



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou  
Faculté du Génie de la Construction  
Département de Génie Mécanique

## Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Génie Des Matériaux

### *Thème*

***Élaboration et caractérisation d'un matériau composite  
Bois-Ciment***

**Proposé et dirigé par :**  
Mme Sabrina MENDIL

**Présenté par :**  
M. Salem LOUNAS  
M. Mohamed Ouahib SAIDJ

Mémoire soutenu le : **30/09/2023** devant le jury d'examen composé de :

M. Rabah FERHOUM  
M. Bachir KACIMI  
M<sup>me</sup> Sabrina MENDIL

Professeur à l'UMMTO  
Maitre-Assistant A à l'UMMTO  
Maître de Conférences à l'UMMTO

Président  
Examineur  
Encadreur

Promotion : 2022 / 2023

## ***Remerciements***

Nous tenons à remercier tout d'abord *ALLAH* le tout puissant *de* nous avoir donné la santé, la volonté et la faculté de réaliser ce mémoire de fin d'études.

Nous tenons ici à remercier sincèrement tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, particulièrement notre directrice de recherche madame *Sabrina MENDIL* qui s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Une fois de plus, merci pour votre direction, vos orientations et votre compréhension.

Nos remerciements vont également à l'équipe du laboratoire de génie civile qui nous ont ouvert ses portes pour la réalisation et l'élaboration de nos composites.

On tient aussi à exprimer nos vifs remerciements au professeur *Mr Said MAKHLOUF* de nous avoir ouvert les portes de son laboratoire de recherche « Laboratoire de Mécanique, Structure & Energétique (*LMSE*) » pour la réalisation des tests de conductivité thermique.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire.

<b><i>Introduction générale</i></b> .....	<b>1</b>
<b><i>Références</i></b> .....	<b>3</b>
<b><i>Introduction :</i></b> .....	<b>5</b>
<b><i>I. Le bois : Biomasse Végétale</i></b> .....	<b>6</b>
<b>I.1. Structure du bois</b> .....	<b>6</b>
I.1.1. Structure macroscopique .....	6
I.1.2. Structure microscopique du bois .....	7
<b>I.2. Anatomie du tronc :</b> .....	<b>8</b>
<b>I.3. Composition chimique du bois</b> .....	<b>9</b>
I.3.1. Cellulose .....	9
I.3.2. Hémicellulose.....	10
I.3.3. Lignine .....	10
I.3.4. Extractibles.....	11
I.3.5. Cendres .....	12
I.3.6. Pectine.....	12
<b>I.4. Propriétés du bois :</b> .....	<b>12</b>
I.4.1. Propriétés Mécaniques .....	12
I.4.2. Propriétés Thermiques .....	13
I.4.3. Propriétés Physiques .....	13
<b><i>II. Le Ciment :</i></b> .....	<b>17</b>
<b>II.1. Composition chimique du ciment</b> .....	<b>17</b>
<b>II.2. Le ciment portland :</b> .....	<b>17</b>
<b>II.3. Mécanisme d’hydratation</b> .....	<b>18</b>
<b><i>Conclusion</i></b> .....	<b>20</b>
<b><i>Références :</i></b> .....	<b>21</b>
<b><i>II.1. Introduction :</i></b> .....	<b>25</b>
<b><i>II.2. Généralités sur les matériaux composites</i></b> .....	<b>25</b>
<b>II.2.1. Définition d’un matériau composite :</b> .....	<b>25</b>
<b>II.2.2. Constituants des matériaux composites</b> .....	<b>26</b>
II.2.2.1. Renforts .....	26
II.2.2.2. Matrices : .....	26
<b><i>II.3. Composites Bois-Ciment (CBC)</i></b> .....	<b>27</b>
<b>II.3.1. Effet du bois sur la prise du ciment</b> .....	<b>27</b>
<b>II.3.2. Propriétés des composites Bois-Ciment</b> .....	<b>29</b>
<b>II.3.3. Caractéristiques des composites Bois-Ciment</b> .....	<b>29</b>
<b>II.3.4. Compatibilité Bois-Ciment</b> .....	<b>30</b>
<b>II.3.5. Traitements du bois permettant d’améliorer la compatibilité Bois-Ciment</b> .....	<b>31</b>

II.3.5.1. Traitements physiques .....	31
II.3.5.2. Traitements chimiques .....	32
<b>II.4. Synthèse des travaux réalisés sur les composites bois-ciment.....</b>	<b>33</b>
<b>II.4.1 Travaux de F. MNASRI.....</b>	<b>33</b>
<b>II.4.2 Travaux de A. KARECHE .....</b>	<b>33</b>
<b>II.4.3 Travaux de M. LAHOUIOUI.....</b>	<b>35</b>
<b>II.4.4 Travaux de M. Li : .....</b>	<b>36</b>
<b>II.4.5 Travaux de Y. Daniel AGOSSOU.....</b>	<b>38</b>
<b>II.4.6 Travaux de F. TOULOUM.....</b>	<b>39</b>
<b>II.4.8 Travaux de L. ANES.....</b>	<b>40</b>
<b>II.5. Conclusion.....</b>	<b>41</b>
<b>References: .....</b>	<b>42</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>48</b>
<b>III.1. Matériaux d'étude.....</b>	<b>48</b>
<b>III.1.1. La farine du bois .....</b>	<b>48</b>
III.1.1.1. Caractérisation de la farine du bois .....	48
III.1.1.2. Tamisage de la farine du bois .....	48
III.1.1.3. Mesure de la masse volumique de la farine du bois .....	49
III.1.1.4. Traitement alcalin de la farine du bois avec du NaOH (5%) .....	50
III.1.1.5. Analyse d'absorption d'eau de la farine du bois par capillarité :.....	51
III.1.1.6. Mesure du taux d'humidité de la farine du bois .....	52
III.1.1.7. Mesure de la rétractabilité volumique R (%) (Stabilité dimensionnelle).....	53
<b>III.1.2. Le Ciment .....</b>	<b>53</b>
<b>III.1.3. L'eau de gâchage : .....</b>	<b>54</b>
<b>III.2. Procédure expérimentale et d'élaboration.....</b>	<b>54</b>
<b>III.2.1. Préparation des échantillons.....</b>	<b>54</b>
III.2.1.1. Formulation .....	54
<b>III.2.2. Préparation de pâte Bois-Ciment :.....</b>	<b>55</b>
<b>III.3. Caractérisation des composites Bois-Ciment.....</b>	<b>57</b>
<b>III.3.1. Mesure de la densité .....</b>	<b>57</b>
<b>III.3.2. Mesure du taux d'absorption par capillarité des composites Bois-Ciment :.....</b>	<b>58</b>
<b>III.3.3. Mesure du taux d'absorption par immersion totale pendant 24h.....</b>	<b>59</b>
<b>III.3.4. Rétractabilité volumique des Composites Bois-Ciment .....</b>	<b>60</b>
<b>III.4. Techniques expérimentales .....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.1. Analyse par spectrométrie infrarouge (IR) de la farine du bois traitée et non traitée avec du NaOH :.....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.2. Caractérisation mécanique des composites Bois-Ciment :.....</b>	<b>61</b>

III.4.2.1. Essai de flexion trois points.....	61
III.4.2.2. Essai de compression.....	62
<b>III.4.3. Caractérisation thermique : Mesure de conductivité thermique .....</b>	<b>63</b>
III.4.3.1. Principe.....	63
III.4.3.2. Préparation des échantillons .....	65
<b>III.5. Caractérisation morphologique : Analyse par Microscopie électronique à balayage (MEB) .....</b>	<b>65</b>
<b>III.5.1. Imagerie par électrons secondaires (SE).....</b>	<b>65</b>
<b>III.5.2. Imagerie par électrons rétrodiffusés (BSE).....</b>	<b>66</b>
<b>III.5.3. Préparation des échantillons au MEB : .....</b>	<b>66</b>
<b>Références.....</b>	<b>67</b>
<b>IV. Introduction.....</b>	<b>70</b>
<b>IV.1. Caractérisation de la farine du bois .....</b>	<b>70</b>
<b>IV.1.1. Mesure de la masse volumique de la farine du bois.....</b>	<b>70</b>
<b>IV.1.2. Analyse par Infrarouge (IRTF) de la farine du bois traitée et non traitée avec du NaOH.....</b>	<b>70</b>
<b>IV.1.3. Mesure du taux d'absorption par capillarité de la farine du bois :.....</b>	<b>72</b>
<b>IV.1.5. Rétractabilité volumique (R%) de la farine du bois (Stabilité dimensionnelle) : .....</b>	<b>74</b>
<b>IV.2. Caractérisation du composite Bois-Ciment (CBC) .....</b>	<b>75</b>
<b>IV.2.1. Masse volumique des composites Bois-Ciment.....</b>	<b>75</b>
<b>IV.2.2. Mesure du taux d'absorption d'eau par capillarité du composite en fonction de la teneur en Bois : .....</b>	<b>76</b>
<b>IV. 2.3. Mesure du taux d'absorption d'eau par immersion totale (24h) des composites en fonction de la teneur en bois .....</b>	<b>78</b>
IV.2.4.1. Résistance à la Flexion.....	79
IV.2.4.2. Résistance en Compression : .....	80
<b>IV.2.5. Mesure de Conductivité thermique (<math>\lambda</math>) : .....</b>	<b>81</b>
<b>IV.2.6. Caractérisation morphologique par Microscopie électronique à balayage (MEB) .....</b>	<b>85</b>
<b>IV.7. Conclusion : .....</b>	<b>88</b>
<b>Références.....</b>	<b>89</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>90</b>

**Chapitre I : Recherche bibliographique sur le Bois et le Ciment**

<b>Fig.I.1.</b> Coupe transversale d'un tronc d'arbre .....	5
<b>Fig.I.2.</b> Structure macroscopique du bois .....	7
<b>Fig.I.3.</b> Organisation cellulaire d'un résineux .....	8
<b>Fig.I.4.</b> Coupe transversale de chêne .....	8
<b>Fig.I.5.</b> Composition chimique du bois (Fengel, D., & Wegener 2011) .....	9
<b>Fig.I.6.</b> Formule chimique de la cellulose .....	10
<b>Fig.I.7.</b> Structure des chaînes polymères des hémicelluloses .....	10
<b>Fig.I.8.</b> Précurseurs de la biosynthèse de la lignine .....	11
<b>Fig.I.9.</b> Structure moléculaire de la lignine (Saha et al. 2016) .....	11
<b>Fig.I.10.</b> Structure moléculaire de Pectine (Vi and Thi 2011).....	12
<b>Fig.I.11.</b> Courbe contrainte déformation du matériau bois [Abanto (2011)].....	13
<b>Fig.I.12.</b> Représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois (Natterer, 2004) .....	14
<b>Fig.I.13.</b> Rétractabilité du bois en fonction du taux d'humidité [Govin (2004)] .....	16
<b>Fig.I.14.</b> Courbe caractéristique de calorimètre isotherme d'un ciment (Alexa Bresson, 2006) .....	18

**Chapitre II : Composites Bois-Ciment**

<b>Fig.II.1.</b> Matériau composite .....	26
<b>Fig.II.2.</b> Famille des matrices .....	27
<b>Fig.II.3.</b> Facteurs influençant la prise du ciment .....	29
<b>Fig.II.4.</b> Panneaux composites bois-ciment dans les coffrages .....	38

**Chapitre III : Matériaux d'étude et Techniques Expérimentales**

<b>Fig.III.1.</b> Opération du tamisage de la farine du bois.....	48
<b>Fig.III.2.</b> Presse hydraulique .....	49
<b>Fig.III.3.</b> Procédure du traitement alcalin avec NaOH (5%). (a) : L'agitation de l'ensemble sciure du bois et solution NaOH (5%). (b) : Contrôle du PH avec un PH-mètre. (c) : Filtrage de la farine du bois. (d) : Farine du bois traitée après étuvage à 100°C.....	50
<b>Fig.III.4.</b> Essai d'absorption par capillarité des pastilles en farine de bois traitée et non traitée avec une solution alcaline (NaOH). .....	52
<b>Fig.III.5.</b> Ciment portland Matine utilisé .....	54
<b>Fig.III.6.</b> Préparation de la pâte Bois-Ciment .....	56
<b>Fig.III.7.</b> Procédure d'élaboration des composites Bois-Ciment. (a) et (b) : moulage des éprouvettes. (c) et (d) : démoulage des éprouvettes. (e) et (f) : éprouvettes après 28 jours de séchage. ....	57
<b>Fig.III.8.</b> Dispositif expérimental de l'essai d'absorption par capillarité.....	58
<b>Fig.III.9.</b> Essai d'absorption par capillarité des composites Bois-Ciment .....	59
<b>Fig.III.10.</b> Essai d'immersion totale dans l'eau des composites Bois-Ciment.....	59
<b>Fig.III.11.</b> Spectromètre IRTF et (b) : Échantillons de la farine du bois (1 : Non traitée, 2 : Traitée) .....	61
<b>Fig.III.12.</b> Principe de l'essai de flexion 3 points .....	61

<b>Fig.III.13.</b> Essai de compression .....	62
<b>Fig.III.14.</b> Essais mécaniques. (a) : Essai de flexion à 3 points. (b) : Essai de compression ..	62
<b>Fig.III.15.</b> Dispositif de mesure de la conductivité thermique .....	65
<b>Fig.III.16.</b> MEB « PHILIPS XL 30 » .....	66

#### Chapitre IV : Résultats et discussions

<b>Fig.IV.1.</b> Résultats d'analyse par IFTR de la farine de bois non traitée et traitée avec du NaOH. ....	67
<b>Fig.IV.2.</b> Evolution de l'absorption en eau par capillarité de la farine du bois traitée et non traitée avec une solution alcaline (NaOH). ....	73
<b>Fig.IV.3.</b> Evolution de la masse volumique des composite Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois. ....	75
<b>Fig.IV.4.</b> Evolution de la masse volumique des composite Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois sou forme d'un Histogramme. ....	76
<b>Fig.IV.5.</b> Evolution de l'absorption par capillarité des composite Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois. ....	77
<b>Fig.IV.6.</b> Evolution du taux d'absorption d'eau par immersion totale pendant 24h des composites Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois. ....	78
<b>Fig.IV.7.</b> Histogramme présentant l'évolution des contraintes de Flexion des composites Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois. ....	79
<b>Fig.IV.8.</b> Histogramme de l'évolution des contraintes de compression des composites Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois. ....	80
<b>Fig.IV.9.</b> Courbe montrant l'évolution de la Conductivité thermique des composites en fonction de la teneur en Bois. ....	82
<b>Fig.IV.10.</b> Histogramme montrant l'évolution de la Conductivité thermique des composites en fonction de la teneur en Bois. ....	83
<b>Fig.IV.11.</b> Micrographies électroniques en mode électrons secondaire et rétrodiffusés des composites à 2% en bois. ....	85
<b>Fig.IV.12.</b> Micrographies électroniques en mode électrons secondaire et rétrodiffusés des composites à 10% en bois. ....	86
<b>Fig.IV.13.</b> Micrographies électroniques en mode électrons secondaire et rétrodiffusés des composites à 13% en bois. ....	87

**Chapitre I : Recherche bibliographique sur le Bois et le Ciment**

**Tableau.I.1.** Composition chimique du ciment .....  
**Tableau.I.3.** Propriétés mécanique du ciment ..... 20

**Chapitre III : Matériaux d'étude et Techniques Expérimentales**

**Tableau.III.1.** Formulations des composites bois-ciment (g/cm<sup>3</sup>)..... 55  
**Tableau.III.2.** Dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon la norme NF EN 196-1 ..... 62

**Chapitre IV : Résultats et discussions**

**Tableau.IV.1.** Résultats de Mesure de la masse volumique de la sciure du bois..... 70  
**Tableau.IV.2.** les bandes d'absorption pour la fibre cellulosique ..... 71  
**Tableau.IV.3.** Taux d'absorption d'eau par capillarité de la farine du bois en fonction du temps. .... 73  
**Tableau.IV.4.** Rétractabilité volumique (Stabilité dimensionnelle) ..... 74  
**Tableau.IV.5.** Masse volumique des composites..... 75  
**Tableau.IV.6.** Taux d'absorption par capillarité des composites Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois. .... 77  
**Tableau.IV.7.** Taux d'absorption des composites en fonction de la teneur en bois par immersion totale après 24h. .... 78  
**Tableau.IV.8.** Quelques résultats de travaux réalisés sur les composites à base du bois. .... 81  
**Tableau.IV.9.** Données de la mesure de la conductivité thermique..... 81  
**Tableau.IV. 10.**Résultats de la mesure de la conductivité thermique des composites..... 82  
**Tableau.IV.11.** Travaux réalisés la mesure de la conductivité thermique des composites à base de différentes essences du bois..... 84

### Introduction générale

De nos jours, préserver l'environnement et adopter une politique de développement durable sont d'une priorité de grande importance et d'un intérêt majeur pour les générations à venir. En effet le bilan environnemental est très inquiétant, c'est la principale motivation qui a poussé les chercheurs dans le domaine des matériaux à proposer des matériaux écologiques, biodégradables, légers et performants avec un prix moins couteux. Afin de répondre au mieux à ces préoccupations, le secteur des matériaux composites s'est tourné vers une nouvelle gamme de produits plus respectueux de l'environnement ; les matériaux bio-composites.

Dans ce contexte particulier, les matériaux composites bois-ciment se présentent comme une solution économique et technologique intéressante, à explorer pour limiter l'impact environnemental du bâtiment [1-5]. En effet, ce type de matériaux possède de nombreux avantages comparés aux fibres d'amiantes à la laine de verre et à la laine de roche aux caractères cancérigènes provoquant avec certitude des irritations cutanées et respiratoires lors de leur pose.

En outre, les matériaux composites à matrice cimentaire et à renfort fibres ou particules de bois sont écologique de source renouvelable, très abondant, de faibles coûts, d'une part ses performances mécaniques, acoustiques et thermiques d'autre part. Ce qui les placent comme un bon candidat et une solution alternative innovante dans le secteur de la construction grâce à leur contribution dans la régulation de l'humidité ambiante offrant un confort thermique et un climat intérieur convivial ainsi qu'une excellente isolation phonique de par leurs qualités d'amortissement des sons, limitant ainsi l'impact environnemental en favorisant la valorisation des déchets lignocellulosiques, en réduisant la consommation d'énergie et en évitant la pollution due à l'utilisation des matériaux synthétiques non dégradables.

Le présent travail s'intéresse d'abord à l'élaboration d'un composite à base d'une matrice cimentaire renforcé avec des particules de bois rouge à différentes teneurs. Ensuite, l'étude de ses caractéristiques physico-chimiques, mécaniques, et thermiques. Ce travail consiste également à étudier l'influence de la teneur de ces particules du bois sur le comportement physico-chimiques, mécaniques, et thermiques des composites élaborés.

L'objectif principal de cette étude est de définir et d'optimiser la teneur en bois adéquate qui permet d'élaborer et de proposer un matériau composite performant et écologique aux caractéristiques mécaniques acceptables et thermiques élevées à matrice cimentaire renforcée par des particules du bois rouge sous forme de sciure valorisant ainsi ce déchet. Autrement dit, il s'agit de trouver un compromis entre les caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et thermiques et d'optimiser la compatibilité chimique entre ces deux matériaux afin d'utiliser ce composite comme un matériau léger et isolant dans le bâtiment.

Ce mémoire est scindé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur le bois et le ciment, mettant en évidence les différentes caractéristiques et propriétés de ces deux constituants en l'occurrence la structure du bois, sa composition chimique ainsi que ses propriétés mécaniques, thermiques, physiques et hygroscopiques. Les propriétés mécaniques et hydriques ainsi que la composition chimique du ciment ont été aussi présenté.

Le deuxième chapitre constitue une étude bibliographique sur les matériaux composites en particulier sur le composite bois-ciment en présentant ses propriétés et caractéristiques, l'effet du bois sur la prise du ciment et la compatibilité entre ces deux constituants en évoquant les différents traitements permettant d'améliorer la compatibilité entre ces deux derniers. De plus une synthèse des travaux réalisés sur les composites bois-ciment a été réalisée.

Le troisième chapitre présente la partie expérimentale de ce travail, consacré à la présentation et à la caractérisation des matériaux d'étude ainsi qu'à la procédure expérimentale d'élaboration de nos composites bois-ciment en mettant en évidence les différentes techniques utilisées pour la caractérisation de notre composite.

Le quatrième chapitre est dédié à la présentation, traitement et discussion des résultats obtenus.

Ce travail est finalisé par une conclusion générale et des perspectives. Enfin, nous espérons que le présent travail apportera une contribution au développement et à la valorisation des déchets lignocellulosique comme un matériau isolant dans le bâtiment.

---

## Références

- [1] Li M., Khelifa M., El Ganaoui M. Mechanical characterization of concrete containing wood shavings as aggregates. *Int J Sustainable Built Environ* 2017; 6:587–596.
- [2] Constatinos A.B., Athina G.G., Elena G., Sevastianos M., Yiannis M., Dimitris P.L. European residential buildings stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. *Build Environ* 2007;42:1298-1314.
- [3] Amziane S., Sonebi M. Overview on bio-based building material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters* 2016;1: 31- 38.
- [4] Wolfe R.W., Gjinolli A. Cement-Bonded Wood Composites as an Engineering Material. *Proceedings, Forest Product Society* 1997;84-91.
- [5] Pacheco-Torgal F., Jalali S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres. A review. *Constr Build Mater* 2011 ;25(2) :575–581. Cité par Mengya Li, "Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.

**Chapitre I :**  
**Recherche bibliographique sur le**  
**Bois et le Ciment**

**Introduction :**

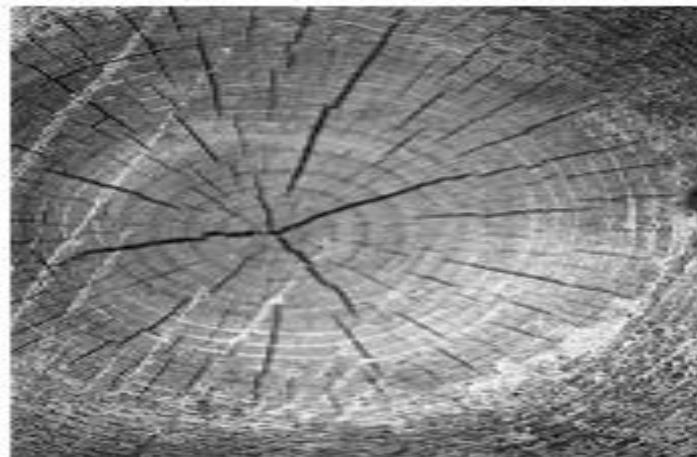
Le bois est un matériau composite, tant en terme structural qu'au niveau de sa composition chimique. C'est une ressource naturelle renouvelable composée d'un ensemble complexe de cellules, de forme de tubes, qui assure une fonction biologique pendant la vie de l'arbre, c'est une matière ligneuse élaborée par un organisme vivant au milieu d'un écosystème.

C'est un matériau à caractère hétérogène ; ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et biologiques varient extrêmement d'une espèce à l'autre. Sa structure est cellulaire, poreuse et fortement hygroscopique.

Il est sans doute l'éco-matériau par excellence. Employé par l'homme depuis longtemps, son usage a influencé l'évolution des civilisations. Ses nombreuses qualités le rendent incontournable, intemporel et source d'innovations.

Dans ce premier chapitre, nous présentons une étude bibliographique sur le bois et le ciment.

La première partie est consacrée à la présentation du bois ; sa structure, son anatomie et sa composition chimique. Puis, on présente ses propriétés ; mécaniques, thermiques et physiques qui sont très intéressantes dans ce travail.



**Fig.I.1.** Coupe transversale d'un tronc d'arbre [1]

## I. Le bois : Biomasse Végétale

### I.1. Structure du bois

#### I.1.1. Structure macroscopique

Le tronc d'un arbre est constitué de bois, d'écorce et d'une couche mince située entre le bois et l'écorce, appelée cambium (voir Figure). La fonction de cette couche est de produire les cellules du bois et de l'écorce. Le cambium est la partie la plus importante de l'arbre. En effet, les cellules mères qui y sont présentes participent chaque année à son développement par division cellulaire. Il donne naissance au liber vers l'extérieur et au bois d'aubier vers l'intérieur du tronc.

Le bois a pour origine l'arbre et le matériau qui nous intéresse le plus est particulièrement celui tiré du tronc. Pris dans son ensemble, le tronc comprend :

**1. Le rhytidome** est la partie externe de l'écorce. Il protège l'arbre contre les attaques biologiques (insectes), contre les gelures, contre le dessèchement (coup de soleil) et contre les blessures (chutes dépièrres).

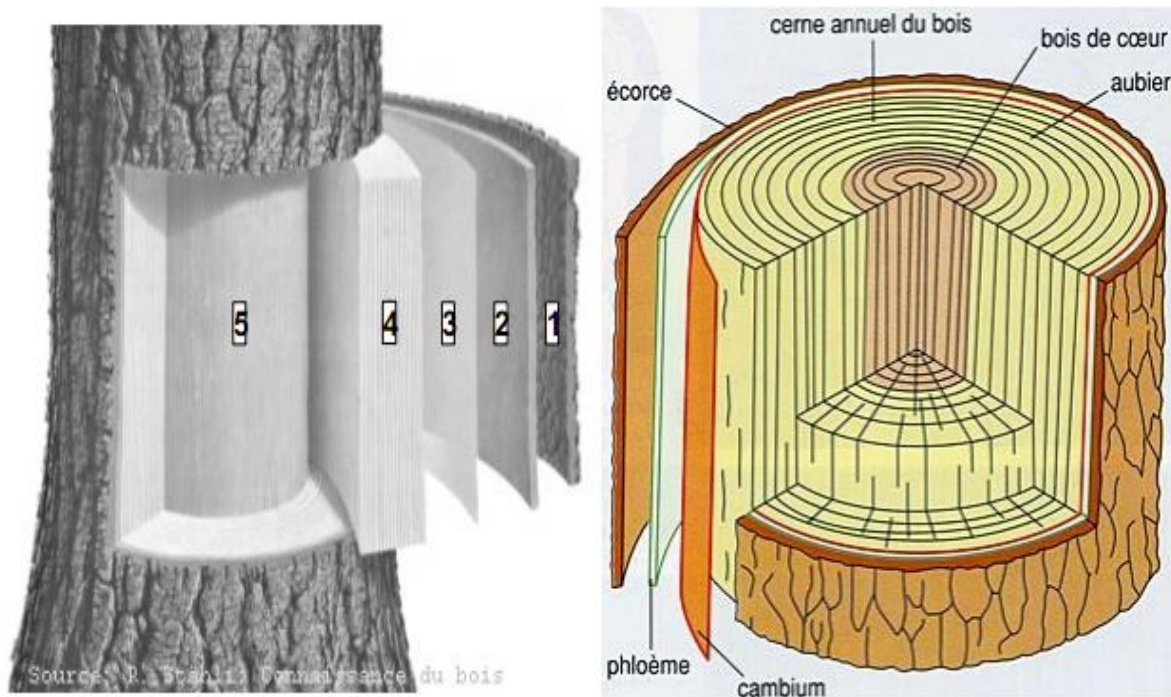
**2. Le liber** est la partie interne de l'écorce. C'est l'appareil conducteur de la sève élaborée (descendante) formée de glucose transformé en amidon. C'est pourquoi une blessure du liber (par ex. gravure au couteau de poche) peut freiner ou stopper la croissance de toute une partie de l'arbre.

**3. le cambium** est le tissu de croissance de l'arbre. Les cellules vivantes du cambium se multiplient par division, croissent jusqu'à leur taille définitive, se rigidifient (croissance des parois cellulaires) et meurent. Ces vaisseaux cessent peu à peu d'alimenter l'arbre après quelques années. Ils se bouchent et s'imprègnent de différentes substances : tanins, résines, etc. La croissance se développe principalement dans trois directions : longitudinale (croissance en hauteur), radiale vers l'intérieur (xylème, formation du bois) et radiale vers l'extérieur (phloème, formation du liber).

**4. l'aubier** représente le système conducteur de la nourriture de l'arbre, des racines à la couronne. Il transporte la sève brute (montante), un mélange de sels nutritifs dissous dans l'eau que les racines prélèvent du sol. L'aubier reprend aussi l'effort principal des charges

mécaniques (en traction et en compression) dus aux vents, à la neige et au poids propre de la couronne

**5. le bois de cœur** (ou le bois parfait ou duramen) est l'élément de soutien central de l'arbre. En revanche, il ne remplit plus de fonction conductrice des substances nutritives. Le centre du tronc, la moelle, peut, à partir d'un certain âge, être creuse [1].



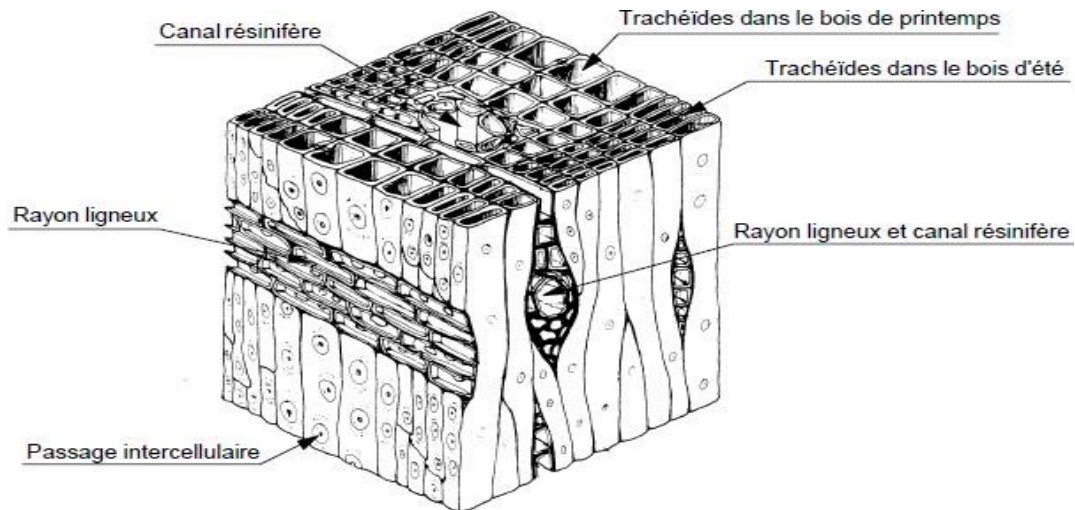
**Fig.I.2.** Structure macroscopique du bois [1]

### I.1.2. Structure microscopique du bois

Le bois est formé essentiellement de trachéides orientées dans le sens longitudinal. On peut distinguer des trachéides de bois de printemps ou bois initial et celles de bois d'été ou bois final. Elles sont de forme allongée, de section transversale polygonale et creuse. Les trachéides de bois de printemps ont des parois minces avec un diamètre intérieur important ; ce qui donne une masse volumique faible. Au contraire, les trachéides de bois d'été ont des parois épaisses mais un diamètre intérieur faible et une masse volumique importante. Ceci est visualisé sur la **figure I.2** où l'on distingue nettement l'interface entre le bois initial et le bois final [2].

Ces trachéides possèdent, sur leurs parois, des ponctuations aréolées qui jouent le rôle de régulateur des écoulements. Ils sont plus larges et plus nombreux dans le bois d'été.

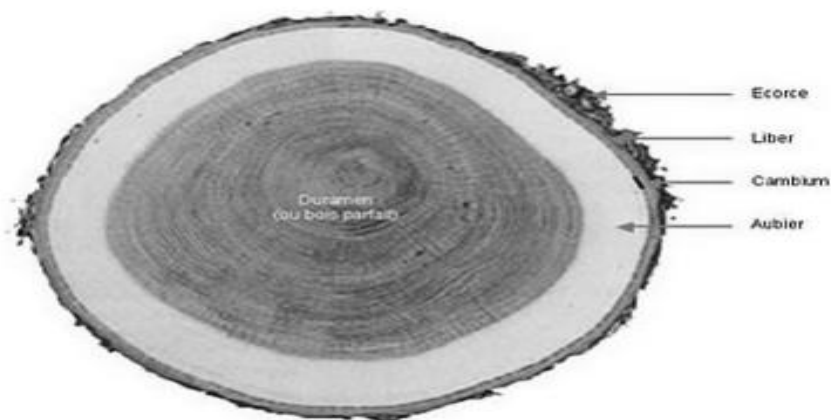
Parallèlement aux trachéides, les canaux résinifères, entourés de cellules qui produisent de la résine, assurent la circulation de celle-ci. Dans le sens radial, les rayons ligneux transportent la sève [2].



**Fig.I.3.** Organisation cellulaire d'un résineux [2]

## I.2. Anatomie du tronc :

Les arbres croissent en épaisseur grâce à l'activité d'une couche mono-strate de tissu ; le Cambium. Celui-ci produit du Liber, un xylème du point de vue botanique, vers l'intérieur et de l'Ecorce, un phloème, vers l'extérieur. Etant donné que les cellules du cambium sont en division continue, les cellules du xylème, les premières formées s'éloignent progressivement du cambium, tout en subissant des modifications physico-chimiques qui en font un cœur, ou duramen, bien distinct [1].



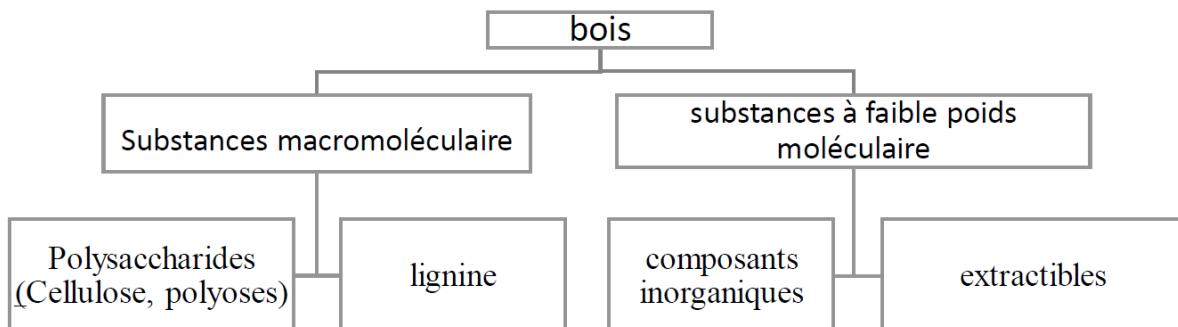
**Fig.I.4.** Coupe transversale de chêne [1]

### I.3. Composition chimique du bois

Les principaux constituants chimiques du bois sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Dans une proportion beaucoup plus faible il contient des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques [Michaud (2003)] [3].

La proportion d'holocellulose (cellulose, hémicelluloses) et de lignine varie beaucoup selon les essences du bois [Monties (1980)] et d'une couche à une autre de la paroi cellulaire [Navi and Heger (2005)] [3].

La teneur moyenne des différents constituants varie en fonction des essences de bois. La répartition moyenne des polymères selon l'essence de bois est présentée dans le tableau suivant :

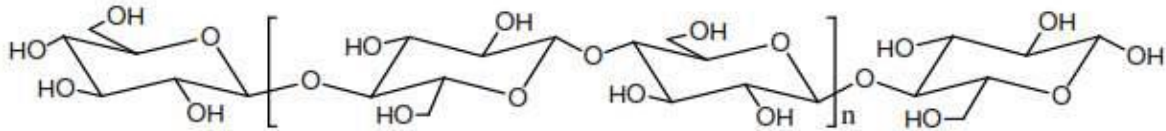


**Fig.I.5.** Composition chimique du bois (Fengel, D., & Wegener 2011) [4]

#### I.3.1. Cellulose

La cellulose est le constituant structural principal des parois cellulaires végétales, organisée sous forme de micro fibrilles. C'est un homopolymère, dont l'unité de base est le glucose, de formule  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . C'est la substance naturelle renouvelable la plus abondante sur terre, fibreuse, dure insoluble dans l'eau grâce à son organisation, qui est généralement cristalline.

Elle assure la protection et le soutien dans les organismes végétaux en formant des liaisons hydrogène intermoléculaire et la liaison de Van der Waals entre la cellulose et avec des constituants d'hémicellulose.

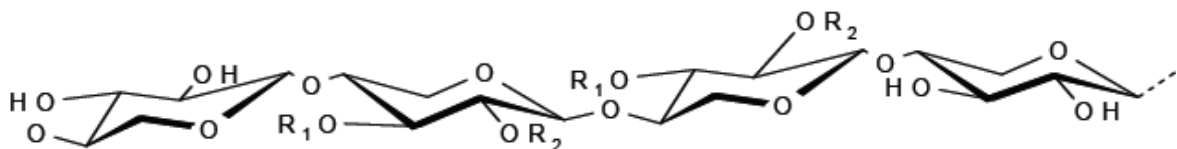


**Fig.I.6.** Formule chimique de la cellulose [1]

### I.3.2. Hémicellulose

Les hémicelluloses sont des polysaccharides, qui se trouvent dans tous les végétaux caractérisés par des masses molaires beaucoup plus faibles que celle de la cellulose et par des structures moins régulières à la fois par la présence de différentes unités dans leurs chaînes et/ou de ramifications [5]. Elle est composée de sucres neutres : xylose, arabinose, galactose, glucose, mannose, et d'acides uroniques et joue le rôle de compatibilisant à l'interface entre la cellulose et la lignine.

La structure chimique de l'hémicellulose est variée selon l'origine de l'espèce végétale, le type cellulaire, la localisation dans la paroi ou bien encore l'âge des tissus. Ce polymère est caractérisé aussi par la solubilité dans le milieu alcalin. Le degré de polymérisation de ce polysaccharide à l'état naturel est compris entre 200 et 300 selon l'espèce [6].

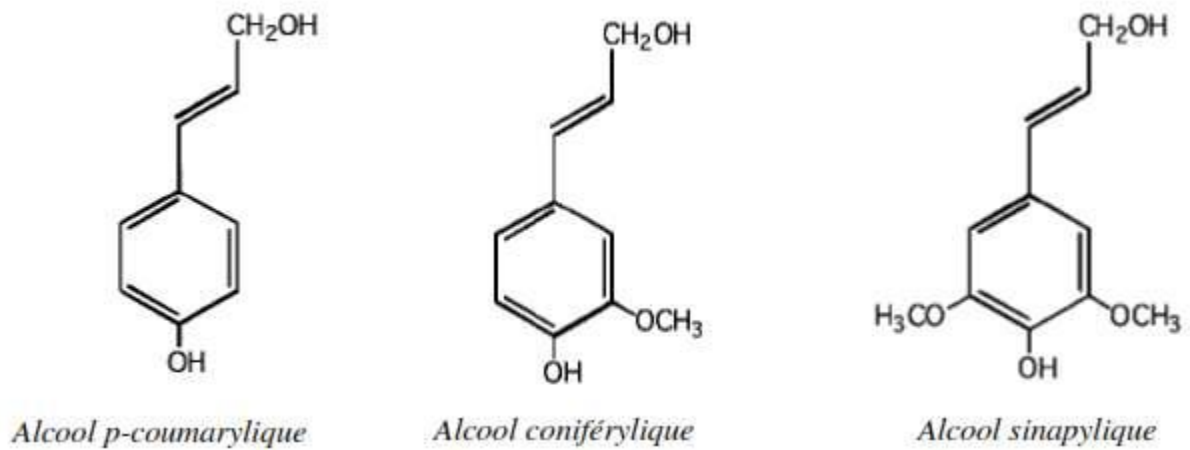


**Fig.I.7.** Structure des chaînes polymères des hémicelluloses [7].

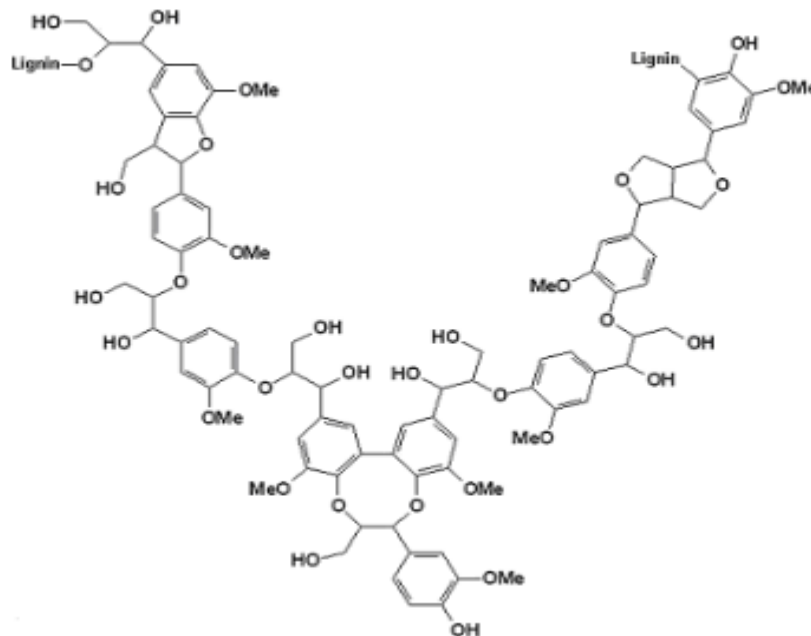
### I.3.3. Lignine

C'est un polymère tridimensionnel, amorphe, de nature phénolique et hydrophobe, qui assure la rigidité de la paroi cellulaire, elle est chimiquement très différente de la cellulose et des hémicelluloses. Dotée d'une structure très hétérogène qui varie en fonction des différentes espèces végétales.

La lignine est biosynthétisée à partir de trois alcools phénoliques : les alcools pcoumarylique, coniférylique et sinapylique.



**Fig.I.8.** Précurseurs de la biosynthèse de la lignine [1]



**Fig.I.9.** Structure moléculaire de la lignine (Saha et al. 2016). [8]

### I.3.4. Extractibles

Les extractibles sont des composés de faible poids moléculaire situés dans la structure poreuse du bois qui peuvent être extraites depuis ce dernier par des solvants polaires (acétone, eau, éthanol) ou apolaires (toluène, cyclohexane, dichlorométhane).

La teneur et la composition de ces extractibles varient fortement d'une essence à l'autre.

Cependant, Il existe trois types d'extractibles :

Les terpénoïdes (myrcène, limonène,  $\alpha$ -pinène...), les polyphénols (tannins condensés et hydrolysables, flavonoïdes, tropolones, stilbènes, quinones...) et les composés aliphatiques [1].

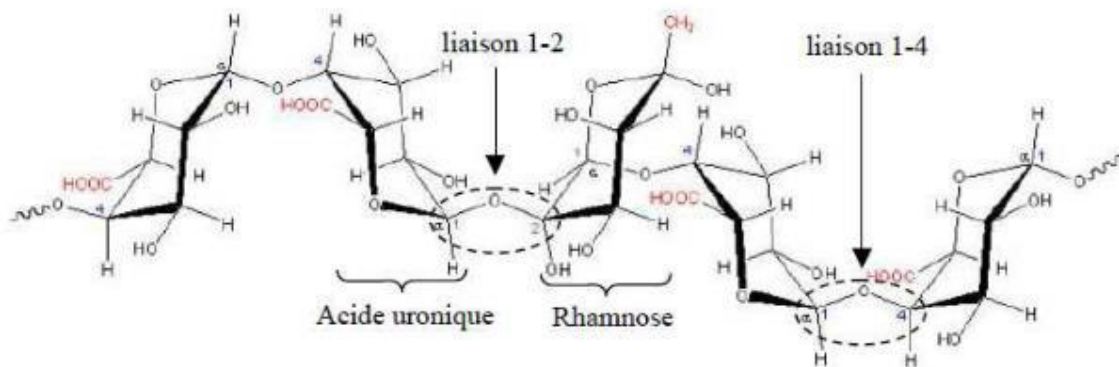
### I.3.5. Cendres

Ce sont les résidus minéraux obtenus après combustion du bois à haute température 500°C.

Ils représentent généralement moins de 1 % de la masse sèche du bois en zone tempérée, ce pourcentage étant souvent supérieur en zone tropicale [1].

### I.3.6. Pectine

La pectine est un polymère acide, composée d'une chaîne d'acide uronique (l'acide uronique est obtenu par oxydation du dernier carbone de sucre) [9]. La macromolécule de pectine ressemble à un zig-zig ce qui procure la flexibilité à la plante [10].



**Fig.I.10.** Structure moléculaire de Pectine (*Vi and Thi 2011*) [8]

## I.4. Propriétés du bois :

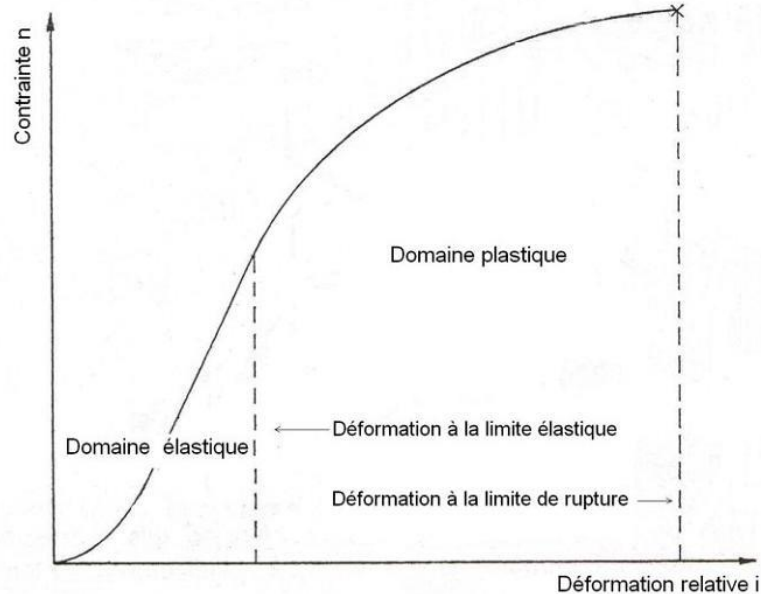
### I.4.1. Propriétés Mécaniques

Le bois est un matériau particulier dont ses propriétés varient en fonction de différents facteurs.

La grande variabilité anatomique et constitutive des fibres végétales, associés aux traitements qu'elles ont subi, confèrent à ces dernières des propriétés mécaniques diverses [*Bledzki. and Gassan (1999); Baley (2004); John and Thomas (2008)*] [3].

De part sa structure cristalline, la cellulose est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé qui de l'ordre de 136 GPA pour 75 GPA pour la fibre de verre [3].

En effet, le bois est un matériau doté d'une bonne résistance à l'usure, à la compression, à l'allongement dans le sens des fibres et en termes de flexibilité, le bois tant à reprendre sa forme lorsqu'il a fléchi.



**Fig.I.11.** Courbe contrainte déformation du matériau bois [Abanto (2011)] [3]

#### I.4.2. Propriétés Thermiques

Les propriétés thermiques de la cellulose s'ont d'une importance capitale. En effet la dégradation thermique est un facteur limitant la fabrication des composites. La plupart des fibres naturelles perdent leurs rigidités des 160°C, la lignine quant à elle se dégrade aux alentours de 200°C, néanmoins, la destruction de l'ordre cristallin n'es visible qu'au-dessus de 320°C par agitation thermique des molécules [Weiss (1983); Ragoubi (2010)], la conductivité thermique du bois et de l'ordre de 0,12 à 0,23 W/m.K [Michaud (2003)], ce qui le prédestine à l'isolation thermique [3].

#### I.4.3. Propriétés Physiques

Les propriétés physiques sont les caractéristiques quantitatives du bois et son comportement aux influences extérieures autres que les forces appliquées, et qui varient selon le type d'essence, les conditions de croissance et le taux d'humidité.

Le bois est considéré comme étant un matériau anisotrope, c'est à dire que ses propriétés varient selon les différentes directions [4].

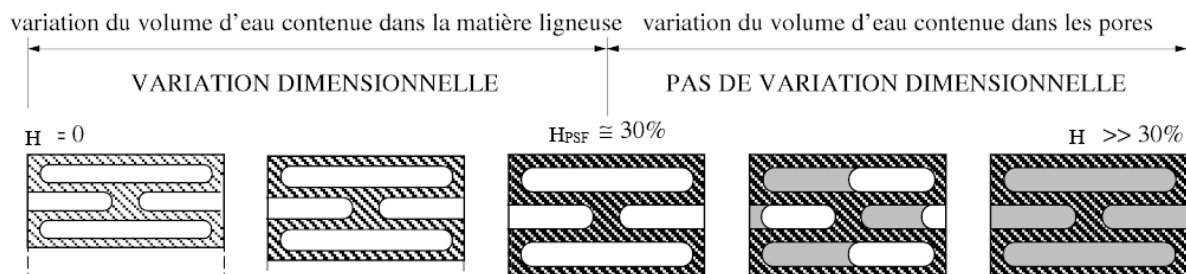
### I.4.3.1. Hygroscopicité du bois

On appelle matériau hygroscopique tout matériau capable de stocker et déstocker de l'eau sous forme liquide dans ses pores. Ainsi, selon le taux d'humidité, une quantité de vapeur d'eau s'y condense ou une quantité d'eau liquide s'y évapore [11].

L'eau joue un rôle de plastifiant pour la chaîne polymère constituant les parois cellulaires et augmente la mobilité des chaînes.

Plusieurs types d'eau circulent dans les bois massifs quelle qu'en soit l'essence ou la densité. Les différents états de l'eau dans le bois sont : [4]

- **Etat anhydre (H=0%)** : il n'y a pas de l'eau libre ou liée dans le bois ; il ne reste que l'eau de constitution qui est contenue dans la matière ligneuse. Il n'en est pas tenu compte dans la mesure du taux d'humidité, elle ne disparaît que si l'on brûle le bois (*Leboucher 2014*). Cet état instable est obtenu par dessiccation totale de bois dans l'étuve à 103 degrés Celsius.
- **L'eau liée ou (d'imprégnation)** :  $0% < H < 30%$  cette eau est dite liée au bois par l'intermédiaire d'une liaison sur les sites hydroxyles disponibles (-OH) des celluloses ou lignines. L'énergie nécessaire pour enlever cette eau est l'énergie du séchage. Le bois mis en œuvre ayant une teneur en eau se situant entre 8 et 20% est toujours dans la plage hygroscopique de l'eau liée.
- **Point de saturation des fibres PSF** :  $H = 30%$ , c'est un point particulier, variant d'une essence à l'autre, où toutes les fibres sont saturées d'eau.
- **L'eau libre** :  $H > 30%$  cette eau remplit les pores du bois (figure 10) et peut conduire à la saturation totale.



**Fig.I.12.** Représentation schématique de l'évolution de la teneur en eau dans le bois (*Natterer, 2004*) [4]

#### I.4.3.1.1. Relation eau/bois

La teneur en eau caractérise l'état hydrique d'un matériau. Elle désigne la quantité d'eau liquide qui peut être contenue dans un matériau poreux. Cette quantité peut être exprimée par un rapport massique ou volumique [11].

Les molécules d'eau sont adsorbées par groupes hydroxyles (-OH) qui se trouvent sur les macromolécules d'hémicelluloses, de cellulose amorphe et au niveau de la lignine dans une moindre mesure, ainsi qu'à la surface des parties cristalline de la cellulose [3].

#### I.4.3.1.2. Mesure du taux d'humidité dans le bois

Le taux d'humidité (H) d'un échantillon de bois s'exprime en pourcentage. Il est égal à la masse d'eau comprise dans l'échantillon (MH) par rapport à la masse anhydre Mo.

Avec MH la masse de l'échantillon à l'air ambiant, M0 la masse de l'échantillon anhydre. La norme française (NF B 51-004 février 1942) préconise de mesurer la masse anhydre d'un échantillon après séchage à  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à obtention d'une masse constante [12].

(H) est une grandeur sans dimension souvent exprimée en pourcentage et pouvant facilement avoir des valeurs supérieures à 100% [3].

$$H = \frac{MH - M_0}{M_0} * 100 \dots\dots\dots I.1$$

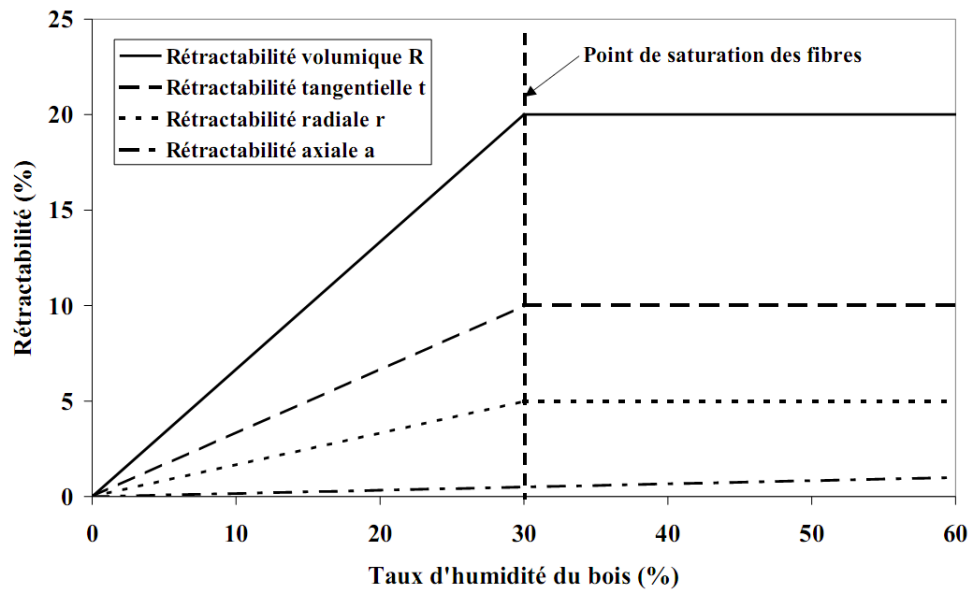
#### I.4.3.2. Rétractabilité volumique (Stabilité dimensionnelle)

Comme conséquence directe de l'instabilité dimensionnelle due à l'hygroscopie du bois, on définit la rétractabilité volumique (figure 15) du bois R.

$$H = \frac{V_H - V_0}{V_0} * 100 \dots\dots\dots I.2$$

**Avec**

$V_H$  volume de l'échantillon au taux d'humidité H,  $V_0$  volume de l'échantillon anhydre [3].



**Fig.I.13.** Rétractabilité du bois en fonction du taux d'humidité [Govin (2004)] [3]

L'évolution de la rétractabilité est quasiment linéaire en fonction du taux d'humidité jusqu'à une valeur seuil égale au taux d'humidité du PSF.

#### I.4.3.3. La masse volumique

Certains bois sont légers (peuplier, épicéa,) et d'autres sont très lourds (chêne, ...). La densité varie non seulement d'une essence à l'autre, mais aussi au sein d'une même espèce. Par ailleurs, elle varie en fonction de la teneur en eau. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\rho_x = \frac{M_x}{V_x} \dots \dots \dots I.3$$

$M_x$  et  $V_x$  masse et volume à l'humidité  $x$  [3].

#### I.4.3.4. La porosité

Le réseau cellulaire qui est formé par les parois, les lumens et les ponctuations des différents éléments cellulaires fait du bois un matériau poreux. Une surface spécifique de la matrice solide, espace poreux effectif et la distribution des tailles des pores sont des aspects typiques de ce type de matériaux.

La porosité est définie par le rapport du volume de pores ( $V_p$ ) au volume total ( $V_t$ ) du matériau. Plus la porosité est importante, plus le bois est léger et moins il sera résistant, dur et stable [Almeida (2006) ; Benmansour (2011)] [3].

## II. Le Ciment :

Le ciment est une poudre minérale finement broyée, et un liant hydraulique qui gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit en augmentant sa résistance mécanique progressivement, due à la formation des hydrates stables avec le temps.

Constitué majoritairement de chaux (CaO) et de silice (SiO<sub>2</sub>) et classiquement composé de : calcaire, argile avec d'autres adjuvants comme le fer et le gypse [8].

Il existe trois différents types de liants inorganiques : le gypse, le ciment de magnésie et le ciment Portland

Les types de ciments se varient selon le pourcentage d'ajout de gypse entre 3 et 5% pour la régulation de temps de prise et pour l'amélioration de la résistance mécanique.

### II.1. Composition chimique du ciment

**Tableau.I.1.** Composition chimique du ciment [8]

Composition chimique	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO
Teneur (%)	63,72	20,26	4,51	3,84	3,21	0,5	1,09

### II.2. Le ciment portland :

Le ciment portland fait partie des ciments les plus répandus dans l'industrie de la construction, il est constitué essentiellement d'une roche synthétique appelée « clinker » et de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) ; la teneur en clinker est au minimum de 95%.

Les principaux constituants du clinker sont : l'alite (C<sub>3</sub>S), la bélite (C<sub>2</sub>S), l'aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) et l'alumine ferrite tétracalcique (C<sub>4</sub>AF), ils représentent plus de 95% du ciment Portland.

La préparation de ce type de ciment consiste à mélanger de manière homogène de (80%) et calcaire et (20%) d'argile, ensuite le mélange (le cru) est calciné à 1450°C pour former le clinker.

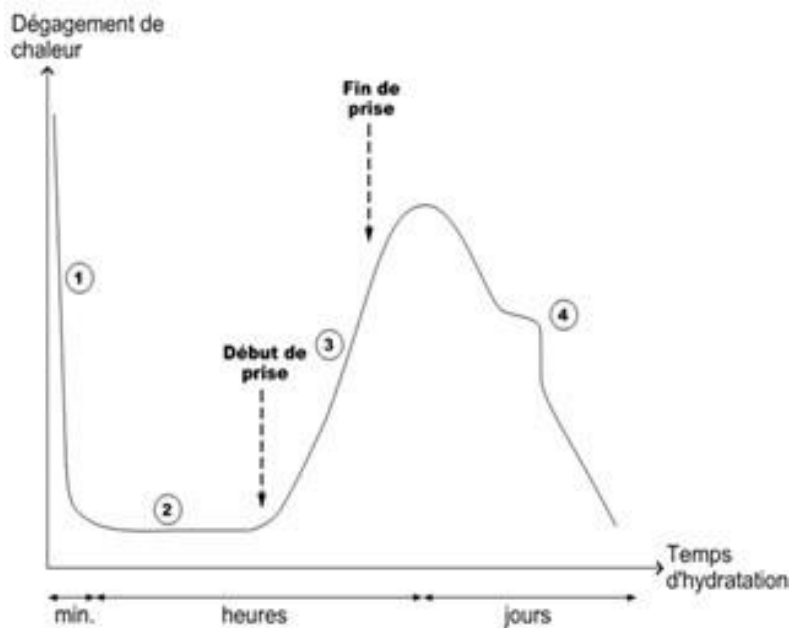
En s'approchant de cette zone, les granulats sont successivement déshydratés, décarbonatés (par départ de gaz carbonique contenu dans le calcaire). La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le **tableau I.2** [4]

**Tableau.I.2.** Composition chimique du clinker de ciment Portland (ciment gris) [14]

Minéral	Silicate tricalcique	Silicate bicalcique	Aluminate tricalcique	Alumino-ferrite
Formulation chimique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$
Notation cimentaire	C3S	C2S	C3A	C3AF
Proportion en masse	60-75%	10-20%	8-12%	8-12%

### II.3. Mécanisme d'hydratation

L'hydratation du ciment portland implique, la réaction des quatre phases minérales qui le composent. Comme le ciment est composé principalement de C3S, c'est l'hydratation du C3S qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre les différentes réactions [15].

**Fig.I.14.** Courbe caractéristique de calorimètre isotherme d'un ciment (Alexa Bresson, 2006).

[15]

Il peut être découpée en quatre période :

### **Période 1 : réactions initiales**

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C3S et le C3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables) : les ions entrent en solution.

### **Période 2 : période dormante**

Le dégagement de chaleur est faible. Aucune évolution de la pâte ne semble se produire. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase (ions calcium, silicates, hydroxydes et sulfates). Quand l'eau de gâchage est saturée en ions, le début de la prise se produit. Le pH de la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des constituants.

### **Période 3 : période d'accélération**

Cette période débute lorsque la concentration en ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et créent donc un solide.

### **Période 4 : période de ralentissement**

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel. La chaleur dégagée diminue.

Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. C'est pendant cette période que l'ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm.

Les mécanismes complexes à l'origine de la création des différents produits de l'hydratation que sont les silicates et les aluminates sont l'adsorption, l'hydrolyse, la dissolution, la solvataion et la cristallisation [15].

**Propriété mécanique du ciment**

Le **tableau I.3** présente la résistance à la compression après 28 jours de durcissement de différents types de ciment produit par la Société du Ciment de Gabès [8].

**Tableau.I.3.** Propriétés mécaniques du ciment [8].

Type de ciment	CEM I	CEM II A	CEMII B	CEM III
Resistance à la compression (MPa)	$\geq 42,5$	$\geq 42,5$	$\geq 32 ,5$	$\geq 32 ,5$

**Conclusion**

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur le bois et le ciment ou on a mis en évidence les différentes caractéristiques et propriétés de ces deux derniers ; la structure du bois, sa composition chimique et ses propriétés mécaniques, thermiques, physiques et hygroscopiques.

Dans la deuxième partie de ce présent chapitre on a présenté le ciment, sa composition chimique, ses propriétés mécaniques et hydriques (Mécanisme d'hydratation).

**Références :**

- [1] Cours L3 GDM Bois et Mousses, option Génie des Matériaux, filière Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2020.
- [2] Bruno Clair, "Étude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire," *Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, France* 2001. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [3] Farid Touloum, "Contribution au développement de matériaux isolants dans le domaine du bâtiment. Utilisation du bois de palmier dattier," Université Mohamed Khider-Biskra, 2018.
- [4] ANES Linda, "Elaboration et caractérisation d'un composite bois-ciment," Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2021.
- [5] K.ALMI, Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2018. Cité par Chérait Khaoula et Slimani Hiam, "valorisation de matière végétale (cas de palmier dattier) et son utilisation en domaine des matériaux composites," Université Echahid Hamma Lakhdar, El Oued, 2020.
- [6] BELOUADAH Z. Contribution à l'étude d'endommagement et du comportement mécanique des matériaux composites renforcés par des fibres végétales existantes dans la région du Hodna. Thèse doctorat, spécialité génie mécanique, U.M.M.T.O.2017. Cité par Atmane Souad et Bareche Roza, "Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de PVC et de grignon d'olive local," Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [7] C.Y.A. Maxime, "Étude de la microstructure des composites bois/ciment par relaxométrie RMN du proton," pp. 39, 2009. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.

- [8] Marwa Lahouioui, "Elaboration et évaluation des propriétés physico-thermiques et acoustiques de nouveaux éco-composites à base de bois de palmier", Université De Gabes Ecole Nationale D'ingénieurs De Gabes, 2019.
- [9] R. Harrison, M. Bader, "Damage development in corps laminates under monotonic and cyclic stressing," *Fiber Science and Technology*, vol. 18, pp. 163-180, 1983. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [10] E. Gamstedt, B. Sjögren, "Micro mechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies," *Composites Science and Technology*, vol. 59, pp. 167-178, 1999. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [11] Faiza Mnasri, "Etude du transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes : application aux milieux fibreux et à l'isolation des bâtiments," Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Université de Lorraine, 2016.
- [12] F. Lagattu, M.C. Lafarie-Frenot, "Variation of peek matrix crystalline in apc-2 composite subjected to large shearing deformations," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 605-612, 2000. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [13] M. Bederina, Z. Makhloufi, M. Quéneudec, "allégement des bétons de sables locaux par ajout de copeaux de bois traités et non traités et caractérisations physicomécaniques et microstructure," 2009. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [14] H. F.W. Taylor, "Cement chemistry," *Thomas Telford*, 1997. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.

- [15] Alexa Bresson, "Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland, 2006  
<http://doc.lerm.fr/lhydratation-du-ciment-portland/>

# **Chapitre II**

## **Composites Bois-Ciment**

### **II.1. Introduction :**

Les matériaux composites connaissent actuellement un développement intense dans tous les domaines de l'industrie grâce à leurs remarquables performances telle la bonne tenue à la fatigue statique et dynamique et leur légèreté. Généralement, ils ne se plastifient et ne se corrodent pas et ont une tenue aux impacts et aux chocs très moyenne. Par contre, les matériaux composites vieillissent sous l'action de l'humidité et de la chaleur, ils sont insensibles aux produits chimiques, graisses, huiles, liquides hydrauliques, peinture, solvants, pétrole ...etc.

Les composites ciment/bois sont utilisés dans l'industrie de la construction principalement pour les maisons préfabriquées à cause de leurs bonnes propriétés d'isolation acoustique, de leur faible conductivité thermique, de leur résistance au feu, de la résistance à l'humidité, de la résistance à la pourriture et aux insectes [1-2].

### **II.2. Généralités sur les matériaux composites**

#### **II.2.1. Définition d'un matériau composite :**

Les matériaux composites sont des matériaux solides hétérogènes et anisotropes, constitués de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de natures différentes ayant une forte capacité d'adhésion [3]. Les qualités respectives des constituants se complètent pour former un matériau aux performances mécaniques, thermiques et/ou physico-chimiques améliorées.

Un matériau composite est constitué d'une phase continue nommée la matrice qui a pour rôle d'assurer la cohésion de la structure et le transfert de charges entre les renforts.

L'autre composant est le renfort qui est une phase discontinue qui assure la tenue mécanique et représente des propriétés mécaniques supérieures à celles de la matrice.

A ces deux composants principaux peuvent s'ajouter des additifs qui permettent de modifier l'aspect, ou les caractéristiques du matériau.

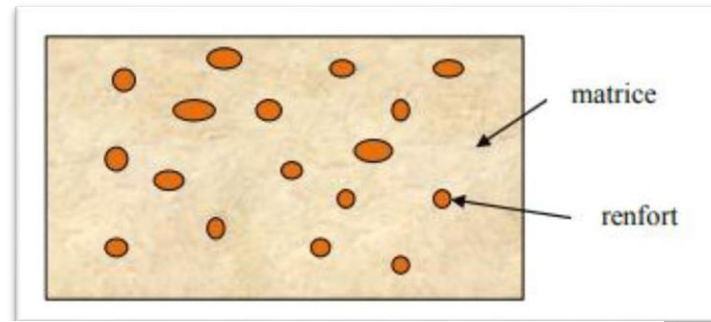


Fig.II.1. Matériau composite [4]

## II.2.2. Constituants des matériaux composites

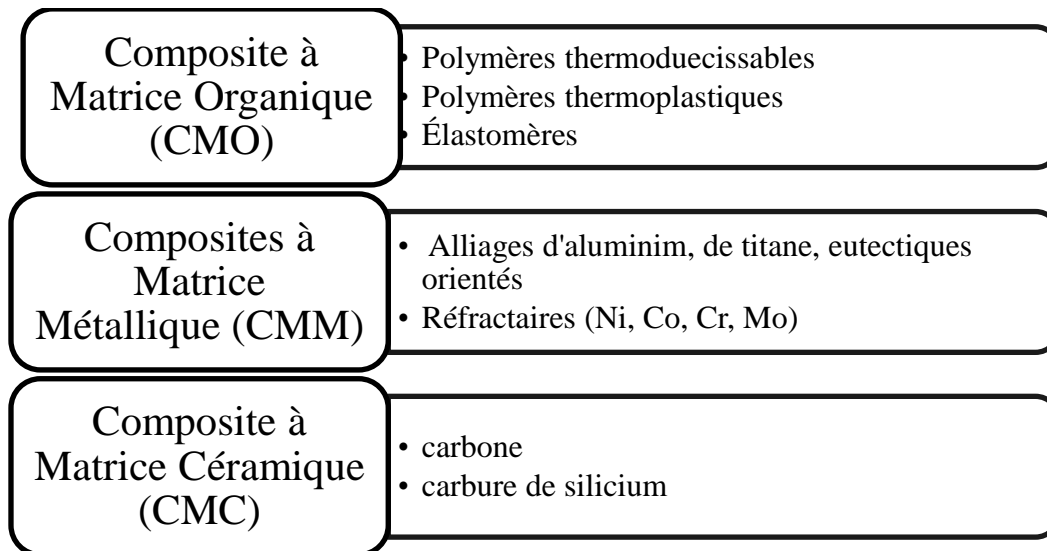
### II.2.2.1. Renforts

Les renforts sont les squelettes supportant les efforts mécaniques et permettent d'améliorer les propriétés physico-chimiques des matériaux (la résistance aux acides et aux bases pour le stockage de produits chimiques), ainsi que les propriétés électriques (résistance électrique, conductivité, ...). Et aussi de faciliter la mise en œuvre et réduire le coût de fabrication d'un matériau. Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites Ils sont caractérisés par la nature de la fibre, minérale ou organique et l'architecture du renfort [5].

### II.2.2.2. Matrices :

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites qui revêt trois fonctions principales : la répartition de la charge mécanique sur tout le renfort, la cohésion des fibres pour une meilleure homogénéisation de l'ensemble, Elle est facilement déformable mais assure la protection chimique des fibres et la protection des renforts vis-à-vis du milieu extérieur (chocs mécaniques ou thermiques) Elle permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé. Les matrices peuvent être décomposées en quatre catégories en fonction du besoin industriel (les matrices thermodurcissables, les matrices thermoplastiques, les matrices thermostables et les matrices métalliques et céramiques) [6].

Il existe également différents types de matrices et on distingue trois grandes familles :



**Fig.II.2.** Famille des matrices

Beaucoup de facteurs influent sur les propriétés des matériaux composites, ces propriétés :

- Des propriétés, de la nature et de la qualité des matériaux constitutifs.
- Des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort.
- De leur interaction, de l'interface matrice-renfort, etc. [7].

### II.3. Composites Bois-Ciment (CBC)

Les composites bois/ciment sont des matériaux constitués de particules ou de fibres de bois liées entre elles par du ciment. À noter qu'il existe également des composites à base de produits végétaux autres que le bois, comme le bambou, le sisal, le lin et la bagasse [8-9].

Bien que de nombreux produits existent déjà sur le marché, les connaissances concernant les composites bois/ciment restent encore limitées. Il existe notamment un problème de compatibilité entre le ciment et certaines essences de bois, qui ne peuvent donc pas être valorisées sous cette forme. Des problèmes de stabilité dimensionnelle et de vieillissement du composite exposé à des variations d'humidité importantes ont également été reportés [10].

#### II.3.1. Effet du bois sur la prise du ciment

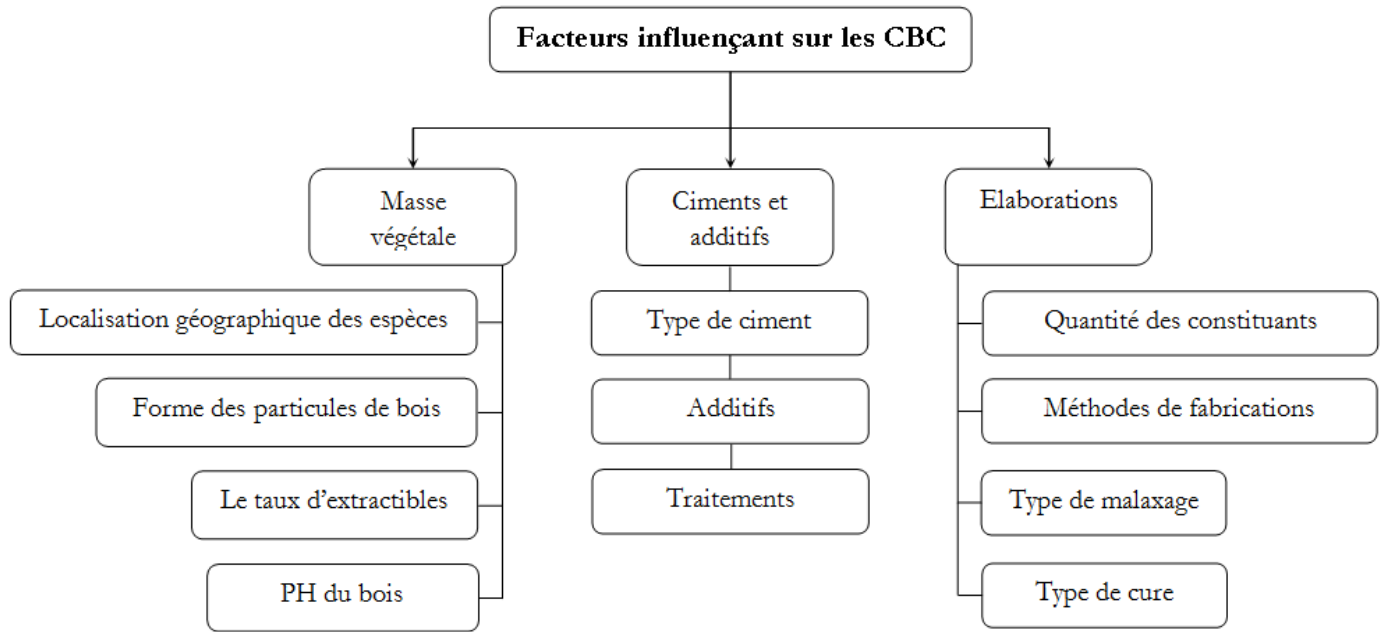
L'incompatibilité entre le ciment et le bois peut être le résultat de plusieurs facteurs, incluant le type de ciment, la localisation géographique des espèces (type de sol, climat), la forme des particules de bois, le pH et autres [11].

Les sucres solubles dans l'eau, glucosides, composantes phénoliques, tanins et produits extractibles du bois inhibent l'hydratation du ciment, prolongeant la période de prise, diminuant la quantité et la taille des cristaux essentiels pour la résistance des matériaux inorganiques, c'est-à-dire, qu'ils ont un effet négatif sur la compatibilité entre le bois et le matériau inorganique. Plus la quantité d'extractibles est grande, plus l'incompatibilité du bois avec les matériaux inorganiques sont faibles. Généralement, les espèces avec une quantité égale ou supérieure à 70 % d'extractibles solubles dans l'eau sont considérées comme des espèces incompatibles [12].

- Le vieux bois est plus compatible que le bois récemment scié, selon les auteurs de [13-14] la farine de bois est moins compatible que la laine de bois, chose qui peut être attribuée au lessivage plus facile des extractibles sous la forme de farine que chez la laine de bois.
- Le pH du bois a aussi un effet sur la compatibilité entre le bois et le ciment. Les espèces ayant un pH plus haut que 4.9 sont considérées comme incompatibles avec le ciment et compatibles si le pH est inférieur à 3-9.

Les extractibles acides avec un pH faible inhibent beaucoup moins la cristallisation du ciment que les extractibles alcalins avec un pH élevé. Cependant, les bois acides pourraient diminuer le pH du mélange ciment/eau causant un résultat défavorable à la prise du ciment [14].

- Par ailleurs, les extractibles du bois soluble dans l'eau principalement les tannins hydrolysables, les acides salinés libres, les gras solubles et les composantes phénoliques peuvent retarder l'hydratation du gypse hemihydraté et altérer la structure et la taille des cristaux du gypse en réduisant la liaison entre le gypse et le bois. L'incorporation de la matière végétale dans le ciment n'est pas forcément triviale, des problèmes de compatibilité chimique pouvant se poser [14].



**Fig.II.3.** Facteurs influençant la prise du ciment [15].

### II.3.2. Propriétés des composites Bois-Ciment

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.

Les propriétés de ce type de composites sont influencées significativement par le type de liant inorganique, la quantité de matériau en bois et par la masse volumique du panneau. Les matériaux inorganiques utilisés sont le ciment Portland, la magnésie et le gypse.

Les composites CBC combine les bonnes caractéristiques du bois et du matériel inorganique [15].

### II.3.3. Caractéristiques des composites Bois-Ciment

Les auteurs [Moslemi and Pfister (1987) ; Dittenber and GangaRao (2012)] rapportent que les caractéristiques des CBC dépendent fortement de la ressource végétale utilisée. En effet, la biomasse végétale présente des différences au niveau de leurs propriétés intrinsèques d'une espèce à une autre d'un endroit à un autre ... etc. Ainsi il ressort de la littérature en relation à l'utilisation des ressources végétale dans une matrice ciment la complexité du sujet.

Le succès de la fabrication des CBC dépend fortement de la disponibilité de la ressource végétale. Théoriquement, nous pouvons fabriquer des CBC de n'importe quelle ressource

végétale tel que le bambou, le lin, le chanvre le bois de palmier dattier... etc. à l'exception du bois pourri.

Toutefois, il faudra tenir compte des caractéristiques physico-chimiques et anatomiques de la biomasse végétale et du comportement de cette dernière vis-à-vis du ciment.

Avec une masse volumique faible comprise entre 400 et 1500 kg/m<sup>3</sup>, les CBC appartiennent à la famille des bétons légers. Une série de propriétés en découlent notamment une bonne isolation thermique et phonique, résistance mécanique ... etc [Beraldo (1994)].

Contrairement aux panneaux à base de résine, les CBC présentent une bonne stabilité dimensionnelle. Toutefois, elle reste insuffisante pour une utilisation extérieure sans produit protecteur.

Le milieu alcalin que procure le ciment une fois au contact de l'eau assure la protection de la biomasse végétale contre les attaques des champignons de pourriture et aux insectes xylophages [Moslemi and Pfister (1987)][15].

#### II.3.4. Compatibilité Bois-Ciment

Pour éviter l'incompatibilité des bois avec le ciment, plusieurs méthodes ont été utilisées : l'extraction avec de l'eau chaude ou froide, le stockage prolongé, le séchage des particules au séchoir et l'utilisation de produits chimiques ; des solutions diluées dans l'hydroxyde de sodium.

Plusieurs recherches menées par *D.W. Fengel* [16] ont montré que l'élimination des extractibles du bois entraîne une compatibilité avec le ciment.

Dans le but d'augmenter la compatibilité du bois, en utilisant trois traitements et en montrant que le traitement d'extraction à l'eau chaude (80°C) a été meilleur que le traitement d'extraction à l'eau froide (20°C).

L'extraction avec NaOH (10g/l) a été le traitement donnant de meilleurs résultats.

Les additifs et les accélérateurs sont souvent utilisés dans la fabrication de panneaux composites bois/ciment pour réduire le temps de prise du ciment et améliorer la compatibilité des composantes.

Les chlorures sont les accélérateurs les plus efficaces et peuvent compenser l'effet négatif du bois sur l'hydratation du ciment, principalement le Chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>).

Le degré d'hydratation augmente quand la quantité d'accélérateur augmente. Les additifs comme le sulfate d'aluminium ( $Al_2(SO_4)_3$ ) et le silicate de sodium ( $Na_2SiO_3$ ) sont aussi utilisés pour la fabrication des panneaux composites de ciment Portland et bois.

### **II.3.5. Traitements du bois permettant d'améliorer la compatibilité Bois-Ciment**

Les traitements des fibres de cellulose ont comme objective la réduction des contraintes liées aux propriétés des fibres végétales et d'améliorer leur adhésion avec une matrice polymérique et réduire l'absorption d'humidité [17].

#### **II.3.5.1. Traitements physiques**

##### **II.3.5.1.1. Traitement plasma**

Pendant le traitement plasma, le substrat est bombardé par des particules de haute énergie se déplacement dans le flux de plasma.

En conséquence, les propriétés de surface telles que la rugosité, la mouillabilité et la chimie de surface du substrat peut être modifiée sans avoir recours à des produits chimiques ou des solvants.

Les traitements plasma modifient la surface des fibres naturelles par altération ou élimination des couches de surface faiblement attachée et la formation de nouveaux groupes fonctionnels (fonctionnalisation et réticulation). Selon le type et la nature des gaz utilisés, différentes modifications de surface pourront être introduites. Des réticulations de surface peuvent être introduites, la tension de surface peut être augmentée ou diminuée, des radicaux libres réactifs pourront être produits [18].

##### **II.3.5.1.2. Traitement corona**

Les procédés de type corona (couronne) sont largement utilisés dans le traitement de surface des matériaux. Différents types de supports peuvent être traités : polymères, aluminium, textiles..., etc. Cette technique est basée sur l'utilisation d'une haute tension (1500V) à haute fréquence entre deux électrodes. L'air est ionisé et les électrons sont accélérés et réagissent ainsi avec les surfaces adjacentes.

Dans les cas des fibres de cellulose, le traitement corona entraîne une augmentation de l'énergie de surface, de l'acidité et de la basicité ainsi que le rapport de quantité d'oxygène et de carbone (O/C) [18].

### II.3.5.2. Traitements chimiques

#### II.3.5.2.1. Traitement par les silanes

Ce traitement a pour objectif d'augmenter l'interaction entre les liaisons fibre/matrice. Le traitement à base de silane est un moyen très répandu pour changer la surface de la fibre d'hydrophile à hydrophobe. En l'absence d'eau, même à une température élevée, aucune réaction ne se produit entre les liaisons Si-OR et les groupes OH de la cellulose, tandis que les liaisons Si-OR réagissent avec le groupement OH phénolique de la lignine. En présence d'humidité, un groupe alkoxy hydrolysable conduit à la formation de silanols. Le silanol réagit ensuite avec le groupe hydroxyle de la cellulose, en formant des liaisons covalentes stables avec la paroi cellulaire par chimisorption sur la surface de la fibre [19].

#### II.3.5.2.2. Traitement par acétylation

Le principe de cette méthode est de faire réagir les groupes hydroxyles (-OH) de la fibre avec les groupements acétyles ( $\text{CH}_3\text{CO}-$ ) qui permet d'améliorer le pouvoir hydrophobe de la fibre et de rendre ainsi la surface de la fibre plus hydrophobe en entraînant une stabilité dimensionnelle des composites, car aucune absorption d'eau ne peut conduire à un gonflement ou un retrait du matériau composite [17].

#### II.3.5.2.3. Traitement alcalin

Le traitement alcalin avec la soude NaOH est le plus utilisé dans le traitement du bois en général et particulièrement des traitements des fibres naturelles. Il a pour but d'augmenter la surface de contact entre la fibre et la matrice. Il est souvent utilisé pour éliminer la lignine, l'hémicellulose et de supprimer les impuretés résiduelles de la fibre [17].

En effet, une mauvaise adhérence entre la fibre et la matrice génère les espaces vides autour des fibres dans les composites de fibres naturelles, ce qui conduit à une grande absorption d'eau. La modification des fibres par le processus d'alcalinisation peut réduire l'absorption d'humidité. L'hydroxyde de potassium (KOH) ou l'hydroxyde de sodium (NaOH) sont couramment utilisés pour diminuer la capacité de liaison hydrogène de la cellulose et éliminer les groupes hydroxyle ouverts qui ont tendance à se lier aux molécules d'eau. Il dissout également les hémicelluloses (les plus hydrophiles) ainsi réduire la capacité de la fibre à absorber l'humidité (*Azwa et al. 2013*) [20].

## II.4. Synthèse des travaux réalisés sur les composites bois-ciment

### II.4.1 Travaux de F. MNASRI

"Etude du transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes : application aux milieux fibreux et à l'isolation des bâtiments", dans ce travail, une approche de caractérisation d'un composite lignocellulosique hétérogène de structure poreuse a été présentée. En effet ce matériau est composé de deux constituants bien connus dans le domaine de l'industrie de construction : Le bois et le ciment. Le bois est incorporé sous forme de granulats avec des formes et des tailles irrégulières et le ciment est utilisé comme un liant. Le travail réalisé permet de remonter aux propriétés intrinsèques équivalentes de ce matériau (conductivité thermique et perméabilité à la vapeur) à l'aide des techniques de micro-tomographie.

Cette étude a été maintenue à travers une analyse des phénomènes de transfert de chaleur et de masse au sein d'un milieu poreux de type bois. Suivie par une évaluation des propriétés thermo-physiques équivalentes d'un composite de mélange bois-ciment moyennant des méthodes expérimentales et numériques.

La perméabilité et la conductivité thermique équivalentes sont les deux propriétés évaluées dans cette configuration. Ces deux propriétés dépendent fortement de la porosité et de la distribution des pores dans la phase continue (la phase solide). De plus la composition de ce matériau et les fractions volumiques de chacun de ses constituants influent sur la formation de sa microstructure et par conséquent sur ses propriétés de transferts thermiques et hydriques.

L'ensemble des connaissances développées dans ce travail permet une piste sérieuse pour l'élaboration d'un éco-matériau à propriétés contrôlées pour des usages spécifiques dans la construction et la rénovation.

### II.4.2 Travaux de A. KARECHE

"Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier (BPD) : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert", L'objectif de ce travail est de fournir une réflexion à la fois très appliquée mais aussi fondamentale sur les procédés de l'isolation thermique dans le but d'améliorer les conditions de confort dans les bâtiments. Cette étude est consacrée à la conception et le développement de nouveaux composites ; de mortier à base du palmier dattier, à l'étude de la microstructure, de la durabilité et de la dégradation du bois de palmier, ainsi

qu'une caractérisation générale des fibres de bois de palmier dattier, à savoir le séchage, la saturation, la perte et le gain de masse.

La cinétique du séchage a permis de conclure que :

- Le séchage élimine une grande quantité d'eau du bois de palmier à une température d'environ de 60°C ou 70°C, selon la variété de bois, pendant 24 heures.
- A une température de 90°C, le bois s'équilibre avec l'environnement où la perte d'eau est peu importante et la stabilité des masses des échantillons est obtenue.
- Les fibres de bois de palmier dattier peuvent perdre 80% de leur poids et elles peuvent absorber 180% d'eau à partir de l'état sec.

La deuxième étape de ce travail expérimentale consiste à faire une caractérisation

(Physique, thermophysique, mécaniques et dégradabilité) des composites à base des fibres de bois de palmier dattier.

L'étude sur un mortier pur et un mortier chargé par des fibres de bois BPD a montré que :

- L'augmentation de la concentration des fibres de BPD dans le mortier provoque une chute considérable de la densité volumique, de la conductivité thermique et de la résistance mécanique.
- La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage des fibres. Cela est en accord avec la littérature. En effet, la majorité des auteurs rapportent que l'ajout des fibres végétales au béton ou au mortier n'améliore pas sa résistance à la compression.
- Absence d'une bonne activité d'hydratation entre le ciment et les fibres surtout à partir d'une concentration de 20% de fibres de BPD, ce comportement a conduit à l'apparition des fissures sur ces composites.

La caractérisation thermophysique des matériaux à base de BPD montre que les fibres de BPD donnent une bonne propriété de l'isolation thermique. A titre d'exemple la conductivité thermique dans le cas de l'état humide peut atteindre  $0.7 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  par contre la conductivité

thermique dans le cas de l'état sec est de l'ordre de  $0.1 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Ce résultat confirme que les fibres de bois de palmier dattier ont une bonne isolation thermique au milieu humidifié.

En revanche, les mortiers sans fibres de BPD peuvent atteindre  $0.86 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  au milieu sec.

La caractérisation a aussi permis de noter les conclusions suivantes :

- L'incorporation de fibres de BPD dans le mortier améliore la propriété thermique d'isolation.
- Selon la quantité de fibres de BPD, il est possible d'avoir des résistances mécaniques intéressantes et une multitude de catégories de mortiers légers.
- La structure paraît relativement homogène et compact avec une bonne adhérence des fibres de BPD avec le mortier avec l'ajout de faibles quantités de fibres de BPD.
- Le seul inconvénient enregistré est la diminution de la résistance mécanique quand la quantité de fibres de BPD augmente et l'augmentation de la conductivité thermique quand l'humidité augmente.

L'influence de l'eau sur les mortiers chargés par des fibres de BPD explique clairement que cela mène à la dégradation irréversible. Ce qui induit une réduction des propriétés mécaniques de ces composites. En effet, l'incorporation de l'eau dans le mortier chargé par des fibres de BPD vient d'une partie qui modifie les propriétés structurales : la décohésion de l'interface fibre-matrice à cause du gonflement surtout dans le cas des fibres grosses et la fissuration.

Il a été démontré dans ce travail que les composites à base de bois de palmier dattier est un bon candidat pour être utilisé comme isolant thermique dans le bâtiment. Par ailleurs, les expositions prolongées des composites bio-sourcés à des ambiances hygrothermiques conduisent inévitablement à la dégradation des fibres végétales.

#### **II.4.3 Travaux de M. LAHOUIOUI**

"Elaboration et évaluation des propriétés physico-thermiques et acoustiques de nouveaux éco-composites à base de bois de palmier", ce projet vise à développer et à caractériser un nouveau matériau écologique renforcé par des fibres de palmier afin d'être utilisé comme un isolant thermique et sonore.

Les composites utilisés dans ce projet sont formés par un mélange de ciment, eau et sable avec différentes teneurs massiques en fibres (0%, 2,5%, 10% et 20%). Afin d'améliorer l'adhésion

entre les fibres et la matrice cimentaire, des différents traitements chimiques ont été appliquées sur ces fibres qui sont les suivants :

- ✚ Un lavage simple par l'acétone et l'éthanol.
- ✚ Un traitement alcalin pour le résidu obtenu de premier lavage
- ✚ Un blanchiment par l'hypochlorite de sodium
- ✚ Extraction de la lignine par attaque directe avec l'acide sulfurique concentré après le premier lavage.

Les performances thermo-physiques, mécaniques, acoustiques, et la cinétique d'absorption et désorption d'eau de ces composites ont été analysés.

Les résultats révèlent que l'incorporation des fibres de palmier dattier non traitées et traitées réduit leur conductivité thermique qui diminue de  $1,38 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  pour le ciment pur à  $0,31 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  pour les composites avec 5% des fibres traitées et non traitées.

De plus, la résistance à la compression décroît dès l'ajout de fibres naturelles dans les composites. Après le traitement chimique des fibres, la résistance mécanique de ces composites s'accroît tout en restant inférieure à celle de ciment pur. Pour les analyses acoustiques, le coefficient d'absorption acoustique des composites atteint 0,8 à hautes fréquences [1800-200 Hz]. Ces composites présentent donc de bonnes performances thermiques et acoustiques avec des propriétés mécaniques acceptables. De ce fait, cette étude montre que les nouveaux composites élaborés peuvent être utilisés comme matériaux d'isolation thermique et sonores dans le bâtiment.

#### **II.4.4 Travaux de M. Li :**

"Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment", le présent travail porte sur l'étude d'un composite à base de fibres de bois et d'une pâte de ciment Portland qui vise à réduire l'impact environnemental des bâtiments. Ces matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans la construction durable, comme des éléments secondaires, pour leurs performances thermiques, hydriques, mécaniques et acoustiques.

Pour atteindre cet objectif, cette étude a été scindée en trois parties distinctes et complémentaires : l'analyse de la résistance mécanique des éprouvettes en compression et en flexion ; l'étude du comportement hygrothermique des panneaux bois-ciment dans des

conditions d'utilisation naturelle ; enfin l'étude se termine par l'analyse du comportement à hautes températures des panneaux composites bois-ciment.

L'analyse mécanique réalisée sur des éprouvettes en compression et en flexion à trois points a permis d'estimer le module d'Young MOE, la limite d'élasticité (RE) et la résistance à la rupture (MOR) du matériau composite bois-ciment. Les tests montrent que la résistance mécanique en compression est supérieure à celle de la flexion.

Les simulations montrent que le modèle proposé CDPM (Concrete Damage Plasticity Model) disponible dans le logiciel d'éléments finis Abaqus est capable de décrire le comportement inélastique complet d'un matériau bois ciment tant en traction qu'en compression, en tenant compte de l'effet de l'endommagement.

Pour une stabilité optimale de ce type de système de coffrage, lors de l'opération de coulage, il est conseillé de respecter ces hauteurs d'assemblage admissibles :  $h=0.5\text{m}$  pour un panneau d'épaisseur  $t=25\text{mm}$  ;  $h=1.0\text{m}$  pour un panneau d'épaisseur  $t=35\text{mm}$  ; et  $h=1.5\text{m}$  pour un panneau d'épaisseur  $t=50\text{mm}$ .

Les essais hygrothermiques à l'échelle du laboratoire et les résultats d'analyse du comportement à hautes températures des panneaux de coffrages obtenus ont montré que le matériau analysé dans cette étude présente des résultats satisfaisants en permettant d'améliorer le confort intérieur des bâtiments et d'économiser la consommation d'énergie offrant une alternative aux matériaux de construction traditionnels grâce à son intervention sur la régularisation d'humidité.



**Fig.II.4.** Panneaux composites bois-ciment dans les coffrages [29].

#### **II.4.5 Travaux de Y. Daniel AGOSSOU**

"Etude de la formulation et de la modélisation des résistances mécaniques des composites à matrice cimentaire renforcés par des biomasses végétales : Cas des fibres de rônier et des balles de riz", la présente étude s'inscrit dans la vague des travaux effectués en vue de développer de nouveaux matériaux à base de fibres végétales pouvant servir dans la construction. Elle a pour objet l'étude des caractéristiques du composite résultant de l'incorporation à une matrice cimentaire des fibres courtes du *Borassus Aethiopum* Mart (rônier) et des balles de riz. Les balles de riz contrairement aux fibres de rônier sont fortement hygroscopiques.

Les essais de caractérisation ont porté d'une part sur les propriétés physiques notamment la densité et l'absorption, et d'autre part sur les propriétés mécaniques qui sont les résistances en flexion trois points et la compression. Afin d'étudier l'impact du dosage en liant, de la granulométrie, de la quantité d'eau sur ces propriétés, dix-huit formulations ont été réalisées et testées par le biais d'éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  sur chaque composite formulé.

Les résultats obtenus sont prometteurs : les éprouvettes ont des densités suffisamment faibles pouvant descendre jusqu'à  $980 \text{ kg/m}^3$  pour les composites de fibres de rônier ciment et à  $1040 \text{ kg/m}^3$  pour les composites de balles de riz permettant ainsi de classer le matériau dans la catégorie des bétons légers.

Les résistances maximales observées en traction par flexion sont de  $7,75 \text{ MPa}$  pour les composites fibres de rônier ciment, et  $12,25 \text{ MPa}$  pour les composites balles de riz ciment pour les rapports Eau/Ciment optimal. Ces résistances maximales à la compression du composite

sont de l'ordre de 15,52 MPa pour les composites fibres de rônier ciment et 15,63 MPa pour le composite balles de riz ciment.

#### II.4.6 Travaux de F. TOULOUM

"Contribution au développement de matériaux isolants dans le domaine du bâtiment ; utilisation du bois de palmier dattier", l'objectif principal de ce travail est d'étudier la faisabilité d'élaborer des composites bois ciment sans compactage en associant des particules végétales issues du bois de palmier dattier (Rachis et Pétiole) avec du ciment portland destinés à améliorer l'isolation thermique des enveloppes extérieurs des bâtiments.

Dans un premier temps, l'étude expérimentale est débutée par la mise en place d'une méthode de formulation en substituant le sable dans le cas des mortiers puis le ciment dans le cas d'étude sur pâtes, Puis afin de valider la méthode mise en place, divers essais à l'état frais et durcis ont été effectués. À l'état frais, des mesures de l'affaissement ont été réalisées sur l'ensemble des échantillons. À l'état durci, des tests mécaniques de mesure de la résistance à la flexion et à la compression sur des éprouvettes âgées de 14, 21 et 28 jours ont été réalisés.

L'étude, a été complétée par des analyses calorimétriques (semi adiabatique), du temps de prise (Vicat) et microscopiques (MEB), également, l'ajout d'accélérateur de prise comme le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ).

De point de vue caractérisation thermique, la conductivité thermique du composite diminue en fonction de la teneur en particules de bois de palmier dattier. Les valeurs obtenues sur les composites CBC à 28 jours notamment pour la teneur en particule de bois à 4 % ( $\lambda = 0,64 \text{ W/m.K}$ ) est assez satisfaisante comparée à d'autres matériaux à base de fibres végétales à l'image du Mortier – fibre de coco ( $\lambda = 0,65 \text{ W/m.K}$ ). Par ailleurs, la conductivité thermique de ces composites dépend de plusieurs paramètres à savoir le rapport E/C, âge du composites, quantité de ciment, humidité relative de ces matériaux.

Les résultats des essais de compression démontrent que le CBC réagit d'une manière conventionnelle. En effet, la contrainte de compression diminue en fonction de la teneur du composite en particules de bois de palmier dattier. Cependant, pour une certaine teneur en particules (3%), le composite bois ciment résultant présente une contrainte assez importante ( $R_c = 30,51 \text{ MPa}$ ) comparé à d'autres produits de même type ciment-filler-sable-bois ( $R_c = 10,6 \text{ MPa}$ ).

De point de vue caractérisation thermique, les valeurs obtenues sur les composites bois ciment de 28 jours, notamment pour la teneur en particule de bois à 10 % qui correspond à 0,24 W/m.K, s'apparentent à celles des bétons légers conformément à la norme ASTM C109/C109-95.

En parallèle, les essais de compression sur les composites bois-ciment à maturation ont révélés un comportement très particulier notamment pour les teneurs en particules 2, 4, 6 et 8%. Ce résultat n'adhère pas à ceux de la littérature où il a été rapporté une diminution de la contrainte de compression en fonction de la teneur en particules de bois. Pour cette étude, la diminution de la contrainte n'est significative qu'au-delà de la teneur de 8%. Ainsi, conformément à la norme ASTM C 109/ C 109-95, le composite bois (à 8% en teneur) ciment, développé dans cette étude, pourra être utilisée dans le domaine de bâtiment, notamment, le recouvrement des murs.

Les essais de flexion ont confirmé l'analyse et la discussion développée dans la partie essais de compression. Ces essais ont montré un gain en propriétés mécaniques correspondant au composite bois (8%) ciment dû principalement à une bonne adhésion à l'interface particules de bois de palmier dattier – ciment qui est traduit par un transfert de charge matrice -particules plus efficaces.

#### **II.4.8 Travaux de L. ANES**

"Elaboration et caractérisation d'un composite bois-ciment", l'objectif principal de ce travail est d'élaborer un matériau composite à matrice cimentaire et à renfort en bois d'eucalyptus, un matériau innovant dans la construction en Algérie. Il sera utilisé en panneaux isolants afin de réduire les importations. L'avantage économique de ce matériau composite réside principalement dans la valorisation de la matière première locale bois et ciment.

Dans cette étude le problème d'incompatibilité du bois avec la matrice cimentaire a été exposé et pour palier à cette problématique ; différents traitements du bois ont été effectués ; il s'agit d'un traitement à l'eau bouillante ainsi qu'un traitement chimique par l'hydroxyde de sodium. Ces deux traitements ont été comparé au bois d'eucalyptus non traité.

Pour déterminer l'influence du bois sur l'hydratation du ciment, un suivi de la cinétique d'hydratation en milieu concentré et dilué a été réalisé, suivi d'une caractérisation mécanique et thermique du composite élaboré.

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que le bois d'eucalyptus a retardé l'hydratation du ciment et que le traitement à l'eau bouillante n'améliore pas le processus d'hydratation. En revanche, c'est le traitement alcalin qui est le plus efficace au point de vue performances mécaniques notamment la résistance à la flexion. Selon les normes en vigueur, ces composites peuvent être employés dans l'isolation thermique des constructions, notamment, le recouvrement des murs.

## II.5. Conclusion

Les panneaux composites à base de ciment ne sont pas des produits nouveaux utilisés dans la construction, puisqu'ils étaient sur le marché au début des années 1960 [21].

Des panneaux structuraux à haute densité liés au ciment ont été développés, conduisant à plusieurs applications d'ingénierie [22-23].

Ces matériaux sont plus écologiques et peu coûteux à produire. En particulier, les matériaux à base des fibres de bois qui présentent une conductivité thermique proche de celle du polystyrène expansé et de la laine de verre [24].

En outre, ils sont faciles à utiliser à la fois dans la nouvelle construction et/ou dans la rénovation, et ils présentent une bonne performance phonique en raison de leur capacité à amortir les ondes sonores. Dans ce contexte particulier, les biomatériaux constituent une solution économique et technologique intéressante. Un autre avantage important d'élaborer un matériau bois-ciment formé des fibres de bois, c'est son prix de revient plus bas comparés aux autres matériaux de construction (béton ordinaire, acier, bois, etc.), sa disponibilité en grandes quantités, respectueux de l'environnement et facile à transformer [24–25].

Ces matériaux bois cimentaires se caractérisent par une faible résistance mécanique ; ce qui est un inconvénient majeur et qui limite leur utilisation dans le bâtiment. Les études menées dans ce domaine ont montré que l'introduction des copeaux de bois comme granulats affectent la résistance mécanique et la durabilité [26–27]. *Agar-Ozbek et al.* [26] ont montré que les propriétés mécaniques liées à la résistance et la durabilité dépendent principalement de la texture, de la forme et de la taille de l'agrégat. *Kevern et al.* Dans d'autres travaux, il a été constaté que l'augmentation de l'absorption des gros granulats réduit la durabilité et le mélange avec de longues microfibrilles tout en augmentant la durabilité [28- 27]. Notons que la majorité de ces travaux de recherche ont été réalisés sur des échantillons composites bois –ciment utilisant un béton perméable et poreux.

**References:**

- [1] R.H. Falk, "Rapid growth of cement-cellulose fiber board," presented at Proceedings, 12th annual Excellence in housing conference and exposition, Dallas, 1994, February 23-26. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [2] G. Tsoumis, "Science and technology of wood. Structure, properties, utilization. Van Nostrand Reinhold," *presented at New York, U.S.A.* Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [3] F. Zhou, G. Cheng et B. Jiang, Effect of silane treatment on microstructure of sisal fibers, *Applied Surface Science.*, Vol. 292, 2014, pp 806-812. Cité par MANSOUR Aicha, "Elaboration d'un matériau composite à base de granulats légers de nature végétale (déchet de bois)," Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2020.
- [4] Chérait Khaoula et Slimani Hiam, "valorisation de matière végétale (cas de palmier dattier) et son utilisation en domaine des matériaux composites," Université Echahid Hamma Lakhdar, El Oued, 2020.
- [5] L. Berreur, Bertrand de Maillard, Stanislas Nösperger, L'industrie française des matériaux composites, Nodal Consultants, p17, 2002. Cité par MANSOUR Aicha, "Elaboration d'un matériau composite à base de granulats légers de nature végétale (déchet de bois)," Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2020.
- [6] TOUATI, Z. étude d'un matériau composite à base de polypropylène renforcé par des fibres d'alfa. Mémoire de magister. Boumerdes : université M'Hamed Bougara Boumerdes, 2014. Cité par MANSOUR Aicha, "Elaboration d'un matériau composite à base de granulats légers de nature végétale (déchet de bois)," Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2020.
- [7] F. Dalmaso et J. Mézières, Calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dans les matériaux composites, Institut Français du Pétrole, 1998. Cité par MANSOUR Aicha, "Elaboration d'un matériau composite à base de granulats légers de nature végétale (déchet de bois)," Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2020.

- [8] F. Pacheco-Torgala, S. Jalalib, "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibers," 2011. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [9] R.S.P. Coutts, "A review of Australian research into natural fiber cements composites," *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, pp. 518-526, 2005. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [10] C.Y.A. Maxime, "Etude de la microstructure des composites bois/ciment par relaxométrie RMN du proton," *Université BORDEAUX I*, 2009. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [11] D.P.M. Miller, A.A. "Wood-cement composites: Species and heartwood sapwood effects on hydration and tensile strength," *Forest Prod*, vol. 41, pp. 9-14, 1991. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [12] M. Hachmi, A.A. Moslemi, A.G. Campbell, "A new technique to classify the compatibility of wood with cement," *wood science technology*, vol. 24, pp. 345-354, 1990. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [13] M. H. Simatupang, H. Lange, H. Kasim, N. Seddig, "Influence of wood species on the setting of cement and gypsum," presented at fiber and Particleboard Bonded with Inorganic Binder, Idaho, USA., 1988. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.

- [14] K.E.C. Semple, R.B. Evans, P.D, "Cement hydration tests using woodflour may not predict the suitability of *Acacia mangium* and *Eucalyptus pellita* for the manufacture of wood-wool cement board," *Holzforchung*, vol. 32, pp. 327-332, 1999. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [15] Farid Touloum, "Contribution au développement de matériaux isolants dans le domaine du bâtiment. Utilisation du bois de palmier dattier," Université Mohamed Khider-Biskra, 2018.
- [16] D.W. Fengel, G, "Wood chemistry, ultrastructure, reactions," *Walter of Gruyter, NewYork* 1983. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [17] A.Djamel Eddine, " Extraction, caractérisation morphologique, physico-chimique et mécanique des fibres caulinaires de *Retama monosperma* L.Boiss, thèse de doctorat, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, 2016. Cité par Chérait Khaoula et Slimani Hiam, "valorisation de matière végétale (cas de palmier dattier) et son utilisation en domaine des matériaux composites," Université Echahid Hamma Lakhdar, El Oued, 2020.
- [18] A.Abdelkebir, " L'effet de la température de mercerisation sur les propriétés du composite ( Tissus de Jute / Polyester", Université Mohamed Boudiaf -M'sila, 2017. Cité par Chérait Khaoula et Slimani Hiam, "valorisation de matière végétale (cas de palmier dattier) et son utilisation en domaine des matériaux composites," Université Echahid Hamma Lakhdar, El Oued, 2020.
- [19] R. Agrawal, N. S. Saxena, K. B. Sharma, S. Thomas, and M. S. Sreekala "Activation energy and crystallization kinetics of untreated and treated oil palm fibre reinforced phenol formaldehyde composites," (in English), *Materials science and engineering. a-structural materials properties microstructure and processing*, Article vol. 277, no. 1-2, pp. 77-82, Jan 2000. Cité par Chérait Khaoula et Slimani Hiam, "valorisation de matière végétale (cas de palmier dattier) et son utilisation en domaine des matériaux composites," Université Echahid Hamma Lakhdar, El Oued, 2020.

- [20] Marwa Lahouioui, "Elaboration et évaluation des propriétés physico-thermiques et acoustiques de nouveaux éco-composites à base de bois de palmier", Université De Gabes Ecole Nationale D'ingénieurs De Gabes, 2019.
- [21] Li M., Khelifa M., El Ganaoui M. Mechanical characterization of concrete containing wood shavings as aggregates. *Int J Sustainable Built Environ*, 2017 ; 6 :587–596. Cité par Mengya Li, "Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.
- [22] Papadopoulos A.N., Ntalos G.A., Kakaras L. Mechanical and physical properties of cement-bonded OSB. *Holz als Roh- und Werkstoff* 2006 ;64 : 517–518. Cité par Mengya Li, "Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.
- [23] Deppe HJ. On the production and application of cement-bonded wood chipboards. *Proc. 8th Washington State Symposium on Particleboard*. 1974, pp267–286. Cité par Mengya Li, "Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.
- [24] Koohestani B., Koubaa A., Tikou Belem T., Bussière B., Bouzahzah H. Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfills containing maple-wood filler. *Constr. Build. Mater.* 2016 ;121 :222–228. Cité par Mengya Li, "Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.
- [25] Bashar S. Mohammed B. S, Abdullahi M., Hoong C.K. Statistical models for concrete containing wood chipping as partial replacement to fine aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2014 ;55 :13–19. Cité par Mengya Li, "Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.
- [26] Agar-Ozbek A.S., Weeheiijim J., Schlangen E., Bruegel K.V. Investigating porous Concrete with improved strength: testing at different scales. *Constr. Build. Mater.* 2013 ; 41 :480–490. Cité par Mengya Li, "Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.
- [27] Kevern J.T., Biddle D., Cao Q. Effects of macrosynthetic fibers on pervious concrete properties. *J. Mater. Civ. Eng.* 2015 ;27:(9). Cité par Mengya Li, "Caractérisation

expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.

[28] Kevern J.T., Wang K., Schaefer V.R. Effect of coarse aggregate on the freezethaw durability of pervious concrete. J. Mater. Civ. Eng. 2010 ;22 :469–475. Cité par Mengya Li, "Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.

[29] Mengya Li, "Caractérisation expérimentale et modélisation du panneau composite bois-ciment. Matériaux, "Université de Lorraine, 2018.

**Chapitre III**  
**Matériaux d'étude et**  
**Techniques Expérimentales**

## Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux de l'étude, la procédure expérimentale d'élaboration de nos composites Bois-Ciment ainsi que les différentes techniques utilisées pour la caractérisation de la farine du bois et de nos composites Bois-Ciment élaborés.

### III.1. Matériaux d'étude

#### III.1.1. La farine du bois

##### III.1.1.1. Caractérisation de la farine du bois

Le type du bois utilisé dans cette étude est une farine du bois rouge qui provient des déchets des menuiseries. Le bois rouge est issu des arbres du Padouk qui est un bois exotique qui provient d'Afrique Occidentale et Centrale. Sa couleur rouge très intense est sa principale caractéristique. Sa durabilité et sa stabilité font du Padouk une matière prisée.

##### III.1.1.2. Tamisage de la farine du bois

La granulométrie de la farine du bois utilisée est choisie entre  $[0.4-0.08]$ mm, il s'agit des particules du bois qui sont passées au tamis de 0.4mm et retenues au tamis de 0.08mm comme le montre la figure suivante :



**Figure III.1.** Opération du tamisage de la farine du bois

Ce choix granulaire est préférable, d'un côté, du point de vue malaxage afin d'éviter la formation d'éventuels amas (mélange non homogène) de matière qui peuvent affecter négativement les propriétés mécaniques du composite Bois-Ciment. D'un autre côté, ce choix permet de réduire le taux d'absorption d'eau par le bois et d'améliorer la surface de contact avec la matrice cimentaire [1].

### III.1.1.3. Mesure de la masse volumique de la farine du bois

Pour la mesure de la masse volumique ( $\rho$ ) de la farine du bois, ce dernier a été compacté sous forme de pastilles à l'aide d'une pastilleuse cylindrique de diamètre 13mm sous une presse hydraulique avec une force de 20MPa pendant quelques secondes (**Fig.III.2**). Cinq pastilles ont été élaborées puis séchées dans une étuve à 100°C pendant 24h. Après séchage, les pastilles ont été pesées à l'aide d'une balance analytique et leurs dimensions ont été mesurées en utilisant un pied à coulisse.



**Figure III.2.** Presse hydraulique

La masse volumique ( $\rho$ ) est calculée à partir de la relation (**III.1**), il s'agit du rapport de la masse de la poudre ( $M_0$ ) sur son volume ( $V = \pi d^2 * H$ ) où  $d$  et  $H$  sont respectivement le diamètre et la hauteur de la pastille.

$$\rho = \frac{M_0}{(\pi d^2 * H)} \dots\dots\dots (III.1)$$

#### III.1.1.4. Traitement alcalin de la farine du bois avec du NaOH (5%)

Après tamisage, la farine du bois est complètement immergée dans une solution alcaline de NaOH à 5% en masse, agitée pendant 01 heure à l'aide d'un agitateur (**fig.III.3.a**), ensuite filtrée et lavée à l'eau distillée jusqu'à la neutralisation de la solution (PH=7). Cette neutralisation a été vérifiée à l'aide d'un PH-mètre (**fig.III.3.b**). Au final, la farine du bois est séchée dans une étuve à 100°C pendant 24h [2]. (**fig.III.3.c et e**)

Après 24h de séchage à 100°C, la farine du bois est de nouveau passée dans les tamis pour avoir la granulométrie désirée [0.4-0.08[ mm (**fig.III.3.d**).

La solution alcaline a été préparée en introduisant 5g en masse de NaOH dans une fiole jaugée de 100ml d'eau distillée. A des concentrations plus élevées, le traitement provoque une rupture de la chaîne cellulosique ce qui entraîne la dégradation des propriétés mécaniques [4].



**Figure III.3.** Procédure du traitement alcalin avec NaOH (5%). (a) : L'agitation de l'ensemble sciure du bois et solution NaOH (5%). (b) : Contrôle du PH avec un PH-mètre. (c) : Filtrage de la farine du bois. (d) : Farine du bois traitée après étuvage à 100°C

### III.1.1.5. Analyse d'absorption d'eau de la farine du bois par capillarité :

L'analyse d'absorption d'eau de la farine du bois consiste à déterminer le taux de saturation du volume des vides se trouvant dans la farine du bois ainsi que la porosité du bois. L'absorption d'eau est effectuée sur des pastilles traitées et non traitées avec du NaOH, par leur immersion dans l'eau distillée à température ambiante pour chaque instant (t). Pour cela, cette partie est dédiée à la détermination de gain massique en eau et de la porosité massique de pastilles en farine de bois.

Les pastilles élaborées sont préalablement séchées dans une étuve à T= 100°C pendant 24h jusqu'à la stabilisation de la masse. Le choix de cette température est lié au séchage conventionnel (température entre 50 °C et 100° C) [3].

Le suivi de la masse est effectué par pesée pour chaque instant (t) à l'aide d'une balance analytique de précision de  $10^{-5}$  (voir la figure III.4). L'absorption de l'eau représente le poids d'eau qu'un échantillon peut absorber jusqu'à la saturation. L'absorption est définie comme une quantité d'eau absorbée à l'instant (t) par rapport à la masse sèche de l'échantillon [9]. Elle s'exprime par la relation (III.2).

$$\text{Teneur en eau absorbée (W\%)} = \frac{(M(t) - M_i)}{M_i} * 100 \dots \dots \dots (\text{III. 2})$$

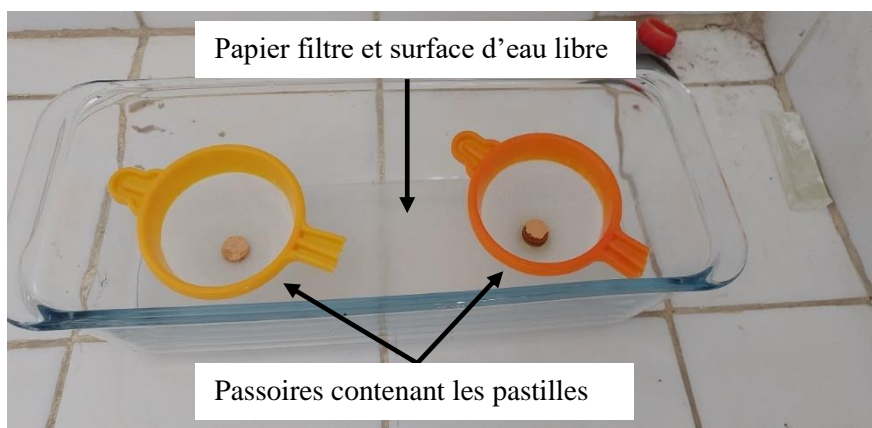
Avec :

$M_i$  = Masse initiale de l'échantillon anhydre (après séchage)

$M(t)$  = Masse de l'échantillon à l'instant (t) après la saturation

$W$  (%) = Le taux d'absorption

Dans le but de voir l'effet du traitement alcalin sur l'absorption d'eau par capillarité, deux pastilles, ont été préparées, l'une a subi un traitement alcalin avec du NaOH et l'autre aucun traitement. Ces pastilles sont posées sur des passoires articulées en dessus d'une surface d'eau libre. Un papier filtre est placé entre la surface d'eau libre et les passoires contenant les pastilles pour contrôler le taux d'absorption. Dans ce procédé de saturation, l'eau est absorbée sous l'effet de capillarité.



**Figure III.4.** Essai d'absorption par capillarité des pastilles en farine de bois traitée et non traitée avec une solution alcaline (NaOH).

### III.1.1.6. Mesure du taux d'humidité de la farine du bois

La mesure du taux d'humidité du bois est liée directement au procédé de séchage qui est par définition ; de diminuer la teneur en eau existante dans le bois. L'opération de mesure du taux d'humidité a été effectuée comme suit :

- ✚ Détermination de la masse initiale des échantillons ( $M_0$ )
- ✚ Séchage des échantillons à une température de  $100^\circ\text{C}$  jusqu'à la stabilisation de leur masse.
- ✚ Mesure du gain de masse  $M(t)$  ou ( $M_H$ ) et de perte de masse ( $\Delta m$ ) pour chaque instant ( $t$ ) en utilisant une balance analytique avec une précision de  $10^5$  (**figure III.3**).

Le taux d'humidité ( $H$ ) d'un échantillon de bois s'exprime en pourcentage. Il est défini comme la masse d'eau présente dans le bois rapporté à sa masse anhydre  $M_0$ . Elle est exprimée par la relation suivante :

$$H\% = \frac{M_H - M_0}{M_0} * 100 \dots \dots \dots (III.3)$$

Avec :

$M_H$  : La masse d'eau comprise dans l'échantillon à l'air ambiant,

$M_0$  : La masse de l'échantillon anhydre.

La norme française (NF B 51-004 février 1942) préconise de mesurer la masse anhydre d'un échantillon après séchage à  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à obtention d'une masse constante.

La perte de masse ou le pourcentage massique de perte d'eau est calculé par l'équation **III.4**

$$\Delta m (\%) = \frac{(m_0 - m(t))}{m_0} * 100 \dots \dots \dots \text{(III. 4)}$$

Avec :

$\Delta m (\%)$  : Le pourcentage de perte en masse

$m_i$  : La masse initiale de l'échantillon avant le séchage en gramme.

$m(t)$  : La masse mesurée de l'échantillon après un instant (t) de séchage en gramme.

### III. 1.1.7. Mesure de la rétractabilité volumique R (%) (Stabilité dimensionnelle)

L'opération est réalisée par la mesure du volume ( $V_0$ ) de cinq pastilles traitées avec du NaOH puis ces pastilles sont introduites dans une étuve à  $100^\circ\text{C}$  pour séchage pendant 24h. Après séchage, le volume ( $V_H$ ) a été mesuré pour la détermination du volume final et la rétractabilité est mesurée à l'aide de la relation **(III.5)** :

$$R (\%) = \frac{(V_H - V_0)}{V_0} * 100 \dots \dots \dots \text{(III. 5)}.$$

### III.1.2. Le Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment portland au calcaire NA442 CEM II/B-L 42,5 N nommé **Matine** certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 - 2013) et Européenne (EN 197 - 1) en provenance de la cimenterie de Hammam Dalaa M'sila en Algérie.



Figure III.5. Ciment portland Matine utilisé

### III.1.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est celui du robinet du laboratoire du génie civil de la ville de Tizi-Ouzou.

## III.2. Procédure expérimentale et d'élaboration

### III.2.1. Préparation des échantillons

#### III.2.1.1. Formulation

Nos composites Bois-Ciment ont été élaborés en ajustant un protocole de formulation inspiré du travail de TOULOUM [1]. Il s'agit de résoudre le système d'équation suivant tout en négligeant le volume de l'air :

$$V_c + V_e + V_b = 1\text{m}^3$$

$$E/C = 0.5$$

$$V_b = y$$

Avec :

**V<sub>c</sub>** = Volume de ciment ; **V<sub>e</sub>** = Volume de l'eau ; **V<sub>b</sub>** = Volume de bois ; **E** = Eau ; **C** = Ciment  
**x** = Pourcentage de substitution (2, 4, 6, 8, 10 et 13%) ; **E/C** = 0,30 ; 0,32 ; 0,35 ; 0,38 ; 0,41 et 0,44.

**Tableau.III.1.** Formulations des composites bois-ciment ( $\text{g/cm}^3$ )

<b>Éprouvettes pour les essais mécaniques</b>								
	$\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	0%	2%	4%	6%	8%	10%	13%
Ciment	3130	1.2433	1.1710	1.1013	1.0342	0.97	0.9088	0.8227
Eau	1000	0.3708	0.3785	0.3854	0.3915	0.3967	0.4009	0.4053
Bois	900	0.00	0.0138	0.0277	0.0415	0.0552	0.0691	0.0899
E/C	0.3195	0.2982	0.3232	0.35	0.3786	0.4089	0.4411	0.4926
B/C	0.2875	0.00	0.0118	0.0251	0.0401	0.057	0.0761	0.1092
<b>Éprouvettes pour les essais thermo physiques</b>								
Ciment	3130	2.9140	2.7447	2.5811	2.4239	2.2734	2.1300	1.9283
Eau	1000	0.8690	0.8871	0.9034	0.9176	0.9297	0.9395	0.9499
Bois	900	0.00	0.0324	0.0648	0.0972	0.1296	0.162	0.2106
E/C	0.3195	0.2982	0.3232	0.35	0.3786	0.4089	0.4411	0.4411
B/C	0.2875	0.00	0.0118	0.0251	0.0401	0.0570	0.0761	0.1092

L'étude consiste à élaborer des composites Bois-Ciment et de voir l'influence de la substitution de ciment portland par les particules de la farine du bois. Ce travail a été réalisé sur des éprouvettes à raison de six taux volumiques de substitution à savoir (2, 4, 6, 8, 10 et 13%) par les particules de la farine du bois et ceci rentre dans le contexte d'obtention des composites Bois-Ciment résistants et isolants.

### III.2.2. Préparation de pâte Bois-Ciment :

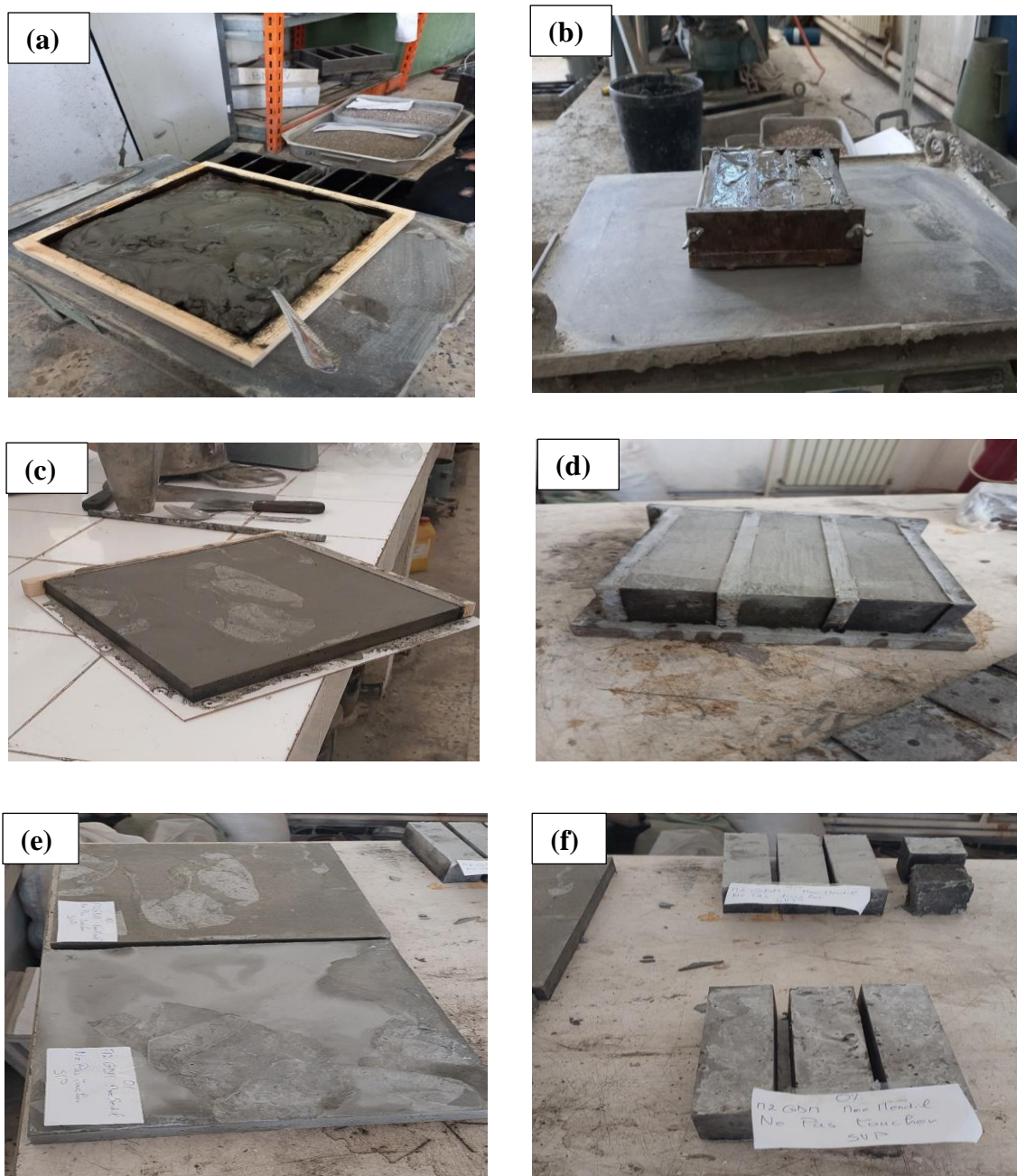
La préparation de pâte bois-ciment pour l'élaboration de nos composites a été réalisée à l'aide d'un malaxeur de 5 litres (**voir figure.III.6**) et dure 2 minutes répartie comme suit :

- ✚ Versement des matériaux solides dans la cuve du malaxeur, du plus fin au plus grossier (ciment, bois,)
- ✚ Malaxer à sec à petite vitesse pendant 5s pour homogénéisation,
- ✚ Ajouter l'eau et malaxer pendant 30s à petite vitesse,
- ✚ Racler le fond de la cuve pendant 30s,
- ✚ Malaxer à grande vitesse pendant 60s.



**Figure III.6.** Préparation de la pâte Bois-Ciment

Le mélange de pâte est ensuite versé dans des moules prismatiques de dimension 40\*40\*160 cm en acier pour l'analyse physique et mécanique, et des moules en bois de dimensions 300\*300\*20 cm pour l'analyse thermique pour les mesures de conductivité thermique. Ces moules sont préalablement imprégnés d'une fine couche de l'huile de décoffrage. Après moulage, les éprouvettes sont recouvertes d'un film plastique pour garder un milieu endogène. Le démoulage est effectué après 24h et les éprouvettes sont conservées à l'air libre à  $20^{\circ}\pm 2$  °C pendant 28 jours. (Voir **figure.III.7**).



**Figure III.7.** Procédure d'élaboration des composites Bois-Ciment. (a) et (b) : moulage des éprouvettes. (c) et (d) : démoulage des éprouvettes. (e) et (f) : éprouvettes après 28 jours de séchage.

### III.3. Caractérisation des composites Bois-Ciment

#### III.3.1. Mesure de la densité

La densité des composites bois-ciment a été déterminée par le rapport de la masse des éprouvettes au volume apparent après la cure de 28 jours (20°C,  $R_H = 98\%$ ) et le séchage à l'étuve à  $100 \pm 2^\circ\text{C}$ , jusqu'à la stabilisation de la masse. Ensuite, les échantillons ont été pesés

sur une balance analytique avec une sensibilité de  $\pm 0,01$  g. La masse de chaque échantillon a été déterminée en calculant la moyenne arithmétique de trois essais. Les dimensions des spécimens ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse numérique avec une sensibilité de  $\pm 0,001$  mm. La densité (**D**) a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$d = \frac{M_o}{V_o} \dots \dots \dots (III. 6)$$

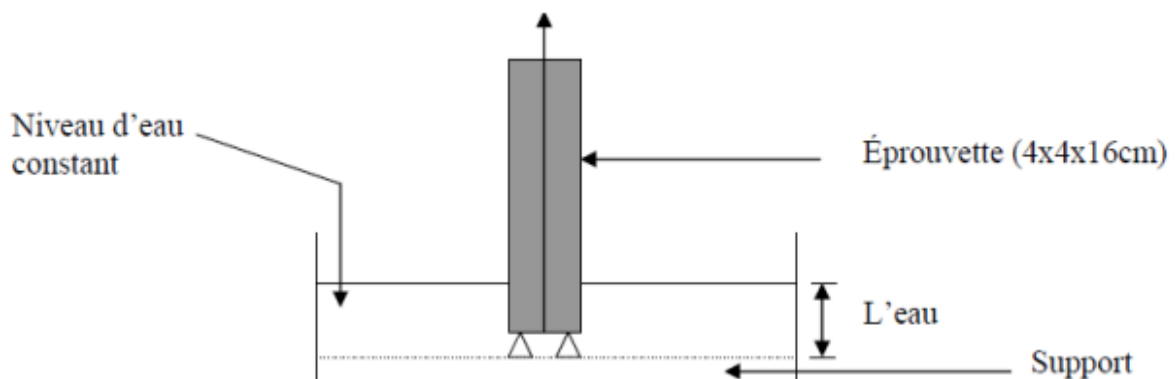
Avec :

**M<sub>o</sub>** : Le poids sec (g)

**V<sub>o</sub>** : Le volume sec (cm<sup>3</sup>) de l'éprouvette.

### III.3.2. Mesure du taux d'absorption par capillarité des composites Bois-Ciment :

La capacité d'absorption d'eau du composite Bois-Ciment est réalisée conformément à la norme EN 480-5. Des éprouvettes prismatique 4\*4\*16 cm ont été séchées dans une étuve à 90°C jusqu' à la stabilisation de la masse. La masse initiale (M<sub>o</sub>) a été mesurée, ensuite les éprouvettes sont introduites verticalement dans un bain d'eau de sorte que l'eau ne sera en contact qu'avec la partie basse (1/8) des éprouvettes sur une durée de 90 minutes (**fig.III.8**).



**Figure III.8.** Dispositif expérimental de l'essai d'absorption par capillarité [4]



**Figure III.9.** Essai d'absorption par capillarité des composites Bois-Ciment

### III.3.3. Mesure du taux d'absorption par immersion totale pendant 24h

La mesure du taux d'absorption des composites Bois-Ciment a été réalisée après leur séchage dans l'étuve à 90°C jusqu'à la stabilisation de leur masse ( $M_0$ ). Ensuite, les éprouvettes sont totalement immergées dans un bain d'eau pendant 24h (**fig.III.10**). Après saturation, leurs masses ont été mesurées ( $M_s$ ), et le taux d'absorption est calculé pour chaque éprouvette suivant la relation (**III.7**) :

$$A (\%) = \frac{(M_s - M_0)}{M_0} * 100 \dots \dots \dots (\text{III.7})$$



**Figure III.10.** Essai d'immersion totale dans l'eau des composites Bois-Ciment

### III.3.4. Rétractabilité volumique des Composites Bois-Ciment

Comme conséquence directe de l'instabilité dimensionnelle due à l'hygroscopie du bois, on définit la rétractabilité volumique du bois R.

$$R (\%) = \frac{(V_H - V_0)}{V_0} * 100 \dots \dots \dots (III. 8).$$

Avec :

$V_H$  : Volume de l'échantillon au taux d'humidité H,

$V_0$  : Volume de l'échantillon anhydre.

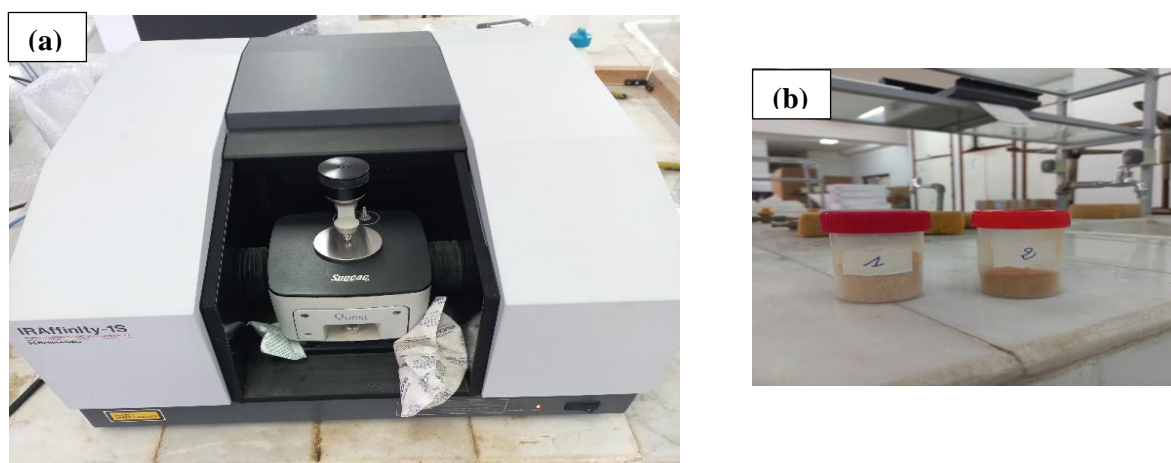
## III.4. Techniques expérimentales

### III.4.1. Analyse par spectrométrie infrarouge (IR) de la farine du bois traitée et non traitée avec du NaOH :

L'analyse IR est une méthode d'analyse efficace et importante qui permet de voir la modification de structure qui est générée par la modification chimique des particules végétales comme le bois.

Le principe de la spectroscopie infrarouge (IR) repose sur l'absorption de la lumière par la plupart des molécules dans la région de l'infrarouge et en convertissant cette absorption en vibration moléculaire (déformation, élongation) qui correspond spécifiquement aux liaisons présentes dans la molécule. L'analyse entre rayonnement incident et transmis à travers l'échantillon permet de déterminer les principales fonctions chimiques présentes dans l'échantillon [4].

L'analyse de la farine bois à l'état naturel et de la farine du bois traités par NaOH, a été réalisée sur un spectromètre de type *IRAffinity-1S* de gamme ATR complète, mesure de réflexion diffuse ou spéculaire, cellule à gaz. Doté d'une résolution élevée de  $0.5 \text{ cm}^{-1}$  et une haute sensibilité de 30000 :1, accumulation de 1 minute, voisinage de  $2100 \text{ cm}^{-1}$  peak to peak, assisté par le logiciel Lab Solutions IR haute performance.

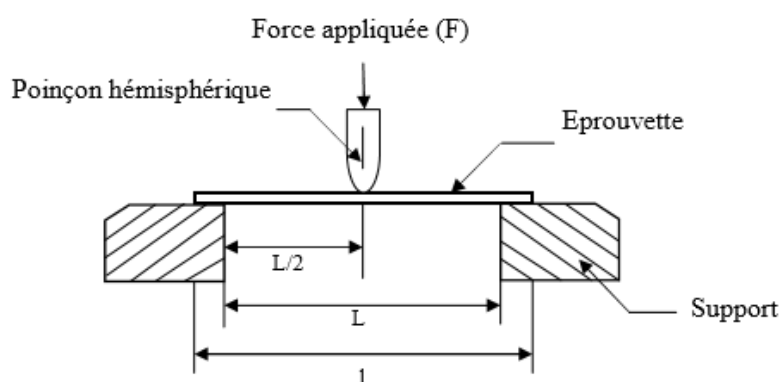


**Figure III.11.** Spectromètre IRTF et (b) : Échantillons de la farine du bois (1 : Non traitée, 2 : Traitée)

### III.4.2. Caractérisation mécanique des composites Bois-Ciment :

#### III.4.2.1. Essai de flexion trois points

L'essai de flexion trois points est un test mécanique statique. Il consiste à placer une éprouvette rectangulaire sur deux appuis et d'appliquer un effort ponctuel au centre [5].



**Figure III.12.** Principe de l'essai de flexion 3 points [6]

**Tableau.III.2.** Dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon la norme NF EN 196-1

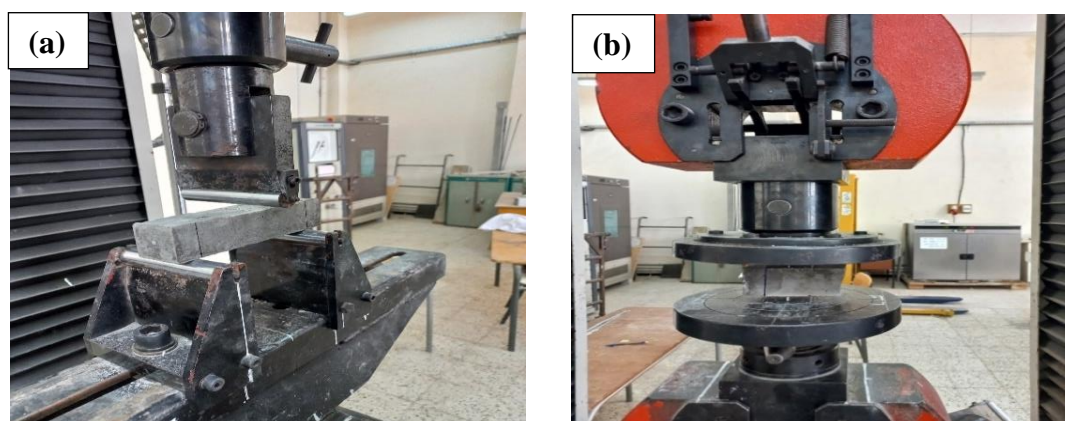
Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur B	Épaisseur h
160 mm	140 mm	40 mm	40 mm

### III.4.2.2. Essai de compression

Selon la norme (NFT 51.101), Cet essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette. On mesure simultanément les contraintes et déformations au cours de l'essai.

**Figure III.13.** Essai de compression [7]

La **figure.III.14**, montre les essais réalisés expérimentalement sur nos composites Bois-Ciment élaborés.

**Figure III.14.** Essais mécaniques. (a) : Essai de flexion à 3 points. (b) : Essai de compression

Les essais mécaniques (Flexion et compression) ont été effectués à l'aide d'une machine électromécanique universelle d'essais de type IBERTEST MOD. ELIB-200E/W assistée par

ordinateur du laboratoire du génie civil de l'Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou qui permet d'exécuter des essais de traction, compression, flexion.

Sa capacité est de 200 KN, en traction et compression, utilisant un seul espace de travail. Les essais sont réalisés avec une vitesse de contrainte de 10 mm/min dont les valeurs rapportées sont des moyennes. En flexion, cette machine développe une capacité de 30 KN avec une vitesse de mise en charge de 50N/s.

Les essais de flexion et de compression sont effectués sur des éprouvettes prismatiques de section carrée de dimension  $40 \times 40 \times 160$  (mm) testées à 28 jours d'âge. La contrainte de flexion et la contrainte de compression sont données par les formules suivantes :

$$R_f = \frac{1.5 * FL}{bh^2} \dots \dots \dots (III. 9)$$

$$R_c = \frac{F_c}{S} \dots \dots \dots (III. 10)$$

F : la force appliquée (Newton)

L : la distance entre les appuis (millimètre)

h et b : respectivement la hauteur et la largeur de l'éprouvette (millimètre).

R<sub>c</sub> : la résistance à la compression (méga pascals)

F<sub>c</sub> : la charge maximale à la rupture (newtons)

S : Est l'aire des plateaux (40mm x 40mm).

### III.4.3. Caractérisation thermique : Mesure de conductivité thermique

#### III.4.3.1. Principe

La conductivité thermique ( $\lambda$ ), est une grandeur physique caractérisant la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Son unité de mesure est «  $W.m^{-1}K^{-1}$  ».

La conductivité thermique est étroitement liée à la notion de conduction thermique : celle-ci désigne le mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu (ou entre deux milieux entrant en contact). Il s'agit donc d'un processus de transport d'énergie, qui s'effectue sans déplacement de matière.

La machine utilisée est de type H112N de l'unité TCU100 de conductivité thermique B480 pour les matériaux de construction et d'isolation P.A.Hilton Ltd du laboratoire de Mécanique, Structure & Energétique (LMSE) Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.

Le principe de B480 est basé sur la méthode relative de mesure de conductivité thermique qui a été déterminée en utilisant une méthode stationnaire basée sur une norme internationale ISO 8301.

La méthode du débitmètre thermique apparaît dans la norme Standard 8301: 1991, cette méthode est l'une des meilleures façons pour mesurer l'isolation thermique des matériaux par rapport aux autres méthodes d'état stationnaire.

Les échantillons sont placés entre deux tapis en silicone, l'ensemble est placé sur la plaque froide. On ferme le couvercle et on fixe les deux attaches, on fait tourner la roue à vis dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pour abaisser l'ensemble de la plaque chaude sur la plaque du débitmètre thermique. Au point où le voyant vert « position d'essai » s'allume. On arrête la rotation et on prend note de la lecture du cadran. La machine est entourée d'un isolant. Les plaques, froide et chaude, sont fixées (ou conservées) à une température constante de 10°C et 30 °C qui sont mesurées par les thermocouples.

La conductivité thermique de l'échantillon est donnée par l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{Ls * [(K_1 + (K_2 * \bar{T})) + ((K_3 + (K_4 * \bar{T})) * HFM) + ((K_5 + (K_6 * \bar{T})) * HFM^2)]}{dT} \dots\dots\dots \text{(III.11)}$$

**Avec :**

HFM : sortie du débitmètre thermique en (mV)

T<sub>1</sub> (T<sub>H</sub>) : température de la plaque chaude en (°C)

T<sub>2</sub> (T<sub>C</sub>) : température de la plaque froide en (°C)

K1 = 88.1389, K2 = -2.7829, K3 = -21.3064, K4 = 0.8037, K5 = 0.7954 et K6 = -0.0189 : Constantes d'étalonnage pour l'appareil donnée dans le catalogue de la machine.

dT : Différence de température entre les deux plaques et  $\bar{T} = dT/2$ .

Ls : épaisseur de la plaque en (mm)

$\lambda$  : conductivité thermique en (w/mk)

Avec Ls = (nombre de tours avec échantillon - nombre de tours sans échantillon) \* le pas

Où le pas = 2.5

### III.4.3.2. Préparation des échantillons

Les plaques de 300\*300\*20 ont été lissé avec du papier abrasif a sec pour avoir une surface plane qui va engendrer un meilleur transfert de chaleur. Elles ont été introduites dans l'étuve à 100°C jusqu'à l'évaporation totale de la quantité d'eau emprisonnée à l'intérieur des pores des éprouvettes et cela pour éviter la dégradation de la machine lors de la mesure de la conductivité thermique sachant que durant l'analyse l'eau s'évapore et s'incruste à l'intérieur de la machine qui peut provoquer une détérioration de la machine.



Figure III.15. Dispositif de mesure de la conductivité thermique

## III.5. Caractérisation morphologique : Analyse par Microscopie électronique à balayage (MEB)

La Microscopie Electronique à Balayage est basée sur le principe d'interaction électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon avec des agrandissements importants.

Le microscope électronique à balayage utilisé dans ce travail est de type JEOL JSM-6060, de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, équipé d'un spectromètre à dispersion d'énergie (EDS-X). Le filament du microscope est en tungstène et la tension appliquée est généralement de 20 KV. Le système d'analyse permet l'acquisition d'analyses ponctuelles et de cartographies élémentaires X.

### III.5.1. Imagerie par électrons secondaires (SE)

Les électrons secondaires ont une faible énergie. Ils ne proviennent que d'une couche superficielle, de quelques dizaines d'angströms d'épaisseur. La résolution est de l'ordre de 40Å pour un échantillon à éléments lourds, elle peut monter à 100Å et plus pour des éléments légers. Dans ce mode d'émission, un point de l'image est d'autant plus clair que le point correspondant de l'objet émet plus d'électrons. La meilleure résolution en électrons secondaires est obtenue

avec des éléments lourds. Ce mode nous renseigne sur la topographie de la surface des échantillons à étudier.

### III.5.2. Imagerie par électrons rétrodiffusés (BSE)

Comme nous venons de le voir, un matériau soumis à un faisceau électronique réémet entre autres des électrons rétrodiffusés dont la quantité dépend de la nature chimique de l'élément émetteur. L'usage classique qui en est fait, dans un Microscope Electronique à Balayage, ou MEB, est une image en contraste chimique : le faisceau balaye la surface de l'échantillon et l'intensité de rétrodiffusion est mesurée et représentée en échelle de gris sur une cartographie. Un point clair montrera un endroit de forte émissivité, donc de numéro atomique « élevé », un point sombre correspondra à une zone de numéro atomique moins élevé.

### III.5.3. Préparation des échantillons au MEB :

Avant de faire passer les échantillons au MEB, qui ont la particularité d'isolants, ces échantillons ont été enrobés d'un métal conducteur pour faire évacuer les électrons au cours de l'analyse. Les observations des échantillons ont été effectuées en mode rétrodiffusé, qui permet de mieux visualiser les différentes phases par contraste chimique, ainsi qu'au mode secondaire, en vue d'observer la topographie de la surface (Pores et fissures...).



Figure III.16. MEB « PHILIPS XL 30 » [8]

**Références**

- [1] Touloum et al. Formulation d'un composite bois de palmier dattier-ciment/ J. Appl. Eng. Sci. Technol. (2016) 2(2) : 57-63.
- [2] Rahmoun et al « Effect of treatment with soda and dimethoxydimethylsilane on water absorption and thermal stability of olive pomace flour and date stone »J. Mater. Environ. Sci. 6 (9) (2015) 2655-2664
- [3] This work, " study of materials reinforced with date palm wood: durability,degradation, structurals and transfers properties," *magister thesis, Elhadj Lakheda. University of Banta*, 2013. Cité par KARECHE Abdelhak,"Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité,dégradation et propriétés structurales et de transfert,"Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.
- [4] ANES Linda, "Elaboration et caractérisation d'un composite bois-ciment, "Université M'hamedBougara Boumerdes, 2021.
- [5] J.Molimard, « Cours de mécanique expérimentale », Ecole nationale supérieure des mines de SaintÉtienne, 2005]. Cité par MANSOUR Aicha,"Elaboration d'un matériau composite à base de granulats légers de nature végétale (déchet de bois),"Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2020.
- [6] K. Rouam, «Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles», Diplôme de Magister, Universite m'hamed bougara boumerdes, 2014, p69. Cité par FATHI Er-romeysa, BOUDJELLAL Hesna et BEN AISSA Souheyr,"Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base d'une résine thermodurcissables renforcé par la sciure de bois,"Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2020.
- [7] M. Bouznad, M. Karou, « Influence du vieillissement et du recyclé sur les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite », Diplôme master, Universite mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2014, p94. Cité par FATHI Er-romeysa, BOUDJELLAL Hesna et BEN AISSA Souheyr,"Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base d'une résine thermodurcissables renforcé par la sciure de bois,"Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2020.

[8] Atmane Souad et Bareche Roza, "Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de PVC et de grignon d'olive local," Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.

[9] M. Božiková, "Thermophysical parameters of corn and wheat flour," vol. 49, pp. 157-160, 2003. Cité par KARECHE Abdelhak, "Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert," Université Hadj Lekhdar Batna, 2014.

[10] F. Touloum, Thèse de Doctorat, "Contribution au développement de matériaux isolants dans le domaine du bâtiment. Utilisation du bois de palmier dattier," Université Mohamed Khider-Biskra, 2018.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussions**

## IV. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'ensemble des résultats et leurs interprétations à savoir, la caractérisation de la farine du bois et des composites Bois-Ciment élaborés par des essais physique, mécaniques, acoustique et thermiques

### IV.1. Caractérisation de la farine du bois

#### IV.1.1. Mesure de la masse volumique de la farine du bois

Les résultats de mesure de la masse volumique de la farine du bois sont consignés dans le **tableau.V.1.**

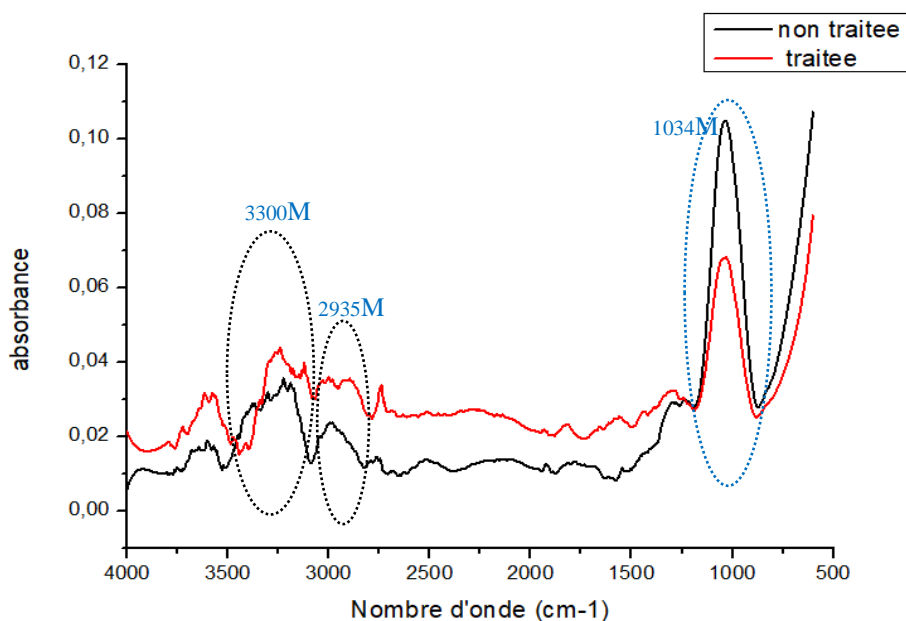
**Tableau.IV.1.** Résultats de Mesure de la masse volumique de la sciure du bois

Nombre d'essai	1	2	3	4	5	Moyenne
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0.978	1.052	1.097	1.093	1.053	1.05

Après cinq mesures de masse volumique effectuées sur cinq pastilles, la moyenne de la masse volumique de la farine de bois trouvée est de l'ordre de 1.05g/cm<sup>3</sup> ou 1050kg/m<sup>3</sup>. Nos composites Bois-Ciment ont été élaborés en fonction de cette masse volumique réelle de la farine du bois utilisée.

#### IV.1.2. Analyse par Infrarouge (IRTF) de la farine du bois traitée et non traitée avec du NaOH

L'analyse de la farine bois à l'état naturel et de la farine du bois traité dans une solution alcaline par NaOH, est réalisée sur un spectromètre à transformée de Fourier assisté par un micro-ordinateur. Les résultats obtenus par spectroscopie infrarouge sont présentés dans la **figure.IV.1.**



**Fig.IV.1.** Résultats d'analyse par IFTR de la farine de bois non traitée et traitée avec du NaOH.

**Tableau.IV.2.** Les bandes d'absorption pour la fibre cellulosique [4]

Nombre d'onde (cm-1)	Types de vibration
3200-3600	Vibration d'élongation des hydroxyles O-H
2935	Vibration d'élongation asymétrique des liaisons C-H du groupe CH <sub>2</sub>
2854	Vibration d'élongation symétrique des liaisons C-H du groupe CH <sub>2</sub>
1746	Vibration des groupements carbonyles C=O
1644	Vibration d'élongation des hydroxyles O-H de l'eau
1460	Vibration de déformation asymétrique des liaisons C-H du cycle aromatique
1381	Vibration de déformation symétrique des liaisons C-H dans le plan des polysaccharides
1238	Vibration d'élongation des groupements C-O
1163	Vibration d'élongation antisymétrique des liaisons C-O-C de la cellulose et de l'hémicellulose
1034	Vibration de déformation des liaisons C-O-C de la cellulose et de l'hémicellulose
609	Vibration de déformation des hydroxyles O-H des polysaccharides.

Le spectre de la farine du bois non traité montre l'existence d'une large bande entre  $3200\text{ cm}^{-1}$  et  $3600\text{ cm}^{-1}$  correspondant aux bandes de vibrations d'étirement des groupes d'élongation fonctionnels des hydroxyles O-H et C-H de la cellulose et de la lignine, trouvés dans les matériaux lignocellulosiques.

On observe également une bande à  $2935\text{ cm}^{-1}$  est attribuée aux étirements asymétriques de la liaison C-H de la lignine.

La bande à  $1034\text{ cm}^{-1}$  montre l'existence de la cellulose et de l'hémicellulose correspondant aux vibrations de déformation des liaisons C-O-C.

L'effet du traitement alcalin sur la farine du bois se traduit par la réduction de l'intensité du signal qui se traduit par la diminution des bandes des hydroxyles et aussi des bandes de la cellulose et d'hémicellulose correspondant à la leur dissolution. Ainsi que par une diminution des autres pics du fait de l'opération de lavage causée par la soude et cela est en parfait accord avec la littérature [1].

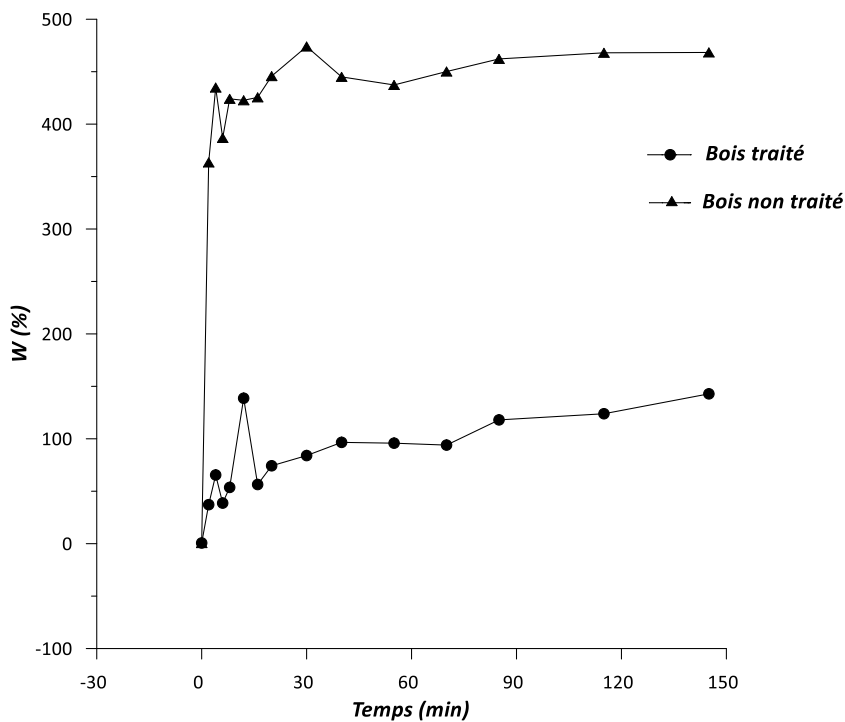
Cette dissolution qu'engendre le traitement alcalin a été expliqué par une hydrolyse partielle des hémicelluloses en milieu alcalin et par conséquent la rupture des liaisons C-O-C entre deux monomères, la solution devient riche en oligosaccharides de poids moléculaires inférieurs et libérerait des sucres simples sous leur forme acide. Le traitement alcalin nettoie la surface des fibres en dégradant leurs constituants amorphes tels que les graisses, les cires ainsi que les polysaccharides (lignines, hémicelluloses) [2].

### **VI.1.3. Mesure du taux d'absorption par capillarité de la farine du bois :**

Le **tableau IV.3** présente les résultats de mesure du taux d'absorption d'eau par capillarité de la farine de bois avec et sans traitement alcalin (NaOH).

**Tableau.IV.3.** Taux d'absorption d'eau par capillarité de la farine du bois en fonction du temps.

Temps (min)	Masse de la pastille traitée (g)	W (%) de la pastille traitée	Masse de la pastille non traitée (g)	W (%) de la pastille non traitée
0	0,644	0.644	0,540	0.540
2	0,884	37,167	2,503	363,439
4	1,066	65,485	2,888	434,829
6	0,893	38,680	2,629	386,803
8	0,990	53,631	2,830	424,093
12	1,538	138,655	2,823	422,714
16	1,007	56,391	2,838	425,502
20	1,123	74,252	2,947	445,752
30	1,185	83,995	3,100	473,975
40	1,266	96,578	2,944	445,039
55	1,262	95,819	2,902	437,348
70	1,250	93,979	2,971	450,119
85	1,405	118,006	3,036	462,180
115	1,442	123,860	3,068	468,010
145	1,565	142,849	3,069	468,342

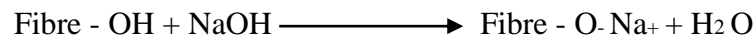


**Fig.IV.2.** Evolution de l'absorption en eau par capillarité de la farine du bois traitée et non traitée avec une solution alcaline (NaOH).

Les résultats de l'absorption d'eau par capillarité de la farine du bois traité et non traité dans une solution alcaline montrent que le bois traité absorbe trois fois moins d'eau que le bois naturel. Les modifications causées par ce traitement alcalin donnent une augmentation de la

rugosité de la surface en brisant la liaison hydrogène interne ce qui modifie la cristallinité, la structure des cellules unitaires, l'absorption d'humidité et l'orientation des fibrilles, améliorant ainsi les propriétés mécaniques de la fibre. Pendant le traitement, la lignine, la cire et les huiles qui dissimulent la surface extérieure de la paroi cellulaire en fibres sera partiellement enlevée, ainsi que l'hémicellulose (*Ahmad, Hamid, and Osman 2019*).

Dans le cas des fibres végétales, Le traitement par l'hydroxyde de sodium (NaOH) conduit à l'ionisation du groupe hydroxyle selon la formule suivante : (*Cao et al,2006*)



On peut conclure que le traitement chimique par de la soude (NaOH) apporte un effet positif sur la fonctionnalisation de la farine du bois en diminuant la capacité de liaison hydrogène de la cellulose et en éliminant les groupes hydroxyle ouverts qui ont tendance à se lier aux molécules d'eau. Il dissout également les hémicelluloses (les plus hydrophiles) ainsi que de réduire la capacité de la fibre à absorber l'humidité (*Azwa et al. 2013*).

D'après ce résultat, notre choix d'élaboration des composites Bois-Ciment est porté sur la farine du bois qui a subi un traitement chimique par de la soude.

#### IV.1.5. Rétractabilité volumique (R%) de la farine du bois (Stabilité dimensionnelle) :

Les mesures de la rétractabilité volumique (R%) de la farine du bois traitée chimiquement sont présentées dans le **tableau.IV.4**.

**Tableau.IV.4.** Rétractabilité volumique (Stabilité dimensionnelle)

Pastille	1	2	3	4	5	Moyenne
Volume humide (cm <sup>3</sup> )	0,411	0,464	0,383	0,623	0,451	0,466
Volume sec (cm <sup>3</sup> )	0,397	0,397	0,358	0,583	0,424	0,432
Rétractabilité volumique (%)	3,4	16,87	7,46	6,96	6,38	8,21

La rétractabilité volumique mesurée pour un taux d'humidité équivalent à 70% est de l'ordre de 8.21% qui représente une valeur seuil qui est égale au taux d'humidité du point de saturation des fibres (PSF) [3].

## IV.2. Caractérisation du composite Bois-Ciment (CBC)

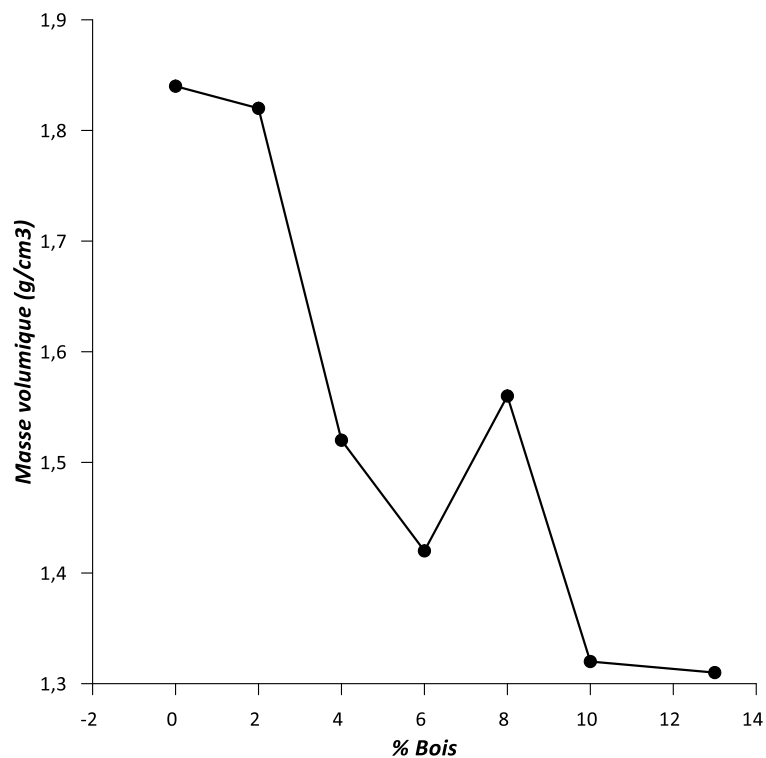
### IV.2.1. Masse volumique des composites Bois-Ciment

Le **tableau.IV.5** présente la variation de la masse volumique des composites en fonction de la teneur en bois après 28 jours de séchage.

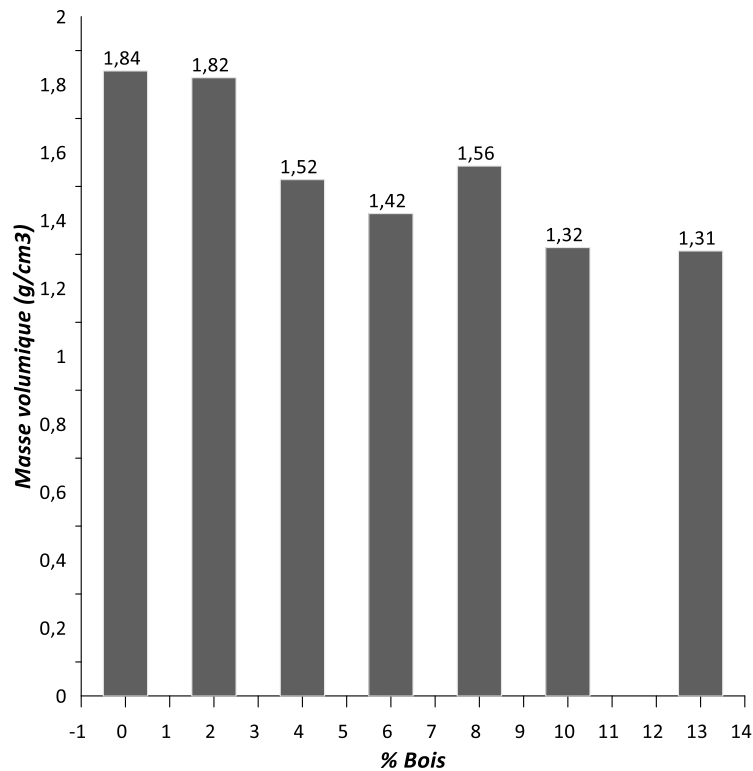
**Tableau.IV.5.** Masse volumique des composites

% Bois	Mo avant séchage (g)	M après séchage (g)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
0%	460,36	420,37	160	40	39	1,84
2%	456,48	409,04	160	40	39	1,82
4%	391,59	362,55	160	40	40	1,52
6%	365,43	348,91	160	40	40	1,42
8%	376,63	356,36	160	40	39	1,56
10%	338,82	308	160	40	40	1,32
13%	320,7	298,36	160	40	39	1,31

La courbe et l'histogramme correspondant à l'évolution de la masse volumique des composites sont présentés en **figure.IV.3** et **4**.



**Fig.IV.3.** Evolution de la masse volumique des composite Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois.



**Fig.IV.4.** Evolution de la masse volumique des composite Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois sou forme d'un Histogramme.

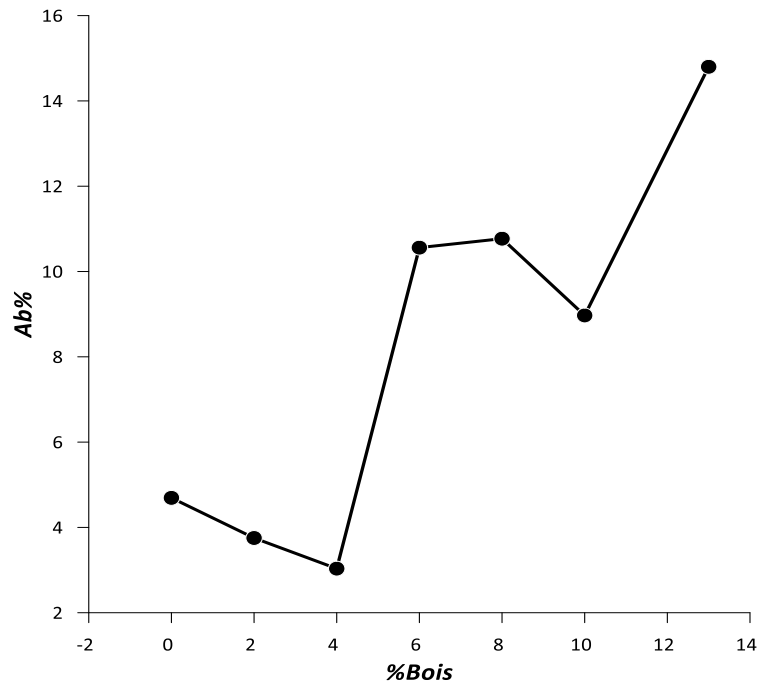
Les résultats illustrent que l'incorporation de la farine du bois réduit considérablement la masse volumique du matériau composite. Ce qui correspond à un béton léger. La valeur minimale de la masse volumique enregistrée est obtenue pour une teneur de 10 et 13% en bois qui correspond respectivement à 1320 et 1310 kg/m<sup>3</sup>. Ces valeurs rentrent dans la gamme des bétons légers isolants (1000-1400Kg/m<sup>3</sup>) [2].

#### **VI.2.2. Mesure du taux d'absorption d'eau par capillarité du composite en fonction de la teneur en Bois :**

Les mesures du taux d'absorption des éprouvettes Bois-Ciment par capillarité ainsi que la courbe correspondante sont présentés, respectivement, dans le **tableau.IV.6** et **figure.IV.5**. Les résultats obtenus montrent une différence d'absorption en fonction de la teneur en bois. Cette différence est liée directement à la porosité du matériau. En général, plus la compacité est élevée plus l'absorption capillaire est faible [2].

**Tableau.IV.6.** Taux d'absorption par capillarité des composites Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois.

Eprouvettes (%B)	0%	2%	4%	6%	8%	10%	13%
Absorption Ab (%)	4,693	3,752	3,034	10,56	10,77	8,97	14,8



**Fig.IV.5.** Evolution de l'absorption par capillarité des composite Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois.

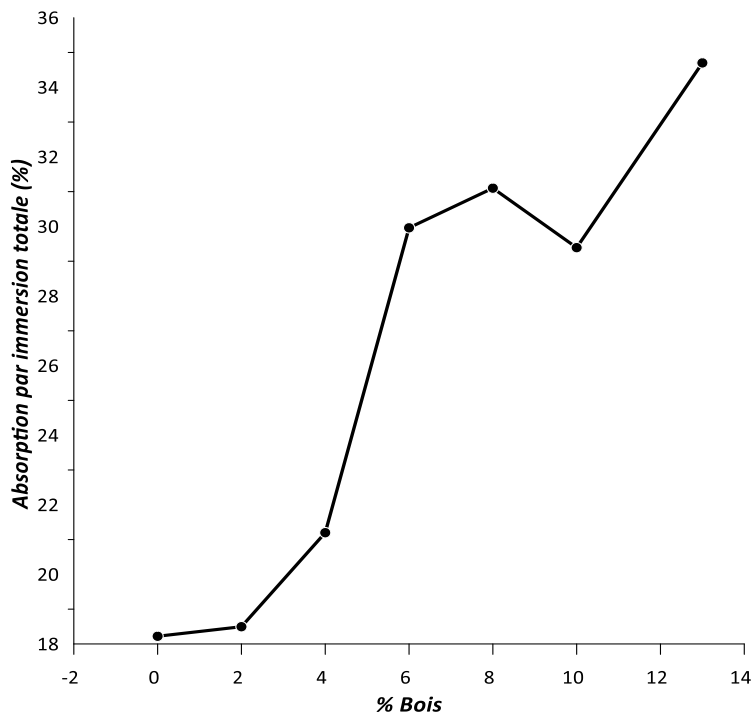
Le taux d'absorption en eau se voit en chute pour les composites contenant 0% à 4% en bois, cette chute est liée directement à la compacité des composites, donc à une faible porosité. Pour les composites à 6 et 8% en bois, cette absorption connaît une augmentation remarquable et cela est due à la porosité importante du matériau vu que le bois est un matériau poreux. A 10% en bois, le taux d'absorption diminue à nouveau, cette diminution est la conséquence d'un matériau compacte a une teneur de 10% en bois. Au-delà de 10% en bois, l'absorption connaît une augmentation importante de l'ordre de 14.8%.

### IV. 2.3. Mesure du taux d'absorption d'eau par immersion totale (24h) des composites en fonction de la teneur en bois

Les mesures du taux d'absorption d'eau des éprouvettes Bois-Ciment par immersion totale pendant 24h en fonction de la teneur en bois ainsi que la courbe correspondante sont présentés, respectivement, dans le **tableau.IV.7** et **figure.IV.6**.

**Tableau.IV.7.** Taux d'absorption des composites en fonction de la teneur en bois par immersion totale après 24h.

Eprouvettes (%B)	0%	2%	4%	6%	8%	10%	13%
Absorption A (%) par immersion après 24h	18,221	18,495	21,197	29,96	31,1	29,39	34,7



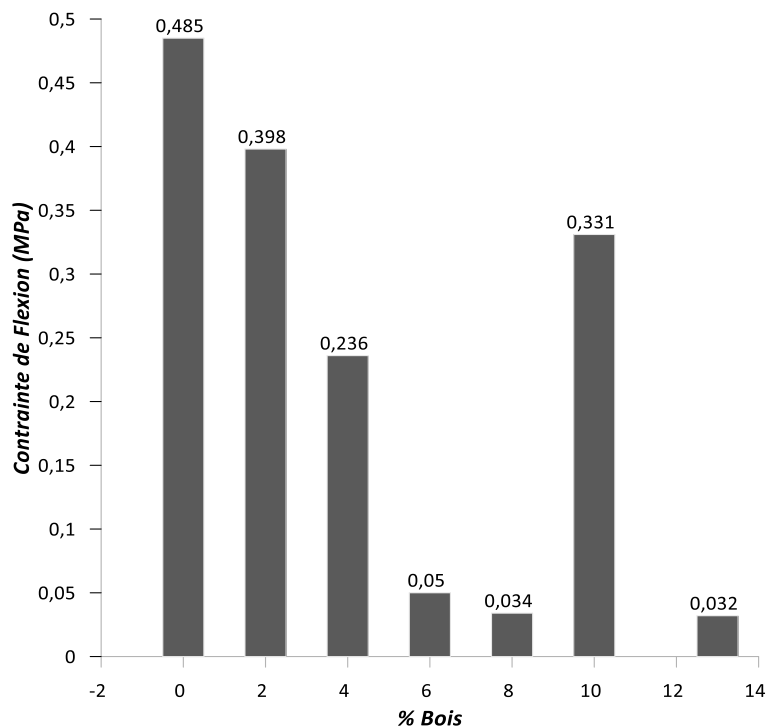
**Fig.IV.6.** Evolution du taux d'absorption d'eau par immersion totale pendant 24h des composites Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois.

Les résultats montrent une augmentation de l'absorption d'eau en fonction de la teneur en Bois contenues dans les composites, elle atteint un maximum de l'ordre de 34.7% pour les composites à 13% en bois. On constate que plus la teneur en bois incorporée dans les composites est importante plus l'absorption d'eau augmente. Cette valeur d'absorption est très significative car elle décrit directement la porosité importante du matériau, ce qui engendre une dégradation des propriétés des composites notamment les propriétés thermiques. Par contre, a une teneur en

bois de 10%, on constate une légère diminution de l'absorption d'eau des composites malgré la teneur élevée du bois, on peut conclure que cette diminution de l'absorption est liée probablement à la porosité qui se trouve uniforme sur toute la surface du matériau. IV.2.4. Caractérisation mécanique

#### IV.2.4.1. Résistance à la Flexion

La figure suivante présente le diagramme des contraintes de flexion en fonction de la course des composites bois-ciment à différentes proportions.



**Fig.IV.7.** Histogramme présentant l'évolution des contraintes de Flexion des composites Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois.

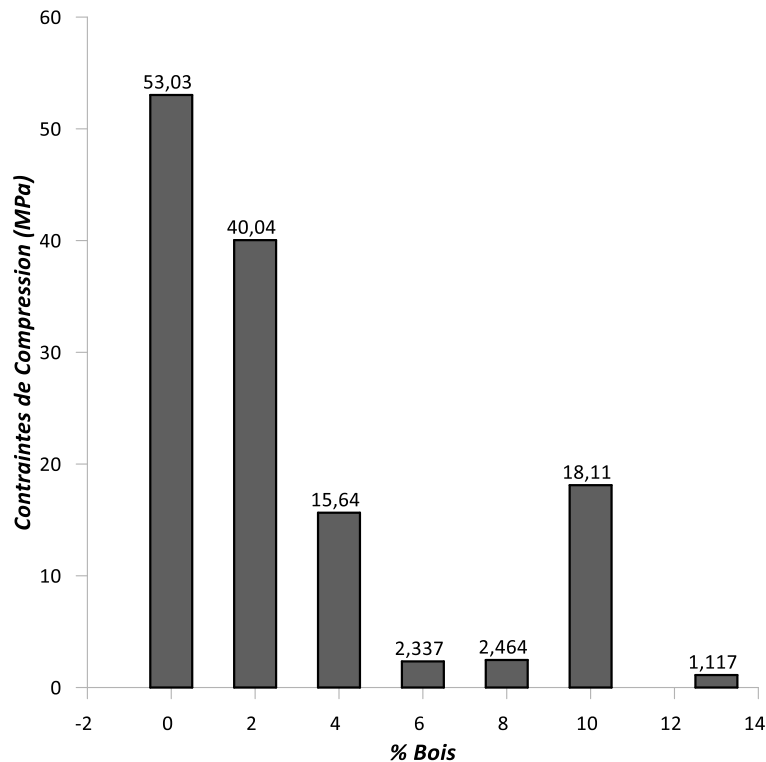
On observe une diminution progressive de la résistance à la flexion des composites pour des teneurs en bois allant de 0 à 8% et à 13%. A 10% en bois, on enregistre une augmentation de la résistance pour atteindre une valeur de 0.331MPa, une valeur très proche de l'éprouvette témoin (0% bois). Cette valeur est très loin de celle rapportée par *Farid TOULOUM* [3] en utilisant du bois de palmier dattier à 8% avec une résistance de 9.04MPa. Et aussi en comparant avec la valeur (4.91MPa) trouvée par *Linda ANES* [2] en utilisant du bois d'eucalyptus à 5%.

L'augmentation de la résistance en flexion de composite bois -ciment en le comparant à l'éprouvette témoin traduit une certaine adhésion entre les particules de bois et la matrice cimentaire.

#### IV.2.4.2. Résistance en Compression :

Le comportement mécanique en compression des composites Bois-Ciment est étudié pour voir l'influence des particules du bois sur la résistance du composite à l'écrasement.

La figure ci-dessus représente l'évolution de la résistance mécanique en compression des composites Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois à 28 jours de séchage.



**Fig.IV.8.** Histogramme de l'évolution des contraintes de compression des composites Bois-Ciment en fonction de la teneur en Bois.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression des composites diminue pour des teneurs en bois allant de 0 à 8%, elle varie de 53.03 pour le composite de référence 0% en bois à 2.337MPa pour 6% en bois, soit une réduction importante de l'ordre de 95.61%. Cette résistance demeure très faible à 8% en bois. Cette chute revient probablement à la porosité existante dans les composites qui renferme une quantité importante d'eau libre en fonction de la teneur en bois, ce qui engendre une diminution de la compacité des composites et par conséquent, une faible résistance mécanique.

Par ailleurs, à 10% en bois, on enregistre une augmentation remarquable de la résistance à la compression, elle est de l'ordre de 18.11MPa. A 13% en bois, une chute brutale à nouveau de la résistance à la compression.

**Tableau.IV.8.** Quelques résultats de travaux réalisés sur les composites à base du bois.

Composites	Rc (MPa)	Référence
Composites à 10% Bois	18.11	Présente étude
Gypse-bois de palmier dattier (1,2% masse)	8.2	[Chikhi, Agoudjil et al. (2013)]
Ciment-filler-sable-bois (10% masse)	10.6	[Bederina, Marmoret et al. (2007)]
Mortier –fibre de coco (10% masse) 7,96	7.96	[Khedari, Suttisonk et al. (2001)]
Béton –fibre de palmier dattier (2% masse)	20	[Kriker, Debicki et al. (2005)]

#### IV.2.5. Mesure de Conductivité thermique ( $\lambda$ ) :

La conductivité thermique est définie comme étant le flux de chaleur qui traverse un matériau d'épaisseur connue avec une différence de températures entre les deux faces, elle s'exprime en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ . Plus la conductivité est faible, plus le pouvoir isolant du matériau est grand.

**Tableau.IV.9.** Données de la mesure de la conductivité thermique.

	HFM (mV)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	Ls (mm)	$\lambda$ (W/mK)
0%	68.6	32.9	7.6	32.5	0.01857	1.19542
2%	70.1	34.8	4.8	33.4	0.01752	1.00720
4%	55	34.3	5.1	33.5	0.02087	0.71766
6%	61.4	31.1	5	30.4	0.01412	0.72111
8%	50.8	31	0.2	29.4	0.01835	0.54141
10%	52.2	35.3	2.4	33.8	0.017175	0.47498

Avec :

**HFM** : Sortie du débitmètre thermique en (mV)

**T<sub>1</sub>(T<sub>H</sub>)** : Température de la plaque chaude en (°C)

**T<sub>2</sub>(T<sub>C</sub>)** : Température de la plaque froide en (°C)

**T<sub>3</sub>(réfrigérant)** : Température de l'entrée du réfrigérant en (°C)

**Ls** : Epaisseur de la plaque en (mm)

**$\lambda$**  : Conductivité thermique en (w/m.k)

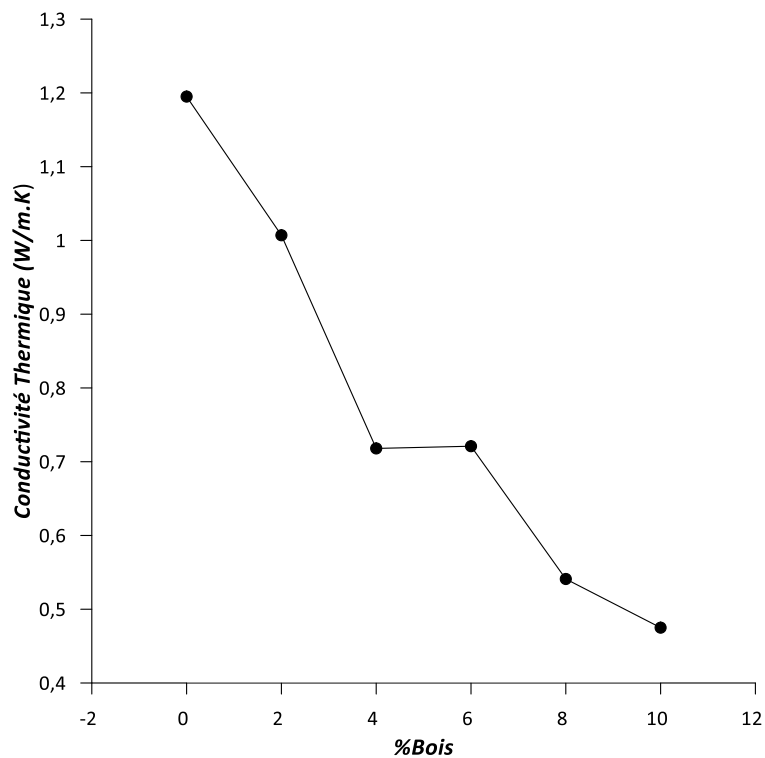
Avec : **Ls** = [(nombre de tours avec échantillon) – (nombre de tours sans échantillon)]\*le pas

Où le pas = 2.5

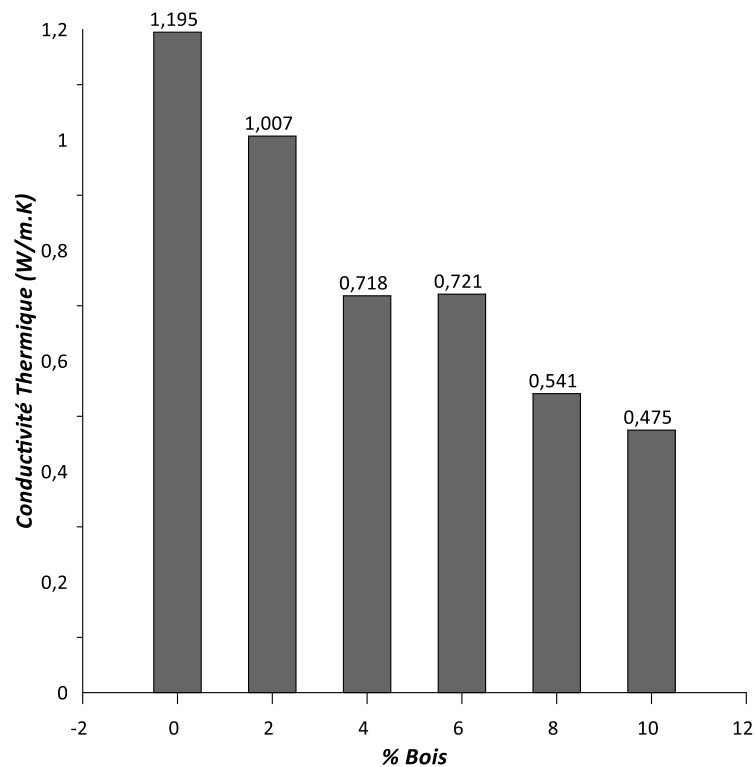
Après mesure, les résultats de l'évolution de la conductivité thermiques, la courbe et l'histogramme correspondants sont présentés respectivement dans le *tableau.IV.10* et *figure.VI.9 et 10*.

**Tableau.IV. 10** Résultats de la mesure de la conductivité thermique des composites

Pourcentage du bois (%)	0	2	4	6	8	10
Conductivité thermique $\lambda$ (w/m.k)	1,195	1,007	0,718	0,721	0,541	0,475



**Fig.IV.9.** Courbe montrant l'évolution de la Conductivité thermique des composites en fonction de la teneur en Bois.



**Fig.IV.10.** Histogramme montrant l'évolution de la Conductivité thermique des composites en fonction de la teneur en Bois.

La courbe (**Fig.IV.9**) et l'histogramme (**Fig.IV.10**) illustrent la variation de la conductivité thermique des composites en fonction de la teneur en bois (0% à 10%). Les mesures sont réalisées à température ambiante et à pression atmosphérique.

Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique passe de  $\lambda=1,195$  à  $0,475\text{W/m}\cdot\text{K}$  pour une teneur de bois allant de 0 à 10% respectivement, avec un gain thermique important.

On remarque que la conductivité thermique diminue en augmentant le pourcentage de la farine du bois et en diminuant la quantité du ciment incorporé dans le mélange. En effet, la conductivité thermique est d'autant plus importante que le dosage en ciment est important (*Demirboga 2003*). Ce résultat est vérifié quel que soit le type de la biomasse injectée dans une matrice minérale (*Bentchikou et al. 2017*) (*Espinoza Herrera 2009*) (*Touloum et al. 2016*) (*Lahouioui 2019*) [2].

De ce fait, on constate que la conductivité thermique du composite bois-ciment dépend fortement de deux facteurs essentiels :

- ✚ La porosité existante dans les composites crée par la matière végétale et qui augmente avec la teneur en bois. Plus cette porosité augmente, plus la conductivité thermique de composite diminue (*Boumhaout et al. 2017*) [2].
- ✚ De la conductivité thermique des principaux constituants incorporés dans le mélange. La conductivité thermique de la farine du bois est faible, elle est de l'ordre de ( $\lambda = 0,06$  à  $0,07$  W/m.K) et celle du ciment ( $\lambda = 0,5$  à  $1,3$  W/m.K). Par conséquent, la quantité du ciment injecté dans le mélange présente un impact direct sur l'augmentation de la conductivité thermique. Ce résultat est vérifié quel que soit le type de matière végétale utilisée dans une matrice minérale.

D'après ces résultats, on peut constater que le renforcement de la matrice cimentaire par les particules du bois améliore ses propriétés thermiques et le rend un bon matériau d'isolation thermique. De ce fait, la conductivité thermique des composites diminue avec l'augmentation de la quantité des particules du bois incorporée. A 10% en bois, la conductivité thermique atteint la valeur de  $0,475$ W/m.K, une valeur proche de celle trouvée par *ANES Linda* [2] ( $\lambda=0,41$ W/m.K) en utilisant du bois d'eucalyptus a 15% en masse.

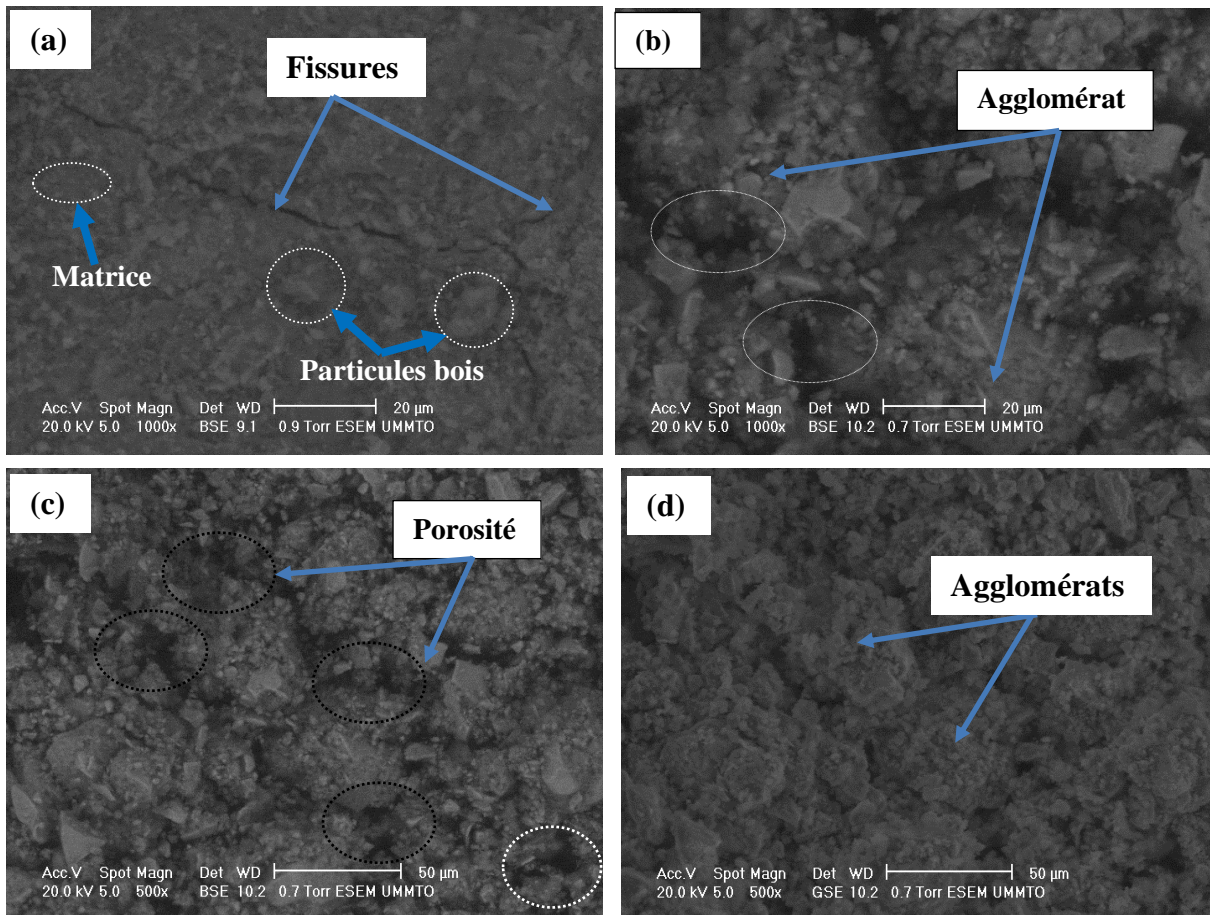
Le **tableau.IV.11** illustre quelques travaux réalisés sur la mesure de la conductivité thermique des composites à base de différentes essences du bois.

**Tableau.IV.11.** Travaux réalisés la mesure de la conductivité thermique des composites à base de différentes essences du bois.

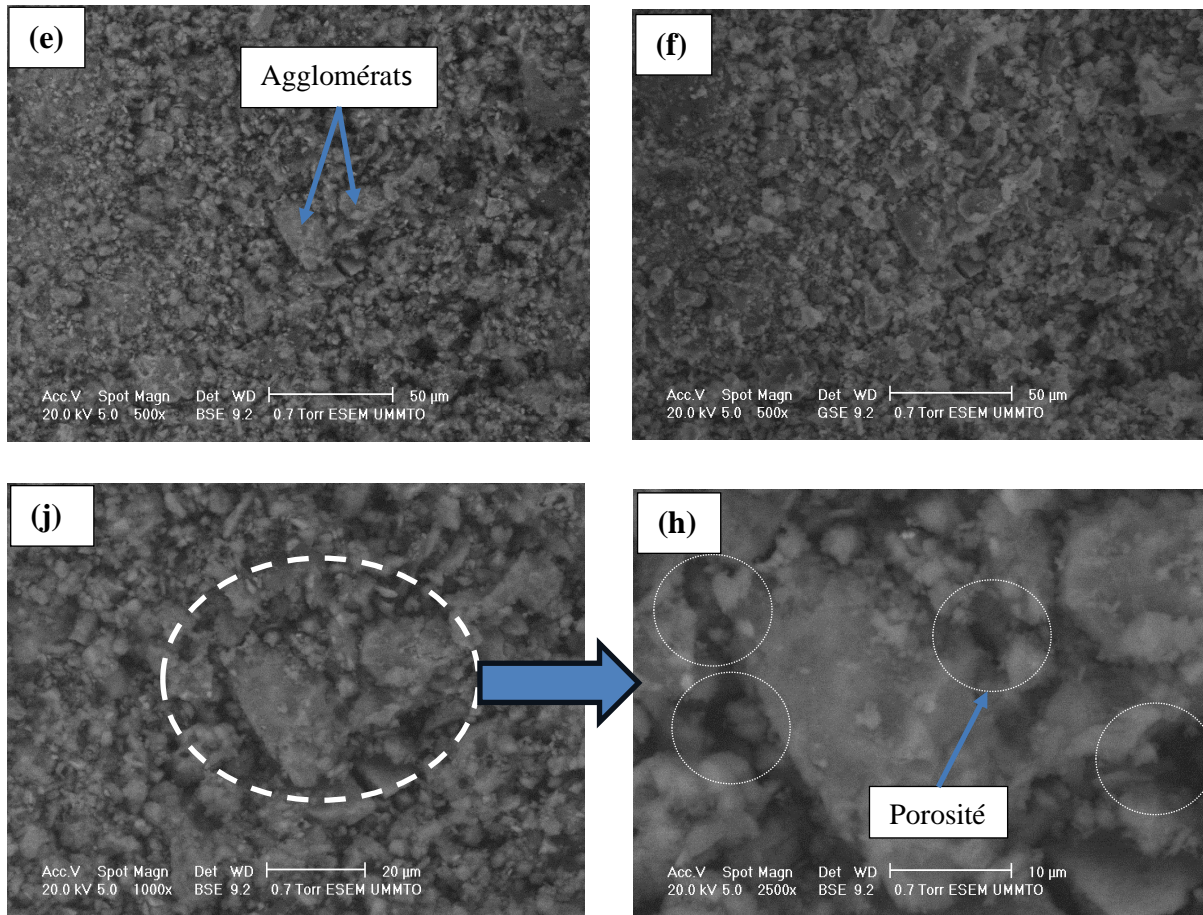
Composites	$\lambda$ (W//m.K)	Référence
(10%)	0.475	Présente étude
Ciment/ Bois d'eucalyptus (15%)	0.41	[Anes Linda (2022)]
Ciment/Bois palmier dattier (8% et 10%)	0.24 - 0.6	[Touloum (2018)]
Ciment/Bois palmier dattier (0%)	0.96	[Touloum (2018)]
Gypse/bois de palmier dattier (10 % masse)	0,15 - 0,17	[Chikhi, Agoudjil et al. (2013)]
Ciment-filler-sable-bois (10-100 % masse)	0,80 - 0,65	[Bederina, Marmoret et al. (2007)]
Ciment-argile-bois (30 % masse)	0,20	[Bouguerra, Amiri et al. (2001)]

### IV.2.6. Caractérisation morphologique par Microscopie électronique à balayage (MEB)

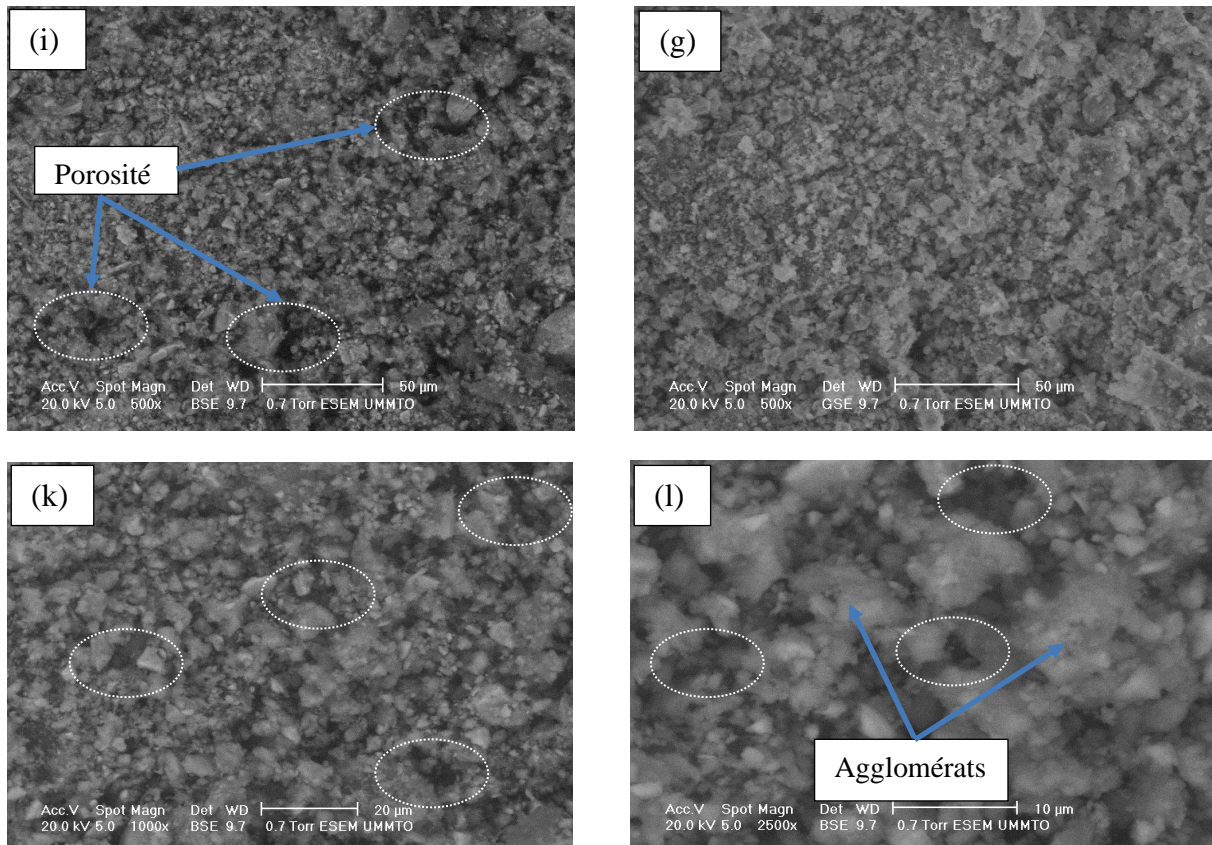
L'analyse par Microscopie électronique à balayage des composites bois ciment à 2, 6, 10 et 13% en bois sont réalisées en mode électrons rétrodiffusés ainsi qu'en mode électrons secondaires pour évaluer la topographie des composites. Les micrographies sont présentées ci-dessous ;



**Fig.IV.11.** Micrographies électroniques en mode électrons secondaire et rétrodiffusés des composites à 2% en bois.



**Fig.IV.12.** Micrographies électroniques en mode électrons secondaire et rétrodiffusés des composites à 10% en bois.



**Fig.IV.13.** Micrographies électroniques en mode électrons secondaire et rétrodiffusés des composites à 13% en bois.

D'après les micrographies électroniques, on observe deux contrastes différents qu'on attribue automatiquement aux particules du bois et à la matrice cimentaire. En allant de 0 à 13% en bois, le contraste devient de plus en plus clair et brillant. Ceci est très visible sur les micrographies (c, j et k). En outre, ces particules en bois se trouvent dispersées dans la matrice cimentaire, donc probablement, ce contraste clair correspond aux particules du bois quoiqu'une affirmation doit être faite à l'aide des micro-analyses EDS lié au Microscope électronique à balayage.

On observe également que la structure des composites est sous forme d'agrégats agglomérés de différentes tailles et géométries. En allant de 0 à 13% en bois, et si on compare les micrographies (b), (j) et (k), on constate que la tailles de ces agglomérats se réduisent et diminuent et se trouvent dispersés d'une manière quasi-homogène sur toute la surface.

Ces agglomérats sont séparés par une porosité accrue qui augmente en fonction de la teneur en bois contenue dans le mélange. Ces agglomérats se réduisent en augmentant la teneur en bois.

Sachant que le bois est une structure lignocellulosique poreuse, donc par conséquent, la porosité se trouve importante en augmentant la teneur en bois.

Cette porosité est très marquée sur les micrographies (k) et (l). Et par conséquence, plus cette porosité est importante, plus le matériau acquiert d'excellentes propriétés thermiques en termes d'isolation.

Il est important de signaler aussi, la présence des fissures qui se propagent suivant toutes les directions.

#### **IV.7. Conclusion :**

L'incorporation de la farine du bois réduit considérablement la masse volumique du matériau composite bois ciment. Ce qui correspond à un béton léger. La valeur minimale de la masse volumique enregistrée est obtenue pour une teneur de 10 et 13% en bois qui correspond respectivement à 1320 et 1310 kg/m<sup>3</sup>. Ces valeurs rentrent dans la gamme des bétons légers isolants (1000-1400Kg/m<sup>3</sup>).

Le taux d'absorption en eau par capillarité et immersion semble faible pour une teneur en bois à 10% en le comparant à d'autres teneurs. Cela est en accord avec l'effet du traitement alcalin qui a réduit l'absorption en eau en réduisant les groupements hydroxyles O-H confirmé par l'analyse FTIR.

L'augmentation de la résistance en flexion de composite bois -ciment en le comparant à l'éprouvette témoin traduit une certaine adhésion entre les particules de bois et la matrice cimentaire.

A 10% en bois, on enregistre une augmentation remarquable de la résistance à la compression, elle est de l'ordre de 18.11MPa. A 13% en bois, une chute brutale à nouveau de la résistance à la compression.

Le renforcement de la matrice cimentaire par les particules du bois améliore ses propriétés thermiques et le rend un bon matériau d'isolation thermique. La conductivité thermique atteint la valeur de 0.475W/m.K,

L'analyse micrographique par microscopie électronique à balayage montre l'existence d'une porosité accrue qui augmente en fonction de la teneur en bois incorporée dans le mélange.

---

**Références**

- [1] Rahmoun et al « Effect of treatment with soda and dimethoxydimethylsilane on water absorption and thermal stability of olive pomace flour and date stone » J. Mater. Environ. Sci. 6 (9) (2015) 2655-2664.
- [2] ANES Linda, "Elaboration et caractérisation d'un composite bois-ciment, "Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2021.
- [3] Farid Touloum, "Contribution au développement de matériaux isolants dans le domaine du bâtiment. Utilisation du bois de palmier dattier," Université Mohamed Khider-Biskra, 2018.
- [4] V. Tserki, P. Matzinos, S. Kokkou, C. Panayiotou, Novel biodegradable composites based on treated lignocellulosic waste flour as filler. Part I. Surface chemical modification and characterization of waste flour, Composites. Part A, 2005; 36: 965-974.

## Conclusion Générale

L'objectif principal de cette étude consiste en la valorisation et le recyclage des déchets du bois rouge pour son utilisation dans la fabrication d'un matériau composite léger, isolant à matrice cimentaire et aux propriétés mécaniques acceptables.

Pour réaliser ces objectifs, nous avons pu élaborer nos composites à matrice cimentaire avec des particules de bois rouge comme renforts à des pourcentage de 0%-2%-4%-6%-8%-10% et 13% à l'aide d'un protocole de fabrication. Nos composites élaborés sont ensuite caractérisés par des essais physico-chimiques, mécaniques et thermiques.

Au préalable, la farine du bois rouge a été traité chimiquement dans une solution alcaline pour réduire le phénomène d'absorption d'eau des composites, un traitement alcalin a été recommandé afin de réduire les substances hydrophiles qui accélèrent le processus d'absorption en présence d'eau et par conséquent des propriétés médiocres.

Il en ressort de cette étude que l'incorporation de la farine du bois réduit considérablement la masse volumique du matériau composite bois ciment. Ce qui correspond à un béton léger. La valeur minimale de la masse volumique enregistrée est obtenue pour une teneur de 10 et 13% en bois qui correspond respectivement à 1320 et 1310 kg/m<sup>3</sup>. Ces valeurs rentrent dans la gamme des bétons légers isolants (1000-1400Kg/m<sup>3</sup>).

Le taux d'absorption en eau par capillarité et immersion semble faible pour une teneur en bois à 10% en le comparant à d'autres teneurs. Cela est en accord avec l'effet du traitement alcalin qui a diminué considérablement l'absorption en eau en réduisant les groupements hydroxyles O-H confirmé par le l'analyse IRTF.

La légère augmentation de la résistance en flexion du composite bois -ciment en le comparant à l'éprouvette témoin traduit l'existence d'une certaine adhésion entre les particules de bois et la matrice cimentaire.

A 10% en bois, on enregistre une augmentation remarquable de la résistance à la compression, comparativement à la flexion. Elle est de l'ordre de 18.11MPa.

Le renforcement de la matrice cimentaire par les particules du bois améliore ses propriétés thermiques et le rend un bon matériau d'isolation thermique. La conductivité thermique atteint la valeur de 0.475W/m.K.

L'analyse micrographique par microscopie électronique à balayage montre l'existence d'une porosité accrue qui augmente en fonction de la teneur en bois incorporée dans le mélange. De plus on a observé des agrégats agglomérés de différentes géométries et qui se réduisent en fonction de la teneur en bois. Plus ces agglomérats diminuent de tailles, plus la porosité est marquée et par conséquent, le matériau devient plus isolant, ce qui a été constaté dans les résultats de la conductivité thermique.

De ce fait, on peut conclure que parmi les composites élaborés, le composite à 10% en bois est doté d'une résistance en compression importante associée à une bonne isolation thermique. Donc on peut proposer ce matériau pour son utilisation dans le bâtiment comme un isolant dans les recouvrements des murs.

En perspectives, il est important d'étaler cette étude sur :

- ✚ D'autres essences du bois pour voir leur comportement dans la matrice cimentaire.
- ✚ L'étude du comportement au feu et de l'isolation phonique des composites bois-ciment.
- ✚ L'utilisation d'autres traitements chimiques qui jouent le rôle de greffage chimique qui inhibent l'absorption d'eau du bois donc du composite.