD après l'essai de flexion.

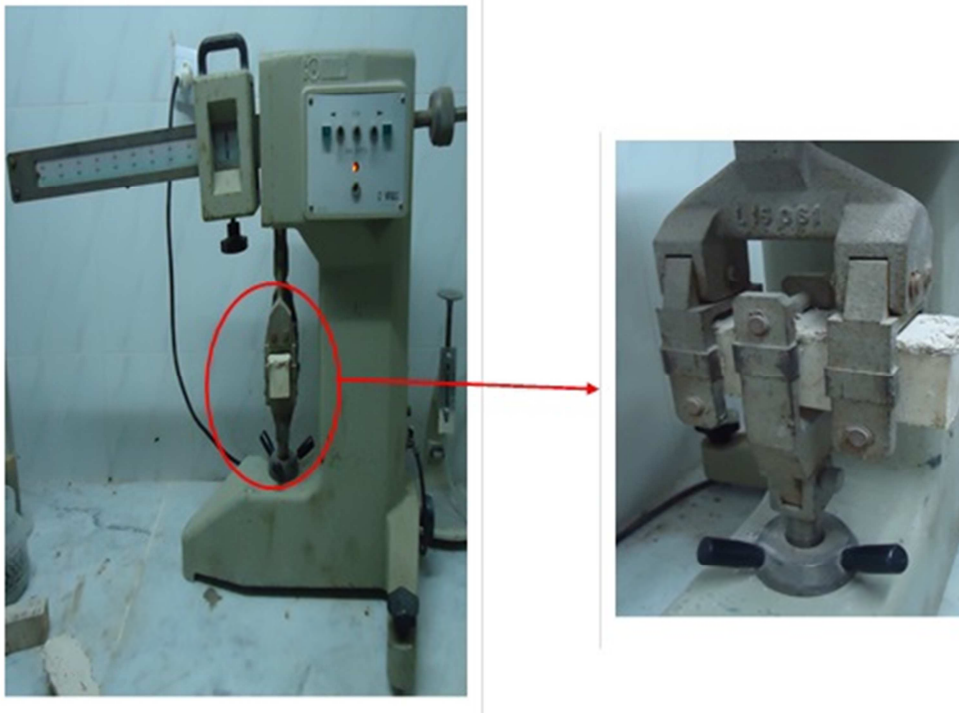
➤ **Essais de flexion**

Une machine de flexion (Modèle: Contrôles L15-005 Fusible 0.5A, German) avec une vitesse de charge de 50 N/s a été utilisée pour l'essai de résistance à la flexion (figure IV.8).

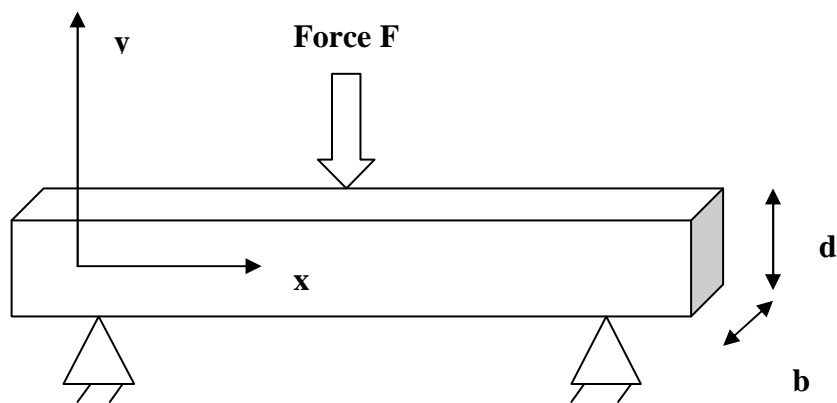
L'éprouvette repose sur deux appuis simples, distants de  $l$ , et la charge  $F$  est appliquée au centre de l'échantillon (voir la figure IV.9). La méthode de la flexion à trois points est utilisée et la résistance à la flexion est calculée à partir de l'équation 5 [4]

$$R_f = 1.5 \frac{Fl}{bd^2} \quad (5)$$

Où  $R_f$  est la résistance à la flexion [MPa],  $b$  et  $d$  sont respectivement la largeur et l'épaisseur de l'échantillon [mm],  $F$  est la charge maximale appliquée à la flexion d'essai [N] et  $l$  est la distance entre les rouleaux d'appui [mm].



**Figure IV.8 :** *Appareil de flexion à 3 points.*



**Figure IV.9 :** *Schéma du montage de flexion 3 points.*



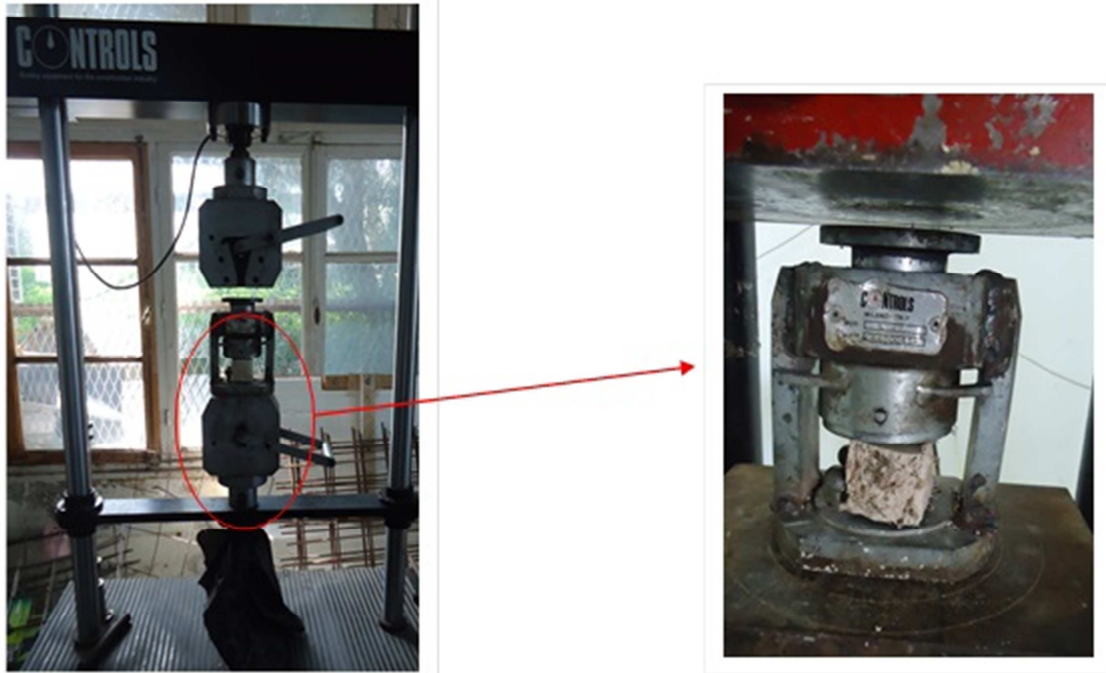
### ➤ Essais de compression

Le but de cet essai est de déterminer la résistance mécanique à la rupture pour des échantillons soumis à des contraintes de compression.

La machine d'essai de compression de 100 KN (Modèle: Electromechanical Universal testing machin Controls, German, utilisant le logiciel Materials Testing Xpert maîtres 7.11) a été utilisée pour déterminer la résistance à la compression à une vitesse de traverse de 10 mm/min et une charge de 10 N/min (voir la figure IV.10). La résistance à la compression a été déterminée en appliquant une charge sur les demi-prismes obtenus à partir de l'essai de flexion sur les échantillons (40 mm × 40 mm × 160 mm utilisés pour l'essai de la flexion). La moyenne de six valeurs pour chaque concentration est rapportée. La résistance à la compression est calculée à partir de l'équation 6 [4]:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (6)$$

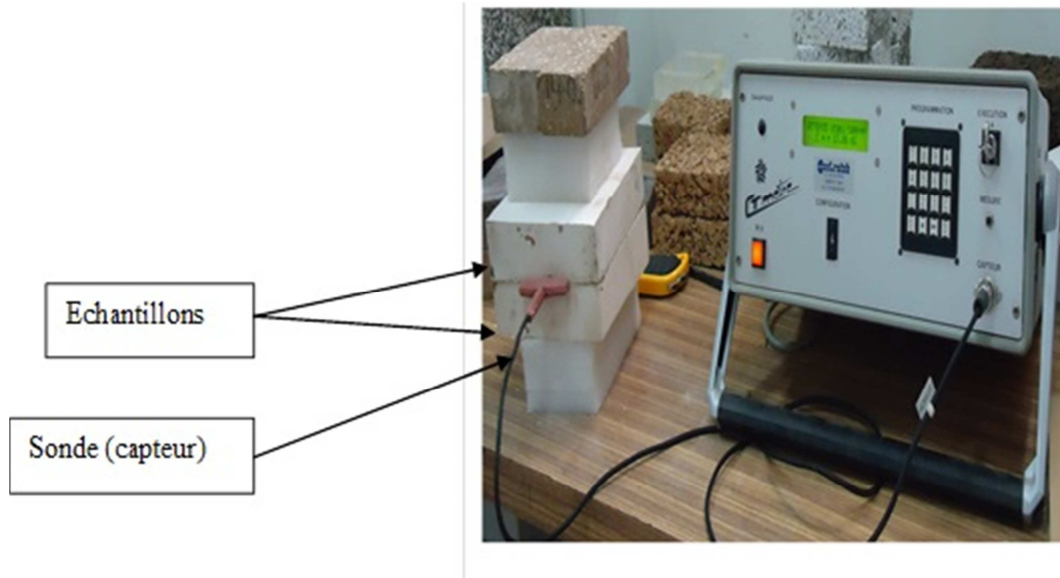
Où  $R_c$  est la résistance à la compression [MPa],  $F_c$  la charge maximale appliquée à la compression [N] et  $A$  la section [mm<sup>2</sup>].



**Figure IV.10 : Appareil de compression.**

### III.4.3. Caractérisation thermophysique

La conductivité thermique des composites est mesurée suivant la norme NF ISO 8894-1 2<sup>nd</sup> Edition 15/05/2010 utilisant le CT-mètre (voir la figure IV.11). Le CT-mètre est un appareillage développé par le CSTB Grenoble (Hébert Sallée). La précision et la reproductibilité des résultats de cet appareil sont estimées à 5% et à 2 %, respectivement. Le domaine de la température de mesure est de -20 à +90 °C pour des matériaux possédant une conductivité thermique comprise entre 0.01 jusqu' à 10 ( $\text{w.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) [5]. Trente échantillons ont été réalisés pour évaluer la conductivité thermique des composites. Les échantillons étudiés sont séchés dans une étuve à 65°C et pesés dans un intervalle de 24 heures, jusqu'à atteindre une perte inférieure à 1% pendant 24 h. Afin d'assurer un bon contact thermique entre la sonde de mesure de la conductivité thermique et le matériau réalisé, les faces des échantillons ont été rabotées.

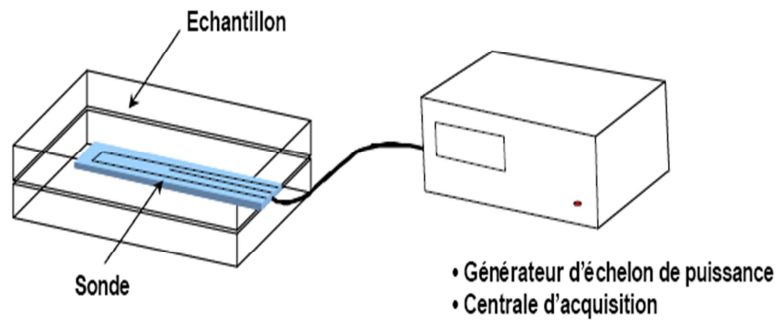


**Figure IV.11 :** Appareil CT METRE

Le principe de fonctionnement de l'appareil CT METRE consiste à mesurer l'élévation de température subie par le capteur au cours d'une période de chauffage choisie. Le capteur de température associé à l'élément chauffant formant la sonde de mesure telle qu'illustré dans la figure IV.12.

Le CT METRE se compose de deux organes:

- l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température transmise dans le matériau à tester,
- la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de mesurer l'évolution de température produite pendant ce temps.



**Figure IV.12 :** Principe de la mesure de  $k$ .

Pour nos essais, nous avons utilisé la sonde de type anneau (circuit imprimé souple d'épaisseur 0,2 mm, dimension 60 mm × 90 mm), le diamètre de l'élément chauffant = 15 mm (Type Ø 15.R). Cette sonde est insérée entre 2 échantillons de dimensions identiques. Après programmation de l'appareil, un créneau en flux délivré sous forme d'effet Joule, qui se produit en une dissipation d'énergie (caractérisée par le suivi de la température en un point donné  $T(t)$ ). A la fin du temps de chauffage, la conductivité thermique ( $k$ ), la chaleur spécifique ( $C_p$ ) et la température initiale ( $T_0$ ) sont affichées sur l'écran de l'appareil.

La diffusivité thermique ( $a$ ) est calculée à partir de l'équation suivante:

$$a = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (7)$$

Avant chaque essai par le CT METRE, les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse volumique sèche de chaque matériau composite.

## IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode de fabrication des composites à base de gypse et de renforts naturels (fibres de bois de palmier dattier), ainsi que les appareils de

mesures des propriétés de ces composites. L'étude granulométrique des différentes fibres permet d'étudier l'influence de la taille sur les propriétés mécaniques, thermiques et la densité des composites. Les tests effectués sur les échantillons à 14 et à 28 jours ont pour but d'analyser l'effet de l'eau sur les propriétés mécaniques. La méthode utilisée pour la mesure de  $k$  est une méthode fiable et simple.

Les résultats expérimentaux de la résistance à l'eau, les propriétés thermophysiques et mécaniques effectués sur les composites à base de gypse et de fibres de bois de palmier dattier seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

## Références

- [1] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [2] J P. A. Serna, J. G. Palomo, M. Gonzalez, "Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 633-641, 2012.
- [3] T. Ashour, H. Georg, W. Wu, "Performance of straw bale wall: A case of study," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 1960-1967, 2011.
- [4] N. E. 1015-11, "Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - détermination de la résistance à la flexion et à la compression du mortier durci," 2000.
- [5] CT. metre, "Guide d'utilisation," FT 131099-A.

# **Chapitre V :**

## **Résultats et Discussions**

## I. Introduction

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude expérimentale et à l'analyse des résultats obtenus des composites élaborés à base de gypse renforcé par des fibres de bois de palmier dattier. Dans cette partie, nous discutons l'influence de l'effet 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 ont été présentés et comparés à ceux existants dans la littérature pour une application d'isolation thermique.

## II. Effet de l'eau

L'influence de l'eau sur les matériaux composites à base de gypse renforcés par des fibres naturelles, est un paramètre important dans la caractérisation de ce type de composites. De même, il est clair que les constituants de ces composites sont largement influencés par l'eau. L'étude de l'effet de l'eau sur les composites est divisée en deux parties, dans la première, on s'intéressera à l'effet d'absorption de l'eau par les composites à base de gypse utilisant des fibres de bois de palmier dattier de 6 mm de diamètre (FBPD<sub>6</sub>). La deuxième partie, sera dédiée à l'étude de la teneur de l'humidité au sein des composites, en tenant compte de l'effet de la concentration et de la taille des fibres ainsi que l'âge des échantillons.

### II.1. Résistance à l'eau

Le tableau V.1 illustre les valeurs expérimentales des essais de résistance à l'eau effectués sur les composites à base de gypse chargés avec des différentes fractions massiques en bois de palmier dattier.

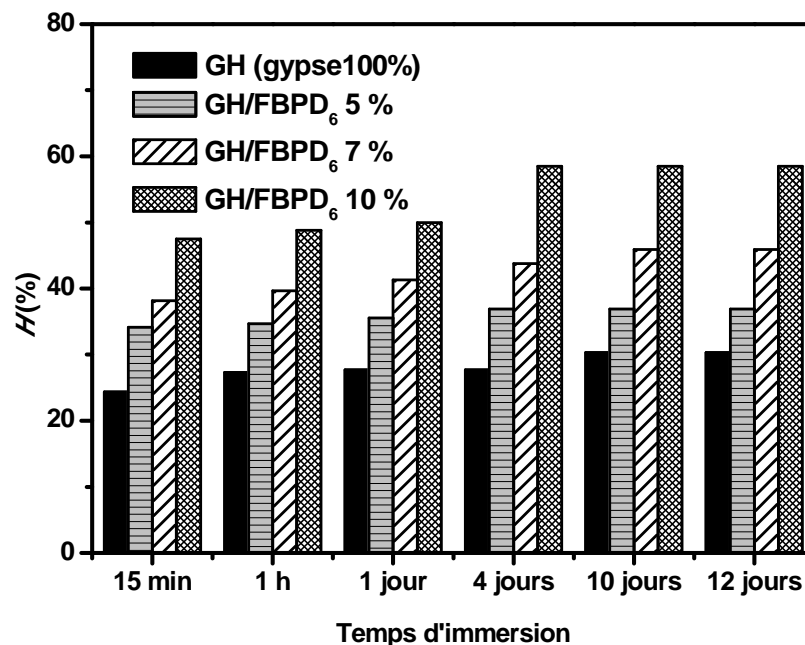
**Tableau V.1 :** Absorption de l'eau par les composites GH/ FBPD (6mm).

Temps d'immersion	0%	5%	7%	10%
15 min	24.346±1.20	34.107±1.04	38.203±2.91	47.484±1.87
1 h	27.328±3.03	34.687±0.75	39.652±0.67	48.788±2.16
1 jour	27.697±1.08	35.525±2.63	41.311±1.01	49.990±3.45
4 jours	27.697±2.04	36.912±1.81	43.813±0.69	58.479±1.33
10 jours	30.279±2.07	36.912±1.06	45.910±1.22	58.479±0.92
12 jours	30.279±0.56	36.912±0.83	45.910±0.17	58.479±0.94



La figure V.1 présente la variation de l'absorption de l'eau par les composites à base de gypse chargés en FBPD<sub>6</sub> pour une période de 0 à 12 jours. Cet essai s'est porté sur l'étude de l'influence de l'eau sur la matrice gypse renforcée avec les fibres de 6mm. Dans cette première partie la taille des fibres n'est pas prise en compte.

On remarque dans la figure V.1 que l'augmentation de la teneur en fibres des composites induit un temps de saturation plus élevé.



**Figure V.1 :** Absorption de l'eau par les composites GH/FBPD (6mm).

On note que pour tous les échantillons, l'absorption de l'eau la plus importante survient après 15 minutes d'immersion. Cela dépend du pouvoir d'absorption de l'eau des fibres naturelles. On enregistre une absorption de 80, 90, 83 et 82% pour des teneurs en fibres FBPD<sub>6</sub> respectives de 0, 5, 7, et 10%.

Par ailleurs, on note que l'évolution de la teneur en eau dans ces composites reste moins significative après une exposition à l'eau allant d'une heure (1h) jusqu'au 4<sup>ème</sup> jour. Cela se traduit par une légère augmentation de la teneur en eau dans les échantillons de 0.63, 1.4, 4 et 9%, pour les composites chargés respectivement de 0, 5, 7, et 10% en FBPD<sub>6</sub>.

On peut voir que l'équilibre a été atteint après une journée d'immersion pour le GH (100% gypse) et au bout de quatre (04) jours pour le composite comprenant 10% de FBPD<sub>6</sub>. Il est noté que, l'absorption en eau augmente avec l'augmentation de la concentration des fibres. Le caractère hydrophilique du bois de palmier dattier induit un pourcentage élevé de la teneur en eau dans les composites à base de gypse. Un résultat similaire a été rapporté par Ashour *et al.*[1] concernant l'effet d'absorption de l'eau pour des composites à base de plâtre chargé par différents types de fibres naturelles (les pailles d'orge, pailles de blé et copeaux de bois). Par ailleurs, De Roza *et al.*[2] ont évalué l'influence de l'eau sur les composites à base de polypropylène chargé par des fibres de lin naturel. Les auteurs indiquent que le temps d'immersion de ces composites dans l'eau augmente leur teneur en eau.

La vitesse d'absorption de l'eau augmente rapidement durant les premiers contacts avec l'eau. Néanmoins, après une heure d'exposition à l'eau, cette vitesse diminue jusqu'à atteindre le point d'équilibre. Le temps de saturation des composites est directement lié au temps de remplissage des vides existant dans les fibres de bois de palmier dattier et du gypse. Ce comportement est aussi observé pour la plupart des composites renforcés par des fibres naturelles [1].

L'augmentation de la teneur d'eau a été aussi remarquée dans les matrices polymères renforcés par les fibres naturelles. Akil *et al.*[3] ont étudié la durabilité des fibres de kénaf (jute) incorporés dans une matrice époxy. Ils concluent que l'exposition de ces composites à l'eau augmente la teneur en eau et l'humidité en reliant cet effet à l'absorption de l'eau par la fibre et la matrice.

## II.2. Influence de l'humidité

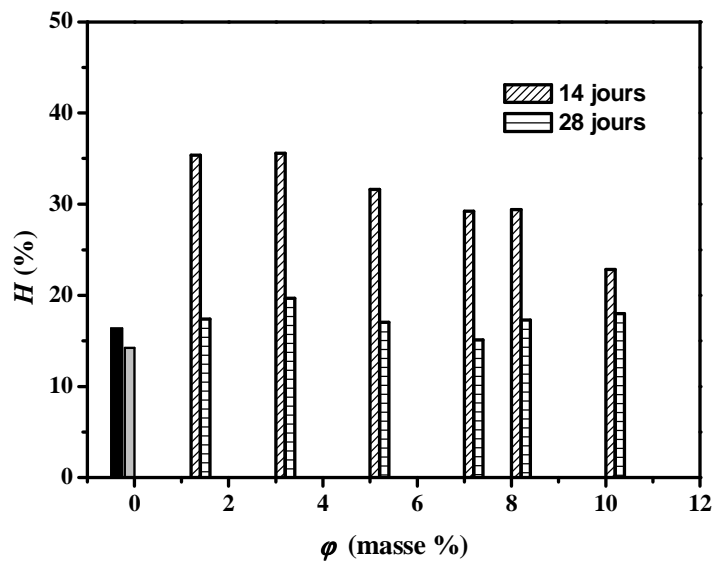
Afin de bien comprendre l'effet de l'eau sur les composites, nous avons réparti les échantillons selon les concentrations en fibres, les tailles et l'âge des échantillons (14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jours).

Les valeurs des taux d'humidité dans ces composites sont regroupées dans le tableau V.2. Les valeurs citées dans ces deux tableaux représentent la moyenne d'essai sur trois échantillons par fraction massique.

**Tableau V.2 :** Taux d'humidité dans les composites GH/FBPD à différentes concentrations aux 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jours.

$\varphi\%$	GH/FBPD <sub>3</sub> 14 <sup>ème</sup> jour	GH/FBPD <sub>3</sub> 28 <sup>ème</sup> jour	GH/FBPD <sub>6</sub> 14 <sup>ème</sup> jour	GH/FBPD <sub>6</sub> 28 <sup>ème</sup> jour
0	16.410±1.88	14.230±1.23	--	--
1.2	35.376±0.75	17.416±1.06	33.459±2.33	17.014±2.63
3	35.561±0.33	19.693±2.46	45.454±3.01	34.471±1.25
5	31.624±0.51	17.044±0.55	26.819±1.56	14.559±1.75
7	29.221±0.32	15.104±1.76	22.446±2.12	14.253±1.22
8	29.428±1.11	17.303±0.92	34.948±1.96	16.423±0.98
10	22.812±0.77	17.991±1.22	28.620±2.02	21.052±1.20

Les figures V.2a, b, c, d présentent les résultats de mesures expérimentales de l'humidité existante dans les différents échantillons composites.

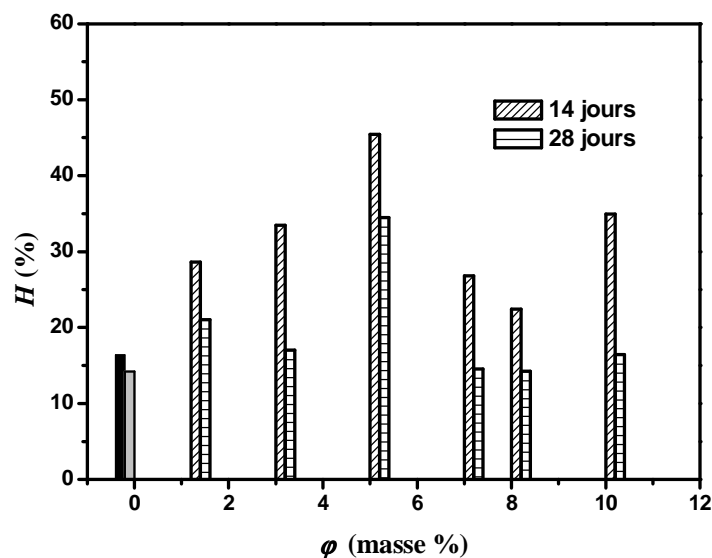


**Figure V.2a :** Taux d'humidité dans les composites GH/FBPD<sub>3</sub> à différentes concentrations aux 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jours.

La figure V.2a, illustre les résultats obtenus relatif au taux d'humidité dans les composites à base de gypse comprenant des fibres de bois de palmier dattier de 3mm. Ces résultats ont été comparés à ceux du gypse pur (GH 100%). De même, ce résultat confirme que l'ajout de

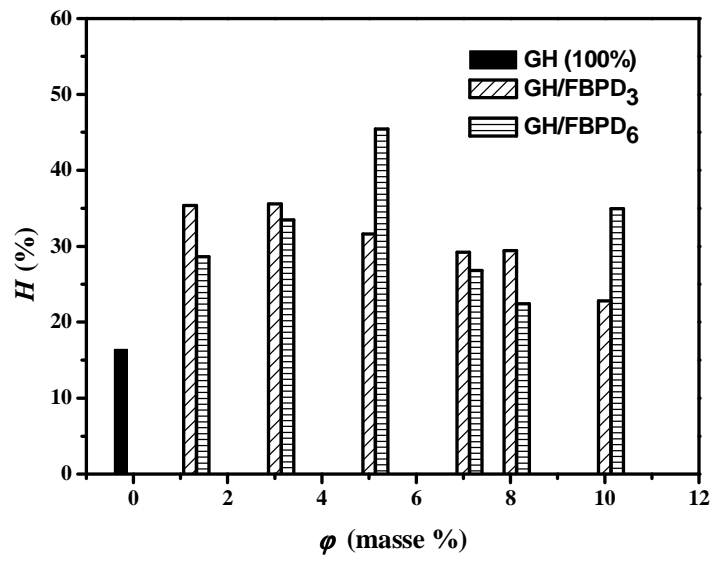
fibres naturelles induit un taux d'humidité élevé. Cela est en relation directe avec le pouvoir hydrophélique des fibres qui absorbent une grande quantité d'eau, et aussi au gypse qui contient des vides qui seront remplis d'eau. Cependant, le taux d'humidité des composites ne vari pas beaucoup entre les concentrations de 1.2 à 10% de FBPD, ce qui montre que le gypse contient moins de vide en introduisant ces fibres.

On note aussi, qu'après 28 jours de séchage naturel, l'humidité des composites diminue, à cause de l'évaporation de l'eau.

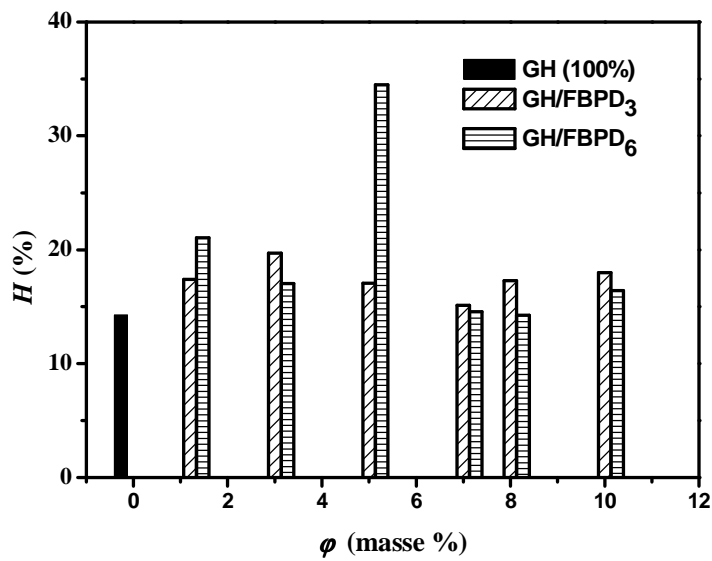


**Figure V.2b :** Taux d'humidité dans les composites  $GH/FBPD_6$  à différentes concentrations aux 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jours.

La figure V.2b, montre les résultats obtenus relatif au taux d'humidité des composites  $GH/FBPD_6$ . Cette fois aussi, les résultats ont été comparés à ceux du gypse pur (GH 100%). Même remarque que pour le cas des composites  $GH/FBPD_3$ , l'humidité des composites chargés par des fibres de 6mm de diamètre augmente en utilisant les fibres naturelles. Le temps de séchage influe directement sur l'humidité du gypse.



**Figure V.2c :** Comparaison de taux d'humidité dans les composites GH/FBPD<sub>3</sub> et GH/FBPD<sub>6</sub> au 14<sup>ème</sup> jour.



**Figure V.2d :** Comparaison de taux d'humidité dans les composites GH/FBPD<sub>3</sub> et GH/FBPD<sub>6</sub> au 28<sup>ème</sup> jour.

Les figures V.2c et V.2d présentent respectivement, l'évolution de la teneur de l'humidité des composites à base de gypse chargés avec des fibres de FBPD<sub>3</sub> et FBPD<sub>6</sub> aux 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jours.

On remarque qu'au 14<sup>ème</sup> jour l'ajout de 1.2% de fibres dans le gypse induit une augmentation de la teneur en eau de 12% pour les composites GH/ FBPD<sub>6</sub>, et de 19% pour les composites GH/ FBPD<sub>3</sub>. Au 28<sup>ème</sup> jour, avec la même concentration en fibres (1.2%), les teneurs d'eau baissent à 3% pour les composites chargés avec des fibres de FBPD<sub>3</sub> et 7% pour ceux renforcés avec des fibres de FBPD<sub>6</sub>.

Pour la concentration de 10% de FBPD, les composites à base de gypse chargés avec des fibres de FBPD<sub>3</sub> subissent une perte d'eau de 6% par rapport aux composites chargés avec une concentration de 1.2% au 28<sup>ème</sup> jour, alors qu'on observe une perte d'eau de 5% pour les composites chargés avec les fibres de FBPD<sub>6</sub>. On constate que la perte de l'eau dans les composites est similaire pour les deux tailles de fibres. Cela est peut être lié à l'évaporation de l'eau des composites.

Les résultats obtenus dans notre étude indiquent que l'incorporation de faible quantité de FBPD dans le gypse augmente la teneur en eau du composite. Ce comportement a été également observé par T. Ashour et al [4]. Ces derniers ont étudié l'effet de l'absorption de l'eau et de l'humidité relative à l'intérieur des murs en plâtre renforcé par des fibres naturelles (l'orge, le blé et les copeaux de bois). Ils ont indiqué que l'incorporation de ces fibres dans le plâtre augmentent automatiquement la teneur de l'eau et le taux d'humidité dans le composite en expliquant que cela est lié au pouvoir d'absorption d'eau des fibres naturelles.

Il est important de préciser que la teneur en eau dans les composites diminue avec l'augmentation de l'âge des échantillons. La teneur en eau dépend essentiellement de la capacité des fibres à absorber l'eau. Cette observation a été rapportée par Panesar *et al.* [5] pour des composites à base de ciment et de liège.

Pour notre cas, les mesures effectuées au 28<sup>ème</sup> jour montrent que les composites à base de gypse renforcés par des fibres de FBPD<sub>3</sub> contiennent une quantité d'eau supérieure à celle des composites chargés avec les fibres de FBPD<sub>6</sub>. Ce comportement est peut-être dû à la procédure de mise en œuvre de ces composites. En effet, les petites fibres ont une forte tendance à absorber une grande quantité d'eau par rapport à leur faible dimension. De plus, les fibres de FBPD<sub>6</sub> n'ont pas assez de temps pour absorber l'eau jusqu'à saturation, alors

que, les FBPD<sub>3</sub> retiennent une grande quantité d'eau dans un petit intervalle de temps. Ce comportement ne peut pas être généralisé, car d'autres recherches [6], affirment que la teneur en eau augmente avec l'augmentation de la taille des fibres. Selon les auteurs de [6], l'utilisation de fibres larges augmentent le taux des vides dans le composite, favorisant l'augmentation de la retenue d'eau dans les cavités.

D'après notre étude, nous pouvons conclure que la teneur en eau dépend de deux principaux paramètres: la surface spécifique des fibres et le temps d'exposition à l'eau. On remarque aussi que les teneurs en eau des échantillons baissent au 28<sup>ème</sup> jour, indiquant donc que la teneur en eau varie en fonction de l'âge des composites.

### III. Propriétés Mécaniques

L'ajout de fibres naturelles dans le gypse entraîne des modifications importantes sur les comportements mécaniques, la résistance à la flexion et à la compression. Dans ce travail, deux paramètres sont étudiés, à savoir: la concentration et la taille des fibres.

La résistance à la compression et à la flexion des composites à base de gypse chargés par les fibres FBPD<sub>3</sub> et FBPD<sub>6</sub> aux différents âges (avec séchage naturel) sont présentées dans les figure V.3 et V.4, respectivement.

#### III.1. Résistance à la compression

Le tableau V.3, présente les valeurs expérimentales d'essais de résistance à la compression avec incertitudes des composites à base de gypse et de fibres de bois de palmiers dattiers.

**Tableau V.3 :** Résistance à la compression des composites GH/FBPD au 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jour.

φ%	3mm, 14	3mm, 28	6mm, 14	6mm, 28
0	6.690±1.56	8.500±0.44		
1.2	2.768±1.22	6.325±1.41	3.662±1.20	8.2±01.58
3	3.731±0.79	6.731±0.92	5.306±0.54	6.162±2.02
5	3.325±0.52	7.325±1.01	2.706±0.71	4.906±0.33
7	3.284±0.66	6.912±0.56	2.168±0.35	4.431±0.15
8	3.162±0.62	6.593±0.78	2.318±0.18	4.943±0.13
10	3.006±0.33	5.400±0.32	1.218±0.20	3.000±0.21

La figure V.3a présente la variation de la résistance à la compression des composites à base de plâtre chargés par les fibres FBPD<sub>3</sub> au 14<sup>ème</sup> jour. Ces résultats montrent que la résistance à la compression diminue en fonction de la concentration des charges. Il a été constaté que la résistance à la compression des composites au 28<sup>ème</sup> jour est supérieure à celle du 14<sup>ème</sup> jour.

La variation de la résistance à la compression des composites en fonction de la concentration des fibres FBPD<sub>6</sub> est illustrée dans la figure V.3b. Un comportement similaire de la résistance à la compression que celui discuté sur les composites chargés avec les fibres FBPD<sub>3</sub> est observé.

Les figures V.3c et V.3d présentent la résistance à la compression des composites à base de gypse comportant deux différentes tailles de FBPD au 14<sup>ème</sup> et au 28<sup>ème</sup> jour. En comparaison avec l'échantillon de gypse pur (100% gypse), les composites chargés avec 1.2% de FBPD<sub>3</sub> présentent une diminution de la résistance à la compression de 58% au 14<sup>ème</sup> jour alors que cela représente 45% pour le cas des FBPD<sub>6</sub>. Au 28<sup>ème</sup> jour, la valeur de la résistance à la compression des composites GH/FBPD<sub>3</sub> avec une concentration en fibre de 1.2% diminue de 15%, et diminue de 4% pour les composites GH/FBPD<sub>6</sub> aux mêmes conditions de test (concentration et âge).

On remarque que la diminution de la résistance à la compression des composites est moins significative au 28<sup>ème</sup> jour. Ce comportement est principalement lié à la baisse du taux d'hydratation dans les composites. Cet effet a également été observé dans la littérature [5] pour les propriétés mécaniques des mortiers à base de ciment renforcés par des fibres de lièges au 14<sup>ème</sup> et au 28<sup>ème</sup> jours.

Il a été constaté que pour des concentrations de fibres inférieures à 5%, la résistance à la compression des composites HG/FBPD<sub>3</sub> est supérieure à celle des HG/FBPD<sub>6</sub>. Ce résultat est dû d'une part à la faible densité des fibres de bois de palmiers dattier, et d'autre part à la surface spécifique des fibres large (FBPD<sub>6</sub>). Les fibres larges engendrent plus de vide entre les interfaces fibres/fibres et fibres/gypse, cela influence directement la résistance à la compression [7].

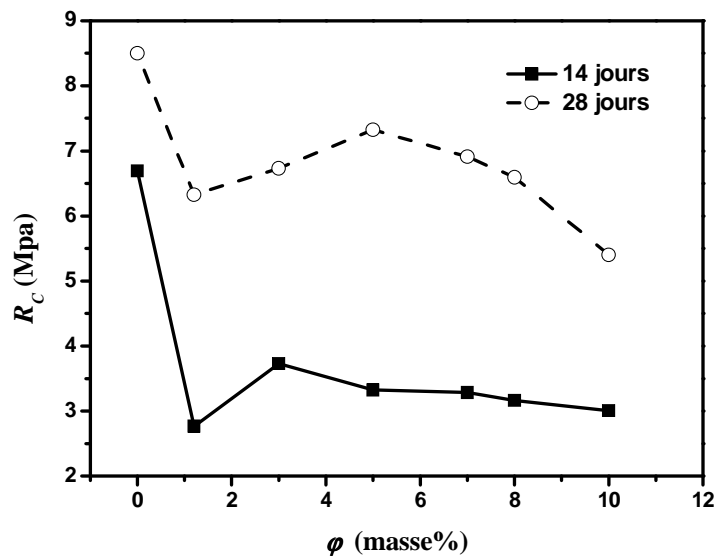
Ce comportement a été également indiqué par les auteurs de [8,9] utilisant respectivement des fibres de liège et des fibres de tige de coton comme renforcement dans le gypse. Ces études ont montré que lorsque la concentration en fibres augmente, la zone interface entre la fibre et



la matrice augmente. Cela induit une fragilisation à l'intérieure de la matrice, et diminue par conséquent la résistance à la compression. Ces résultats issus de la littérature sont en accord avec nos résultats pour le cas de la résistance à la compression de gypse chargé par des fibres de bois de palmier dattier.

Selon Hernandez-Olivares *et al.*[8], l'incorporation de 20% (en masse) de liège dans la matrice de gypse conduit à une résistance à la compression de 2.34MPa. En revanche, dans notre cas, nous avons atteint une valeur de 7,32MPa avec 5% de FBPD<sub>3</sub> et 8,2Mpa avec 1,2% de FBPD<sub>6</sub>. Cette comparaison indique que la résistance à la compression des composites à base de gypse chargés par FBPD est supérieure à celle du gypse renforcé par des fibres de liège. Cela permet de dire que les fibres de palmier dattier sont compatibles avec la matrice de gypse.

Notre étude indique que la résistance à la compression des deux séries de biocomposites diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres. Cette diminution est observée pour la plus part des composites chargés en fibres naturelles. Cependant en comparant nos résultats à ceux d'autres recherche de la littérature, on peut dire que notre composite présente une bonne résistance à la compression (voir le tableau V.1).



**Figure V.3a:** Résistance à la compression des composites GH/FBPD<sub>3</sub> au 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jour.

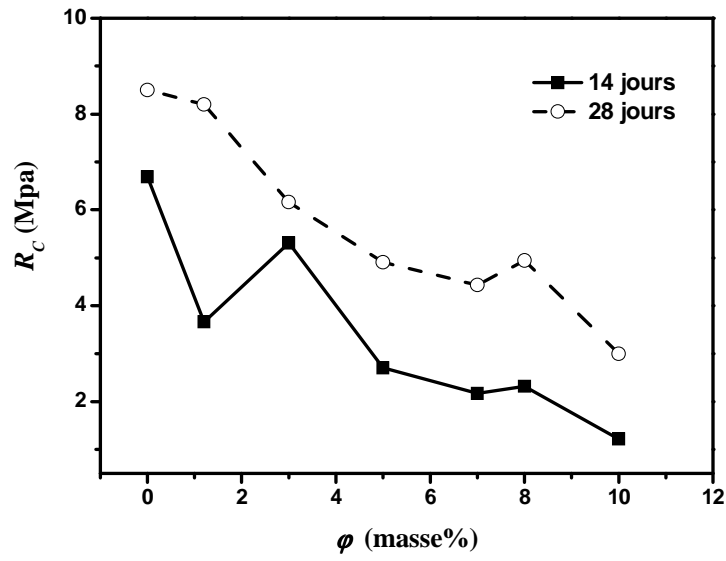


Figure V.3b: Résistance à la compression des composites GH/FBPD<sub>6</sub> au 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jour

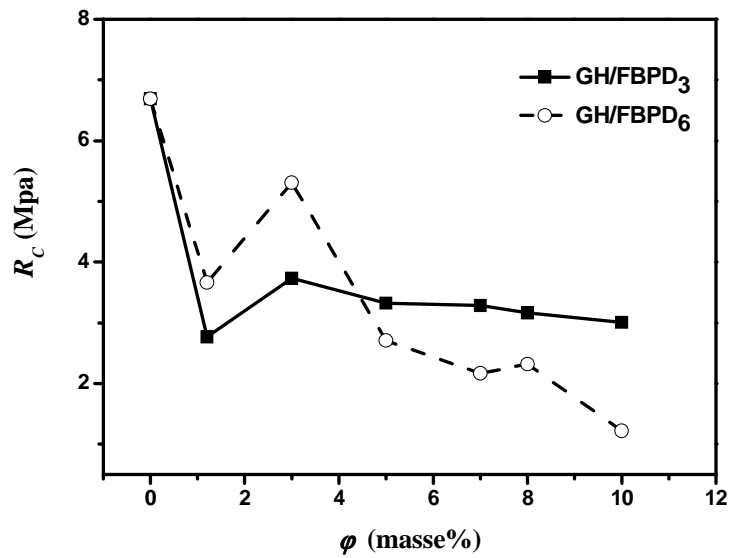
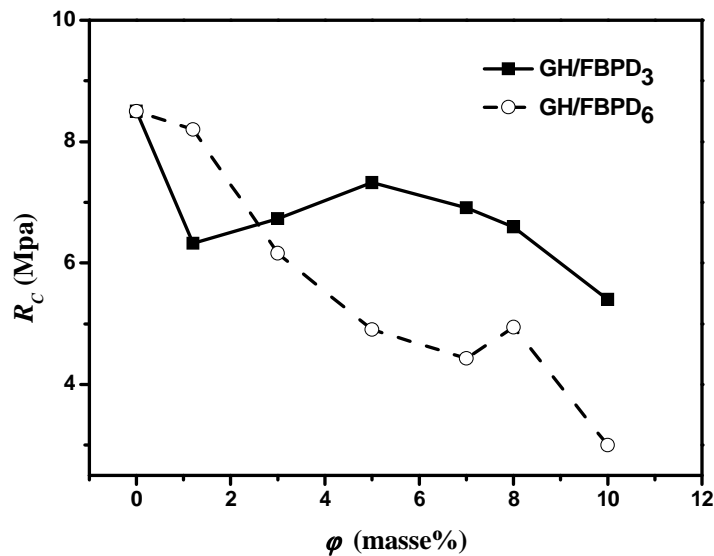


Figure V.3c: Résistance à la compression des composites GH/FBPD au 14<sup>ème</sup> jour



**Figure V.3d:** Résistance à la compression des composites GH/FBPD au 28<sup>ème</sup> jour.

### III.2. Résistance à la flexion

Le tableau V.4, présente les valeurs expérimentales d'essais de résistance à la flexion avec incertitudes des composites à base de gypse et de fibres de bois de palmiers dattiers.

**Tableau V.4:** Résistance à la flexion des composites GH/FBPD au 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jour.

$\phi$ %	GH/FBPD <sub>3</sub> 14 <sup>ème</sup> jour	GH/FBPD <sub>3</sub> 28 <sup>ème</sup> jour	GH/FBPD <sub>6</sub> 14 <sup>ème</sup> jour	GH/FBPD <sub>6</sub> 28 <sup>ème</sup> jour
0	2.574±0.33	4.500±1.88	--	--
1.2	1.404±0.27	3.018±1.02	1.755±1.12	2.901±2.03
3	1.638±0.06	3.650±0.56	1.638±0.61	2.808±1.25
5	1.614±0.83	2.925±0.28	1.287±0.15	2.246±0.38
7	1.638±0.23	2.885±0.31	1.170±0.06	2.340±0.62
8	1.872±0.95	2.8314±0.86	1.965±0.41	1.989±0.19
10	1.614±0.57	2.808±0.19	1.053±0.21	1.965±0.89

La figure V.4a présente la variation de la résistance à la flexion des composites GH/FBPD<sub>3</sub> au 14<sup>ème</sup> jour. Ces résultats montrent que la résistance à la flexion diminue en fonction de la concentration des charges. Cette figure (V.4a) illustre aussi que, la résistance à la flexion des composites au 28<sup>ème</sup> jour est deux fois supérieure à celle du 14<sup>ème</sup> jour.

La variation de la résistance à la flexion des échantillons de composites en fonction de la concentration des fibres FBPD<sub>6</sub> est illustrée dans la figure V.4b. La résistance à la flexion du gypse diminue avec l'augmentation des fibres FBPD<sub>6</sub>. Ce comportement est similaire à celui des composites chargés avec les fibres FBPD<sub>3</sub>. Les résultats de la résistance à la flexion du gypse renforcé par les deux tailles des fibres (FBPD<sub>3</sub> et FBPD<sub>6</sub>) sont similaires à ceux du travail de [7]. Ces derniers, ont montré que l'incorporation des fibres de Polyamide dans le plâtre réduit sa résistance à la flexion.

La résistance à la flexion des composites à base de gypse renforcés par deux tailles différentes de FBPD aux 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jours est présenté dans les figures V.4c et V.4d.

La résistance à la flexion du matériau gypse diminue de 45% au 14<sup>ème</sup> jour en ajoutant une concentration de 1.2% de FBPD<sub>3</sub>. Pour la même concentration des fibres FBPD<sub>6</sub>, la résistance à la flexion du gypse diminue de 31% au même jour d'essai. Les tests effectués au 28<sup>ème</sup> jour sur la même concentration en fibres, induisent une diminution de la résistance à la flexion de l'ordre de 33% pour les composites GH/FBPD<sub>3</sub> et de l'ordre de 26% pour les composites GH/FBPD<sub>6</sub>.

Pour des concentrations de fibre supérieures à 2%, les composites HG/FBPD<sub>3</sub> présentent une résistance à la flexion plus élevée que celle des composites HG/FBPD<sub>6</sub>. L'incorporation de 10% de fibres dans le gypse induit une diminution de 32% pour les composites renforcés par FBPD<sub>6</sub>, et une baisse de 10% utilisant les FBPD<sub>3</sub>. Ce comportement est dû à la perte d'eau qui a entraîné un retrait considérable de la matrice, réduisant ainsi la force de liaison entre les fibres et la matrice. Lorsque la force de liaison entre les fibres et la matrice diminue, la résistance à la flexion des composites est faible. Ce résultat est en accord avec le travail de Li *et al.* [10] relative à l'étude expérimentale des propriétés mécaniques des bétons de chanvre. Les auteurs montrent que l'ajout des fibres de chanvre dans les bétons à base de ciment réduit la résistance à la flexion de ces composites.

Les auteurs de [9] ont utilisé une matrice de gypse chargée par des fibres de tige de coton et de scories avec un rapport de fractions massiques de 2/3/5 relatif aux matériaux gypse/scories/tige de coton. Ils ont indiqué une valeur maximale de 5.60Mpa de la résistance à la flexion. Dans notre cas, nous arrivons à une valeur maximale de 3.65Mpa en utilisant 3% de FBPD<sub>3</sub>. Cette valeur est inférieure à celle obtenue pour le plâtre chargé de fibres de tige de

coton. Cependant, les composites développés par les auteurs de [9] contiennent un ajout de 3% de scories qui peuvent améliorer la résistance à la flexion. Donc, nous pouvons confirmer que l'incorporation de FBPD dans les matrices gypse a montré une bonne performance de la résistance à la flexion.

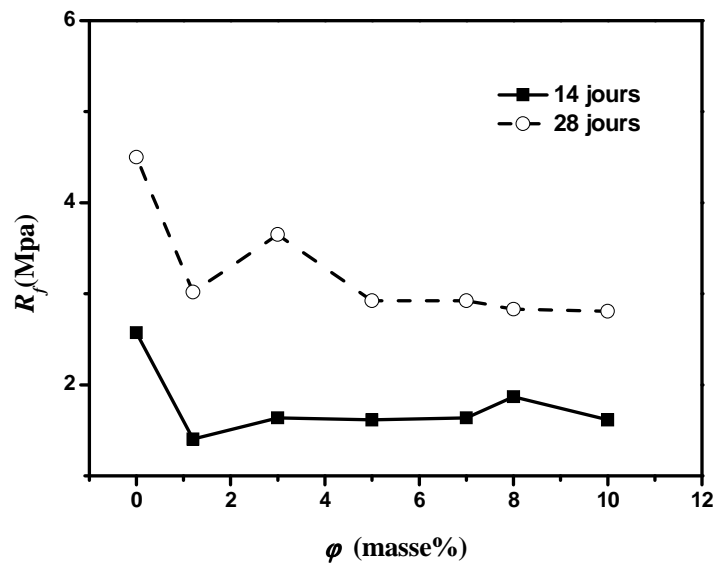


Figure V.4a: Résistance à la flexion des composites GH/FBPD<sub>3</sub> au 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jour.

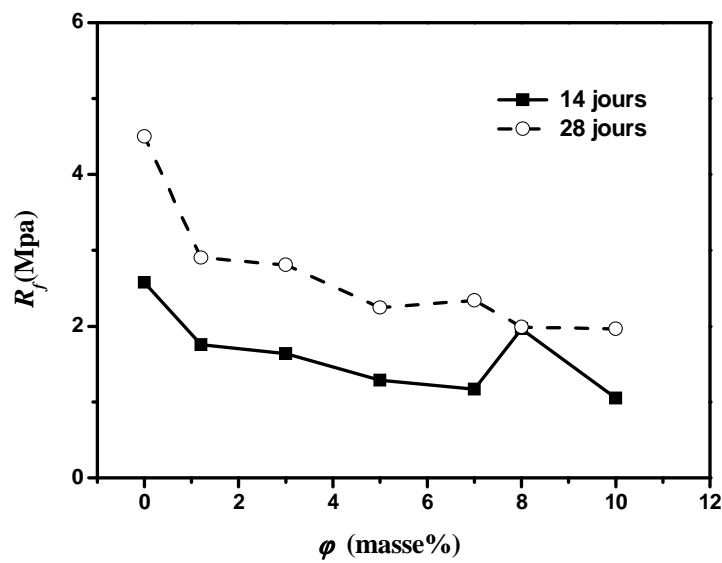


Figure V.4b: Résistance à la flexion des composites GH/FBPD<sub>6</sub> au 14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jour.

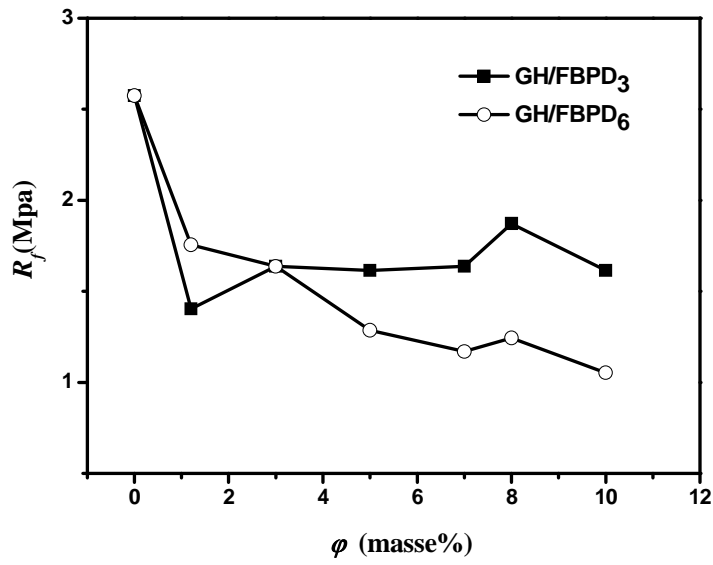


Figure V.4c: Résistance à la flexion des composites GH/FBPD au 14<sup>ème</sup> jour.

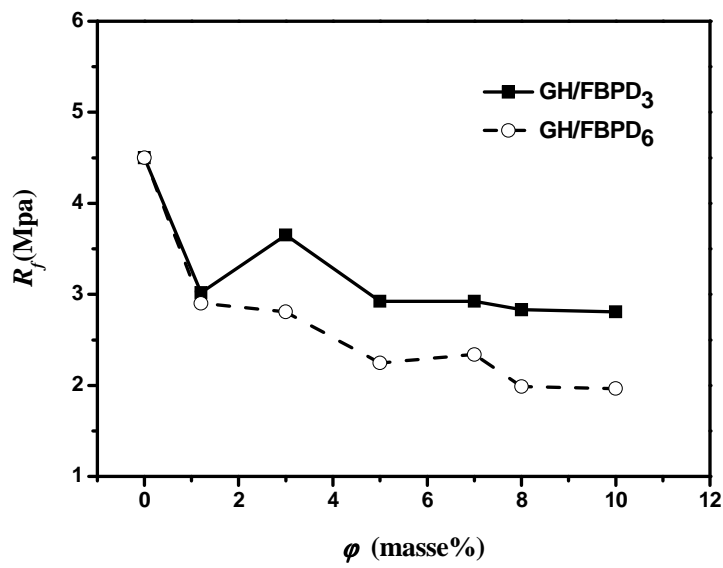


Figure V.4d: Résistance à la flexion des composites GH/FBPD au 28<sup>ème</sup> jour.

Il est à retenir des essais mécaniques effectués dans cette étude que la résistance à la flexion et à la compression du gypse dépend fortement de la concentration des fibres. Il a été constaté que les valeurs de la résistance à la flexion et à la compression des composites chargés avec des petites fibres sont plus élevées que celles des composites renforcés par des fibres larges et pour des concentrations supérieures à 2%. Ces conclusions sont en accord avec les travaux de Parres *et al.* [7], qui ont évalué l'effet de l'ajout des fibres de Polyamide 6 et du Polyamide 6.6 à deux tailles différentes sur les matériaux à base de plâtre. Ils indiquent que l'ajout de 4% de fibre de Polyamide induit une perte de résistance à la compression de 12% et une perte de 50% de la résistance à la flexion. Les auteurs de [7] notent aussi que, pour des concentrations supérieures à 2%, la résistance à la flexion et à la compression des composites incorporés par des petites fibres est plus élevée que celles des composites chargés par des fibres larges. Selon ces auteurs [7] cet effet dépend du vide produit par les fibres larges, qui influe directement sur les propriétés mécaniques des composites.

Donc, on peut conclure que, l'incorporation des fibres dans le gypse induit une variation dans le comportement de rupture du gypse. Une fois que la valeur max de flexion est atteinte, elle augmente jusqu'à ce que les fibres commencent à se contacter avec la matrice, d'où la diminution des caractéristiques mécaniques. Cependant, le grand avantage de l'ajout des fibres dans la matrice de gypse est d'éviter la rupture fragile des échantillons.

### III.3. Comparaison avec les résultats mécaniques des composites à base de gypse

Le tableau V.5 présente une comparaison des valeurs expérimentales des résistances à la compression et à la flexion des composites à base de gypse. On remarque que le composite à base de gypse renforcé par des fibres de palmier dattier présente une résistance à la compression assez élevée que celle des matériaux présentés dans le tableau V.5. Concernant la résistance à la flexion, notre composite présente de bonnes valeurs par rapport aux autres composites (voir tableau V.5). On peut conclure que, les résistances mécaniques des composites GH/FBPD leur permettent d'être appliqués comme matériau de construction.

**Tableau V.5 :** Valeurs de la résistance à la compression et à la flexion de composites à base de gypse.

Matériaux composites	R <sub>c</sub> (Mpa)	R <sub>f</sub> (Mpa)	Réf
Gypse/FBPD 3%	7.32 (5%)	3.65 (3%)	Ce travail
Gypse/scories/coton 5/3/2 (masse%)	--	5.60	[9]
Gypse/liège 20% (masse%)	2.34	2.28	[8]
Plâtre/Polyamide 6 4% (masse%)	5	2.5	[7]
Plâtre allégé	1.7	--	[11]
Plâtre sandwich (nid d'abeilles)	2.93	--	[11]

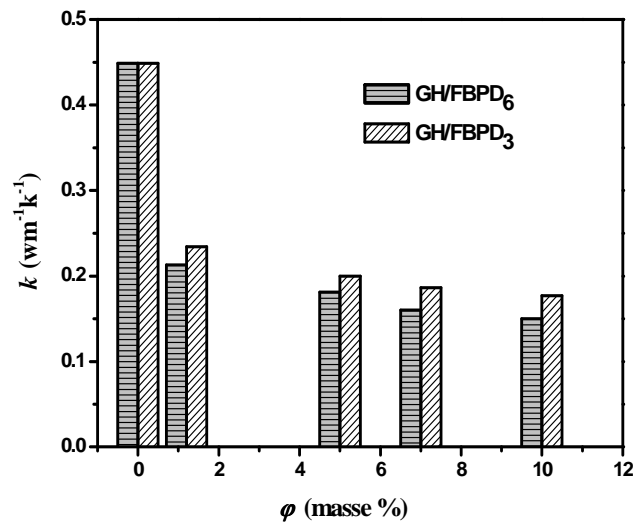
## IV. Propriétés thermophysiques

### IV.1. Conductivité thermique

L'évolution de la conductivité thermique des composites (GH/FBPD<sub>3</sub>) et (GH/FBPD<sub>6</sub>) en fonction de la concentration des fibres est présentée en figure V.5. On remarque que l'ajout de FBPD dans la matrice de gypse réduit la valeur de la conductivité thermique effective du composite. Pour une concentration de 10% de FBPD, la conductivité thermique du gypse diminue de  $0.45 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  à  $0.18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  pour le composite GH/FBPD<sub>3</sub> soit une atténuation de 62%. Pour le composite GH/FBPD<sub>6</sub>, elle diminue à  $0.15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  soit une diminution de 66%. Cette différence est liée principalement au caractère isolant des fibres de BPD, qui présentent une conductivité thermique de l'ordre de  $0.08\text{-}0.09 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  [12]. La conductivité thermique du matériau composite, dépend de celles des renforts qui le constituent. Plus la conductivité thermique des inclusions est faible, plus le matériau est isolant. Cette évolution est similaire à celles obtenues par les travaux de Ashour *et al.* [1] pour des composites à base de plâtre chargés par des pailles d'orge, pailles de blé et copeaux de bois, et d'autres études [14] concernant le ciment chargé par des granulats de liège. Selon les auteurs de [1,14], la conductivité thermique effective de ces matériaux diminue en ajoutant des fibres naturelles. Néanmoins, le vide, contribue à la diminution de la conductivité thermique du composite. Les résultats obtenus montrent aussi que l'effet de la taille des fibres sur la conductivité thermique



du gypse est négligeable. Un comportement similaire est rapporté par les auteurs de [5] qui ont étudié l'impact de la taille des particules de liège sur la conductivité thermique du béton à base de ciment. Leurs résultats montrent que l'effet de la taille des particules de liège sur la conductivité thermique du béton est négligeable.



**Figure V.5 :** Conductivité thermique des composites GH/FBPD.

**Tableau V.6 :** Propriétés physiques et thermiques des matériaux composites.

Concentration de fibres (%)	Matériaux composite			
	GH/FBPD <sub>3</sub>		GH/FBPD <sub>6</sub>	
	$k$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\rho$ (Kg.m <sup>-3</sup> )	$k$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	P (Kg.m <sup>-3</sup> )
GH	0.45±0.03	1130±25	0.45±0.03	1130±25
1.2	0.23±0.05	923 ±19	0.21±0.01	993±21
5	0.20±0.01	887±33	0.18±0.02	890±30
7	0.19±0.02	760±35	0.16±0.01	800±24
10	0.18±0.01	743±20	0.15±0.01	753±28

#### IV.2. Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique

Le tableau V.6 présente les valeurs expérimentales de la masse volumique et de la conductivité thermique des composites à base de gypse et de FBPD. La masse volumique sèche du composite, en fonction de la teneur en FBPD, est donnée par la figure V.6. Pour une

concentration de 10% en FBPD, la masse volumique diminue de  $1130 \text{ kg/m}^3$  pour la pâte de gypse à  $743 \text{ kg/m}^3$  et  $753 \text{ kg/m}^3$  relatif aux composites GH/FBPD<sub>3</sub> et GH/FBPD<sub>6</sub>. Ce qui correspond à un allègement de l'ordre de 25%. Ce résultat est en accord avec ceux présentés dans d'autres études [1, 5]. Ces derniers ont indiqué que l'augmentation du pourcentage des fibres naturels dans la matrice minérale diminue la masse volumique des composites. Cette diminution est reliée d'une part à la faible masse volumique des inclusions et d'autre part, au vide présent dans la matrice engendré par la perte d'eau des fibres. L'ajout de 10% de FBPD diminue la masse volumique du gypse d'environ 25%. Donc cela peut être considéré comme un avantage pour remplacer les panneaux de plâtre.

Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que la taille des charges n'a pas d'influence sur la densité sèche des composites pour des concentrations en fibres inférieures à 10%. Un comportement similaire est rapporté par les auteurs de [15] montrant que les propriétés physiques des composites à base de ciment renforcés par des fibres de sisal et d'eucalyptus est fortement influencé par la teneur des fibres.

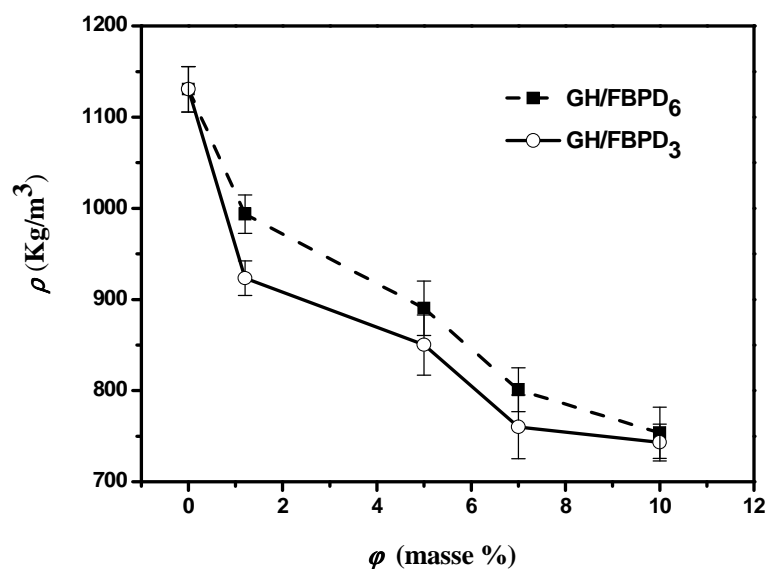
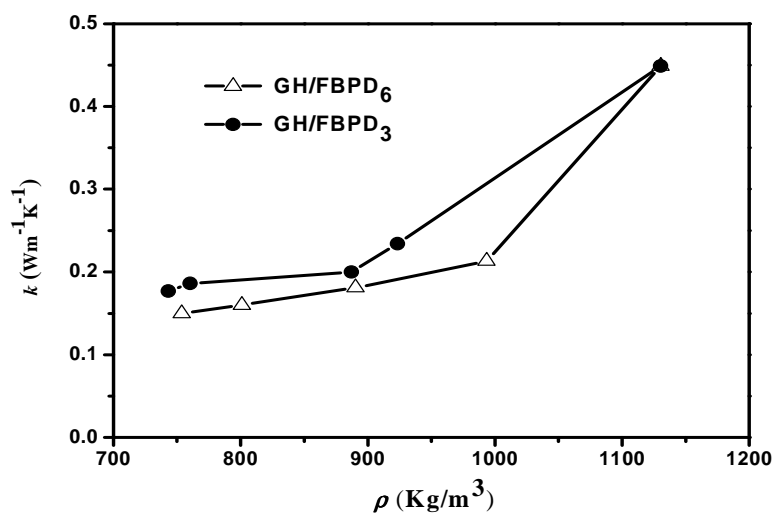


Figure V.6 : Masse volumique sèche de composites à base de gypse.

La relation entre la conductivité thermique et la masse volumique sèche correspondante des composites GH/FBPD est illustrée par la figure V.7. On note que la conductivité thermique augmente en fonction de la masse volumique. Cela montre l'existence d'une relation directe entre la masse volumique et la conductivité thermique des composites. L'augmentation de vides diminue la masse volumique des composites, impliquant une grande résistance thermique et une faible conductivité thermique. Par ailleurs, nos résultats indiquent que l'effet de la concentration des FBPD sur la conductivité thermique et la masse volumique des composites est plus significative que l'effet de la taille des FBPD. Ceci est en accord avec l'étude de [5], où les auteurs signalent que l'influence de la concentration des particules de liège est plus significative sur la conductivité thermique et la masse volumique du béton que l'effet de la taille des particules de liège.



**Figure V.7 :** Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche.

Si on compare nos résultats de  $k$  et  $\rho$  obtenus dans cette thèse à ceux de Li *et al.*[9] qui ont développé un composite à faibles conductivité thermique et densité pour isolation thermique, à base de la matrice gypse incorporée par des fibres de tige de coton, nous pouvons conclure

que les valeurs moyennes de  $k$  et  $\rho$  des composites étudiés dans ce travail sont similaires aux matériaux de construction utilisés dans l'isolation thermique des bâtiments.

#### IV.3. Comparaison avec des composites naturels utilisés pour l'isolation thermique

Le tableau V.7 présente une comparaison des résultats obtenus pour  $k$  et  $\rho$  dans cette étude avec les résultats d'autres recherches concernant les composites chargés en fibres naturelles pour des applications d'isolation thermique dans le bâtiment.

**Table V.7 :** Comparaison de  $k$  et  $\rho$  des composites naturels.

matériaux	$k$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\rho$ [Kg.m <sup>-3</sup> ]	Références
GH/FBPD (10%)	0.15-0.17	753	Cette étude
Gypse pur	0.44	1130	Cette étude
Gypse/liège (20%)	0.12-0.19	578-864	[9]
Béton/liège (10%)	0.96	2100	[5]
Composites de gypse (5% perlite)	0.12	547	[16]
Cément/ chanvre (40%)	0.11	1040	[14]
Plâtre/blé (25%)	0.33	1699	[1]
Plâtre/orge (25%)	0.29	1617	[1]
Plâtre/coupeaux de bois (25%)	0.28	1605	[1]
Béton/durian (30%)	0.18	950	[15]
Béton/noix de coco (30%)	0.17	770	[15]

D'après le tableau V.7, la comparaison entre le composite développé dans cette thèse et les composites de même base à savoir le gypse (ou le plâtre), on distingue que le composite GH/FBPD possède des valeurs de  $k$  et  $\rho$  inférieures à celles des renforts en blé, orge et coupeaux de bois. Néanmoins, elles sont supérieures à celles des charges en liège et en perlite. Cet écart revient principalement au pouvoir isolant des fibres de liège, et des particules de perlite comparé avec celui des fibres de bois de palmier dattier.

D'autre part, du point de vue renfort, on constate que l'utilisation des fibres du bois de palmier dattier produisent des valeurs de  $k$  et  $\rho$  inférieures (voir similaires) à celles des fibres de durian, noix de coco, ou bien supérieures à celles du chanvre (pour des composites à base de ciment). Cependant, il faut préciser que, du point de vue concentration, la valeur maximale

de la concentration des fibres utilisée dans notre composite (10% de fibres) est la plus faible concentration comparée aux autres teneurs des fibres ajoutés dans les composites (comme illustré dans le tableau V.7).

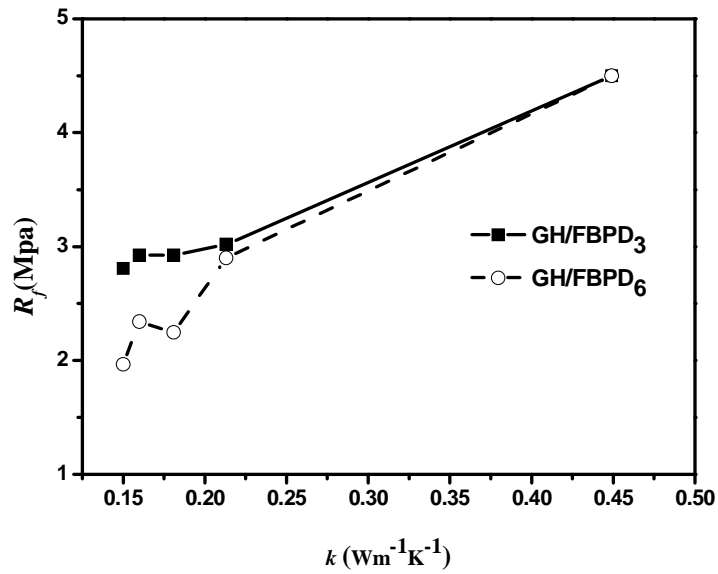
Donc, on peut déduire que les composites à base de gypse renforcés par des FBPD sont un bon candidat pour isolation thermique dans le bâtiment.

#### IV.4. Corrélation entre propriétés thermiques et résistances mécaniques

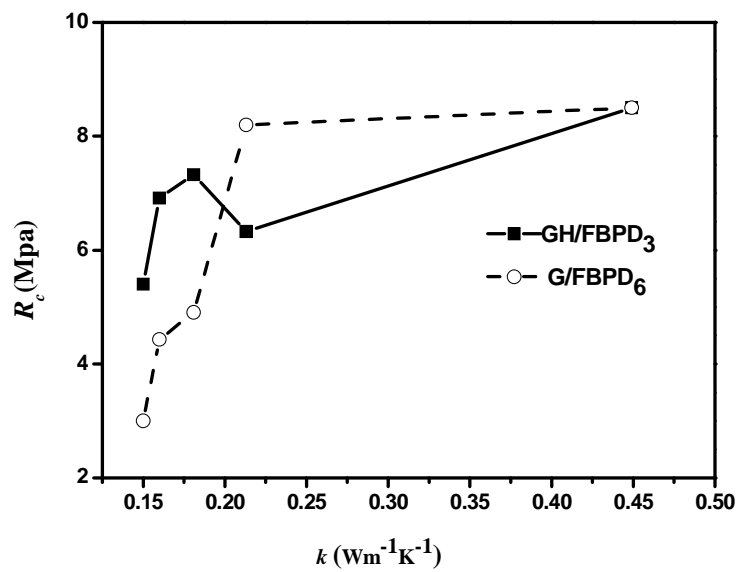
Comme chaque propriété se comporte différemment en fonction de la concentration des fibres, et afin d'avoir plus d'information sur les composites à base de gypse renforcés par des fibres naturelles (dans notre cas, fibres de bois de palmiers dattier), il a été nécessaire d'introduire une étude sur les corrélations qui existent entre les propriétés thermophysiques (conductivité thermique) et les résistances mécaniques (résistance à la flexion et à la compression).

La figure V.8 présente la variation de la résistance à la flexion en fonction de la conductivité thermiques des composites à base de gypse chargés par des fibres en bois de palmier dattier. On remarque que la résistance à la flexion des composites étudiés augmente avec l'augmentation de la conductivité thermique. Donc, on peut dire que l'augmentation de la concentration des fibres dans le composite réduit les deux propriétés, thermiques et résistance à la flexion du gypse. En effet, cette diminution est souhaitable pour les propriétés thermiques, mais elle est indésirable pour la résistance mécanique. Ce comportement est directement lié à l'effet de la concentration des fibres de bois de palmier dattier dans la matrice gypse (déjà discuté dans les figures V.4 et V.5)

Il est constaté que pour des valeurs de  $k$  supérieure à  $0.20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , la résistance à la flexion des composites GH/FBPD<sub>3</sub> et GH/FBPD<sub>6</sub> présente des valeurs similaires. Tandis que, pour des valeurs de  $k$  inférieure à  $0.20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , la résistance à la flexion des composites GH/FBPD<sub>3</sub> est la plus élevée. Ce comportement est principalement dû à la bonne dispersion des fibres de petites tailles dans la matrice, et à sa faible teneur en pores produits dans le gypse en comparaison avec les fibres de tailles plus larges. Même raisonnement à été rapporté par [7].



**Figure V.8 :** *Corrélation entre la conductivité thermique et la résistance à la flexion des composites GH/FBPD.*



**Figure V.9 :** *Corrélation entre la conductivité thermique et la résistance à la compression des composites GH/FBPD.*

La variation de la résistance à la compression en fonction de la conductivité thermiques des composites à base de gypse chargés par des fibres en bois de palmier dattier est illustrée dans la figure V.9. Même comportement que celui de la résistance à la flexion est observé. On

déduit que la résistance à la compression des composites augmente avec l'augmentation de la conductivité thermique. Cela est lié à l'effet de la teneur en fibre dans le gypse.

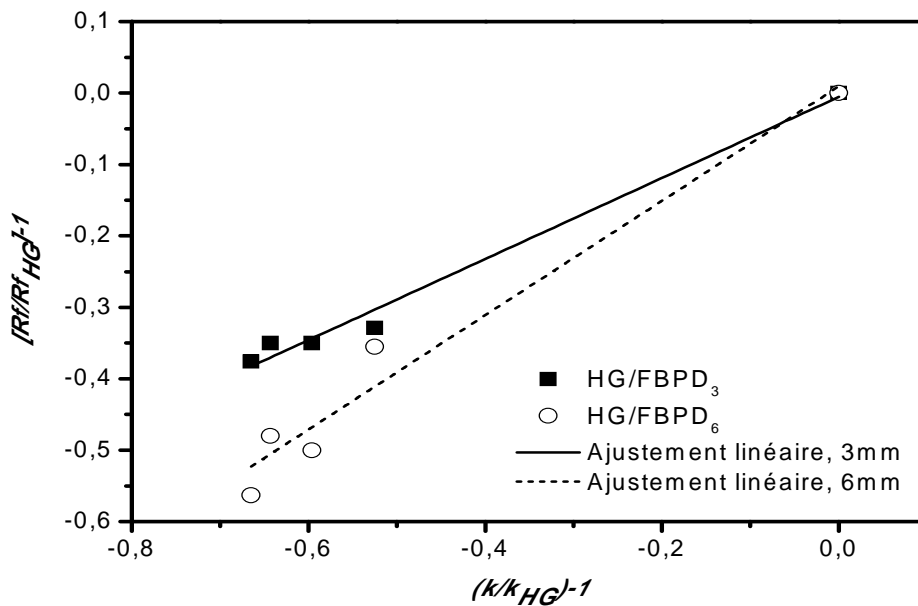
Pour des valeurs de  $k$  supérieure à  $0.20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , la résistance à la compression des composites GH/FBPD<sub>6</sub> présente des valeurs plus élevées que celles des composites GH/FBPD<sub>3</sub>. Néanmoins, pour des valeurs de  $k$  inférieure à  $0.20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , la résistance à la compression des composites GH/FBPD<sub>3</sub> est la meilleure. Ce résultat est fortement lié à la résistance de contact entre fibre/fibre et fibre/matrice, de sorte que l'augmentation des surfaces de contact fragilise la résistance à la compression de la matrice [7].

Donc, on peut conclure que, l'effet de la concentration des fibres est le paramètre le plus influent sur les propriétés thermophysiques (conductivité thermique). Tandis que, les propriétés mécaniques de ces composites sont influencés par les deux paramètres, la concentration des fibres et leur taille (pour des concentrations supérieures à 2%).

#### IV.5. Corrélation expérimentale entre les propriétés

Afin de mieux comprendre la relation entre les propriétés du matériau composite à base de gypse à différents ajouts de fibres naturelles élaboré dans cette étude, nous avons essayé de voir s'il y a une corrélation expérimentales entre les propriétés de ce composite.

La figure V.10 présente la variation relative de la résistance à la flexion du composite à base de gypse renforcé par deux différentes tailles de fibres de bois de palmier dattier (3mm et 6mm) en fonction des valeurs relatives de la conductivité thermique.



**Figure V.10:** Variation relative entre  $R_f$  et  $k$  des composites  $HG/FBPD_3$  et  $HG/FBPD_6$ .

A partir de la figure V.10, on note que la résistance à la flexion augmente d’une manière linéaire avec l’augmentation de la conductivité thermique.

Les valeurs expérimentales ont été ajustées selon l’équation (V.1) linéaire :

$$(R_f / R_{f_{HG}}) - 1 = \alpha_1 [(\kappa / \kappa_{HG}) - 1] \tag{1}$$

Les valeurs de la pente  $\alpha_1$  sont illustrées dans le tableau V.8.

La corrélation observée entre  $R_f$  et  $k$  est confirmée par les valeurs des facteurs de régressions qui sont proches de 1.

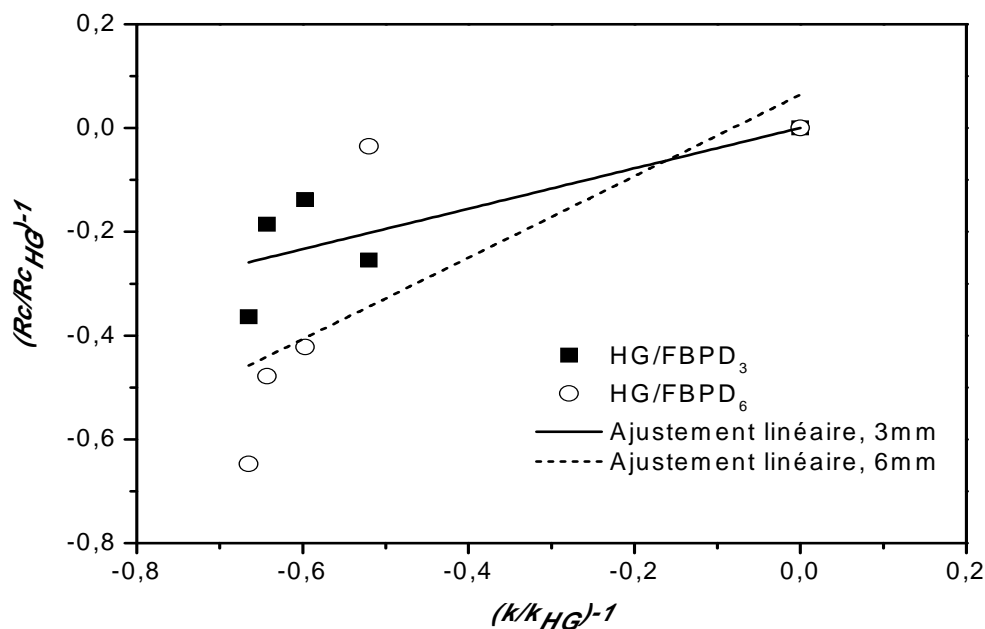
**Tableau V.8 :** Valeurs expérimentales de  $\alpha$  et de  $R^2$  des équations.

composites	$R_f$ Vs $k$		$R_c$ Vs $k$	
	$\alpha_1 \pm \Delta\alpha_1$	$R_1^2$	$\alpha_2 \pm \Delta\alpha_2$	$R_2^2$
HG/FBPD3	$0.567 \pm 0.035$	0.998	$0.389 \pm 0.170$	0.633
HG/FBPD6	$0.800 \pm 0.084$	0.967	$0.784 \pm 0.386$	0.579

$R^2$ : facteur de régression linéaire.



Cependant, on remarque que, les valeurs des pentes des lignes d'ajustements (linéaires) varient en fonction des tailles des fibres de renforcement. Ce comportement peut être relié d'une part, à la distribution plus au moins homogène des petites fibres dans le gypse comparé avec les fibres de plus grandes tailles. Et d'autre part, à la concentration des charges qui augmente la résistance de contact entre fibre/fibre et fibre/gypse. Ce résultat a été aussi observé par Agoudjil *et al.* [17] dans le cas de propriétés diélectriques et thermiques des composites à base d'EVA chargé en particules de BaTiO<sub>3</sub>. Les auteurs [17] ont indiqué que la divergence dans la pente est liée à la résistance de contact entre la matrice et les charges causée par l'augmentation des particules de BaTiO<sub>3</sub>.



**Figure V.11:** Variation relative entre  $R_c$  et  $k$  des composites  $HG/FBPD_3$  et  $HG/FBPD_6$ .

La variation relative de la résistance à la compression du composite à base de gypse en fonction des valeurs relatives de la conductivité thermique est illustrée dans la figure V.11.

A partir de la figure V.11, on note que la résistance à la compression augmente linéairement avec la conductivité thermique des composites.

Les valeurs expérimentales ont été ajustées selon l'équation (V.2) linéaire :

$$(R_c / R_{c_{HG}}) - 1 = \alpha_2 \left[ (\kappa / \kappa_{HG}) - 1 \right] \quad (2)$$

Les valeurs de la pente  $\alpha_2$  sont données dans le tableau VI.8 et on note qu'elles sont loin de 1. Cela est probablement dû à la distribution des fibres dans la matrice de gypse qui se traduit par des réponses anisotropes des propriétés du matériau composite.

La figure V.11 montre que, la variation entre les pentes des lignes d'ajustement des deux tailles est très significative (plus que le double), cela est fortement influencé par l'effort d'écrasement des fibres entre elles surtout à fortes concentrations. Et comme la distribution des fibres dans le gypse est faite d'une manière arbitraire, la réponse à la sollicitation mécanique en fonction des propriétés thermiques est divergente.

En fin, l'étude de la corrélation linéaire est très intéressante, dont le but d'optimiser les différentes propriétés intrinsèques des matériaux surtout lorsqu'il s'agit des matériaux composites.

## V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté et analysé le comportement mécanique et thermophysique (conductivité thermique et densité) de composites à base de gypse chargés avec des fibres de palmier dattier en tenant en compte la concentration massique et la taille des fibres, ainsi que l'âge des composites (14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jours de séchage naturel). L'influence de l'eau sur les composites HG/FBPD a été présentée et analysée. Le comportement mécanique (résistance à la compression et à la flexion) a été mesuré et analysé. Nous avons conclu que la résistance à la compression et à la flexion de tous les échantillons diminuent en augmentant la teneur en fibres. Les résultats mécaniques obtenus par cette étude sont similaires et parfois prometteuses en comparant avec les valeurs de la littérature.

D'autre part, les propriétés thermophysiques de ces biocomposites ont été mesurées et étudiées. On a indiqué que la conductivité thermique varie en fonction de la concentration des fibres, tandis que l'effet de la taille des fibres sur les propriétés thermophysiques est moins significatif.

Les résultats montrent aussi que l'incorporation de 10% de FBPD dans le gypse produit un composite ayant une  $k = 0.15 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$  et  $\rho = 753 \text{ kg/m}^3$ . Ces valeurs sont similaires à ceux utilisés pour les matériaux destinés pour l'isolation thermique dans le bâtiment.

Il est à noter que l'effet de la concentration des fibres de bois de palmier dattier sur le gypse est très significatif sur le comportement thermophysique des composites. Tandis que, les propriétés mécaniques sont fortement influencées par la concentration et la taille des fibres.

Il a été montré qu'une corrélation linéaire existe entre les propriétés mécaniques et thermiques des composites à base de gypse et des fibres de bois de palmier dattier.

## Références

- [1] T. Ashour, H. Georg, F.J. Bockisch, W. Wu, "The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings," *Materials and Design*, vol. 31, pp. 4676-4685, 2010.
- [2] I.M. De Rosa, C. Santulli, F. Sarasini, "Acoustic emission for monitoring the mechanical behaviour of natural fibre composites: A literature review," *Composites: Part A*, vol. 40, pp. 1456–1469, 2009.
- [3] H.M. Akil, M.F. Omar, A.A.M. Mazuki, S. Safiee, Z.A.M. Ishak, A. Abu Bakar, "Kenaf fiber reinforced composites: A review," *Materials and Design*, vol. 32, pp. 4107-4121, 2011.
- [4] T. Ashour, H. Georg, W. Wu "Performance of straw bale wall: A case of study," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 1960-1967, 2011.
- [5] D.K. Panesar, B. Shindman, "The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork," *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, pp. 982-992, 2012.
- [6] S. Migneault, F. Erchiqui, A. Chaala, K. Englund, 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.
- [7] F. Parres, J.E. Crespo-Amorós, 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.
- [8] F. Hernandez-Olivares, M. del Rio, B. Parga-Landa, B. Parga-Landa, "Development of cork gypsum composites for building applications," *Construction and Building Materials*, vol. 13, pp. 179-186, 1999.
- [9] G. Li, Z. Zhao, J. Li, C. Li, "Properties study of cotton stalk fiber/gypsum composite," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 43-46, 2003.
- [10] Z. Li, X. Wang, L. Wang, "Properties of hemp fibre reinforced concrete composites," *Composites: Part A*, vol. 37, pp. 497-505, 2006.

- [11] M. Rio Merino, J. Santa Cruz.Astorquie, F. Hernandez-Olivares, "New prefabricated elements of lightened plaster used for partitions and extrados," *Construction and Building Materials*, vol. 19, pp. 487-492, 2005.
- [12] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [13] X.Y. Zhou, H.G. Li, C.L. Lu, "An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 1070-1074, 2010.
- [14] N. Stevulov, J. Junak, J. Cigasova, E. Terpakova "Effect of hemp shive sizes on mechanical properties of lightweight fibrous composites," *Engineering procedia*, vol. 42, pp. 496-500, 2012.
- [15] J. Khedari, N. Pratinthong, J. Hirunlabh, "New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity," *Cement & Concrete Composites*, vol. 23, pp. 65-70, 2001.
- [16] A. Vimrová, L. Svoboda, R. Cierny,, "Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality," *Cement & Concrete Composites*, vol. 33, pp. 84–89, 2011.
- [17] B. Agoudjil, L. Ibos, Y. Candau and J-C Majesté, "A comparative analysis of dielectric, rheological and thermophysical behaviour of ethylene vinyl acetate/BaTiO<sub>3</sub> composites," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 41, pp. 055407 (7), 2008.

# **Chapitre VI : Etude technico-économique**

## **I. Introduction**

Après avoir exposé et analysé les propriétés techniques des matériaux isolants dans le premier chapitre (Chapitre I) en présentant leurs avantages et leurs inconvénients, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'évaluation des coûts de fabrication du biocomposite développé dans ce travail pour une application d'isolation thermique dans les panneaux solaires ou dans les façades intérieures des bâtiments. Les formules et les paramètres de calculs techniques et économiques du matériau isolant sont aussi présentés. Cette étude constitue une liaison entre la théorie avec sa rigueur scientifique et la pratique, prenant nécessairement en considération des critères beaucoup plus subjectifs.

Les applications de l'isolation thermique de ces biocomposites visent plus particulièrement les panneaux solaires et/ou l'intérieur du bâtiment. Le prototype du panneau solaire en appliquant ce biocomposite est en cours de réalisation à l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES/EPSTCDER).

## **II. Critères de choix des isolants**

Lors d'un choix de matériau d'isolation, il est intéressant, dans une démarche d'écofabrication, de ne pas limiter ses critères de choix aux seules performances thermiques du matériau. Le choix d'un isolant devrait se faire sur la base des critères décrits ci-dessous [1].

### **II.1. Propriétés thermiques**

Elles sont généralement décrites par les propriétés telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique.

### **II.2. Propriétés techniques**

Le comportement au feu, le comportement à l'humidité, le type de mise en œuvre, la stabilité dans le temps, etc.

### **II.3. Propriétés environnementales**

Coût énergétique de la production, du transport, risques pour la santé, etc. Ces propriétés sont décrites par des notions telles que l'éco-bilan : le calcul d'un indice intégrant l'impact environnemental du matériau aux différents stades de sa vie. Différents indicateurs existent, qui se distinguent par la prise en compte ou non de certains aspects difficilement quantifiables et par des pondérations différentes.

### **II.4. Propriétés économiques**

Coût du matériau et de sa mise en œuvre en rapport avec le type d'utilisation et les performances à atteindre.

### **II.5. Qualité de l'isolant**

Bien que la faible conductivité thermique des matériaux constitue une caractéristique importante pour distinguer les matériaux isolants, cela ne suffit pas de généraliser leurs applications dans tous les domaines (*voir* tableau VI.1). Le choix de tel isolant pour une telle application nécessite une attention particulière des propriétés intrinsèques des matériaux isolants et de l'environnement d'application.

Le tableau VI.1 présente quelques exemples des matériaux isolants à éviter dans des applications bien déterminées.



**Tableau VI.1 : Qualités des isolants [1].**

<b>Qualité</b>	<b>Effets recherchés</b>	<b>Type d'isolant à éviter de ce point de vue</b>
Faible coefficient de conductivité	Freiner l'échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur.	Aujourd'hui, tous les matériaux isolants ont une faible conductivité $k$ . Par contre, les isolants minces, du fait de leur faible épaisseur, ont une mauvaise résistance thermique.
Forte densité Bonne aptitude à accumuler la chaleur (chaleur spécifique)	Amortir l'onde de variation de la température extérieure sur le cycle de 24 heures (pour rester au frais l'été). Retarder la propagation du feu en cas d'incendie Offrir une bonne isolation phonique.	Polystyrènes, polyuréthane et laines de densité inférieure à 50 kg/m <sup>3</sup> .
Perméabilité à la vapeur d'eau	Permet de laisser respirer la maison.	Polystyrènes, polyuréthane.
Longévité	Absence de tassement, pas d'apparition de « jours » aux raccords.	Laines en rouleau ou en vrac.
Absence de nocivité	Pas d'émanation toxique due à des additifs chimiques, pas de microfibrilles irritantes.	Polystyrènes, polyuréthane et, dans une moindre mesure, laines minérales.
Isolation préservée en cas d'humidité	Efficacité préservée de l'isolant par grand froid.	Aucun matériau à éviter mais frein-vapeur obligatoire sur la face intérieure de tous les isolants fibreux.

### III. Facteurs déterminant le choix des épaisseurs de l'isolant

Plusieurs facteurs entrent en considération pour déterminer les épaisseurs convenables des isolants. Après avoir choisi à priori un mode de construction à adopter, il faut choisir un, deux, ou trois types d'isolants. Parmi ces facteurs, on peut citer entre autres :

#### III.1. Les températures

Dans les calculs, on prend généralement l'écart de température maximum compte tenu des températures extérieures plus élevées (ou plus faibles), en supposant que la température

intérieure est constante. Pour cela, les effets de l'insolation sont à considérer afin de tenir compte de l'élévation de la température de la paroi ensoleillée [2].

### **III.2. Conductivité de l'isolant**

On peut retenir la valeur pratique obtenue en majorant la conductivité thermique théorique donné par le fabricant pour prendre en compte le manque d'homogénéité de certains isolants, les tolérances et les erreurs de mesure sur les échantillons, le vieillissement et d'une légère humidification, les ponts thermiques inévitables, et quelques imperfections de pose [2,3].

### **III.3. Déperditions admises**

La tâche difficile des techniciens est de prendre une décision sur le choix de la déperdition à admettre aux parois isolantes. Avant de proposer la déperdition admise, il faut prendre en compte le prix de l'énergie et le prix des isolants. Si la déperdition admise est faible, l'épaisseur de l'isolant à mettre en œuvre est grande [2,3].

### **III.4. Prix de l'isolant**

La tendance actuelle est d'utiliser un isolant bon marché mais efficace thermiquement dans le but d'avoir le coût minimum de l'isolation [3].

### **III.5. Prix de l'énergie**

L'adoption d'une épaisseur importante de l'isolant a pour but d'économiser l'énergie. Le prix de l'énergie intervient d'ailleurs par la valeur des déperditions dans l'approche de l'épaisseur économique. Il faut donc faire une analyse soignée sur le prix de l'énergie et celui de l'isolant [2,3].

### **III.6. Taux d'amortissement**

Il s'agit là d'une notion plus financière que technique tout à fait conventionnelle. Dans le cas de notre étude d'isolation, il peut être en fonction de la durée de vie de l'isolant et de la construction entière[2].

### **III.7. Temps d'utilisation**

Cette notion de temps d'utilisation n'est essentiellement valable que pour les installations qui ne fonctionnent généralement pas toute l'année. D'où l'utilité d'économie d'installation [3].

### III.8. Fabrications commercialisées

A cause du progrès de la préfabrication des panneaux isolants, le choix des épaisseurs devient alors beaucoup plus limité pour les techniciens. Certains fabricants produisent des isolants pour des applications bien déterminés (bâtiments, panneaux solaires, etc.) [4].

## IV. Les paramètres de calculs économiques de l'isolation

Il existe quelques facteurs et/ou paramètres technico-économiques qui doivent être pris en considération afin d'évaluer l'étude économique de l'isolation, à savoir : le coût de l'isolant, sa durée de vie et le coût de l'énergie.

### IV.1. Le coût de l'isolant

Il est évident que le prix de l'isolant est un facteur important qui entre en jeu dans l'investissement et le calcul économique d'un projet d'études d'isolation thermique. En dehors de toutes considérations techniques, on a tendance à s'intéresser aux prix des isolants dans le but d'économiser les dépenses occasionnées par l'isolation. Généralement, le coût de l'isolant est calculé pour le prix du m<sup>3</sup>[5].

Pour une paroi considérée, le coût de l'isolant relatif à une durée de vie de l'isolation estimée à « $\tau_v$  ans », le coût annuel attribué à l'isolant est donc donné par la relation suivante [2,3] :

$$C_{isol,annuel} = \frac{e_{is} \cdot S \cdot C_m}{\tau_v} \quad (1)$$

Avec :

$C_m$ : Prix du m<sup>3</sup> de l'isolant en Dinars Algérien (DA).

$\tau_v$  : Durée de vie de l'isolant en Années.

$S$  : Surface en m<sup>2</sup>.

## IV.2. Epaisseurs de l'isolant

Il existe plusieurs formules et méthodes proposées par beaucoup d'auteurs pour estimer l'épaisseur de l'isolant [3]. Certaines méthodes sont en fonction de quelques paramètres alors que d'autres utilisent un grand nombre de paramètres. Dans notre étude, nous nous limiterons à aborder la méthode de calcul qui découle directement de la loi de Fourier.

La loi de Fourier met en relief une relation entre la déperdition, l'écart de températures entre les deux côtés de la paroi considérée, de la somme des résistances thermiques des différentes couches constituant la paroi et des résistances thermiques superficielles des deux milieux séparés par la paroi. Cette loi de Fourier montre que la densité de flux thermique traversant une paroi est proportionnelle à la différence de températures de ses deux côtés.

Cette formule s'exprime sous la forme généralisée suivante [4] :

$$\varphi = \frac{\Delta\theta}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e_{is}}{k_{is}}} \quad (\text{en W/m}^2) \quad (2)$$

Ou :

$R_e=1/h_e$  : Résistance thermique de convection externe en  $\text{m}^2.\text{K/W}$ .

$R_i=1/h_i$  : Résistance thermique de convection interne en  $\text{m}^2.\text{K/W}$ .

$e_{is}$  : Epaisseur de l'isolant en m.

$k_{is}$  : conductivité thermique de l'isolant.

$\Delta\theta$  : Ecart de températures en  $^{\circ}\text{C}$

$\varphi$  : Densité de flux thermique en  $\text{W/m}^2$

$$\varphi = U \times \Delta\theta \quad (3)$$

Avec :  $U$  est le coefficient d'échange global de transmission de chaleur.

$$U = 1 / [R_e + R_i + (e_{is} / k_{is})] \quad (4)$$

Hypothèses de calculs :

- Les coefficients de transferts par convection libre (interne et externe) de l'air est compris entre 5 et 25  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  [6], donc la résistance thermique par convection varie dans l'intervalle de 0.2 à 0.04  $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ . Donc, dans notre cas, la résistance thermique par convection n'est pas négligeable.
- En posant la résistance thermique par convention (interne et externe)  $R = R_e + R_i$ .

L'expression de l'épaisseur de l'isolant est donnée par l'équation 5.

$$e_{is} = \left[ \frac{\Delta\theta}{\phi} - R \right] k_{is} \text{ (en m)} \quad (5)$$

A partir de la relation 5, on note que l'épaisseur de l'isolant dépend essentiellement de la conductivité thermique du type d'isolant choisi, de la déperdition à admettre, de la différence de température entre l'ambiance interne et externe de l'isolant, ainsi que la résistance thermique par convection.

### IV.3. La durée de vie de l'isolant

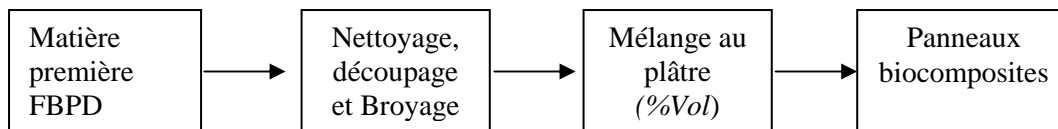
La durée de vie de l'isolant constitue un facteur principal pour estimer l'amortissement de l'isolation ainsi que la construction entière. La durée de vie est variable suivant l'isolant; elle peut varier en fonction des défauts de fabrication, des imperfections de pose, des conditions d'utilisation (compatibilité des matériaux, températures d'utilisations, etc.), et des matières premières de fabrication.

Dans de bonnes conditions d'utilisation, un bon isolant garde son pouvoir isolant, son efficacité thermique et ses performances techniques jusqu'à quinze ans d'utilisation [7].

## V. Evaluation des coûts de fabrication du biocomposite

### V.1. Diagramme général du procédé

Le schéma général du procédé complet de fabrication de panneaux de biocomposite est présenté sur la figure VI.1.



**Figure VI.1 :** *Diagramme schématique du procédé de fabrication de biocomposites gypse/FBPD*

Cet ordre des opérations a été fixé lors de l'étude, notamment en ce qui concerne l'étape de broyage, qui nous a permis d'obtenir des fibres à différentes tailles, comme nous l'avons montré au Chapitre IV.

Les étapes de la fabrication de panneaux biocomposites permettront finalement d'évaluer le coût par m<sup>2</sup> de panneaux.

### V.2. Coût de la matière première et de son broyage

C'est tout d'abord la disponibilité d'un bois qui fixe son prix. L'exploitation des palmiers dattiers produit annuellement une quantité importante de bois, estimée à environ 250000 tonnes pour l'Algérie seulement et presque 2 millions de tonnes mondialement. Ces parties renouvelables de l'arbre sont actuellement très peu exploitées [8]. Le but est de récupérer ces déchets en vue de les utiliser comme un renfort dans la fabrication des biocomposites destinés à l'isolation thermique.

#### V.2.1. Bois de palmier dattier

Il s'agit du bois sous la forme la plus brute, c'est à dire de tronc, grappe, pétiole et de rachis. Le schéma ci-dessous (figure VI.2) présente les prix moyens actuels constatés en Algérie. Les procédés de nettoyage, découpage et de broyage de bois de palmier dattier sont réalisés à l'entreprise EPTR à Batna.

Le prix du bois (pour une concentration de 10%) nécessaire pour fabriquer un panneau de  $1\text{m}\times 1\text{m}\times 50\text{mm}$  de biocomposite avec une densité de  $754\text{ Kg/m}^3$  est estimé de la manière suivante :

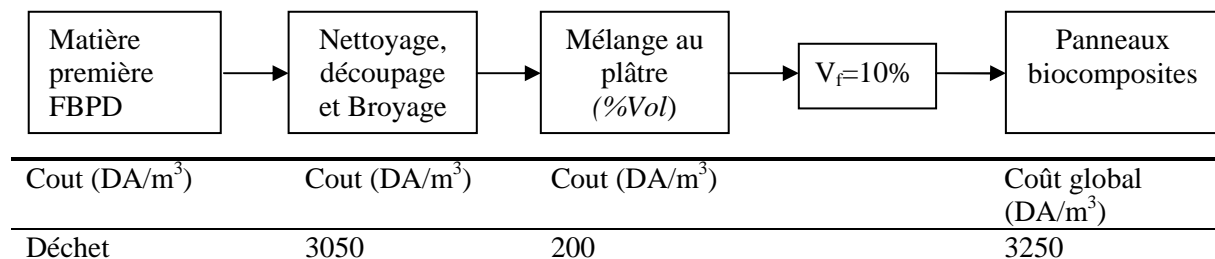
Bois de palmier dattier (équivalent de 10%) :	30,5Kg
Prix du broyage et du transport :	100DA/Kg
Cout de bois :	3050DA

### V.2.2. Plâtre

Le prix du plâtre est très faible comparé aux autres types de liants, tels que le ciment. Le sac de 50 Kg varie entre 350 et 400 DA.

### V.3. Estimation du surcoût au mètre carré de panneau de biocomposite

Les paramètres de la fabrication des plaques composites peuvent se résumer sur la figure VI.2:



**Figure VI.2 :** Diagramme schématique d'estimation des surcoûts de fabrication de panneaux de biocomposites gypse/FBPD

Notons que si la matière première qui est dans notre cas les fibres de bois de palmier dattier est considérée comme un déchet, le coût global au m<sup>3</sup> de panneaux de biocomposite dépend essentiellement du coût de découpage, nettoyage et broyage du bois de palmier dattier car le prix du plâtre est très faible.

Pour calculer le coût global au mètre cube de biocomposite, il faut définir les masses des composants nécessaires pour fabriquer ce volume ( $1\text{m}\times 1\text{m}\times 50\text{mm}$ ).

Pour un taux de gâchage de 0.6, il faudrait 212 Kg de gypse, 30,5 Kg de fibres et 127,5 Kg d'eau.

Les résultats de calcul du cout global d'un panneau de 1m×1m×50mm de biocomposite de 754 Kg/m<sup>3</sup> de masse volumique avec 10% d'ajout et une est estimé à 3250 DA.

## **VI. Application du biocomposite dans l'isolation thermique**

### **VI.1. Panneaux solaires**

Les matériaux les plus utilisés dans l'isolation thermique des panneaux solaires sont les isolants synthétiques: la laine de verre (sous forme de rouleau), le verre expansé (sous forme de bloc, plaques et coquilles) ainsi que la laine de roche qui se présente sous forme de panneau rigide et le polystyrène extrudé (sous forme de panneau).

Ces isolants offrent des propriétés thermiques intéressantes, cependant leurs couts et leur aspect environnemental affaiblit leur utilisation. Le biocomposite développé dans ce travail offre un champ d'application plus large tout en respectant les aspects économiques et environnementaux.

Dans ce qui suit, nous allons évaluer la dépense totale au niveau de l'isolation. Faisons une étude économique comparative entre les différents isolants (regroupés dans le tableau IIV.2) avec leurs prix actuels. Le tableau VI.2 présente les couts d'isolants comparés à celui du composites élaboré dans notre étude.

Fixons les paramètres technico-économiques suivants :

- La durée de vie de l'isolant est estimée à 15ans ;
- La surface est estimée à 1m<sup>2</sup> et l'épaisseur à 50mm ;
- La différence de température est constante pour tous les isolants ;
- La déperdition est considérée comme une constante ;

En appliquant ces hypothèses, on déduit que le coût d'isolant est directement lié à la conductivité thermique de l'isolant et à son coût. Les coûts des isolants annuels sont exposés dans le tableau VI.2.



**Tableau VI.2** : Comparaison des prix d'isolants appliqués pour panneaux solaires.

Matériaux	$k(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1})$	$e_{is}$ (mm)	$C_m$ (DA)	$C_{is, \text{annuel}}$
Laine de verre (LV)	0,032	100	1000 [7]	6000.18
Laine de roche	0,033	100	1200 [7]	7200.96
Textile recyclé (TR)	0,032	120	1300 [9]	9500.04
XPS	0,028	80	2200 [9]	10500.06
Polyuréthane	0,028	80	2200 [9]	10500.06
Verre cellulaire (VC)	0,032	130	5800 [9]	45800.32
Liège	0,032	100	4000 [1]	35000
HG/FBPD	0,15	50	550	3250

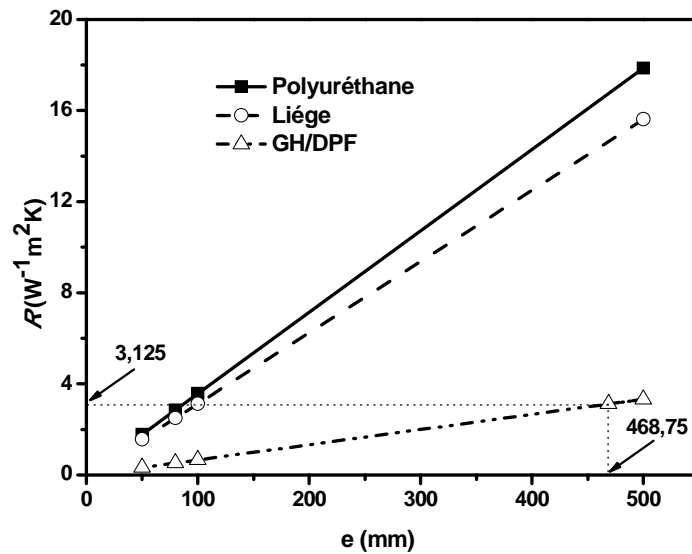
\* représente le prix global estimé pour la fabrication d'un panneau de biocomposite de dimensions 1m×1m×50mm.

Il est à noter que le prix du biocomposite est très faibles comparer avec les autres isolants. Ce faible cout est directement lié aux faibles prix des constituants du biocomposites fabriqué à partir de matériaux naturels et renouvelables.

Il est aussi remarqué que l'épaisseur utilisé pour les panneaux en biocomposites est très faible par rapport aux autres isolants, tandis que sa conductivité thermique est plus importante. Néanmoins, pour augmenter la résistance thermique du biocomposite il suffit d'augmenter son épaisseur.

En comparant les résultats de calculs, du point de vue coût, on a pu tirer les conclusions suivantes :

- Le cout moyen de l'isolation en composite de gypse renforcés par des fibres de bois de palmier dattier élaboré dans cette étude présente le plus faible cout comparer avec d'autres isolants utilisés dans l'isolation thermique dans les panneaux solaires.
- Les isolants à base de fibres naturels sont plus favoris du point de vue énergie grise et environnement.



**Figure VI.3 :** Résistances thermiques des isolants à différentes épaisseurs.

La figure VI.3 présente la comparaison de résistances thermiques des biocomposites GH/BPD avec celles du polyuréthane et du liège.

A partir de cette figure on peut constater que la résistance thermique du biocomposite est très faible comparée à celle des deux autres isolants. Pour atteindre la résistance thermique du polyuréthane ou du liège il faut augmenter l'épaisseur du biocomposite jusqu'à 428.57mm et 468.75mm respectivement (voir la figure VI.3). Cette épaisseur est très grande pour être appliquée dans les panneaux solaires, une raison qui rend l'application de ce biocomposite plus favorable dans le bâtiment.

Il est à noter que l'application du biocomposite dans les panneaux solaires semble être moins performante qu'à leur application dans le bâtiment. Une étude comparative avec d'autres isolants est présentée ci-dessous.

## VI.2. Comparaison des isolants appliqués pour les Panneaux Solaires

Le tableau VI.3 présente les caractéristiques techniques et environnementales de différents isolants appliqués dans les panneaux solaires.

**Tableau VI.3 : Propriétés des isolants [1].**

Isolants	Caractéristiques			
	Techniques		Environnementales	
	$\lambda$ W/m.°C	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Energie grise kWh/m <sup>3</sup>	Bilan CO2 kg éq.CO2/m <sup>3</sup>
<b>Isolants d'origine minérale</b>				
Laine de roche	0.037	20-150	150	45
Laine de verre	0.039	13-100	225	75
Perlite	0,045-0,05	90	230	69
<b>Isolants d'origine synthétiques</b>				
Polystyrène expansé	0,040	10-40	450	70
Polystyrène extrudé	0,032	10-40	850	70
Polyuréthane	0,023	40	1200	Très élevé
<b>Isolants d'origine végétale</b>				
Laine de chanvre	0.039	30	30	9
Fibre de bois	0.050	110- 160	800	240
Laine de coton	0.04	20	moyenne	Elevée
Laine de lin	0.047	30-35	30	Peu élevé
liège	0,032-0,045	65-75	450	Moyen

Peu d'isolants sont performants finalement pour toutes les fonctions possibles : par exemple, la laine de verre est le matériau le moins cher, le plus répandu, mais particulièrement sensible à l'accumulation de vapeur d'eau... et se dégrade rapidement en perdant son pouvoir isolant (effet de tassement de la laine de verre à 10 ou 15 ans...peu constaté car peu de gens démontent des parois isolées à 10 ou 15 ans). Le choix de l'isolant sera conduit par le choix du mode constructif et vice versa.

Donc, on peut conclure qu'il n'existe pas d'isolant qui n'a pas d'inconvénients ou de limite d'utilisation, raison pour laquelle le biocomposite élaboré dans cette étude est proposé pour répondre aux problèmes d'isolation thermique dans les panneaux solaires. Et seule l'expérience peut trancher sur la fiabilité de ce matériau pour l'application dans les panneaux solaires.

### VI.3. Bâtiment

D'une part, le développement des composites naturels dans le secteur du bâtiment connaît une forte hausse grâce à leur pouvoir d'isolation, leurs disponibilités et leurs couts très faibles.

La déperdition thermique à travers une paroi (élément de séparation) dépend [9] :

- de la résistance thermique de l'isolant mis en œuvre ;
- de la technique d'isolation utilisée, en relation avec les conditions d'application, qui peut être très différente d'un cas à l'autre (isolation statique ou dynamique, positionnement par rapport aux ponts thermiques, etc.).

Les applications mentionnées prennent en compte, à titre d'exemple, du second aspect.

D'autre part, les bétons légers offrent une densité très inférieure à celle d'un produit classique: de 300 à 1800 kg/m<sup>3</sup>, contre 2300 kg/m<sup>3</sup> pour un béton classique. Pour certains bétons légers, elle peut descendre jusqu'à des densités voisines de 40 kg/m<sup>3</sup> [10].

La résistance d'un béton léger est très inférieure à celle d'un béton traditionnel, cependant leurs propriétés thermiques sont très intéressantes surtout dans le domaine d'isolation[11].

Le tableau VI.4 présente les principales classes de bétons légers et leurs domaines d'application.

D'après les différents résultats expérimentaux des essais effectués sur notre matériau (discutés dans le chapitre IV), on peut le classer selon trois catégories de bétons légers en fonction de ses propriétés.

Du point de vue densité, le biocomposite est similaire à un béton léger isolant de type béton caverneux de bois utilisé comme plaque isolante ou dans les cloisons.

En qualité de conductivité thermique, notre matériau est classé comme un béton léger très isolant. Sa conductivité thermique est équivalente à un béton cellulaire appliqué comme plaque isolante.

Si on a recours à la résistance de compression à 28 jours, le composite fabriqué dans cette étude possède une qualité d'un béton léger isolant et porteur comme un béton caverneux d'argile ou de schiste expansé et peut être appliqué dans les murs, cloison, échappe isolante.

Cette analyse montre que notre biocomposite représente un matériau qui peut répondre à plusieurs applications, mais cela nécessite un soin plus particulier dans les concentrations des fibres à ajouter dans le gypse.

**Tableau VI.4 : Classification et domaines d'application des bétons légers [10].**

Caractéristiques moyennes	Bétons légers		
	Très isolants	Isolants	Isolants et porteurs
Masse apparente volumique sèche (kg/m <sup>3</sup> )	300-600	600-900	900-1300
Conductivité thermique (W/m.°K)	0.05 à 0.2	0.2 à 0.4	0.3 à 0.6
Résistance mécanique de compression à 28 jrs (MPa)	0.5 à 1	1 à 2	3 à 15
Types de bétons	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton cellulaire ;</li> <li>• Béton isolant légers à base de polystyrènes expansés (PSE);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton cellulaire ;</li> <li>• Béton plein de PSE ;</li> <li>• Béton de perlite, de vermiculite ;</li> <li>• Béton caverneux de ponce, de bois ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton semi-cavernaux de pouzzolane, de laitier expansé ;</li> <li>• Béton caverneux d'argile ou de schiste expansé ;</li> <li>• Béton plein de sable et gravillon d'argile ou schiste expansé.</li> </ul>
Domaines d'applications	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plaques de remplissage ;</li> <li>• Plaque isolantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plaques de remplissage ;</li> <li>• Plaque isolantes</li> <li>• Vêtures ;</li> <li>• Ecran anti-bruit ;</li> <li>• Cloison ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bloc ;</li> <li>• entrevous ;</li> <li>• murs ;</li> <li>• cloisons ;</li> <li>• plaques drainantes ;</li> <li>• chappes isolantes de planchers</li> </ul>

D'une manière générale, l'utilisation du biocomposite en isolation thermique dans le bâtiment présente un avantage intéressant comparé aux matériaux traditionnels tels que les bétons de ciment.

Le panneau en biocomposite composé de gypse renforcé par des fibres de bois de palmier dattier convient parfaitement aux techniques de constructions usitées dans le secteur du bâtiment algérien et devrait donc facilement pouvoir être introduit en Algérie.

Les panneaux en biocomposite sont parfaits pour être utilisés comme faux-plafonds: ils sont faciles à installer et ont de bonnes qualités thermiques et acoustiques.

Le panneau en biocomposite peut aussi être utilisé pour des murs extérieurs pour améliorer l'isolation thermique. Les panneaux peuvent être utilisés comme des enduits ou blocs dans les murs extérieurs ou intérieurs pour constituer des maçonneries isolants.

Il est important de préciser que le biocomposite réalisé dans ce travail est mieux adapté aux bâtiments qu'aux panneaux solaires, puisque les constituants de ce biocomposite sont des matériaux courants et utilisés dans le bâtiment à savoir le plâtre ou le bois (liège, chanvre...).

## **VII. Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'évaluer les performances techniques et économiques des isolations thermiques appliquées dans les panneaux solaires thermiques ou bien dans le bâtiment.

Ce qui concerne l'étude technico-économique, à partir des résultats de calculs, on peut conclure que le biocomposite développé dans cette étude qui est d'origine naturel et renouvelable, présente des performances techniques et économiques intéressantes comparées à ceux des isolants issus de ressources synthétiques, un avantage qui lui permet d'être utilisé comme un matériau d'isolation thermique dans les panneaux solaires.

Les résultats des propriétés techniques des biocomposites (thermiques et mécaniques) permettent de les classer avec les bétons légers destinés à l'isolation thermique dans le secteur du bâtiment.

A partir de l'étude technico-économique, on peut conclure que notre biocomposite est mieux adapté aux bâtiments qu'aux panneaux solaires.

Enfin, il est noté que l'étude technico-économique de ce nouveau biocomposite implique une étude expérimentale, afin d'évaluer l'intérêt de ce matériau dans l'éco-construction.

## Références

- [1] Auteurs et Experts ETI, *Éco-matériaux et isolation isoler et revêtir les façades*, Technique de l'ingénieur, Editions T.I., Vol 43811210, 2004, TBA 2125.
- [2] G. Ballot, M. Duminil, "Isolation frigorifique: guide théorique et pratique," *Paris: Pyc édition*, pp. 445, 1981.
- [2] A.H. Nambintsoa, "Méthodes optimales de calcul et informatisation de l'isolation des chambres froides (conception du logiciel Frisol 1.0)," *Mémoire de fin d'études d'Ingéniorat*, Génie Industriel/ESPA, Madagascar, 2004.
- [3] M. B. Rahevivo, "Etude de matériaux d'isolation des installations frigorifiques avec conception de logiciel de calcul technico-économique dénommé IBF 1.0," *Ingéniorat en Science des Matériaux*, Université d'Antananarivo Ecole supérieure polytechniques, Madagascar, 2008.
- [4] R.C.R. Andriambalonarivo, "Optimisation de l'isolation pour la construction d'une chambre froide à système traditionnel. Conception d'un véhicule isothermique," *Mémoire de fin d'études d'Ingéniorat*, Génie Industriel/ESPA, Madagascar, 2000.
- [5] H. M. Rasolomaharo, "Etude du comportement thermique des isolants d'origine végétale. Application à l'isolation d'une chambre froide," *mémoire de fin d'études de DEA, SMM/ESPA*, Madagascar, 2003.
- [6] J.P Holma, *Heat Transfert*. Tenth Edition. 2010, United State of America.
- [7] *L'isolation Responsable*, Groupe Saint-Gobain, Copyright 2008 Isover, <http://www.toutsurlisolation.com/Choisir-son-isolant/Comparer-les-isolants/Le-prix-de-l-isolation>.
- [8] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [9] C. Langlais, S. Klarsfeld, "Isolation thermique à température ambiante. Propriétés", *Technique de l'ingénieur*, 2010.
- [10] J. Bresson, J.L. Maillard, " Béton légers", rapport technique, laboratoire de CERIB, fiche 136, 1996.
- [11] *les bétons spéciaux*, Techniques de l'ingénieur Techniques du bâtiment : Connaître les matériaux de la construction, Vol: TIE804DUO, Editions T.I., 2005, tba 1022.

# **Conclusions générales**



## I. Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse a été consacré dans un premier temps au développement d'un nouveau matériau biocomposite constitué de fibres de bois de palmier dattier dispersées dans une matrice gypse en vue de l'utiliser comme un isolant thermique. La partie expérimentale porte sur l'élaboration et la caractérisation thermique et mécanique de ce biocomposite. Puis, à l'étude numérique utilisant la méthode des éléments finis pour prédire la conductivité thermique des composites à base de polymères chargés par des particules métalliques. Le modèle numérique développé dans cette partie de la thèse servira, dans le future, comme un modèle pour estimer la conductivité thermique des biocomposites.

Les principaux résultats obtenus dans cette étude sont exposés ci-dessous.

### *Etude numérique*

La synthèse bibliographique montre qu'aucun modèle numérique ou théorique ne permet la prédiction des propriétés thermiques (notamment la conductivité thermique) des matériaux hétérogènes d'une manière parfaite. Tous les modèles théoriques d'estimation de  $k_{eff}$  divergent aux fortes concentrations et aucun modèle ne prend en compte la taille des particules. Seul la forme ou la concentration en charges ainsi que les conductivités des deux constituants sont présent en compte par ces modèles. D'autre part, l'influence de la taille des particules est très significative. Cela implique une recherche plus approfondie des caractéristiques intrinsèques de ces matériaux. Les méthodes expérimentales peuvent se rapprocher de la réalité mais avec un soin plus particuliers. Cependant, les méthodes numériques sont très utiles et offrent un champ d'application plus large, mais les résultats peuvent diverger de la réalité.

L'étude numérique effectuée dans ce mémoire a été consacrée à la modélisation numérique de la conductivité thermique des composites EVA /BaTiO<sub>3</sub> et PP/Cu, puis comparer les résultats obtenus à partir de cette étude aux modèles théoriques et aux résultats expérimentaux. L'effet de la taille et de la concentration des charges sur la conductivité thermique effective des composites a été aussi étudié.

Les résultats obtenus montrent qu'en dessous de la concentration de 20% (vol%) de charges, le modèle numérique développé dans notre étude prédit assez bien la conductivité thermique

des composites. Au-dessus de 20% (vol%) de charges, les résultats numériques divergent des résultats expérimentaux. Cet écart peut être attribué au fait que la modélisation numérique ne prend pas en considération la résistance thermique interface, qui est un facteur qui influe fortement la conductivité thermique des matériaux composites. La taille des particules présente aussi un paramètre important qui influe sur la conductivité thermique effective des matériaux composites. Il est important de retenir que, la conductivité thermique diminue lorsque la taille des particules augmente. Par ailleurs, il est très utile d'utiliser le modèle numérique proposé dans cette étude pour étudier l'effet de la taille des particules sur la conductivité thermique des matériaux composites.

Il a été constaté à partir de cette étude que, l'effet de la compatibilité entre la matrice et la charge sur la conductivité thermique effective des composite est plus significative que le type de charges.

#### *Etude expérimentale des composites*

Les résultats d'essais expérimentaux concernant le comportement mécanique et thermophysique de composites à base de gypse chargés avec des fibres de palmier dattier en tenant en compte la concentration massique et la taille des fibres, ainsi que l'âge des composites (14<sup>ème</sup> et 28<sup>ème</sup> jours de séchage naturel) sont présentés et discutés. L'influence de l'eau sur les composites HG/FBPD a été présentée et analysée. On a constaté que, d'une part la résistance à la compression et à la flexion de tous les échantillons diminuent en augmentant la teneur en fibres. Les résultats mécaniques du biocomposite obtenus par cette étude sont similaires et parfois meilleurs comparés aux valeurs fournis dans la littérature concernant d'autres matériaux.

D'autre part, les propriétés thermophysiques notamment la conductivité thermique de ces biocomposites varient en fonction de la concentration des fibres, tandis que l'effet de taille des fibres sur les propriétés thermophysiques est moins signifiant.

Les résultats montrent aussi que l'incorporation de 10% de FBPD dans le gypse produit un composite avec une  $k = 0.15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $\rho = 753 \text{ kg.m}^{-3}$ . Ce qui lui permet d'être appliqué comme isolant thermique dans les panneaux solaires ou comme un matériau de construction dans le bâtiment. Néanmoins, les propriétés mécaniques diminuent en augmentant le volume

des fibres dans la matrice. Il est à noter que, les propriétés thermique et mécanique optimales sont données par une fraction volumique variant entre 3 et 5% de FBPD.

Il est a noté que l'effet de la concentration des fibres de bois de palmier dattier sur le gypse est très significatif sur le comportement thermophysique des composites. Tandis que, les propriétés mécaniques sont fortement influencées par la concentration et la taille des fibres.

L'étude concernant les corrélations entre la conductivité thermique et la résistance mécanique a été étudiée. Cette étude montre que pour des valeurs de  $k$  supérieure à  $0.20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , la résistance à la flexion des composites GH/FBPD<sub>3</sub> et GH/FBPD<sub>6</sub> présente des valeurs similaires. Tandis que, pour des valeurs de  $k$  inférieure à  $0.20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , la résistance à la flexion des composites GH/FBPD<sub>3</sub> est la plus élevée. Ce comportement est principalement dû à la bonne dispersion des fibres de petites tailles dans la matrice, et à sa faible teneur des pores produits dans le gypse comparé avec les fibres de tailles plus larges.

L'étude technico-économique nous a permis de montrer l'avantage d'utiliser ces biocomposites dans le domaine de l'isolation.

Il est a noté que, d'une part, le biocomposite développé dans cette étude qui est d'origine naturel et renouvelable, présente des performances techniques et économiques intéressantes comparées à ceux des isolants issus de ressources synthétiques.

D'autre part, A partir de l'étude technico-économique, on peut conclure que notre biocomposite est mieux adapté aux bâtiments qu'aux panneaux solaires.

Enfin, il est noté que l'étude technico-économique de ce nouveau biocomposites implique une étude expérimentale, afin d'évaluer l'intérêt de ce matériaux dans l'éco-construction.

#### PERSPECTIVES :

- 1- Modélisation des propriétés thermiques du biocomposites.

La modélisation numérique des propriétés thermophysiques du biocomposite à différentes concentrations de fibres en utilisant le modèle mathématique développé dans le chapitre III. Le but de cette partie est d'évaluer notre modèle avec d'autre type de composite à savoir les composites naturels. Puis, comparer les résultats numériques avec ceux de l'expérimental obtenus dans ce travail.

- 2- Réalisation d'un prototype de panneau solaire en utilisant le biocomposite comme isolant.

Le prototype du panneau solaire en appliquant le biocomposite développé dans cette étude sera réalisé dans le future afin d'évaluer ses performances techniques dans les conditions naturelles.

### 3- Utilisation du renfort bois de palmier dattier avec une autre matrice

Les enjeux d'une association avec une autre matrice que le gypse seront probablement différents ; avec un composite résine/bois, on pourra rechercher une diminution de masse volumique, tandis qu'un composite ciment/bois ou chaux/ciment/bois pourra viser des applications structurales avec de meilleures performances en compression. L'évaluation des performances du matériau devra donc dans ces cas-là passer par les tests dédiés.

**Titre du mémoire :** METROLOGIE ET MODELISATION DES TRANSFERTS DANS LES COMPOSITES NATURELS A FAIBLE COUT POUR L'ISOLATION THERMIQUE DANS LES PANNEAUX SOLAIRE.

**Option :** Physique Energétique.

**Auteur :** CHIKHI Mourad.

**Mots clés :** Isolation thermique, Panneaux solaires, Conductivité thermique, Biocomposites, Fibres de bois de palmier dattier (FBPD), COMSOL, Thermique habitât;

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

### **Résumé :**

Ce mémoire de thèse est consacré à l'étude expérimentale des propriétés thermiques et mécaniques d'un nouveau biocomposite constitué de fibres naturelles dispersées dans une matrice gypse, en vue de l'utiliser comme isolant thermique dans les panneaux solaire et le bâtiment. Du point de vue mécanique, les résistances mécaniques du gypse diminuent avec l'augmentation des fibres. Pour une concentration de 10% de FBPD la résistance à la compression du gypse à 28 jours diminue à 5.4 Mpa et à 2.8 Mpa pour la résistance en flexion. Du point de vue thermique, la conductivité thermique du gypse diminue avec l'augmentation de la concentration des fibres. Elle diminue de 0.44 à 0.15 W/m<sup>2</sup>K, pour une concentration de 10% de fibres. L'influence de la concentration des FBPD sur les propriétés mécaniques et thermiques du composite est plus significative que la taille des fibres. La corrélation entre la conductivité thermique et la résistance mécanique a été également étudiée. Parallèlement à ce travail expérimental, une étude numérique basée sur la méthode des éléments finis est établie afin de prédire la conductivité thermique des matériaux hétérogènes. Les composites étudiés dans cette partie sont constitués de matrices polymères renforcées par des particules métalliques. L'approche numérique de la prédiction de la conductivité thermique effective des composites sera appliquée par la suite pour estimer la conductivité thermique effective des biocomposites élaborés dans ce travail. Le domaine d'application de ce biocomposite est dans l'isolation thermique des panneaux solaires et des bâtiments. L'étude technico-économique menée dans ce travail montre que ce matériau est mieux adapté aux bâtiments qu'aux panneaux solaires.

**Report title:** METROLOGY AND MODELING OF HEAT TRANSFERT IN LOW COST NATURAL COMPOSITES FOR THERMAL INSULATING APPLIED IN SOLAR PANELS.

**Keywords:** Thermal insulation, Solar panels, Thermal conductivity, Biocomposites, Date palm fiber (DPF), COMSOL, thermal building;

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

### **Abstract:**

This thesis deals with the experimental study of the thermal and mechanical properties of a new biocomposite composed of gypsum matrix reinforced with natural fibers for use as thermal insulation in solar panels and building sector. The mechanical strength of gypsum decreases with increasing fibers concentration. For 10% of FBPD adding, the compressive strength of gypsum at 28 days decreases to 5.4 MPa and to 2.8 MPa for the flexural strength. The thermal conductivity of gypsum decreases with increasing fibers concentration. It decreases from 0.44 to 0.15W/m<sup>2</sup>K, for 10% of fibers adding. The DPF concentration had a significant effect on the mechanical and thermal properties of composite compared to the size effect. The correlation between thermal conductivity and mechanical strength was also studied. Parallel to this experimental work, a numerical study based on the finite element method is established to predict the thermal conductivity of heterogeneous materials. Composites studied in this part of thesis are constituted of polymeric matrix reinforced with metal particles. The numerical approach for the prediction of the effective thermal conductivity of the polymer composite is subsequently applied to estimate the effective thermal conductivity of biocomposites developed in this work. The scope of this biocomposite is in thermal insulation of solar panels and in buildings. The technical and economical analysis presented in this work shows that this new material is better suited for buildings than the solar panels.