



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت - بلحاج بوشعيب

Université Ain Témouchent–Belhadj Bouchaib

Faculté des sciences et de Technologie

Département de Genie Civil

Projet de Fin d'études pour obtenir le diplôme de master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie civil & Travaux Publics

Spécialité : Matériaux & VOA

Thème :

Effet de la Température sur les Mortiers à Base de fibres Végétales.

Realisé par :

- Lalla ISmail
- Zahraoui Mohamed Ihab

Devant les jurys composés de :

- | | | |
|-----------------------|------------------------|------------|
| • Mme. MOOUSSI Wahiba | U.B.B (Ain Temouchent) | Président. |
| • Mme. DERBAL Ahlem | U.B.B (Ain Temouchent) | Encadreur. |
| • Mme. MANAA Rab | U.B.B (Ain Temouchent) | Examineur. |

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciement

Avant tout, on remercie DIEU le tout-puissant d'avoir nous donner le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études, et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences et technologies, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre encadreur madame DERBAL Ahlem pour l'intérêt porté à notre travail, sa disponibilité, ses conseils précieux et surtout sa grande patience.

Mes remerciements vont aussi aux techniciens du laboratoire de département génie civil à l'U Belhadj Bouchaib, pour leur explications et contribution à la réalisation de ce travail.

Enfin pour tous ceux qui ont participés de près ou de loin à réaliser de ce modeste travail,

MERCI.



Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je
dédie ce travail :*

*A nos parents pour le mérite d'être venu au monde, leurs soins et leurs
instructions si précieux.*

À tous les membres de ma famille.

En témoignage de ma sincère amitié je dédie cette mémoire à :

A tous mes très chers amis

A tous mes collègues de ma filière génie civil & Travaux Publics.

A tous mes professeurs qui nous ont enseigné.

A tous ceux qui me sont chers et qui sont aujourd'hui absents.

ISMAIL...

Je dédie ce travail :

A mes chers parents pour leur amour, soutien et sacrifices.

A mes amies pour leur support et motivation.

*Et pour conclure cette modeste dédicace, je tiens à remercier
chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé partiellement et
substantiellement à réaliser ce travail.*

M. IHAB...

Résumé

Résumé :

Le mortier est un matériau cimentaire largement utilisé dans le domaine du génie civil. Dans certaines conditions d'utilisation, notamment en cas d'exposition à des températures élevées (incendies, environnements extrêmes), ses propriétés physiques et mécaniques peuvent être altérées. Ainsi la présente étude expérimentale vise à analyser l'effet de la température sur le comportement de mortiers renforcés par des fibres végétales, en particulier les fibres issues du palmier dattier et des algues marines. Une attention particulière a également été portée à l'incorporation de la perlite naturelle de Hammam Boughrara (Maghnia) utilisée comme substitut partiel du sable, dans le but d'améliorer les propriétés thermo-physiques du mortier et alléger sa structure. Dans cette recherche, l'accent est mis sur l'influence de ces composants naturels dans différentes formulations de mortier, avec un même rapport Eau/Liant, et soumises à des températures croissantes de 200°C, 400°C et 600°C. Les fibres ont été préalablement traitées par une solution alcaline (NaOH) afin d'améliorer leur durabilité et leur adhésion à la matrice cimentaire. Plusieurs essais ont été réalisés à l'état frais (maniabilité, air occlus) et à l'état durci (résistances à la compression et à la flexion, absorption capillaire, conductivité thermique, ultrasons).

Les résultats obtenus montrent que l'ajout des fibres végétales et de la perlite a un impact significatif sur le comportement thermo-mécanique des mortiers étudiés. À température ambiante, les performances sont améliorées, mais au-delà de certaines températures, la dégradation thermique des fibres devient un facteur limitant. Cette étude met en lumière le potentiel des fibres végétales et de la perlite comme alternatives écologiques et performantes dans la formulation des mortiers, tout en soulignant la nécessité d'un dosage optimal et de traitements adaptés pour améliorer leur stabilité thermique.

Mots clés : Mortiers, Effet de la température, Fibres végétales, Palmier dattier, Algues, Perlite, Traitement alcalin.

Abstract:

Mortar is a cement-based material widely used in civil engineering. In certain use conditions, especially when exposed to high temperatures (such as fires or extreme environments), its physical and mechanical properties may be significantly affected. Therefore the present experimental study aims to analyze the effect of temperature on the behavior of mortars reinforced with natural plant fibers, particularly those extracted from date palm and marine algae. Special attention was also given to the incorporation of natural perlite from Hammam Boughrara (Maghnia), used as a partial replacement for sand, to improve the thermo-physical behavior of the mortar and lighten its structure. This research focuses on the influence of these natural components in various mortar formulations, using a constant water/binder ratio and exposing them to increasing temperatures of 200, 400, and 600°C. The plant fibers were pre-treated with an alkaline solution (NaOH) to enhance their durability and bonding with the cement matrix. Several tests were conducted on both fresh (workability, entrained air) and hardened mortars (flexural and compressive strength, capillary absorption, thermal conductivity, ultrasound).

The results show that the addition of plant fibers and perlite significantly influences the thermo-mechanical behavior of the studied mortars. At room temperature, their performance is improved, but at higher temperatures, the thermal degradation of the fibers becomes a limiting factor. This study highlights the potential of plant fibers and perlite as eco-friendly and efficient alternatives in mortar formulation, while emphasizing the importance of optimal dosage and appropriate treatments to ensure thermal stability.

Keywords: Mortars, Temperature effect, Plant fibers, Date palm, Algae, Perlite, Alkaline treatment.

ملخص :

الملاط هو مادة أسمنتية تستخدم على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية وفي بعض ظروف الاستعمال، خاصةً عند التعرض لدرجات حرارة مرتفعة (مثل الحرائق أو البيئات القاسية)، يمكن أن تتأثر خصائصه الفيزيائية والميكانيكية بشكل كبير. بناءً على ذلك، تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تحليل تأثير الحرارة على سلوك الملاط المعزز بألياف نباتية طبيعية وخصوصاً الألياف المستخرجة من النخيل والطحالب البحرية. كما تم التركيز أيضاً على إدماج مادة البيرلايت الطبيعية المستخرجة من حمام بوغرة (مغنية)، كمادة بديلة جزئياً للرمل، بهدف تحسين الخصائص الفيزيائية الحرارية وتخفيف وزن الملاط. تركز هذه الدراسة على مدى تأثير دمج هذه المكونات الطبيعية في تركيبات مختلفة من الملاط بنفس نسبة الماء إلى المادة الرابطة، مع تعريضها لدرجات حرارة متزايدة (200، 400 و 600 درجة مئوية). وقد خضعت الألياف النباتية لمعالجة قلوية (NaOH) مسبقاً، بغرض تحسين متانتها وتماسكها مع عجينة الإسمنت. تم إجراء اختبارات متعددة على الملاط في حالتيه الطازجة (العملانية، الهواء المحبوس) والصلبة (مقاومة الانضغاط والانحناء، الامتصاص الشعري الموصلية الحرارية، واختبار الموجات فوق الصوتية).

أظهرت النتائج أن إضافة الألياف النباتية والبيرلايت تؤثر بشكل ملحوظ على السلوك الحراري والميكانيكي للملاط. ففي درجة الحرارة العادية، تتحسن خصائص الملاط، لكن عند درجات حرارة عالية، تصبح تحلل الألياف حرارياً عاملاً محدوداً للأداء. كما تسلط هذه الدراسة الضوء على الإمكانيات الكبيرة لاستخدام الألياف النباتية والبيرلايت كبديل بينية فعالة في تركيب الملاط، مع التأكيد على أهمية تحديد الجرعة المثلى والمعالجة المناسبة لضمان الثبات الحراري.

الكلمات المفتاحية : الملاط ، تأثير الحرارة، الألياف النباتية، نخيل التمر، الطحالب، البيرلايت، المعالجة القلوية.

Table des matière

| | |
|------------------------------------|------------|
| <i>Remerciement</i> | <i>i</i> |
| <i>Dédicaces</i> | <i>ii</i> |
| <i>Résumé</i> | <i>iii</i> |
| <i>Table des matière</i> | <i>vi</i> |
| <i>Liste des figures</i> | <i>10</i> |
| <i>Liste des tableaux</i> | <i>14</i> |
| <i>Introduction générale</i> | <i>16</i> |

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES FIBRES VEGETALES.

| | |
|--|----|
| Introduction : | 20 |
| I. Les fibres naturelles : | 20 |
| 1.1 Les fibres végétales : | 22 |
| 1.2 Structure de la fibre végétale : | 22 |
| 1.2.1 La Cellulose : | 23 |
| 1.2.2 L'hémicellulose : | 24 |
| 1.2.3 La lignine : | 25 |
| 1.2.4 Cires : | 26 |
| 1.2.5 Pectines : | 26 |
| 1.3 Présentation de différentes fibres végétales : | 26 |
| 1.3.1 Le Chanvre : | 27 |
| 1.3.2 Le Lin : | 28 |
| 1.3.3 Le Sisal : | 29 |
| 1.3.4 La noix de coco : | 30 |
| 1.3.5 Palmier dattier : | 30 |
| 1.4 Propriétés chimiques, physiques et mécaniques des fibres végétales : | 31 |
| 1.4.1 Propriétés chimiques des fibres végétales : | 31 |
| 1.4.2 Propriétés Physiques des fibres végétales : | 32 |
| 1.4.3 Propriétés mecaniques des fibres végétales : | 34 |

Table des matière

| | | |
|-------|--|----|
| 1.5 | Domaine d'utilisation dans le génie civil : | 36 |
| 1.6 | Evaluation de la disponibilité des fibres végétales : | 36 |
| 1.6.1 | Disponibilité les fibres végétales à l'échelle mondiale : | 36 |
| 1.6.2 | Disponibilité les fibres végétales en Algérie : | 37 |
| 1.7 | Avantages et inconvénients des fibres végétales : | 38 |
| II. | L'impact des fibres végétales sur les propriétés des matériaux cimentaires : | 39 |
| 2.1 | L'ouvrabilité : | 39 |
| 2.2 | Temps de prise : | 40 |
| 2.3 | Résistance mécanique, résistance à la compression et flexion : | 41 |
| 2.4 | Absorption de l'eau : | 43 |
| 2.5 | Résistance à la carbonisation : | 44 |
| .III | Effet de la température sur les matériaux de construction : | 45 |
| 3.1 | L'expansion et la contraction : | 45 |
| 3.2 | Les réactions chimiques : | 45 |
| 3.3 | Changements des dimensions : | 46 |
| IV. | Comportement des fibres végétales à haute température : | 47 |
| 4.1 | Comportement thermique : | 47 |
| 4.2 | Comportement mécanique : | 49 |
| 4.3 | Comportement hygrométrique : | 50 |
| | Conclusion : | 51 |

CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALE.

| | | |
|-------|--|----|
| | Introduction : | 53 |
| I. | Présentation des matériaux étudiés : | 53 |
| 1.1 | Le Ciment : | 53 |
| 1.2 | Le Sable : | 54 |
| 1.3 | La Perlite : | 55 |
| 1.4 | L'eau de gâchage : | 57 |
| 1.5 | L'adjuvant : | 57 |
| 1.6 | Les fibres végétales : | 58 |
| 1.6.1 | Fibres de palmier dattier : | 58 |

Table des matière

| | | |
|-------|--|----|
| 1.6.2 | Fibres des algues marines :..... | 58 |
| II. | Méthodes d'essais :..... | 59 |
| 2.1 | La masse volumique apparent des granulats et ciments :..... | 60 |
| 2.2 | La masse volumique absolue :..... | 60 |
| 2.3 | Equivalent de sable :..... | 61 |
| 2.4 | Analyse granulométrique des granulats : | 62 |
| 2.5 | Consistance et temps de prise du ciment :..... | 67 |
| 2.6 | La finesse de mouture (surface spécifique Blaine) du ciment :..... | 68 |
| III. | Traitement des fibres végétales :..... | 69 |
| 3.1 | Traitement alcalin (NaOH) :..... | 70 |
| IV. | Formulation et préparation des mortiers : | 71 |
| 4.1 | La composition de mortiers :..... | 71 |
| 4.2 | Préparation des mortiers :..... | 72 |
| 4.2.1 | Moulage des éprouvettes :..... | 73 |
| 4.2.2 | Démoulage et conservation des éprouvettes :..... | 74 |
| V. | Caractérisation expérimentale des mortiers :..... | 75 |
| 5.1 | Essais à l'état frais des mortiers :..... | 75 |
| 5.1.1 | Maniabilité :..... | 75 |
| 5.1.2 | L'air Occlus :..... | 76 |
| 5.2 | Essais à l'état durci des mortiers :..... | 77 |
| 5.2.1 | Essais de chauffage et de refroidissement :..... | 77 |
| 5.2.2 | Essai de résistance à la flexion :..... | 79 |
| 5.2.3 | Essai de résistance à la compression :..... | 80 |
| 5.2.4 | Essai d'absorption capillaire : | 81 |
| 5.2.5 | Essai de mesure la conductivité thermique : | 82 |
| 5.2.6 | Essai d'Ultrasons :..... | 83 |
| | Conclusion :..... | 84 |

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS.

| | | |
|-----|---|----|
| | Introduction :..... | 86 |
| 1.1 | Essais à l'état frais de mortier :..... | 86 |

Table des matière

| | | |
|-------|---|------------|
| 1.1.1 | Maniabilité :..... | 86 |
| 1.1.2 | L'air occlus :..... | 88 |
| 1.2 | Essais à l'état durci de mortier :..... | 89 |
| 1.2.1 | Résistance à la flexion :..... | 89 |
| 1.2.2 | Résistance à la compression :..... | 92 |
| 1.2.3 | Essai d'Ultrasons :..... | 95 |
| 1.2.4 | Essai de mesure la conductivité thermique : | 99 |
| 1.2.5 | Essai d'absorption capillaire : | 105 |
| | Conclusion :..... | 114 |
| | Conclusion Générale. | 115 |
| | Bibliographie | 117 |

Liste des figures

| | |
|--|-----------|
| <i>Figure 1.1 : Classification des fibres naturelles.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Figure 1.2 : Structure et composition d'une paroi végétale.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figure 1.3 : Description schématique de la structure d'une fibre végétale et arrangement des microfibrilles autour d lumen (chanvre et lin)</i> | <i>23</i> |
| <i>Figure 1.4 : Structure moléculaire de la cellulose.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figure 1.5 : Organisation des composants cellulosiques dans la paroi cellulaire d'une fibre végétale typique.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figure 1.6 : Structure de l'hémicellulose (xylane) constituée d'un squelette xylopyranose, avec des branches latérales d'acide glucuronique (1 → 2) et d'arabinofuranose (1 → 3).....</i> | <i>25</i> |
| <i>Figure 1.7 : Structure des précurseurs de la lignine.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Figure 1.8 : Plante de chanvre et différents types de fibres du chanvre.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figure 1.9 : Le lin et la fibre de lin.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figure 1.10 : Processus principales de production des fibres de sisal.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Figure 1.11 : Le cocotier et les fibres de noix de coco.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Figure 1.12 : Palmier dattier et les fibres de tige et du tronc de palmier.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Figure 1.13 : Analyse chimique de certains Fibres.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figure 1.14 : Teneur en humidité de certains VF sélectionnés.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figure 1.15 : Taux d'absorption d'eau des fibres de palmier dattieren fonction du temps d'immersion</i> | <i>34</i> |
| <i>Figure 1.16 : Les propriétés mécaniques moyennes de différents types de fibres naturelles.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Figure 1.17 : Gisement mondial de fibres végétales hors coton et bois (2001-2008).....</i> | <i>37</i> |
| <i>Figure 1.18 : Gisement de fibres végétales en Algérie.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figure 1.19 : La chute du mortier de ciment contenant des fibres de jute.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figure 1.20 : Explorer l'impact du contenu en fibres d'abaca sur les temps de prise à travers trois méthodes : a) aiguille de Vicat, b) degré d'hydratation, et c) analyse UPV.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Figure 1.21 : Corrélation entre la résistance à la compression et la température.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Figure 1.22 : Effets du pourcentage et de la longueur des fibres de coco sur la résistance à la flexion du béton.</i> | <i>43</i> |

Liste des figures

| | |
|--|-----------|
| <i>Figure 1.23 : Variations de la profondeur de carbonatation entre quatre mélanges à différents âges.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Figure 1.24 : Thermogrammes mesurés par le DSC de quelques fibres naturelles non traitées jute (JUTE1), chanvre (UNTRH), sisal (UNTRS) et kapok (UNTKAPOK).....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figure 1.25 : Représentation schématique de l'effet de la température sur la courbe de contrainte - déformation du matériau cellulosique.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figure 1.26 : Modélisation du comportement mécanique.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figure 1.27 : Absorption d'eau dans les fibres de lin lors de leur exposition à un environnement humide.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Figure 2.1 : Gica béton, Ciment de béni Saf.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Figure 2.2 : sable siliceux / sable fin roulé</i> | <i>54</i> |
| <i>Figure 2.3 : Etuve de séchage</i> | <i>55</i> |
| <i>Figure 2.4 : Gisement Bab à Hammam Boughrara (Tlemcen).....</i> | <i>55</i> |
| <i>Figure 2.5 : Roche de la perlite naturelle avant broyage.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figure 2.6 : la perlite naturelle après le broyage.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figure 2.7: Adjuvant SUPERIOR 9WG.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figure 2.8 : Les étapes d'extraction des fibres du palmier dattier.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figure 2.9 : étape de la collecte et séchage des algues.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figure 2.10 : Fibres des algues après la collecte et séchage.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figure 2.11 : La masse volumique apparent.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figure 2.12 : La masse volumique absolue des granulats et ciments.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Figure 2.13 : Equivalent de sable.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figure 2.14 : Analyse granulométrique des granulats (série des tamis)</i> | <i>62</i> |
| <i>Figure 2.15 : Courbe granulométrique du sable fin (0/2)</i> | <i>63</i> |
| <i>Figure 2.16 : Courbe granulométrique du sable siliceux (0/3)</i> | <i>64</i> |
| <i>Figure 2.17 : Courbe granulométrique du sable de correction.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Figure 2.18 : Courbe granulométrique du la perlite (0/3)</i> | <i>66</i> |
| <i>Figure 2.19 : Essai de prise avec appareil de Vicat.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figure 2.20 : Perméabilimètre de Blaine.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figure 2.21 : fibres dattier après lavage et coupe.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figure 2.22 : Caractérisation dimensionnelle des fibres végétales.....</i> | <i>69</i> |

Liste des figures

| | |
|---|-----------|
| <i>Figure 2.23 : Structure typique de la fibre lignocellulosique (i) non traitée et (ii) et après traitement alcalin.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figure 2.24 : Traitement alcalin (NaOH).....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure 2.25 : Les étapes du malaxage du mortier.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figure 2.26 : Appareil à choc</i> | <i>74</i> |
| <i>Figure 2.27 : Remplissage d'éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³</i> | <i>74</i> |
| <i>Figure 2.28 : Les éprouvettes après démoulage et conservation.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Figure 2.29 : Principe de fonctionnement de la maniabilité.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Figure 2.30 : Maniabilimètre de mortier.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Figure 2.31 : Appareil de mesure de la teneur en air occlus.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Figure 2.32 : Four utilisé pour le chauffage des éprouvettes à température maximale 1200 °C</i> | <i>78</i> |
| <i>Figure 2.33 : Cycle de chauffage / refroidissement des éprouvettes de mortier.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Figure 2.34 : Observation microscopique de l'évolution des fissures dans le mortier après exposition thermique à 200, 400 et 600°C</i> | <i>79</i> |
| <i>Figure 2.35 : Appareil de l'essai de la flexion.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Figure 2.36 : Essai de résistance à la compression.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Figure 2.37 : Eprouvettes dans le récipient en position verticale avec un niveau d'eau constant de 3mm.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Figure 2.38 : mesure de conductivité thermique.....</i> | <i>82</i> |
| <i>Figure 2.39 : Appareil d'auscultation sonore « Essai d'ultrason »</i> | <i>83</i> |
| <i>Figure 3.1 : Evolution de la maniabilité des différents mortiers étudiés.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Figure 3.2 : Evolution de l'air occlus dans les différents mortiers étudiés.....</i> | <i>88</i> |
| <i>Figure 3.3 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à T= 200°C.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Figure 3.4 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à T= 400°C.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Figure 3.5 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à T= 600°C.....</i> | <i>88</i> |
| <i>Figure 3.6 : Evolution de la résistance à la compression à T= 200°C.....</i> | <i>89</i> |
| <i>Figure 3.7 : Evolution de la résistance à la compression à T= 400°C.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Figure 3.8 : Evolution de la résistance à la compression à T= 600°C.....</i> | <i>91</i> |
| <i>Figure 3.9 : L'Évolution de la vitesse des vagues d'onde des mortiers à T = 200°C.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Figure 3.10 : L'Évolution de la vitesse des vagues d'onde des mortiers à T = 400°C.....</i> | <i>95</i> |
| <i>Figure 3.11 : L'Évolution de la vitesse des vagues d'onde des mortiers à T = 600°C.....</i> | <i>96</i> |

Liste des figures

| | |
|--|------------|
| <i>Figure 3.12 : Diminution de la conductivité thermique due à l'augmentation des températures (mortier à l'âge de 7 jours)</i> | <i>98</i> |
| <i>Figure 3.13 : Diminution de la conductivité thermique due à l'augmentation des températures (mortier à l'âge de 28 jours)</i> | <i>100</i> |
| <i>Figure 3.14 : Diminution de la conductivité thermique due à l'augmentation des températures (mortier à l'âge de 60 jours)</i> | <i>101</i> |
| <i>Figure 3.15 : Diminution de la conductivité thermique due à l'augmentation des températures (mortier à l'âge de 90 jours)</i> | <i>101</i> |
| <i>Figure 3.15 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 7 jours.....</i> | <i>103</i> |
| <i>Figure 3.16 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 28 jours.....</i> | <i>103</i> |
| <i>Figure 3.17 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 60 jours.....</i> | <i>104</i> |
| <i>Figure 3.18 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 90 jours.....</i> | <i>104</i> |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----------|
| <i>Tableau 1.1 : Domaines d'application des composites en fibres naturelles.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Tableau 1.2 : Comparaison entre les avantages et les inconvénients des fibres végétales.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Tableau 1.3 : Expansion des divers matériaux par suite de la chaleur ou de l'eau.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Tableau 2.1 : Analyse chimique du ciment (LTPO).....</i> | <i>53</i> |
| <i>Tableau 2.2 : Composition minéralogie du ciment de Béni-Saf.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Tableau 2.3 : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Tableau 2.5 : Propriétés chimique et physique du SUPERIOR 9 WG.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Tableau 2.6 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Tableau 2.8 : Résultats de l'essai de l'équivalent de sable.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Tableau 2.9 : Analyse granulométrique par tamisage du sable fin (0/2)</i> | <i>62</i> |
| <i>Tableau 2.10 : Analyse granulométrique par tamisage du sable siliceux (0/3)</i> | <i>63</i> |
| <i>Tableau 2.11 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de correction.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Tableau 2.12 : Analyse granulométrique par tamisage du perlite (0/3)</i> | <i>65</i> |
| <i>Tableau 2.13 : Résultats de l'essai de Consistance et temps de prise du ciment.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Tableau 2.14 : Résultats de l'essai de surface spécifique Blaine.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Tableau 2.15 : Composition des différentes formulations de mortier.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tableau 2.16 : Conduite des opérations du malaxage.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tableau 3.1 : Type de la formulation de mortiers.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Tableau 3.2 : Classe de consistance selon la durée d'écoulement.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Tableau 3.3 : résultats d'essai de maniabilité.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Tableau 3.4 : résultats d'essai d'air occlus.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Tableau 3.5 : Résistance à la flexion à T= 200°C.....</i> | <i>88</i> |
| <i>Tableau 3.6 : Résistance à la flexion à T= 400°C.....</i> | <i>89</i> |
| <i>Tableau 3.7 : Résistance à la flexion à T= 600°C.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Tableau 3.8 : Résistance à la compression à T= 200°C.....</i> | <i>91</i> |
| <i>Tableau 3.9 : Résistance à la compression à T= 400°C.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Tableau 3.10 : Résistance à la compression à T= 600°C.....</i> | <i>93</i> |
| <i>Tableau 3.11 : résultats d'essai d'Ultrasons à T = 200°C.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Tableau 3.12 : résultats d'essai d'Ultrasons à T = 400°C.....</i> | <i>95</i> |

Liste des tableaux

| | |
|--|------------|
| <i>Tableau 3.13 : résultats d'essai d'Ultrasons à T = 600°C.....</i> | <i>96</i> |
| <i>Tableau 3.14 : qualité de béton en fonction de la vitesse de propagation des ondes.....</i> | <i>97</i> |
| <i>Tableau 3.15 : résultats d'essai de la conductivité thermique à l'âge de 7 jours.....</i> | <i>98</i> |
| <i>Tableau 3.16 : résultats d'essai de la conductivité thermique à l'âge de 28 jours.....</i> | <i>100</i> |
| <i>Tableau 3.17 : résultats d'essai de la conductivité thermique à l'âge de 60 jours.....</i> | <i>101</i> |
| <i>Tableau 3.18 : résultats d'essai de la conductivité thermique à l'âge de 90 jours.....</i> | <i>103</i> |
| <i>Tableau 3.19 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent à T= 200°C.....</i> | <i>105</i> |
| <i>Tableau 3.20 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent à T= 400°C.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Tableau 3.21 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent à T= 600°C.....</i> | <i>110</i> |

Introduction générale.

Introduction générale :

L'Algérie est un des pays qui disposent d'extraordinaires ressources en fibres végétales (Palmier, Alfa, Cotton, Sisal...), malheureusement, leur valorisation dans les domaines pratiques, entre autre , dans les matériaux de construction est encore peu exploitée. Plusieurs travaux s'alignent sur le fait que l'utilisation des fibres végétales dans le mortier s'avère une solution avantageuse, vu son abondance, son impact socioéconomique et environnemental. L'idée d'introduire la fibre végétale dans le domaine du Génie Civil ne date pas d'aujourd'hui. En s'appuyant sur les travaux de plusieurs chercheurs dans ce domaine, nous sommes proposés de faire une étude du Effet de la température sur les mortier à base de fibres (algues ,datier).

L'intégration des fibres végétales dans les mortiers pose un défi majeur en raison de leur sensibilité aux variations de température. Ces changements thermiques peuvent modifier la structure et la composition chimique des fibres, affectant ainsi leur interaction avec la matrice cimentaire. Comprendre l'impact de la température sur les propriétés des mortiers est donc essentiel pour améliorer leur formulation et leur durabilité.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence de la température sur les propriétés mécaniques et physiques des mortiers à base de fibres végétales afin d'évaluer leur comportement en conditions d'utilisation réelles et d'améliorer leur performance et leur longévité. Le travail initié dans le cadre de ce mémoire , consiste à caractériser les propriétés mécaniques : étude des résistances à la compression et à la flexion en faisant durcir le mortier à différentes températures, Effet de la température sur la durabilité : Analyse de la résistance des mortiers aux cycles de gel-dégel et aux variations d'humidité afin d'identifier les mécanismes de détérioration causés par les températures extrêmes et de comprendre les interactions des fibres végétales avec la matrice cimentaire sous contraintes.

Structure du mémoire : Pour réaliser ce travail, une recherche bibliographique est nécessaire sur la matrice cimentaire, le mortier fibré et l'importance d'utiliser les fibres végétales dans les mortiers. Cette recherche bibliographique est présenté en **chapitre 1** intitulé « etude bibliographique sur les fibres végétales .» , ce chapitre traite toutes les définitions, compositions et différents types de fibres et l'étendue de l'ffet de la température sur les matériaux de construction et comportement des vibres végétales à haute température.

Suivi du **chapitre 2** « Matériaux et méthodes expérimentale » la seconde partie concerne l'étude expérimentale illustrée dans ce chapitre , tous les matériaux (ciment, sable et adjuvants, la perlite et fibre végétales..) utilisés pour la confection des différents spécimens, et à la

Introduction générale

présentation des différentes techniques et essais expérimentaux employés pour la réalisation de ce travail.

Le **chapitre 3** expose une analyse des résultats et les interprétations des différents paramètres obtenues après 7 ; 28 ; 60 ; 90 jours. Il permet de comparer les performances des mortiers fibrés et sans fibres(témoin) sous l'effet de la température 200, 400, 600 °C. en mettant en évidence les principaux mécanismes de dégradation observés. Enfin, est propose une synthèse des résultats et discute des limites de l'étude.

Ce projet de fin d'étude se termine par une conclusion générale qui synthétise le travail expérimental effectué afin d'en tirer les enseignements les plus intéressants.

**Chapitre I : Etude bibliographique
Sur les fibres végétales.**

Introduction :

En générale l'introduction de fibres qu'elles soient métalliques ou synthétiques, dans les matériaux cimentaires améliorent leurs performances : limitation des propagations de fissures, amélioration des résistances mécaniques (traction et flexion), amélioration de la ténacité du matériau durci...etc. [1] Néanmoins le prix de revient de ces fibres est élevé et leur fabrication dégage du CO₂ et utilise des ressources non renouvelables. Ainsi les recherches actuelles s'orientent vers, la possibilité de les remplacer par des fibres naturelles. [2] Les fibres végétales sont biodégradables et renouvelables.

Dans certains pays, elles peuvent même être issues de la valorisation de ressources locales. Ces fibres végétales peuvent permettre d'atteindre des propriétés mécaniques intéressantes, tout en réduisant de façon significative le coût de revient du composite cimentaire [3].

Le phénomène de la minéralisation des fibres végétales dans un milieu alcalin est considéré comme l'obstacle principal à l'utilisation de ces fibres dans les matériaux cimentaires. Ont montré que le remplacement partiel du ciment par un ajout pozzoulanique (Meta kaolin, fumé de silice, cendre volante) transforme l'hydroxyde de calcium (responsable du degré d'alcalinité) en CSH, par conséquent, le PH du matériau baisse considérablement. Ainsi la durabilité des fibres végétales, dans les pâtes de ciment est améliorée. Ces résultats ont été confirmés par plusieurs auteurs. [2].

La conductivité thermique d'un matériau de construction est un critère essentiel pour le confort thermique dans le bâtiment [4]. Pinto, J et col [5] ont montré que l'utilisation du bois de palmier dattier dans les mortiers est efficace pour fabriquer un matériau écologique et isolant. Ont révélé que l'introduction des épis de maïs est bénéfique pour les propriétés thermiques des constructions. Ainsi, la propriété d'isolation des fibres végétales devient, donc un paramètre intéressant pour un matériau destiné à un bâtiment eco-énergétiques.

I. Les fibres naturelles :

L'intégration de fibres naturelles dans des matrices cimentaires peut présenter des bénéfices importants. Les matériaux renforcés par des fibres végétales sont actuellement en cours de développement. Bien que leurs applications demeurent restreintes, leur potentiel pour jouer un rôle crucial dans l'industrie future, notamment dans le domaine de la construction, est reconnu. Les fibres se distinguent par une longueur qui est au moins trois fois supérieure à leur diamètre. Ces entités peuvent être catégorisées en fonction de divers critères, notamment leur la composition chimique, la taille et la provenance de ces molécules. Les fibres naturelles sont

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

subdivisées en fonction de leurs origines, venant de plantes. (cellulosique), d'animaux (protéinique) ou de minéraux (amiante) [6]. S'agissant de la récolte, l'extraction des fibres naturelles à partir de leur source constitue une étape cruciale dans la production de matériaux composites à base de fibres. Il existe plusieurs méthodes permettant d'extraire les fibres naturelles de leurs matériaux d'origine. Par exemple, les fibres libériennes peuvent être extraites de la couche externe des tiges de plantes par un procédé appelé rouissage, une méthode qui améliore la séparation des fibres grâce à l'action combinée des bactéries et de l'humidité [7, 8]. Les feuilles des plantes peuvent également être récoltées pour l'extraction des fibres en utilisant des techniques telles que le raclage manuel ou des procédés mécaniques [9].

La classification des différents types de fibres naturelles est présentée dans la **Figure 1.1**. On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine, les fibres végétales qui comprennent :

- ✓ les fibres provenant des poils séminaux de gaines (coton kapok).
- ✓ les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie).
- ✓ les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille) d'enveloppes de fruits (noix de coco).
- ✓ les fibres animales qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et sécrétions telle que la soie.
- ✓ les fibres minérales telles que le basalte.

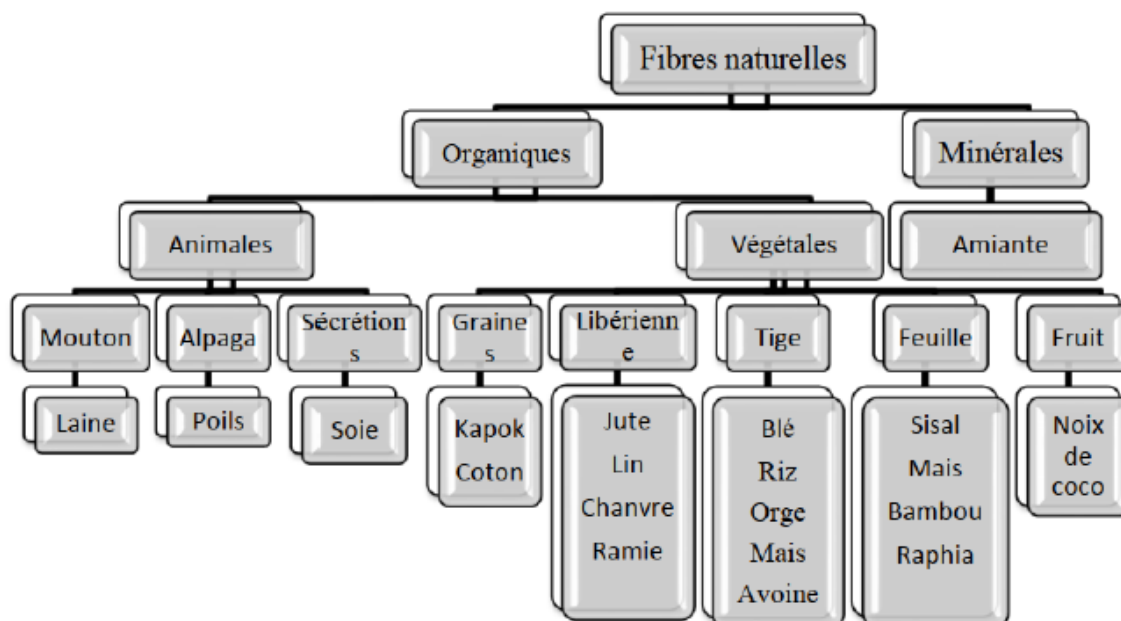


Figure 1.1 : Classification des fibres naturelles. [76]

1.1 Les fibres végétales :

Les fibres végétales peuvent être considérées comme des matériaux composites naturels, principalement composés de fibrilles de cellulose, maintenues ensemble par une matrice constituée essentiellement de lignine et d'hémicellulose (**Figure 1.2**). Les fibrilles de cellulose sont disposées en hélice selon un angle appelé angle microfibrillaire [10]. Les conditions climatiques, l'âge et le processus de digestion influe non seulement sur la structure des fibres, mais aussi la composition chimique [6] .

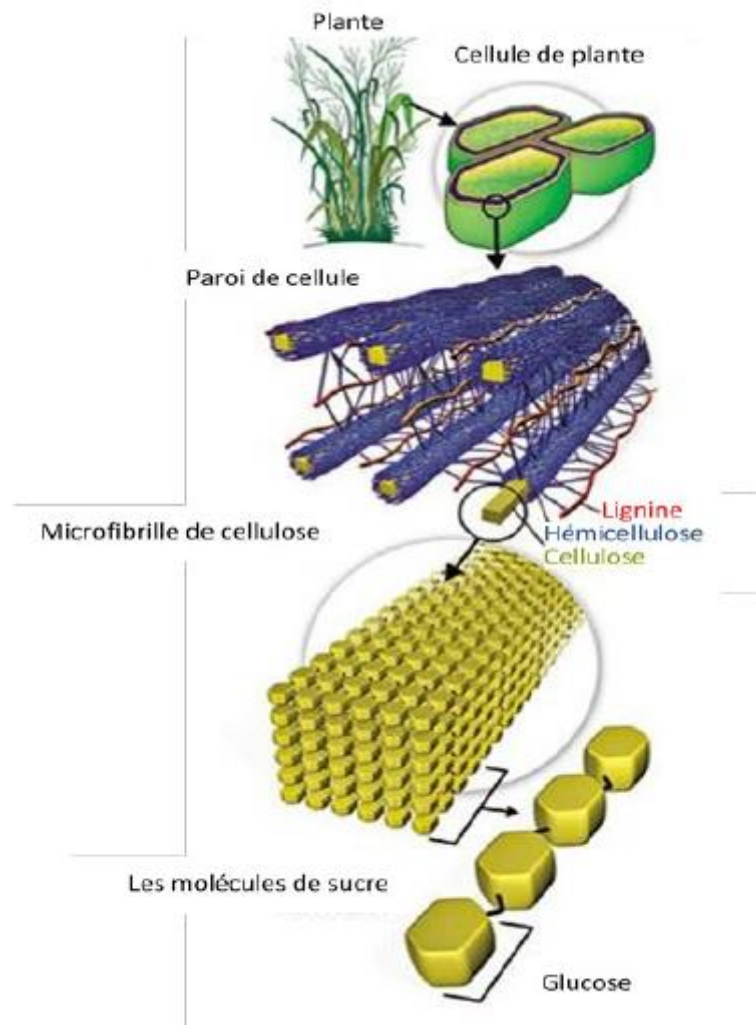


Figure 1.2 : Structure et composition d'une paroi végétale. [77]

1.2 Structure de la fibre végétale :

Dans une plante, les fibres sont généralement organisées sous forme de faisceaux, ce qui leur donne une forme polygonale. Chaque fibre est composée d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire, cette dernière étant subdivisée en trois couches: S1, S2 et S3. La couche S2, la plus

épaisse, est déterminante pour le comportement global de la fibre. Cette structure multicouche confère au matériau une anisotropie. Dans une usine, les fibres sont également regroupées sous forme de faisceaux, ce qui contribue à leur apparence polygonale [11].

La structure de la fibre végétale est comparable à un empilement de plis composites, dont la structure est détaillée à la figure 1.3. Les parois primaire et secondaire contiennent un cadre formé de microfibrilles de cellulose qui est entouré d'une matrice contenant de l'hémicellulose et de la lignine.

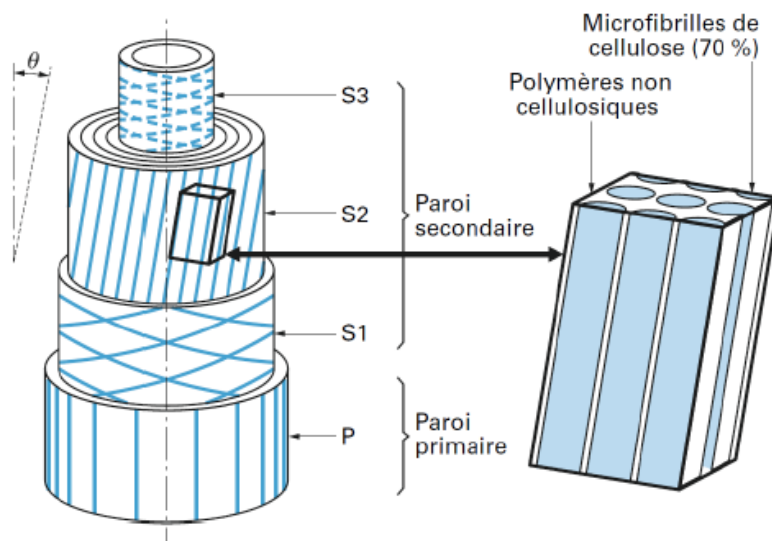


Figure 1.3 : Description schématique de la structure d'une fibre végétale et arrangement des microfibrilles autour d lumen (chanvre et lin). [78]

1.2.1 La Cellulose :

La cellulose est un polymère naturel parmi les plus abondants sur Terre. Elle se retrouve dans divers secteurs industriels, tels que l'emballage, les textiles et le papier, et est également utilisée comme additif alimentaire. Composée de longues chaînes de molécules d'anhydride de glucose, la cellulose peut contenir jusqu'à 15 000 unités moléculaires. Les particules d'anhydride de glucose sont reliées entre elles par des liaisons bêta [B (1,4)]. La structure de la molécule de cellulose est linéaire en raison de cette configuration de liaison. Le degré de polymérisation déterminé par les scientifiques, basé sur le comptage des résidus de glucane, est d'environ 10000 pour la cellulose de bois [12].

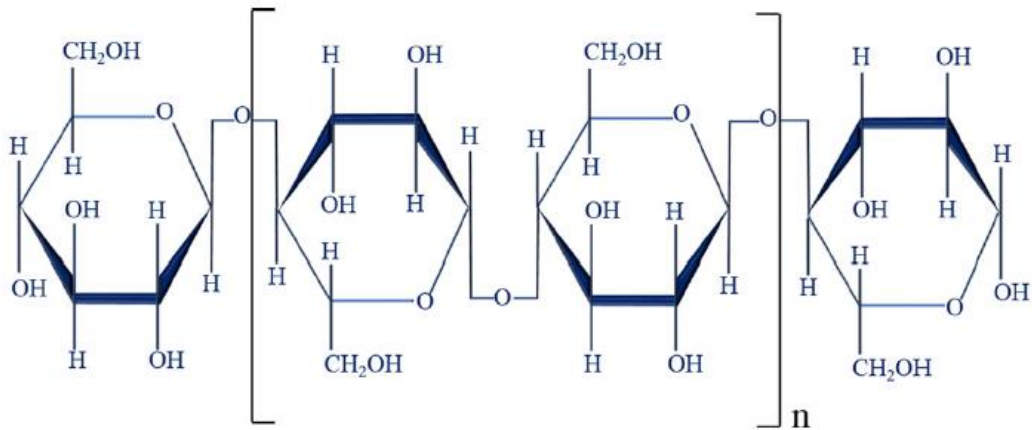


Figure 1.4 : Structure moléculaire de la cellulose. [79]

La forme unitaire cellulaire de la cellulose est connue dans la littérature sous différents noms, tels que microfibrilles, fibrilles élémentaires et protofibrilles. Une telle configuration de différents composants cellulosiques est illustrée sur la figure 1.5. [13]

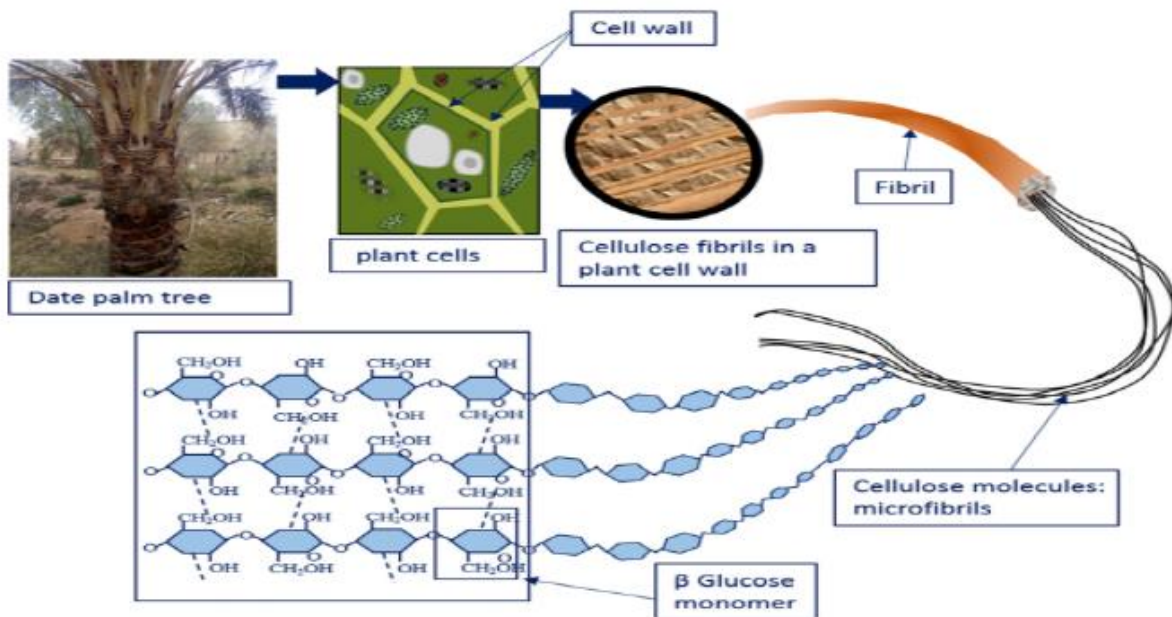


Figure 1.5 : Organisation des composants cellulosiques dans la paroi cellulaire d'une fibre végétale typique [80].

1.2.2 L'hémicellulose :

L'hémicellulose est un polymère naturellement produit composé de monomères glucidiques. Contrairement à la cellulose indiquant un homopolysaccharide, l'hémicellulose renferme une diversité en monomères glucidiques. Les principaux monosaccharides à l'origine de l'hémicellulose sont : l'arabinose, le mannose, le galactose, le glucose et l'androse. Du fait

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

de ses groupes de ramifications latérales volumineux, l'hémicellulose affiche une structure ouverte et amorphe contrairement à la structure cristalline caractéristique de la cellulose.

L'hémicellulose est plus hygroscopique que la cellulose et attire donc plus de molécules d'eau en raison de sa structure plus ouverte. Le poids moléculaire de l'hémicellulose dans le bois est d'environ 100 à 200, bien inférieur à celui de la cellulose (glucose), qui est de 10000 idem. La différence entre les fibres ligneuses et non ligneuses est bien dans leurs teneurs en cellulose, mais aussi dans leurs teneurs en hémicellulose et lignine.

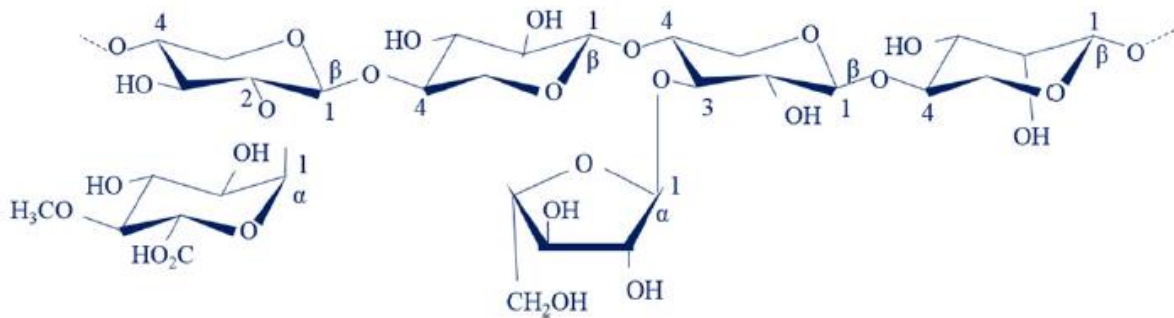


Figure 1.6 : Structure de l'hémicellulose (xylane) constituée d'un squelette xylopyranose, avec des branches latérales d'acide glucuronique (1 → 2) et d'arabinofuranose (1 → 3). [79]

Les fibres non ligneuses telles que les graminées (blé, maïs, riz) contiennent jusqu'à 40% de l'hémicellulose principale trouvée dans les graminées, tandis que les fibres de bois sont composées de 25% à 35% d'hémicellulose en poids sec. La figure 1.6 illustre une molécule d'hémicellulose typique trouvée dans un type de fibre de bois appelé Arabino Glucuronoxylane (xylane) [12].

1.2.3 La lignine :

La lignine (du latin lignum, signifiant bois) est une biomolécule, plus précisément un groupe de macromolécules polyphénoliques. Elle constitue l'un des principaux éléments du bois, aux côtés de la cellulose et des hémicelluloses. Ce biopolymère est principalement présent dans les plantes vasculaires, ainsi que dans certaines algues rouges coralligènes, ce qui suggère une convergence évolutive dans la biosynthèse de la lignine entre ces algues et les trachéophytes. La lignine est totalement amorphe et de nature hydrophobe. C'est le composé qui donne la rigidité aux plantes. La lignine est thermiquement stable ; mais elle est responsable de la dégradation de la fibre par les ultraviolets (UV) [13].

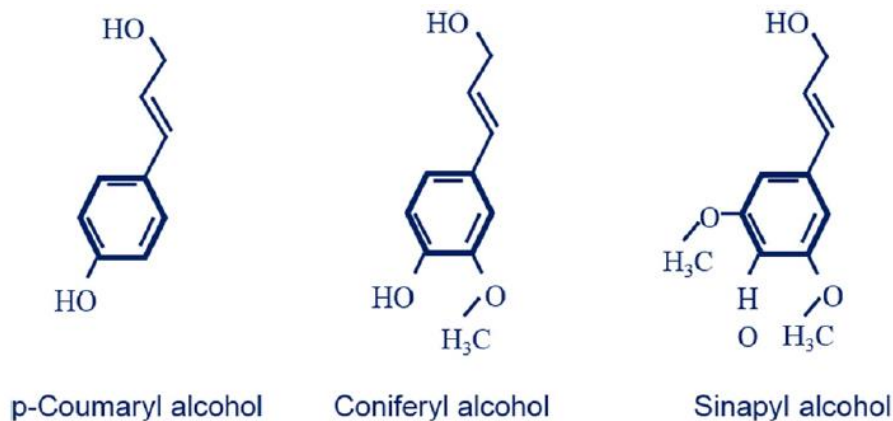


Figure 1.7 : Structure des précurseurs de la lignine. [79]

1.2.4 Cires :

Les cires sont des composantes des fibres végétales qui peuvent être extraites avec des solutions organiques. Elles sont constituées de différents types d'alcools insolubles dans l'eau et de plusieurs acides comme l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique [6].

1.2.5 Pectines :

Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois). Elles jouent le rôle de ciment intercellulaire et contribuent à la cohésion des tissus végétaux [14]. Sur le plan structural, les pectines sont une famille de polysaccharides complexes qui contiennent un enchaînement d'unités d'acide α -D-galacturonique liées entre elles par des liaisons α (1-4).

Les pectines portent aussi des substances non sucrées, essentiellement le méthanol, l'acide acétique, l'acide phénolique et parfois des groupes d'amide [15]. L'estérification des résidus d'acide galacturonique avec le méthanol ou l'acide acétique est une caractéristique qui joue un rôle très important sur les propriétés physicochimiques des pectines particulièrement sur la formation de gel.

1.3 Présentation de différentes fibres végétales :

En raison de leur disponibilité partout, les fibres végétales remplacent de plus en plus les fibres synthétiques dans les matériaux composites pour les applications industrielles. Parmi les nombreuses fibres végétales, on cite dans ce qui suit, un exemple de chaque type de fibre de diverses provenances : tiges, feuilles, fruits et troncs.

1.3.1 Le Chanvre :

C'est une plante annuelle cultivée, sélectionnée pour la taille de sa tige et sa faible teneur en THC ou autres cannabinoïdes à partir de l'espèce que les botanistes nomment le Chanvre cultivé (*Cannabis sativa* L.), elle est cultivée dans les pays à climat tempéré [16]. Cette plante pousse sans avoir besoin de pesticides, de fongicides ou tout autre produit chimique. Elle est donc écologique, antibactérienne et anti-moisissure.

Le chanvre dont la hauteur de la plante va jusqu'à 3 m, est cultivé depuis des milliers d'années pour ces vastes applications : ses tiges (pour en extraire des fibres), ses graines nutritives (pour la production de la nourriture et de l'huile) et ses feuilles (produits pharmaceutiques).

La chine est le premier producteur mondial du chanvre avec une production qui dépasse les 50% [17]. La fibre est extraite à partir la partie extérieure de la tige après le rouissage (figure 1.8). Le rouissage est la dissociation des parties fibreuses de la plante en éliminant la pectose qui soude les fibres (filasse) à la partie ligneuse sous l'action combiné du soleil, l'action enzymatique des microorganismes du sol et de la pluie. Elle est utilisée pour des applications telles que : papeterie, renfort, textile et isolation.



Figure 1.8 : Plante de chanvre et différents types de fibres du chanvre. [81]

1.3.2 Le Lin :

Le lin (*Linum usitatissimum*) est une plante naturelle qui pousse principalement dans les régions tempérées et humides près de la mer. Ses fibres végétales sont célèbres pour leur résistance et leur solidité. Ses feuilles sont de forme lancéolée, avec trois nervures, mesurant jusqu'à 4 cm de long et 4 mm de large. Les capsules de fruit contiennent des graines appelées graines de lin [18]. Cette plante est utilisée depuis des siècles par l'homme et les premières traces de son utilisation a été trouvée dans la grotte de Dzudzuana située en Géorgie depuis plus de 30.000 ans [19].

La fibre de cette plante elle aussi a été utilisée dans l'Égypte antique depuis l'époque des pharaons pour produire le tissu linier, tissu utilisé dans l'embaumement des momies. Comme les autres fibres, cette plante a de multiples applications dans le secteur alimentaire, médical, textile, papeterie et la construction. Le leader mondial de la production du lin est la Canada avec une production annuelle en 2013-2014 de 614.000 tonnes métriques, qui représente environ 80% du commerce mondial des graines du lin [20]. Les fibres sont extraites à partir de la tige.



Figure 1.9 : Le lin et la fibre de lin . [82]

1.3.3 Le Sisal :

Le sisal (*Agave sisalana*) est une plante de la famille des agavaceae, originaire de la ville de Sisal située dans de la péninsule du Yucatán au sud-est du Mexique [21]. Cette plante résistante pousse toute l'année dans les climats chauds des régions arides. En général, le Brésil, l'Indonésie et les pays africains de l'Est (la Tanzanie et le Kenya) sont les principaux producteurs mondiaux de fibres de sisal.

Le premier producteur mondial du sisal est le Brésil avec une production annuelle de 120.000 tonnes, avec des rendements d'environ 800 à 1200 kg / ha. Cette production représente 58% de la production mondiale [22]. Les fibres de sisal sont extraites à partir des feuilles de cette plante après broyage par les roues d'une décortiqueuse, les fibres varient en taille, entre 6-10 cm de largeur et 50-250 cm de longueur [23].



Figure 1.10 : Processus principales de production des fibres de sisal. [83].

1.3.4 La noix de coco :

Les fibres de noix de coco sont des fibres végétales qui entourent et protègent le fruit du cocotier. Le cocotier pousse dans les zones extrêmement ensoleillée et humide. Les fibres sont extraites de la coque extérieure de la noix de coco, obtenues à partir des cocotiers (*Cocos nucifera*) figure 1.11. Elle s'utilise aujourd'hui principalement pour la fabrication artisanale du cordage, géotextiles, matelas, pour les garnitures d'automobiles et dans les matériaux pour le bâtiment. Il existe deux types de fibres de noix de coco : des fibres de noix de coco brunes extraites des échus et des fibres blanches extraites de noix de coco immatures.

Les fibres brunes sont épaisses, fortes et présentent une résistance élevée à l'abrasion ; tandis que les fibres blanches sont plus lisses et plus fines, mais aussi plus faibles [24]. L'Indonésie, les Philippines, l'Inde, le Brésil et Sri Lanka sont les principaux producteurs mondiaux des fibres de noix de coco.



Figure 1.11 : Le cocotier et les fibres de noix de coco. [84]

1.3.5 Palmier dattier :

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est l'un des palmiers les plus cultivés pour ses fruits dans les régions arides et semi-arides du monde. Selon les naturalistes, ce palmier est d'origine de la région du Golfe arabe. Il a toujours joué un rôle important dans la vie

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

économique et sociale des habitants des régions désertiques chaudes de l'Inde jusqu'au Sahara occidental et aussi dans la région aride du sud des États-Unis (Californie et Arizona).

Le palmier dattier peut atteindre un âge qui dépasse le siècle L'Algérie dispose de plus de 10 millions de palmiers dattiers dont plus de la moitié est du cultivar 'Deglet Noor' et le reste produit plus de 800 variétés de dattes dans les oasis du sud [25]. Il est intéressant de noter qu'il existe des palmiers mâles appelés dokkars et des palmiers femelles. Le palmier dattier a une structure fibreuse, présentant quatre types de fibres : les fibres de bois dans le tronc, les fibres de feuille au niveau des pédoncules, les fibres de surface autour du tronc et les fibres de tige dans la tige figure 1.12 [26].



Figure 1.12 : Palmier dattier et les fibres de tige et du tronc de palmier . [85].

1.4 Propriétés chimiques, physiques et mécaniques des fibres végétales :

1.4.1 Propriétés chimiques des fibres végétales :

Les fibres végétales (FV) sont principalement composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. En plus de ces composants, des substances comme les protéines, la pectine, l'amidon et les sels inorganiques sont présentes en quantités plus faibles [27]. La composition chimique des FV varie selon leur origine, mais la cellulose reste toujours le constituant

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

dominant, avec des pourcentages en poids allant de 22% pour certaines fibres jusqu'à 85% pour les linters de coton, comme le montre la figure 1.13.

Les concentrations en lignine oscillent entre 7% et 24 % en poids, tandis que celles des hémicelluloses varient de 12% à 27% en poids. Ces substances sont des hétéropolymères, dont la composition chimique présente une grande diversité selon leur source d'origine. Par ailleurs, les composés inorganiques, déterminés par leur teneur en cendres, fluctuent également en fonction du type de fibre. Ainsi, cette teneur est d'environ 1% en poids pour les fibres lignocellulosiques provenant du bois, et atteint environ 14% pour les fibres de riz [29, 28].

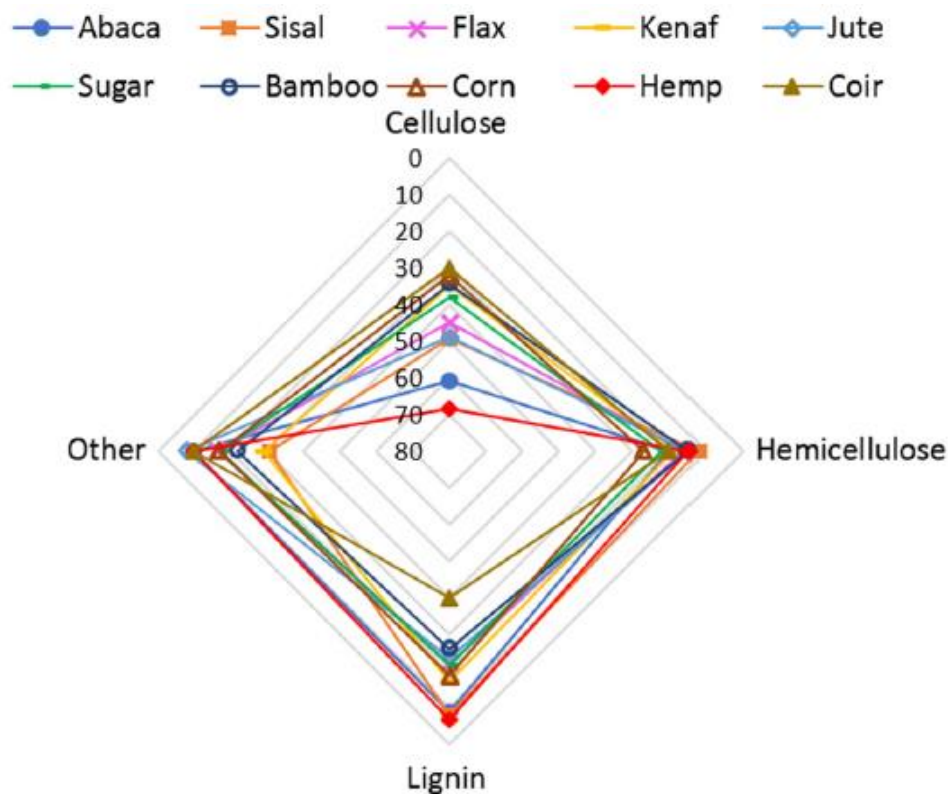


Figure 1.13 : Analyse chimique de certains Fibres. [28]

1.4.2 Propriétés Physiques des fibres végétales :

L'une des principales caractéristiques du bois est son instabilité dimensionnelle vis à-vis de l'humidité, ce qui complexifie son utilisation. Tant qu'un arbre est vivant, il conserve de l'eau qui circule à travers ses cellules. Ainsi, le bois présente un taux d'humidité variable, directement influencé par les conditions climatiques. L'eau agit comme plastifiant pour les chaînes polymères des parois cellulaires, ce qui explique que les phénomènes liés à l'humidité et à sa diffusion déterminent l'ensemble des propriétés du bois. En dehors de l'eau constitutive, formée

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

par les atomes d'hydrogène et d'oxygène des molécules du polymère, l'eau se présente sous deux formes distinctes :

- **Eau libre** : elle remplit les cellules et les vaisseaux, est maintenue par les forces capillaires et n'est pas impliquée dans les variations dimensionnelles.
- **Eau liée** : elle est fixée sur la structure des polymères par physisorption ou chimisorption.

Les forces impliquées sont électrostatiques ou du type de liaisons hydrogène avec des groupes hydroxyle. Pendant le processus de séchage du bois, c'est l'eau libre qui s'évapore en premier. Le point de saturation des fibres du bois est atteint lorsque la teneur en humidité est d'environ $M = 30\%$. En poursuivant le processus de séchage, c'est l'eau liée qui commence à s'évaporer. Le bois sec dans l'air a une teneur en humidité de 13% à 17% selon les saisons.

Il peut avoir un état plus sec lorsqu'il est séché artificiellement ; en particulier, il atteint un état anhydre après avoir été séché pendant plusieurs heures dans une étuve à une température de 100 à 105 °C. Par conséquent, il est concevable qu'il existe un seuil de teneur en humidité pour lequel les sites d'adsorption sont saturés (les parois cellulaires ont la quantité maximale d'eau de liaison). Lorsqu'il n'y a pas d'eau libre, le point de saturation des fibres (FSP) est atteint.

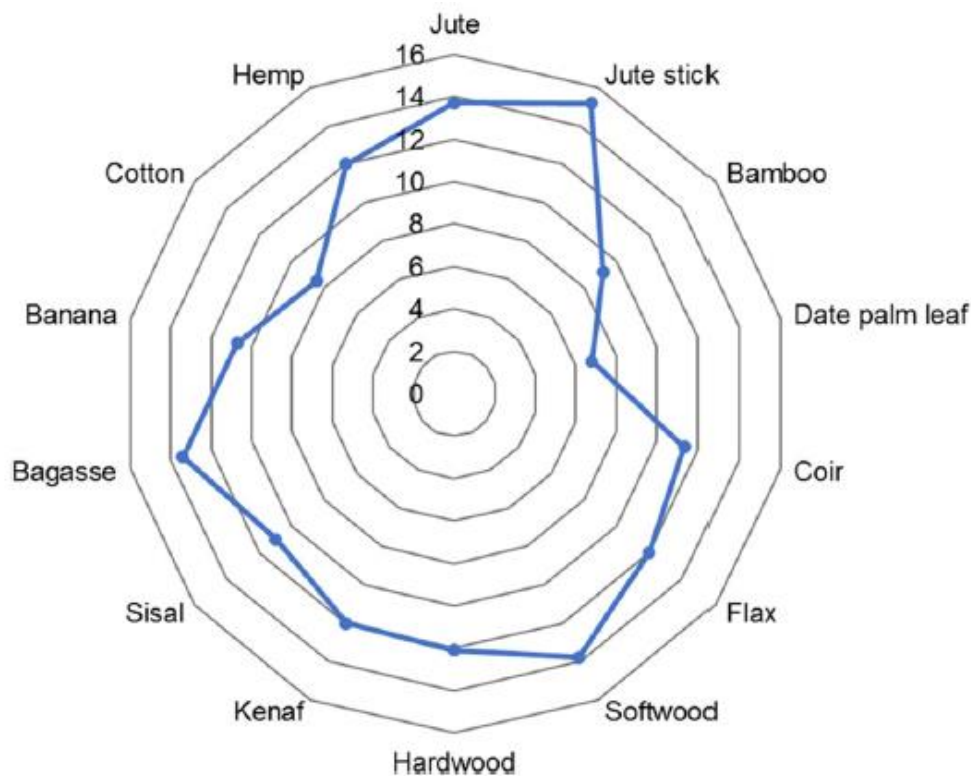


Figure 1.14 : Teneur en humidité de certains VF sélectionnés. [31, 30]

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

La teneur en humidité au FSP est très variable selon les espèces, mais se situe entre 25% et 35% de la teneur en humidité pour la plupart des types de fibres. Généralement, il est plus approprié de donner une valeur de 30%, ce qui correspond au comportement de la majorité des espèces. La teneur en humidité de certains types de VF est significativement différente, comme le montre la figure 1.14 [31, 30]. Cette différence est liée à la liaison hydrogène de la cellulose et à la quantité d'hémicellulose.

En immergeant le VF dans l'eau, la teneur en humidité, dans ce cas, sera au-delà du FSP, y compris à la fois la liaison et l'eau libre. Dans ce contexte, comme mentionné dans l'étude de recherche de [32]. Les propriétés de l'humidité dépendent également du rapport d'aspect des fibres. Dans cette étude, les auteurs ont évalué l'absorption d'eau des fibres de palmier dattier en fonction du temps d'immersion. Ils ont constaté que les fibres de petite surface absorbent plus d'eau que celles de plus grande surface voire la figure 1.15.

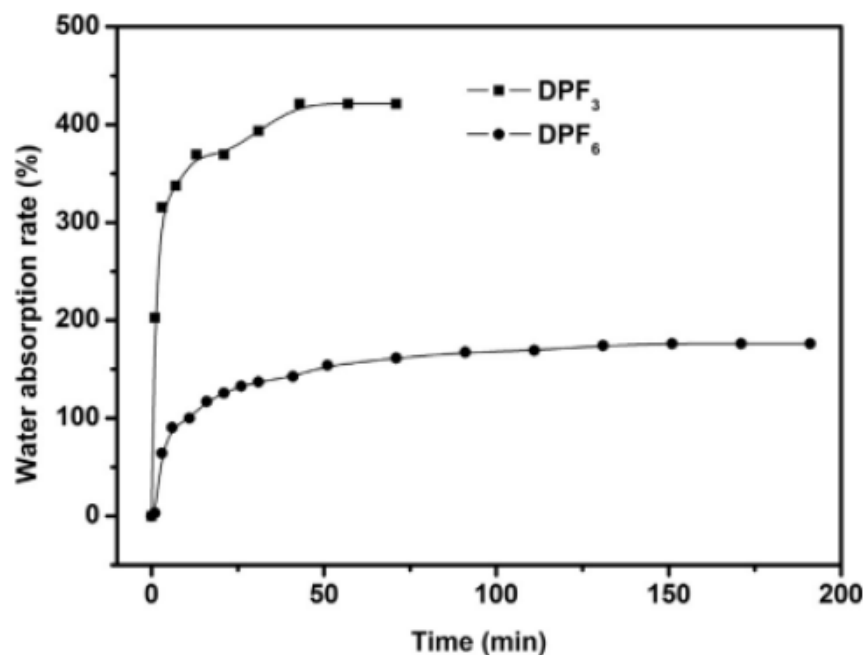


Figure 1.15 : Taux d'absorption d'eau des fibres de palmier dattier en fonction du temps d'immersion. [32]

1.4.3 Propriétés mécaniques des fibres végétales :

Les fibres végétales (telles que le coton, le jute, le chanvre, le lin, le sisal, le kénaf, la noix de coco, l'abaca, le bois, etc.) présentent des structures biologiques essentiellement composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. La cellulose, un polymère caractérisé par une structure largement cristalline, se distingue des autres composants de la fibre qui présentent une

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

structure amorphe. Cela confère à la cellulose un module d'élasticité d'environ 136 GPa, contre 75 GPa pour les fibres de verre. L'ensemble de la fibre végétale peut être comparé à un matériau composite renforcé de fibrilles de cellulose, la matrice étant principalement constituée d'hémicellulose et de lignine. Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice selon un angle appelé « angle micro fibrillaire ». Cet angle est situé entre les fibrilles et l'axe de la fibre. La valeur en degré de l'angle micro fibrillaire influence la rigidité de la fibre.

Les propriétés des fibres naturelles font souvent l'objet de discussions en raison du fait que les techniques utilisées pour cultiver, extraire ou séparer les fibres varient considérablement, ce qui peut modifier leur comportement. Par exemple, les facteurs pouvant affecter les propriétés des VF pourraient être attribués à la variété, aux conditions de culture (sol, traitement, climat), à la maturité, au degré de préparation (rouissage, décapage, peignage ...), à la teneur en humidité, structure cristalline (degré de cristallinité, degré de polymérisation, type de cellulose ...), et morphologie (diamètre de la cellule, angle micro fibrillaire, taille de la lumière), etc. Habituellement, la quantité de renfort et l'orientation des fibres dans un matériau composite déterminent caractéristiques élastiques et de rupture.

Les propriétés mécaniques de différentes fibres de différentes origines de plantes utilisées pour le renforcement de matériaux composites courants sont illustrées à la figure 1.16 [28]. En tenant compte du comportement naturel de ces fibres, certaines dispersions peuvent être remarquées.

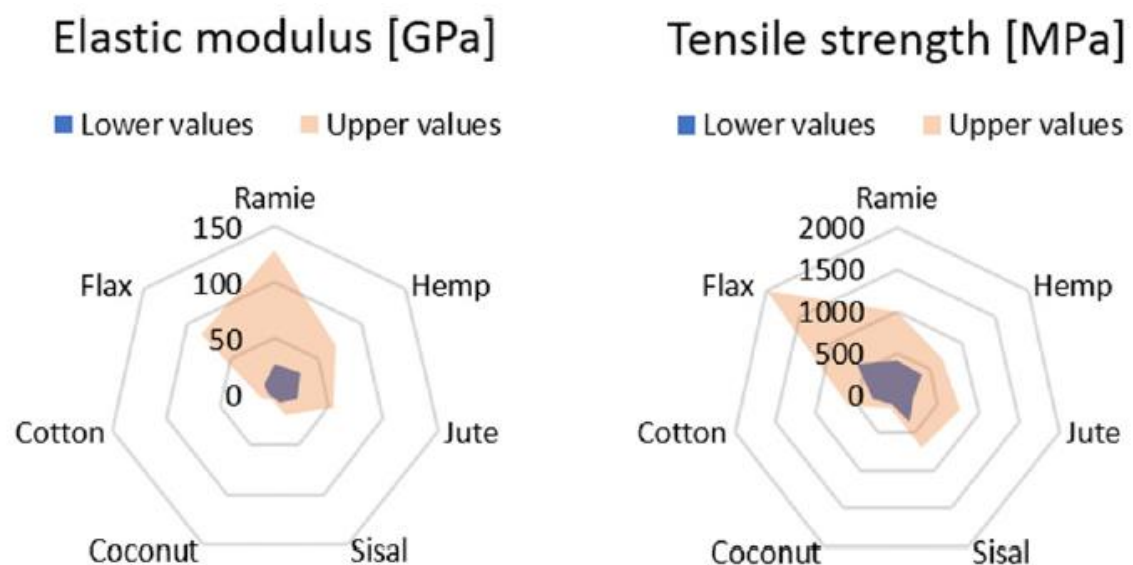


Figure 1.16 : Les propriétés mécaniques moyennes de différents types de fibres naturelles. [28]

1.5 Domaine d'utilisation dans le génie civil :

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques. L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, beaucoup de recherches sont en cours dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante par les fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les dalles et la production des tuiles et les dallages de parking ainsi que dans le renforcement du plâtre. Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polymère, de carbone et d'acier est de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines et spécialement dans la fabrication des panneaux et dans la restauration et la réparation des ouvrages anciens endommagés [33].

Tableau 1.1 : Domaines d'application des composites en fibres naturelles. [34]

| Domaine d'application | Partie sur le marché |
|---|----------------------|
| Construction | 15 % |
| Electricité | 4 % |
| Agriculture | 3 % |
| Fonctionnel | 2 % |
| Automobile et transports | 16 % |
| Textiles | 18 % |
| Biens de consommation | 18 % |
| Emballage flexible | 9 % |
| Emballage rigide (articles de restauration) | 15 % |
| Autre | 1 % |

1.6 Evaluation de la disponibilité des fibres végétales :

1.6.1 Disponibilité des fibres végétales à l'échelle mondiale :

Ces dernières années, une attention croissante a été accordée à l'utilisation des ressources renouvelables de faible coût, particulièrement d'origine végétale dans les applications composites au sein des pays industrialisés. L'Inde, la Chine et le Brésil sont les plus grands pays producteurs de fibres dans le monde comme le montre la figure 1.17.

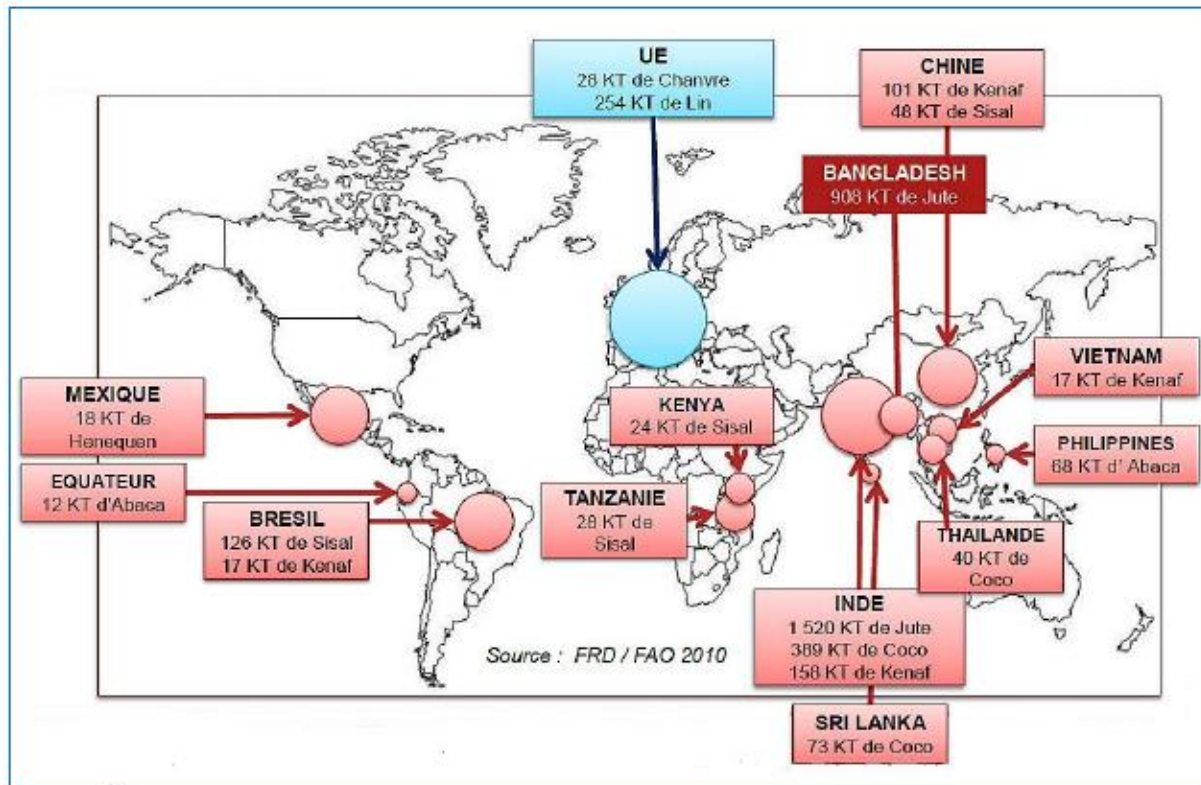


Figure 1.17 : Gisement mondial de fibres végétales hors coton et bois (2001-2008). [19]

1.6.2 Disponibilité les fibres végétales en Algérie :

L'Algérie est l'un des pays les plus remarquables en raison de ses terres fertiles qui abritent une biodiversité riche, notamment dans ses régions montagneuses, ses hauts plateaux et ses zones désertiques : liège, alfa, disse, Doum, palmier dattier, Pin, Cotton, Lin, etc. L'Algérie avec une production annuelle de liège d'environ 6000 tonnes ; elle est le sixième producteur de liège au monde. De plus, l'alfa occupe environ 4 millions d'hectares en Algérie [35].

Il est intéressant aussi de noter que l'Algérie possède 10 millions de palmiers dattiers. D'autre part, l'Algérie a aussi des dizaines de milliers d'hectares très riches d'autres types de fibres tels que le disse et le Doum. La production de crin végétal à base de fibres de Doum avait débuté au début des années 1900 en Algérie par la colonisation française. L'Algérie a une grande richesse en fibres végétales ; mais malheureusement elle reste presque inexploitée [36].

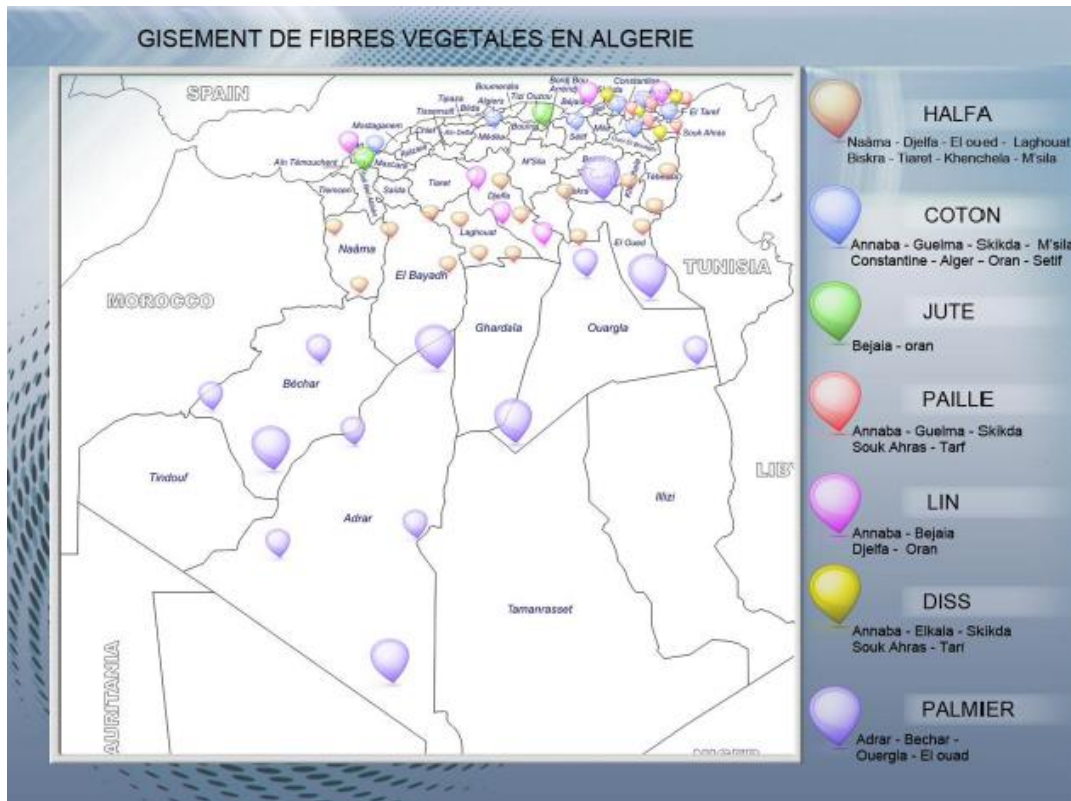


Figure 1.18 : Gisement de fibres végétales en Algérie.

1.7 Avantages et inconvénients des fibres végétales :

Les fibres naturelles ce sont des bio composites agro sources qui présentent comme tous les matériaux composites de notre planète des avantages qui favorisent leur utilisation dans plusieurs domaines d'application (Civil et Militaire).

Ces matériaux verts montrent aussi des inconvénients qui limitent leur utilisation si aucune amélioration n'a été appliquée sur la fibre brute. Le tableau 1.2 indique les principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales.

Tableau 1.2 : Comparaison entre les avantages et les inconvénients des fibres végétales.

| Avantages | Inconvénients |
|--|------------------------------------|
| Ressource renouvelable et Bio dégradable. | Variabilité importante et défauts. |
| Pas d'émission de CO ₂ , en plus elle absorbe le CO ₂ émis par les activités quotidiennes. | Faible durabilité à long terme. |

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

| | |
|--|--|
| Moins abrasive. | Compatibilité entre la fibre et la matrice. |
| Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité) | Faible tenue à la température. |
| Bon régulateur de l'humidité interne Dans le bâtiment. | Forte absorption de l'humidité. |
| Production : peu de technologie, ni d'énergie. | Variations dimensionnelles (gonflement /rétractabilité). |
| Non-toxiques : Pas d'allergie ou d'irritation cutanée lors de la manipulation. | Nécessite la gestion des stocks, surtout pour des applications industrielles. |
| Peu coûteux. | Forte capacité d'absorption d'eau : Le coefficient d'absorption de la fibre de |
| Faible densité (légère). | Banane, Chanvre, Sisal, Palmier dattier, |
| Disponible. | Lin et Noix de coco est respectivement d'environ 407, 158,149, 140,136, et |
| Très bonne capacité d'isolation thermique et acoustique. | 120%. [38, 37]. |

II. L'impact des fibres végétales sur les propriétés des matériaux cimentaires :

2.1 L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité des fibres végétales est l'un des aspects importants qui déterminent leur utilité dans diverses applications. La longueur, le diamètre, la flexibilité et la composition chimique des fibres sont des facteurs essentiels qui influencent leur transformabilité. En général, les fibres plus longues et plus fines sont plus faciles à traiter et sont utilisées dans les industries textiles et les composites, tandis que les applications structurelles nécessitent une résistance et une flexibilité accrues.

Comprendre l'ouvrabilité des fibres végétales est crucial pour les appliquer de manière optimale dans les industries qui cherchent à utiliser des matériaux écologiques. Selon les résultats de la recherche de Kalaivani et al [39], l'ouvrabilité de la pâte de ciment et du mortier était influencée par l'augmentation de la longueur et de la quantité de fibres de jute (figure 1.19).

De même, les résultats d'une étude réalisée par Ismail Shah et al [40] montrent qu'à mesure que la concentration de fibres de ciment augmentait, l'affaissement diminuait en raison de l'absorption d'eau par les fibres. De plus, comme le rapportent Okeola et al. [41], l'ajout de fibres de sisal au mélange de béton entraîne une diminution de l'ouvrabilité du béton frais. Cette réduction est principalement attribuée aux propriétés hygroscopiques du sisal, qui entraînent une réduction de la teneur en eau libre disponible nécessaire à la formation de la pâte de béton.

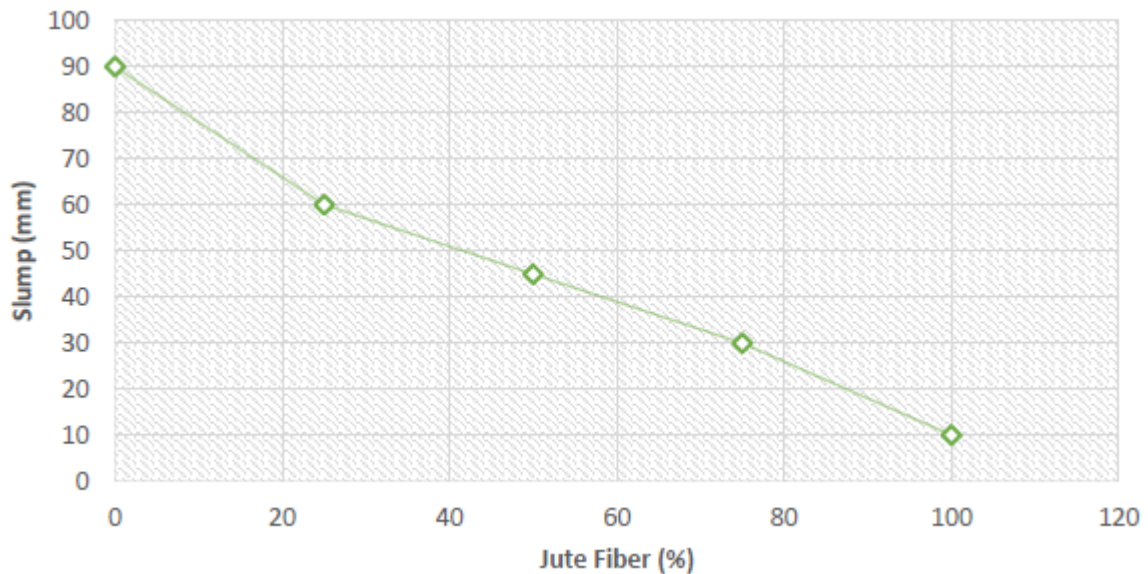


Figure 1.19 : La chute du mortier de ciment contenant des fibres de jute. [58]

2.2 Temps de prise :

De nombreuses études de recherche ont montré les effets négatifs des fibres naturelles extraites des plantes sur l'hydratation des composés de ciment. Belba et al [42] ont observé un retard dans le temps de durcissement et une diminution de la chaleur d'hydratation dans les composés de ciment renforcés par des fibres de bagasse de canne à sucre, l'expliquant par la formation de sucres solubles dans l'eau résultant de la dissolution partielle de l'hémicellulose et de la dégradation alcaline du germe. De même, Sudin et Swami [43] ont noté un retard dans le durcissement du ciment renforcé par des fibres de bambou, probablement dû à la teneur élevée en sucres des fibres, ce qui conduit à la formation de composés de calcium et à un retard du processus d'hydratation.

Lee et Choi [44] a souligné l'importance de mesurer précisément le temps de durcissement dans les composites à base de ciment renforcés par des fibres d'Abaca, en raison du retard dans la réaction d'hydratation. Il a également insisté sur la nécessité de prendre en compte à la fois

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

les propriétés physiques et chimiques des fibres. En raison de l'intervention interne des fibres, les résultats du test de Vicat peuvent être inexacts, et la méthode de la chaleur d'hydratation pourrait négliger les propriétés physiques des fibres. Cependant l'approche non destructive utilisant la vitesse des ondes ultrasonores et leur orientation mérite davantage de recherches, car les résultats varient en fonction de la composition des fibres (figure 1.20).

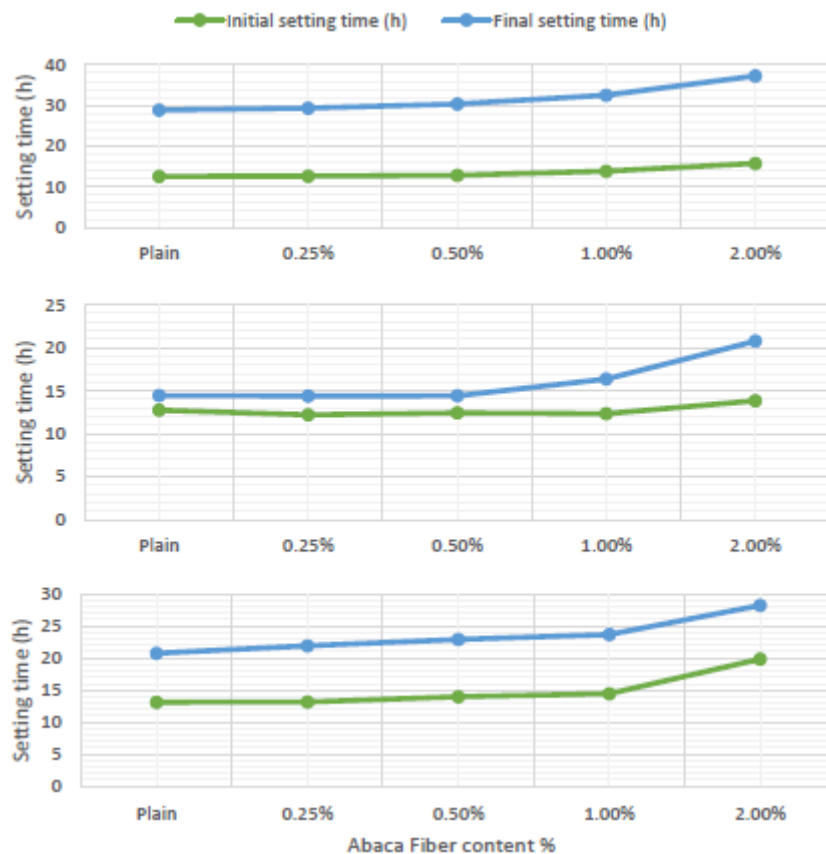


Figure 1.20 : Explorer l'impact du contenu en fibres d'abaca sur les temps de prise à travers trois méthodes : a) aiguille de Vicat, b) degré d'hydratation, et c) analyse UPV. [44]

2.3 Résistance mécanique, résistance à la compression et flexion :

Les fibres naturelles améliorent les qualités mécaniques du béton en augmentant sa flexibilité, sa ténacité, sa résistance aux chocs et sa durabilité. Comme mentionné précédemment, elles contribuent également au durcissement interne, améliorant ainsi la résistance à la compression, régulant le retrait, renforçant la ductilité, réduisant le poids et peut-être, améliorant la maniabilité. La résistance à la compression est essentielle pour évaluer la performance du béton dans la construction, car elle représente la capacité du matériau à résister à la pression. Selon les recherches, la concentration idéale de fibres pour le béton armé varie,

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

la plupart recommandant 0,5% de fibres naturelles, tandis que certains préconisent 1% de fibres naturelles pour obtenir une résistance maximale. Zhou et al. [45] ont trouvé que l'application de fibres de chanvre traitées améliore la résistance à la compression précoce du béton renforcé de fibres de chanvre traité (THFRC). De plus, le THFRC présente une réduction de la fragilité et une augmentation de la ductilité, ce qui indique une plus grande durabilité et une meilleure résistance aux fissures à long terme.

De plus, Rahimi et al. [46] ont découvert que, quel que soit le type de traitement des fibres de lin, les résistances à la compression et à la flexion s'amélioraient de manière constante. Les plus grandes améliorations ont été observées pour une concentration optimale de 0,9% de fibres de lin (en masse de ciment), les fibres traitées à l'alcali montrant la plus grande résistance en raison de l'amélioration de la liaison interfaciale.

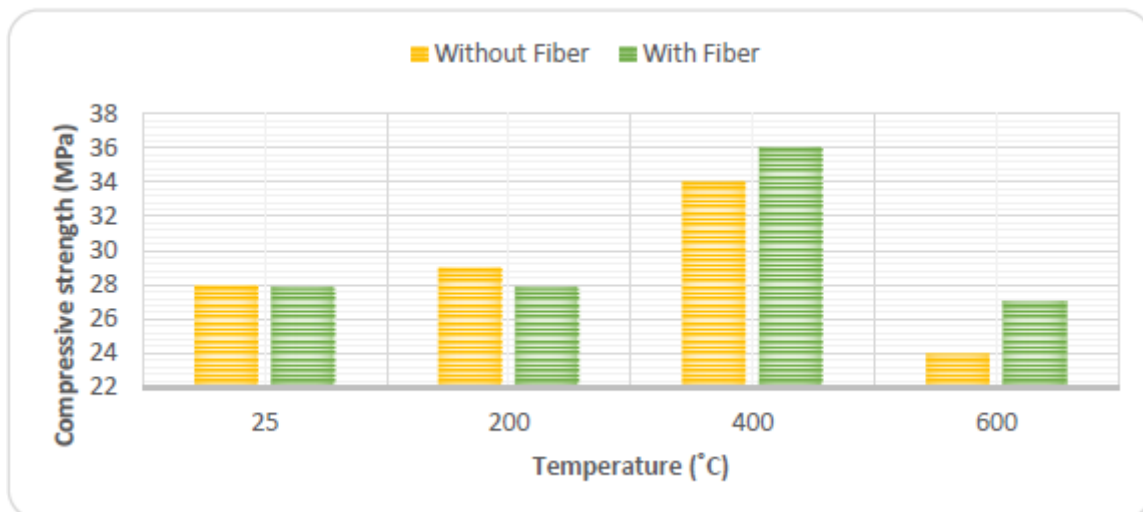


Figure 1.21 : Corrélation entre la résistance à la compression et la température. [62]

D'autre part, les fibres naturelles (FN) ont l'impact le plus significatif sur les performances en flexion des échantillons de béton dans le béton renforcé de fibres (BRF). La recherche a largement exploré l'utilisation des FN dans le BRF, plusieurs études indiquant que des concentrations plus élevées de FN améliorent la résistance à la flexion. Les FN jouent un rôle double en améliorant le durcissement interne, en compactant la matrice et en agissant comme un pont pour prévenir la propagation des fissures au sein de la matrice, augmentant ainsi l'énergie de fracture.

Ramadan et al. [39] ont découvert qu'ajouter des fibres, à savoir des fibres de PA (Phragmites australis) traitées chimiquement avec NaOH, améliore la résistance à la flexion.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

Cette amélioration est due à une meilleure interaction entre les fibres et la matrice, à une rugosité de surface des fibres plus élevée et à une meilleure liaison des fibres.

Cependant Zhou et al. [45] ont rapporté que l'utilisation des fibres de kenaf comme renfort augmente considérablement la résistance à la flexion, en particulier dans les composites à base de ciment à haute résistance. Il est important de noter que l'impact de ces fibres sur la résistance à la flexion varie au départ, elle augmente avec le grade de résistance et la teneur en fibres, mais finit par diminuer.

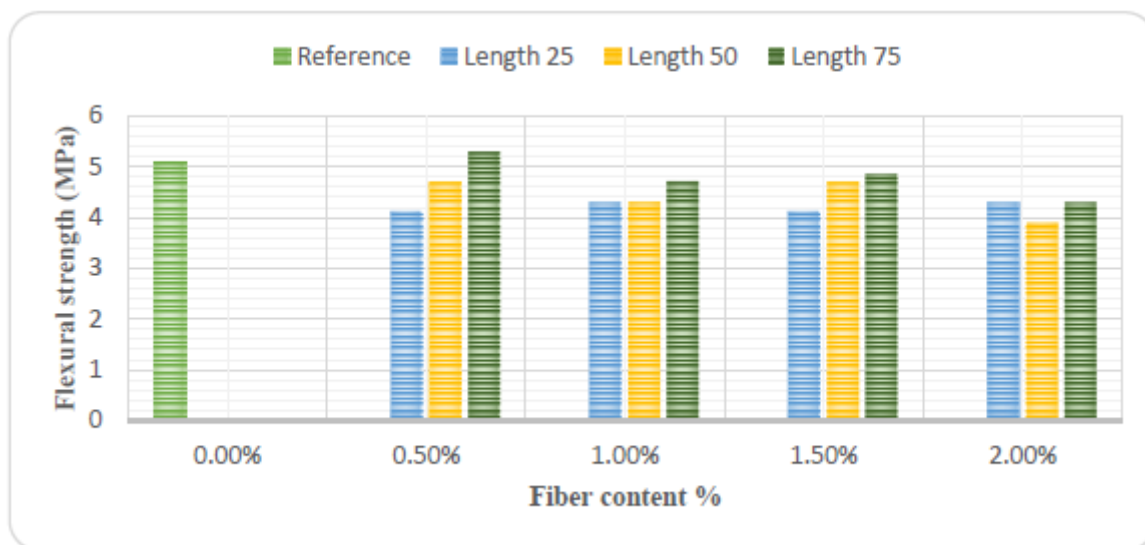


Figure 1.22 : Effets du pourcentage et de la longueur des fibres de coco sur la résistance à la flexion du béton. [63]

2.4 Absorption de l'eau :

L'absorption d'eau dans les matériaux est un facteur important affectant la durabilité du béton, car elle peut conduire à l'introduction de composés toxiques qui contribuent à des problèmes tels que la corrosion des barres métalliques, la fissuration et les dommages structurels. Par conséquent, en évitant l'absorption d'eau, un béton à haute résistance peut être obtenu.

Kesikidou et Stefanidou [47] ont utilisé des fibres naturelles (algues, noix de coco et jute) comme ajouts écologiques dans le mortier, à une fraction volumique de 1,5%. Le pré-trempeage des fibres a empêché toute absorption supplémentaire d'eau après le mélange, et leurs propriétés d'absorption d'eau ont été évaluées. L'absorption d'eau dans les mortiers de ciment est restée relativement constante, ce qui indique une excellente adhésion des fibres avec peu de vides

capillaires, selon l'étude. En revanche, les mortiers à la chaux ont présenté des différences, le mortier de fibres d'algues absorbant davantage d'eau en raison de la capillarité par rapport aux mortiers de fibres de jute et de noix de coco.

2.5 Résistance à la carbonisation :

Récemment, les scientifiques ont utilisé des fibres naturelles (NF) pour améliorer la résistance à la carbonatation du béton. Talavera-Pech et al [48] ont constaté que l'ajout de fibres de cosses de canne à sucre au mortier améliorerait sa résistance à la carbonatation. Les principales raisons de cette amélioration sont l'augmentation de la taille des fibres de la coque de canne à sucre et le confinement des canaux poreux dans la plage de pH alcalin de 9 à 10.

D'autre part, Ban et al [49] Une étude a révélé que le traitement des fibres de bambou avec du glycérol pouvait rendre le mortier modifié par des fibres naturelles plus résistant à la carbonatation que le mortier ordinaire, le distinguant ainsi des groupes de traitement aux esters de silane et d'aluminate (voir la figure 1.23).

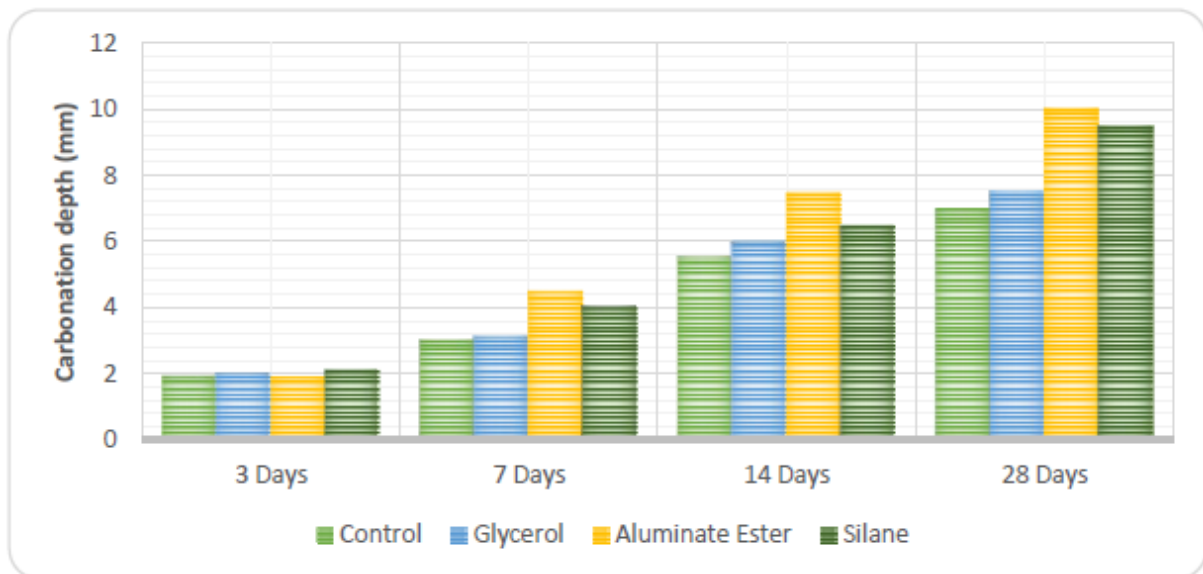


Figure 1.23 : Variations de la profondeur de carbonatation entre quatre mélanges à différents âges. [49]

III. Effet de la température sur les matériaux de construction :

L'effet de la température sur les matériaux de construction est un facteur crucial dans la durabilité des bâtiments, Les variations de température accompagnées des changements de l'humidité entraînent des dilatations et des contractions des matériaux provoquant ainsi des déformations internes. Ces déformations peuvent engendrer des fissures visibles telles que celles observées sur le verre les matériaux de finition et les revêtements extérieurs réduisant non seulement l'esthétique du bâtiment mais aussi sa performance.

Les matériaux de construction comme le béton le métal et le verre réagissent différemment aux variations de température, Par exemple le béton se dilate et se contracte en fonction de l'humidité et de la température et si ces variations sont trop importantes ou trop rapides, elles peuvent provoquer des fissures.

De même les matériaux de finition comme les revêtements en peinture ou les joints en mastic peuvent être sensibles à ces changements. Ces dégâts sont habituellement liés aux déformations des matériaux causées par les variations de leur température et de leur teneur en humidité ou par une réaction chimique. Quand un élément sollicité par des contraintes internes ne peut se déformer en raison de la présence des matériaux qui l'entourent, il s'y produit des fissures. [50]

3.1 L'expansion et la contraction :

La plupart des matériaux subissent une dilatation lorsqu'ils sont chauffés et une contraction lorsqu'ils sont refroidis. Pour les solides l'extension par unité de longueur résultant d'une augmentation de température d'un degré est appelée coefficient de dilatation linéaire.

Les coefficients de dilatation linéaire des matériaux fréquemment utilisés dans le secteur de la construction ont été déterminés expérimentalement en laboratoire et sont généralement consignés dans des ouvrages techniques. Ils sont parfois basés sur l'échelle Centigrade et quelquefois sur l'échelle Fahrenheit, selon des gammes de températures définies et des teneurs en humidité précises. Il est donc assez facile de déterminer la déformation linéaire de tout matériau libre d'entraves en fonction des variations thermiques et, pour l'utilisation pratique de ces données, il conviendrait de se baser sur le genre de construction prévu. [50]

3.2 Les réactions chimiques :

Les réactions chimiques entre les matériaux de construction se produisent généralement en présence d'humidité. Une transformation chimique résulte de l'interaction de deux ou de

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

plusieurs substances et provoque la formation d'autres substances. L'eau elle-même peut être l'une des substances impliquées dans la transformation chimique ou elle peut n'être qu'un agent de transport qui met en présence des substances régissantes.

L'humidité peut, par exemple, provoquer la corrosion des attaches métalliques mais elle peut également extraire des autres matériaux de construction certains agents de corrosion qui sont capables d'accélérer le processus. Toute une gamme d'autres réactions chimiques peuvent entraîner des déformations anormales dans les matériaux de construction ; mentionnons parmi celles-ci la réaction de dilatation qui se produit dans le béton et qui découle des réactions entre les hydroxydes alcalins et les agrégats de calcaire dolomitique. [50]

3.3 Changements des dimensions :

Lorsque la teneur en Humidité des matériaux de construction varie ces derniers subissent des changements dimensionnels qui peuvent être plus significatifs que ceux induits par les fluctuations normales de température. Ainsi un matériau qui absorbe de l'eau à certains moments pour ensuite la restituer subira une série d'extensions et de contractions, ce qui peut éventuellement entraîner sa désintégration ou son détachement. On peut voir au tableau 1.3, sous forme de pourcentages, les changements de longueur de divers matériaux dont un échantillon sec est immergé dans l'eau et, pour fins de comparaison, leur expansion thermique dans le cas d'une augmentation de température de 100°F. [51]

Tableau 1.3 : Expansion des divers matériaux par suite de la chaleur ou de l'eau. [51]

| Les matériaux | Expansion thermique. Changement de longueur en pourcentage pour 100°F | Expansion par l'eau. Changement de longueur en pourcentage | Coefficient Elasticité x 10 ⁶ |
|-----------------------------------|--|--|---|
| Chaux | 0.01 à 0.05 | 0.002 à 0.01 | 3 à 10.4 |
| Briques d'argile et de schiste | 0.02 à 0.05 | 0.002 à 0.01 | 1.4 à 5 |
| Béton | 0.05 à 0.08 | 0.01 à 0.2 | 2.5 |
| Acier | 0.067 | --- | 30 |
| Ciment et mortier portland | 0.04 à 0.06 | 0.005 à 0.03 | 3.5 |
| Mortier à la chaux | 0.04 à 0.05 | 0.001 à 0.02 | 0.5 |

IV. Comportement des fibres végétales à haute température :

Les fibres végétales sont très sensibles à la température et à l'humidité de l'environnement ambiant. La température et la teneur en humidité peuvent interagir et créer des phénomènes de couplage. Le comportement de la fibre sous l'action conjuguée de la température, de l'eau et d'une charge mécanique est appelé comportement thermo-hygro-mécanique (THM) ou thermo-hydro-viscoélastique [52]. L'étude des propriétés THM des fibres végétales revêt une grande importance car leur dégradation hygrothermique sous l'effet de la température et de l'humidité peut altérer leurs propriétés mécaniques et modifier les dimensions du composite. À ce jour il existe à très peu d'études ciblant spécifiquement ce phénomène pour ces fibres et leurs composites.

4.1 Comportement thermique :

Le comportement thermique et la dégradation thermique des fibres végétales ont suscité un intérêt considérable de la part des chercheurs au cours des dernières années. La stabilité thermique limitée des fibres lignocellulosiques constitue l'un de leurs principaux inconvénients. La première dégradation se produit à des températures supérieures à 180°C. En raison de cela, les thermoplastiques couramment utilisés comme matrice dans les composites à fibres végétales comprennent le chlorure de polyvinyle, le polypropylène et le polyéthylène, dont la température de fusion est inférieure ou égale à la température de dégradation [53]. Certains changements dans les propriétés physiques des fibres végétales sont observés lorsque les matériaux celluloseux sont chauffés entre 100 et 250°C. Ces modifications peuvent être expliquées par des transformations au niveau des structures physiques et chimiques, telles que la dépolymérisation, l'hydrolyse, l'oxydation, la déshydratation, la décarboxylation et la recristallisation. Les propriétés thermo physiques de certaines fibres végétales, telles que le sisal, l'ananas et le betelnut, ont été largement analysées [54].

Leonard et al. [55] ont établi les thermogrammes mesurés par le DSC de 4 types fibres végétales telles que le sisal, le kapok, le jute et le chanvre (figure 1.24) pour étudier les caractéristiques thermiques et l'indice de cristallinité après la modification chimique de ces fibres. Les thermogrammes montrent le premier pic exothermique (décomposition) est situé aux environ de 350°C. Varma et al [56] ont étudié le comportement et la stabilité thermique de la fibre de coco (*Cocos nucifera*) modifiée par traitements chimiques. Les graphiques thermogravimétriques de la fibre non traitée et traitée indiquent que la perte de masse de la fibre se situe dans l'intervalle 40-150°C, à cause de la diminution de la teneur en humidité des fibres,

Chapitre I : Etude bibliographique sur les fibres végétales.

et que la modification des fibres par traitement chimique (alkali, silane) affecte la stabilité thermique de la fibre.

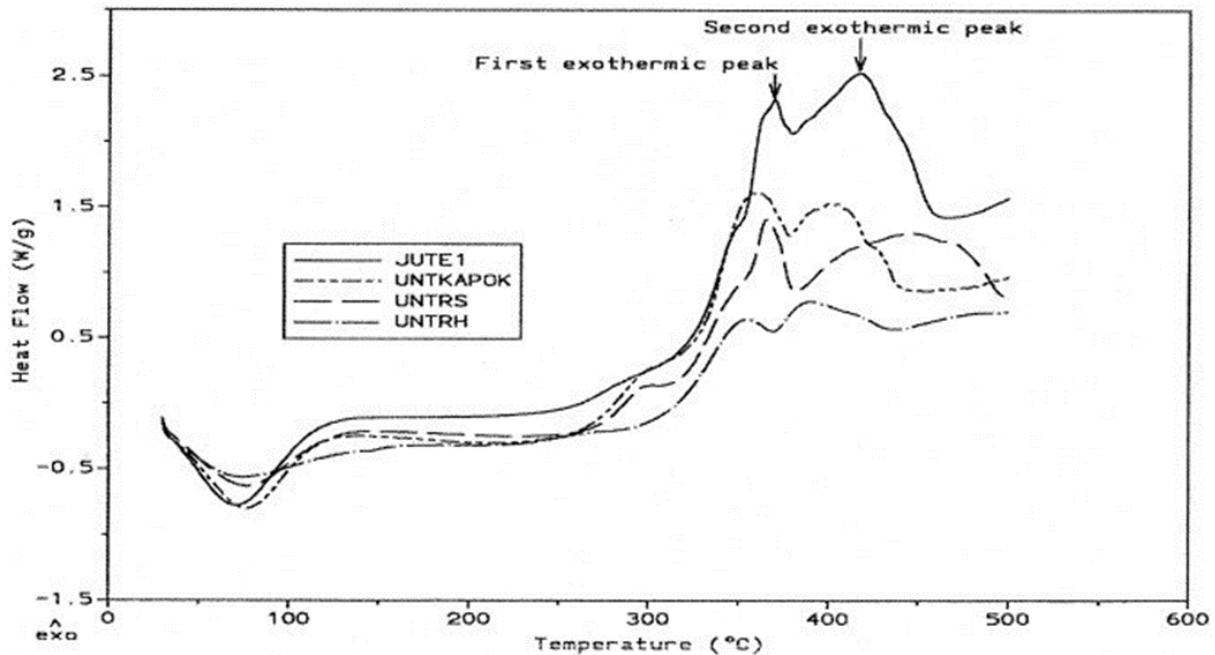


Figure 1.24 : Thermogrammes mesurés par le DSC de quelques fibres naturelles non traitées jute (JUTE1), chanvre (UNTRH), sisal (UNTRS) et kapok (UNTKAPOK). [54]

En générale, l'effet de la température sur la relation de la contrainte déformation est schématiquement illustrée dans la figure 1.25. La diminution de la pente des courbes avec l'augmentation de la température montre une réduction du module d'élasticité, et la résistance réduit aussi. D'ailleurs, les expansions ou contractions hygrothermiques changent aussi la dimension et les distributions de contrainte et de déformation de la fibre.

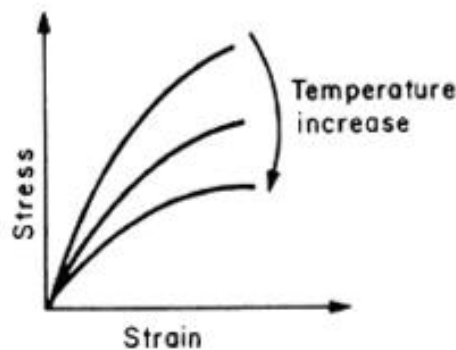


Figure 1.25 : Représentation schématique de l'effet de la température sur la courbe de contrainte - déformation du matériau cellulosique. [57]

4.2 Comportement mécanique :

Le comportement mécanique des fibres végétales change de manière significative lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées, en raison de l'effet de la chaleur sur leurs composants principaux, à savoir la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Les températures élevées entraînent la dégradation des liaisons chimiques entre ces composants, ce qui réduit la rigidité mécanique, la structure et la résistance des fibres à mesure que la température augmente, la cellulose commence à se décomposer entre environ 100 et 150 °C, ce qui entraîne une perte de rigidité des fibres et une diminution de leur capacité à résister aux pressions. De plus, la lignine qui agit comme un liant entre les fibres, commence également à se décomposer entre 200 et 300 °C, rendant les fibres plus fragiles et moins flexibles. Dans ces conditions, les fibres végétales deviennent susceptibles de se casser lorsqu'elles sont soumises à des contraintes mécaniques.

En général, les températures élevées entraînent une diminution marquée de la résistance des fibres végétales à la traction et à la rupture, ce qui réduit leur efficacité en tant que matériaux composites de construction ou pour une utilisation industrielle, nécessitant ainsi des forces mécaniques plus importantes.

L'étude de Navi [58] sur les propriétés mécaniques de la fibre de sisal à haute température montre que les propriétés mécaniques de cette fibre sont considérablement réduites à haute température. La raison est que les coefficients d'expansion thermique des celluloses, des hémicelluloses, de la lignine et de la pectine sont différents. A une température plus haute, ces écarts deviennent plus grands et provoquent des différences de dilatation entre les composantes et, par voie de conséquence, créent des vides et des fractures.

Un modèle micromécanique basée sur la méthode des éléments finis (EF) a été développé par Nilsson et al. [59] pour analyser le comportement en traction de deux types de fibres végétales (lin et chanvre), ainsi que pour étudier la relation entre la rigidité et le diamètre de la fibre en tenant compte de sa microstructure. Dans le but de simplifier la modélisation par éléments finis, la fibre est supposée avoir une forme cylindrique, et seule la paroi secondaire de la fibre a été considérée dans la modélisation, cette dernière représentant la majeure partie de la composition de la fibre.

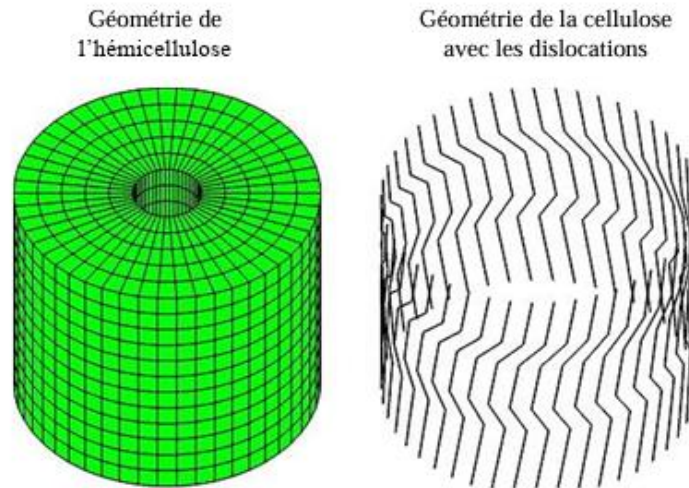


Figure 1.26 : Modélisation du comportement mécanique.

4.3 Comportement hygrométrique :

Le comportement hygrométrique des fibres végétales est lié à leur composition chimique et notamment leur forte teneur en cellulose et en hémicellulose qui ont un caractère hydrophile grâce à la présence des groupements hydroxyles OH, Ces groupements hydroxyles ont une forte affinité avec l'eau [60]. Lorsque les fibres végétales sont soumises à des températures élevées, il se produit une perte progressive d'humidité contenue dans les fibres en raison de l'évaporation de l'eau qui y est liée. Ce phénomène physique résulte de l'effet de la chaleur sur la structure interne des fibres. Cependant, ces modifications sont associées à la perte d'humidité, ce qui entraîne une diminution de la flexibilité et de la résistance des fibres, les rendant ainsi plus fragiles et moins résistantes. À ce jour, une seule étude scientifique s'est intéressée à la cinétique d'absorption de l'eau dans une fibre végétale élémentaire, étant donné que la mise en place d'un protocole expérimental pour analyser le comportement hygrométrique à l'échelle de cette fibre reste un défi compliqué.

Les recherches menées sur des fibres de lin [61] ont permis de mettre en évidence le phénomène d'absorption d'eau, en mesurant la teneur en eau des fibres de lin après une exposition de quelques heures à un taux d'humidité relative de $HR = 66\%$. La figure montre qu'une fibre de lin élémentaire est capable d'absorber les molécules d'eau dans un environnement humide et que la teneur en eau dans la fibre augmente considérablement avec le temps d'exposition à l'humidité jusqu'à atteindre une valeur limite qui correspond à la saturation hygrométrique.

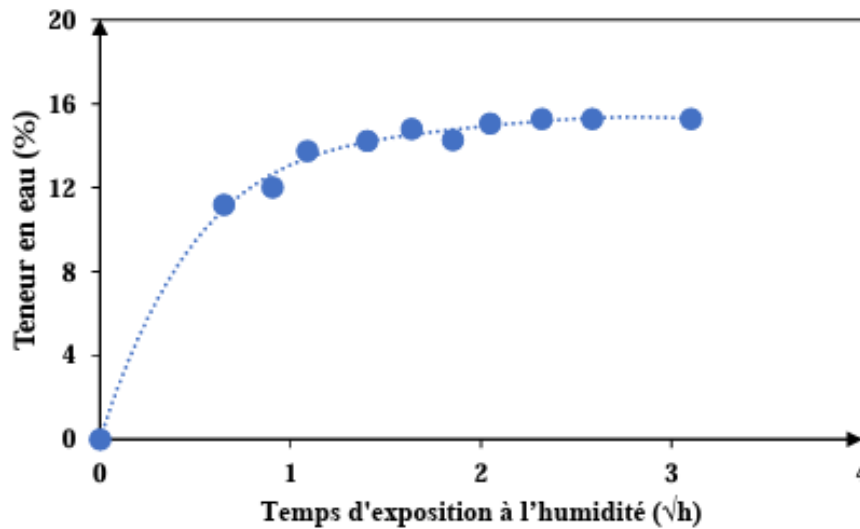


Figure 1.26 : Absorption d'eau dans les fibres de lin lors de leur exposition à un environnement humide.

Conclusion :

Bien que l'étude des fibres végétales soit complexe et difficile en raison de leur structure délicate et de leurs nombreuses compositions chimiques variables qui peuvent être grandement altérées par le climat, l'âge de la plante et le type de sol, il est bon de mentionner que les fibres végétales possèdent beaucoup d'avantages prometteurs pour leur application dans les matériaux composites en raison de leur structure creuse et poreuse, qui fournit une bonne isolation thermique et acoustique. En conséquence, il est possible d'utiliser des fibres végétales dans des composites primaires sans exploitation adéquate de leur matrice non liée. D'autre part, la grande capacité d'absorption d'eau, ainsi que la dégradation de certains constituants chimiques tels que le l'hémicellulose et la lignine dans des environnements alcalins, rendent l'utilisation de ces fibres comme charge dans les matériaux moins renforcés.

Donc, l'abondance des fibres végétales dans le monde entier contribue à accroître leur utilisation dans divers domaines, y compris dans les matériaux de construction, où elles peuvent améliorer les performances mécaniques et environnementales des produits. L'utilisation des fibres végétales dans les mortiers présente ainsi un potentiel considérable pour améliorer la durabilité et la performance de ces matériaux dans diverses applications.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

Introduction :

Ce deuxième chapitre présente en détail les matériaux utilisés dans la fabrication des différents mélanges de mortier, en mettant un accent particulier sur les types de fibres végétales sélectionnées (palmer dattier et les algues) et les traitements spécifiques appliqués à celles-ci. Un des principaux objectifs de cette étude est d'examiner l'impact du traitement alcalin des fibres sur leurs propriétés, ainsi que son influence sur les caractéristiques finales des composites. De plus, ce chapitre aborde les méthodes et techniques utilisées pour évaluer les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites à matrice cimentaire.

I. Présentation des matériaux étudiés :

1.1 Le Ciment :

Le ciment utilisé pour la fabrication de nos éprouvettes de mortiers ordinaires provient de l'usine de Beni-Saf, située dans la wilaya d'Ain-Temouchent. Ce ciment de type composé (Cpj CEMCII/A 42.7), est largement employé dans le secteur de la construction dans la région Nord-Ouest de l'Algérie. Les détails concernant sa composition chimique et minéralogique (composition de Bogue) sont présentés dans les (tableaux **2.1** et **2.2**). Les analyses chimiques ainsi que les études minéralogiques ont été effectuées au sein du Laboratoire des Travaux Publics d'Oran (LTPO).



Figure 2.1 : Gica béton, Ciment de béni Saf.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

Tableau 2.1 : Analyse chimique du ciment (LTPO).

| Composition Chimique | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | Père au Feu | CaO libre | R. I | K ₂ O | Na ₂ O |
|----------------------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|-------------|-----------|------|------------------|-------------------|
| Teneur en (%) | 27.97 | 56.73 | 5.43 | 3.05 | 0.71 | 2.53 | 3.11 | 0.75 | 9.11 | 0.43 | 0.30 |

Tableau 2.2 : Composition minéralogie du ciment de Béni-Saf.

| Composants | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF | CS |
|---------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------|
| Teneur en (%) | 59.98 | 2.15 | 9.87 | 9.31 | 2.94 |

1.2 Le Sable :

Ont été utilisés pour la fabrication de nos mortiers est un deux types de sable de mer :

- Sable fin roulé (0-2 mm) de la sablière de Terga (Wilaya de Ain-Temouchent).
- Sable siliceux (0-3 mm) de la plage des mouches (Wilaya de Ain-Temouchent).



Figure 2.2 : sable siliceux / sable fin roulé.

Pour obtenir une performance optimale du mélange de mortier, il est essentiel de laver soigneusement le sable afin d'éliminer les impuretés et les matières organique, et séchée à l'étuve pendant 24 heures à une température de 105 °C afin d'assurer une déshydratation complète.



Figure 2.3 : Etuve de séchage.

1.3 La Perlite :

La perlite est une roche volcanique d'origine naturelle, issue de l'éruption de laves riches en silice ou de cendres volcaniques. Le refroidissement rapide de ces matériaux conduit à la formation d'une roche à texture vitreuse. Au fil de dizaines de millénaires, les eaux de surface et souterraines s'infiltrent et demeurent emprisonnées dans cette matrice vitreuse. Lorsqu'elle est exposée à des températures élevées, comprises entre 750 et 1250°C, la perlite subit une expansion spectaculaire multipliant son volume initial de quatre à vingt fois en raison de la vaporisation de l'eau qu'elle contient [66]. Cette perlite est extraite sous forme de roches de diamètres variant de 20 à 50 cm, de couleur grise, à l'aspect d'un verre avec des reflets argentés, elle réfléchit la lumière suivant certains plans internes et elle se fragmente en petites sphères ou perles d'où vient son nom (perlite). La perlite utilisée existe dans les roches volcaniques et sédimentaires au Nord-Ouest de Tlemcen près de Hammam Boughrara (Maghnia).



Figure 2.4 : Gisement Bab à Hammam Boughrara (Tlemcen). [68]

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

Les gisements sont localisés près des routes et peuvent apparemment être exploités à ciel ouvert [67]. La perlite est broyée en différentes fractions granulométriques (0/3, 3/8, 8/15) selon l'usage envisagé. [69]

Dans le cadre de nos travaux de laboratoire, nous avons utilisé la perlite ayant une granulométrie de type (0/3) dans la formulation du mortier. Ce choix s'explique par la capacité de cette fraction granulométrique à offrir une bonne répartition dans la matrice cimentaire, améliorant ainsi la compacité du mélange tout en réduisant sa masse volumique. La composition chimique de la perlite broyée est montrée dans le tableau 2.3. [70]



Figure 2.5 : Roche de la perlite naturelle avant broyage.

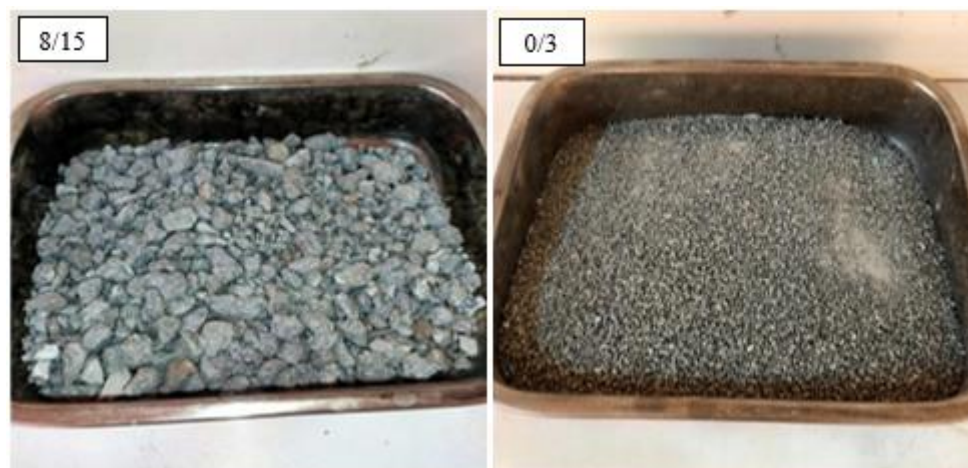


Figure 2.6 : la perlite naturelle après le broyage.

Tableau 2.3 : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara.

| CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | MgO | CL | CaCO ₃ |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|-------------------|------|-------|-------------------|
| 3.16 | 76.40 | 13.43 | 2.92 | 0.01 | 4.33 | 0.82 | 0.37 | 0.008 | 8.75 |

1.4 L'eau de gâchage :

Les exigences relatives à la qualité de l'eau utilisée pour les mortiers et bétons sont définies par la norme (NF P 18-303).

L'eau utilisée pour les mélanges de mortiers est une eau potable, issue du robinet de laboratoire du département de génie civil de l'université d'Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib.

1.5 L'adjuvant :

L'adjuvant utilisé est le SUPERIOR 9 WG est un adjuvant super plastifiant à base de polycarboxylates de nouvelle génération, qui permet de réaliser des bétons fluides avec des rapports E/C très réduits, Il est compatible tous les types de ciment.



Figure 2.6: Adjuvant SUPERIOR 9WG.

Tableau 2.4 : Propriétés chimique et physique du SUPERIOR 9 WG.

| | |
|-------------------------------------|---------------|
| Etat physique | Liquide |
| Couleur | Brun |
| Densité (g/cm ³ , 20° C) | 1.10 (± 0.03) |
| PH (20° C°) | 5.5 (± 1) |
| Extradite sec | 33% (± 2%) |
| Teneur en chlorures | ≤0.1% |

1.6 Les fibres végétales :

Dans le cadre de notre travail expérimental, nous avons étudié deux types de fibres naturelles d'origine végétale, les fibres extraites du tronc du palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) et les fibres issues des algues marines. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel de ces fibres en tant que renforts dans un mortier à base de fibres végétales. Ce type de matériau, à la fois écologique et durable, s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources naturelles renouvelables pour le secteur de la construction.

1.6.1 Fibres de palmier dattier :

Les fibres naturelles utilisées dans cette étude sont extraites de la surface externe du tronc du palmier dattier. Ces fibres naturellement entrelacées, se présentent sous forme d'un maillage de forme quasi rectangulaire, mesurant entre 300 et 500 mm de long et entre 200 et 300 mm de large, composé de trois couches superposées. Il est facile de les séparer en fibres individuelles dont le diamètre varie de 0,1 à 0,8 mm

Les fibres ont été prélevées à partir des palmiers situés dans le jardin de l'université d'Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib, avec l'assistance technique du jardinier de l'établissement.

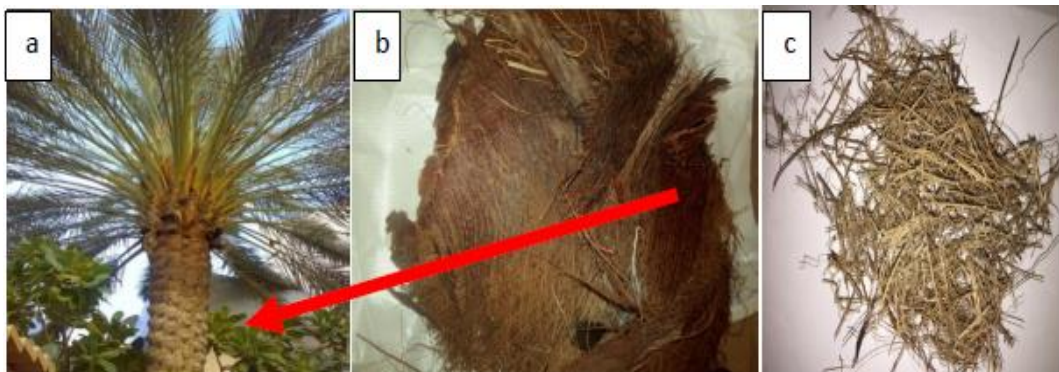


Figure 2.7 : Les étapes d'extraction des fibres du palmier dattier.

1.6.2 Fibres des algues marines :

Les algues sont des organismes aquatiques chlorophylliens qui se développent dans des environnements très humides, tels que les mers, les océans et les eaux courantes. Elles peuvent être classées avec les champignons ne possédant ni racines, ni feuilles, ni fleurs, ni vaisseaux, ni graines. [71] Elles se développent par photosynthèse à partir d'éléments simples comme le dioxyde de carbone (CO₂), l'eau, l'énergie lumineuse et les sels minéraux.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

L'Algérie, pays connu par ces ressources marines naturelles, est une source potentielle d'algues marines pouvant être valorisées. C'est dans ce cadre que nous avons choisi l'espèce *Padina pavonica* comme fibre naturelle dans notre étude, une algue brune appartenant à la famille des Dictyotacées. [72]



Figure 2.8 : étape de la collecte et séchage des algues.

Dans le cadre de cette étude, les fibres végétales issues des algues marines ont été collectées avec soin depuis la Plage des Mouches, située dans la wilaya de Aïn T'émouchent.



Figure 2.9 : Fibres des algues après la collecte et séchage.

II. Méthodes d'essais :

Afin de caractériser les différents matériaux utilisés on a entamé plusieurs essais au niveau du laboratoire de matériaux de génie civil Ain T'émouchent.

2.1 La masse volumique apparent des granulats et ciments :

Cet essai a pour but de déterminer la masse volumique des granulats utilisés dans la confection de béton avec la méthode d'un récipient jaugé. et pour plus de précision dans notre calcul de cette masse volumique.



Figure 2.10 : La masse volumique apparent.

La formule de calcul :
$$M_{app} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{3} \times \frac{1}{V} \dots\dots\dots \text{éq.1}$$

Tableau II.6 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente.

| Matériaux | Sable fin (0/2) | Sable siliceux (0/3) | Perlite (0/3) | Ciment |
|--|--------------------|-------------------------|------------------|--------|
| Masse volumique apparente (g/cm^3). | 1.339 | 1.647 | 1.35 | 1.0604 |

2.2 La masse volumique absolue :

Cette manipulation a pour but de déterminer la masse volumique des granulats utilisés dans la confection du béton avec la méthode de l'éprouvette graduée. Et pour plus de précision dans notre calcul de cette masse volumique.

La formule de calcul :
$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots \text{éq.2}$$



Figure 2.11 : La masse volumique absolue des granulats et ciments.

Tableau 2.5 : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue.

| Matériaux | Sable fin (0/2) | Sable siliceux (0/3) | Perlite (0/3) | Ciment |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------------|------------------|--------|
| Masse volumique absolue (g/cm^3). | 1.342 | 4.083 | 1.86 | 2.84 |

2.3 Equivalent de sable :

L'essai d'équivalent de sable permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière nuisible et d'éléments fins argileux contenus dans le matériau, ainsi de mesurer le taux de propreté des sables. NF-P18-597.



Figure 2.12 : Equivalent de sable.

La formule de calcul : $ES = \frac{h2}{h1} \times 100$ éq.3

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

h1 : hauteur de sable propre et élément fins.

h2 : hauteur de sable propre seulement.

Tableau 2.6 : Résultats de l'essai de l'équivalent de sable.

| Matériaux | Sable fin (0/2) | Sable siliceux (0/3) |
|-------------------------|-----------------|----------------------|
| Equivalent de sable (%) | 75.47 | ---- |

Étant donné que le sable utilisé (sable siliceux) est d'origine marine, il a été préalablement traité et raffiné en laboratoire conformément aux normes en vigueur, afin d'être prêt à l'emploi sans effets indésirables sur notre mélange. Par conséquent son degré de pureté est considéré comme étant de 100%.

2.4 Analyse granulométrique des granulats :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis. La distribution en poids suivant la dimension des particules est traduite par une forme numérique ou une courbe granulométrique (une forme graphique). L'analyse granulométrique est réalisée conformément à la norme NF-P18-560.

- **Module de finesse :** Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat, un bon sable ayant un module de finesse compris entre 2.2 et 2.8.



Figure 2.13 : Analyse granulométrique des granulats (série des tamis).

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

➤ Analyse granulométrique du sable fin (0/2) :

La masse de l'échantillon (M1) = 1000g.

Tableau 2.7 : Analyse granulométrique par tamisage du sable fin (0/2).

| Ouverture du tamis (mm) | Refus partiels (g) | Refus cumulés (g) | RC (%) | TC (%) |
|-------------------------|--------------------|-------------------|--------|--------|
| 5 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 3.15 | 0.05 | 0.05 | 0.005 | 99.995 |
| 2.5 | 0.07 | 0.12 | 0.012 | 99.988 |
| 1.25 | 8.46 | 0.58 | 0.858 | 99.142 |
| 0.63 | 28 | 36.58 | 3.658 | 96.342 |
| 0.315 | 206.95 | 243.53 | 24.353 | 75.647 |
| 0.16 | 535.13 | 778.66 | 77.866 | 22.134 |
| 0.8 | 118.8 | 897.46 | 89.746 | 10.254 |
| Fond | 100.5 | 997.97 | 99.796 | 0.204 |

Module de finesse : $M_f = 1.06$

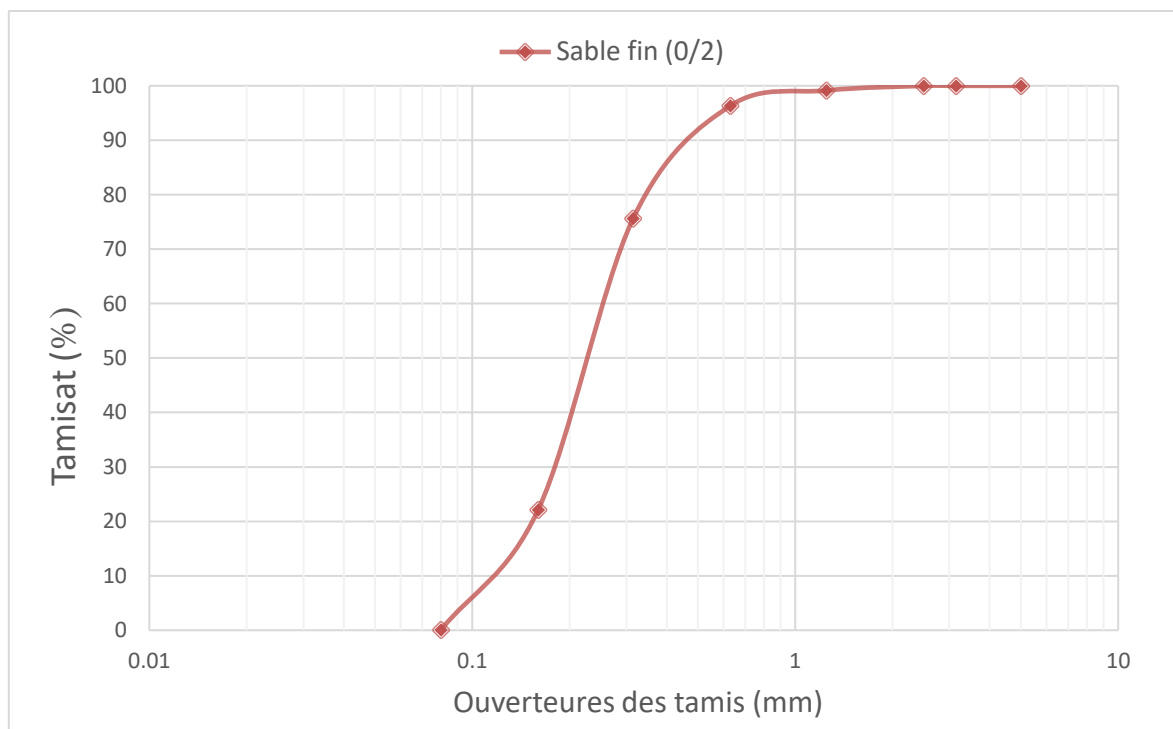


Figure 2.14 : Courbe granulométrique du sable fin (0/2).

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

➤ Analyse granulométrique du sable siliceux (0/3) :

La masse de l'échantillon (M2) = 1000g.

Tableau 2.8 : Analyse granulométrique par tamisage du sable siliceux (0/3).

| Ouverture du tamis (mm) | Refus partiels (g) | Refus cumulés (g) | RC (%) | TC (%) |
|-------------------------|--------------------|-------------------|--------|--------|
| 5 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 3.15 | 0.89 | 0.89 | 0.089 | 99.911 |
| 2.5 | 1.05 | 1.94 | 0.194 | 99.806 |
| 1.25 | 201.2 | 203.14 | 20.314 | 79.686 |
| 0.63 | 526.45 | 729.59 | 72.959 | 27.041 |
| 0.315 | 216.93 | 946.52 | 94.652 | 5.348 |
| 0.16 | 52.2 | 998.72 | 99.872 | 0.128 |
| 0.08 | 0.68 | 999.4 | 99.94 | 0.06 |
| Fond | 0.1 | 999.6 | 99.96 | 0.05 |

Module de finesse : $M_f = 2.88$

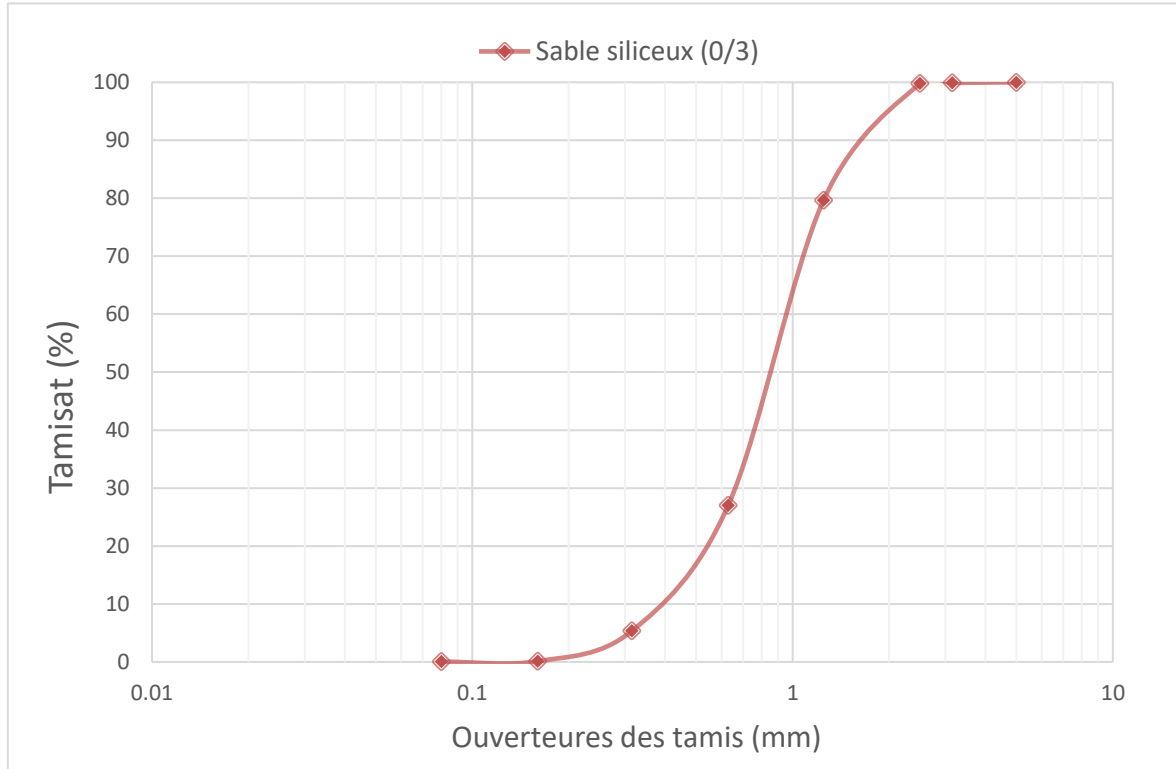


Figure 2.15 : Courbe granulométrique du sable siliceux (0/3).

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

D'après l'analyse granulométrique du sable fin (0/2) et sable siliceux (0/3). Ce sable ne s'inscrit pas dans le fuseau Granulaire. Nous avons fait la correction des deux sables on trouve : Le sable est corrigé : 20.9 % de sable fin et 79.1% de sable siliceux.

➤ Analyse granulométrique du sable de correction :

La masse de l'échantillon (M3) = 209g de sable fin (0/2) + 791g de sable siliceux (0/3) = 1000g.

Tableau 2.9 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de correction.

| Ouverture du tamis (mm) | Refus partiels (g) | Refus cumulés (g) | RC (%) | TC (%) |
|-------------------------|--------------------|-------------------|--------|--------|
| 5 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 3.15 | 0.31 | 0.31 | 0.031 | 99.969 |
| 2.5 | 0.64 | 0.95 | 0.095 | 99.905 |
| 1.25 | 149.5 | 150.45 | 15.095 | 84.955 |
| 0.63 | 455.09 | 605.54 | 60.554 | 39.446 |
| 0.315 | 199.04 | 804.58 | 80.458 | 19.542 |
| 0.16 | 143.1 | 947.68 | 94.768 | 5.232 |
| 0.08 | 30.4 | 978.08 | 97.808 | 2.192 |
| Fond | 21.33 | 999.41 | 99.941 | 0.059 |

Module de finesse : $M_f = 2.51$

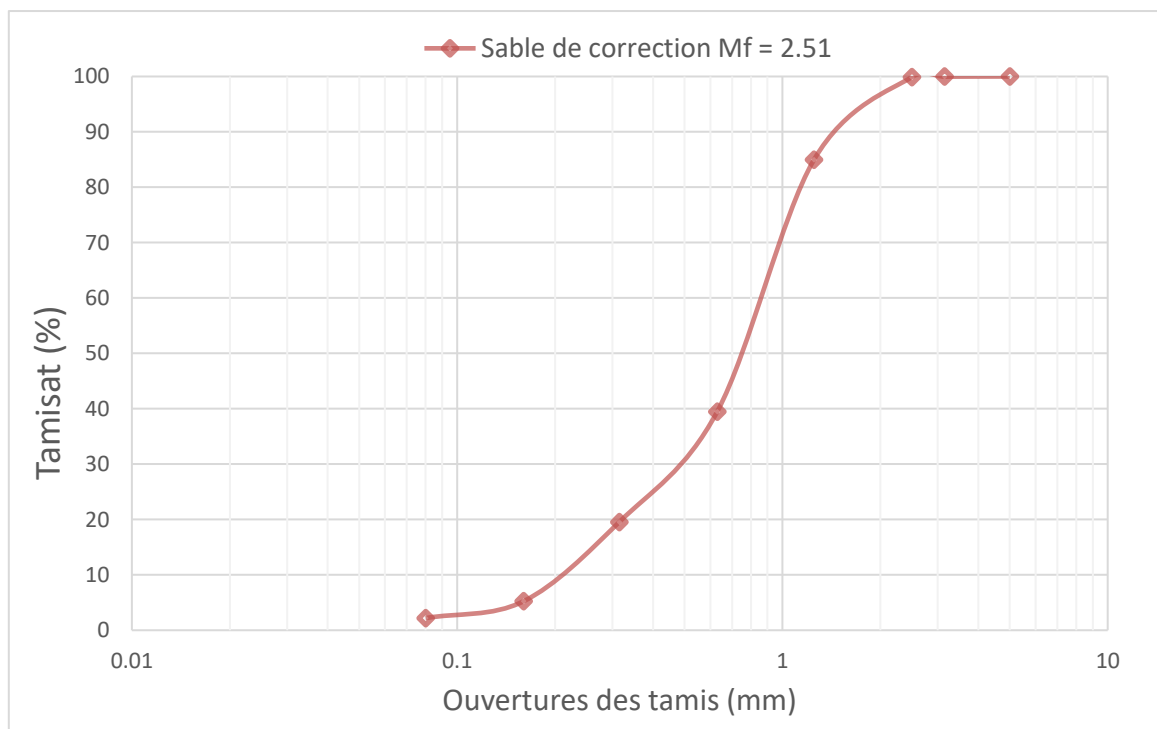


Figure 2.16 : Courbe granulométrique du sable de correction.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

➤ Analyse granulométrique du perlite (0/3) :

La masse de l'échantillon (M4) = 1000g.

Tableau 2.10 : Analyse granulométrique par tamisage du perlite (0/3).

| Ouverture du tamis (mm) | Refus partiels (g) | Refus cumulés (g) | RC (%) | TC (%) |
|-------------------------|--------------------|-------------------|--------|--------|
| 5 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 3.15 | 0.56 | 0.56 | 0.056 | 99.944 |
| 2.5 | 43.18 | 43.74 | 4.318 | 95.626 |
| 1.25 | 358.16 | 401.90 | 35.816 | 59.810 |
| 0.63 | 565.51 | 967.41 | 56.551 | 3.259 |
| 0.315 | 0.25 | 967.66 | 0.025 | 3.234 |
| 0.16 | 0.56 | 968.22 | 0.056 | 3.178 |
| 0.08 | 8.89 | 977.11 | 0.889 | 2.289 |
| Fond | 22.87 | 1000 | 2.287 | 0.02 |

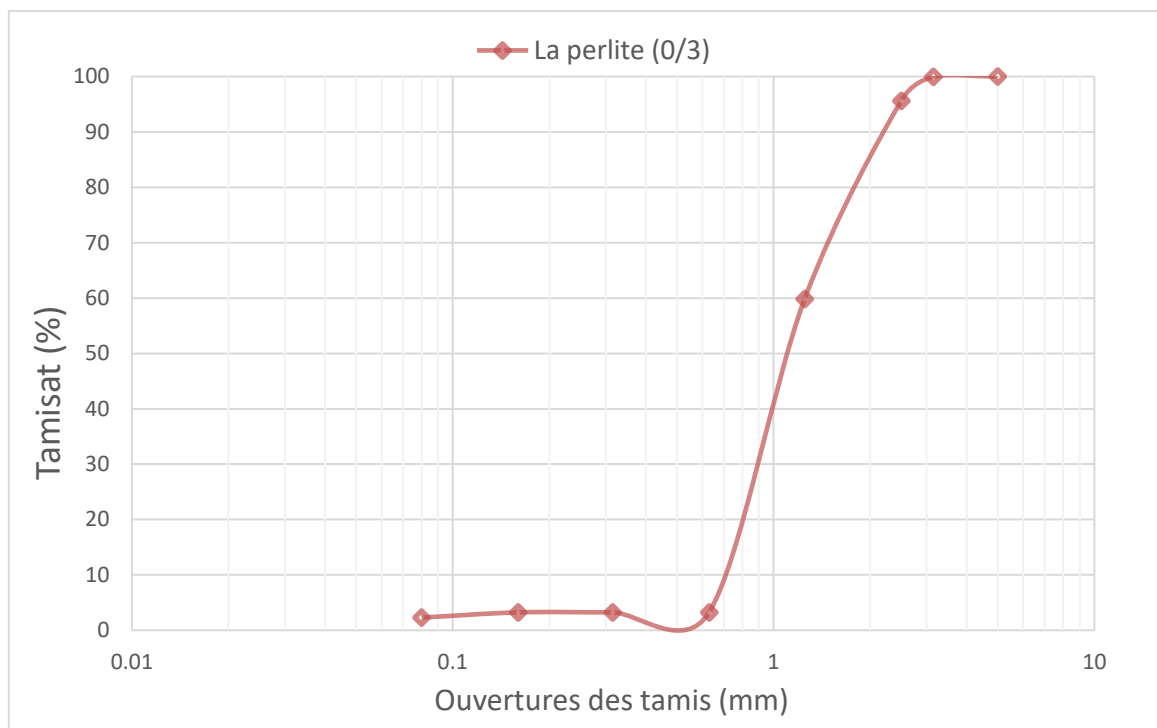


Figure 2.17 : Courbe granulométrique du la perlite (0/3).

2.5 Consistance et temps de prise de ciment :

La consistance normalisée de la pâte de ciment a pour objectif de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée. Cette dernière a été mesurée à l'aide de l'appareil Vicat, muni d'une sonde (une tige) conformément aux prescriptions de la norme NF EN 196-3. Le résultat obtenu de la consistance du ciment utilisé est présenté dans le tableau **12**

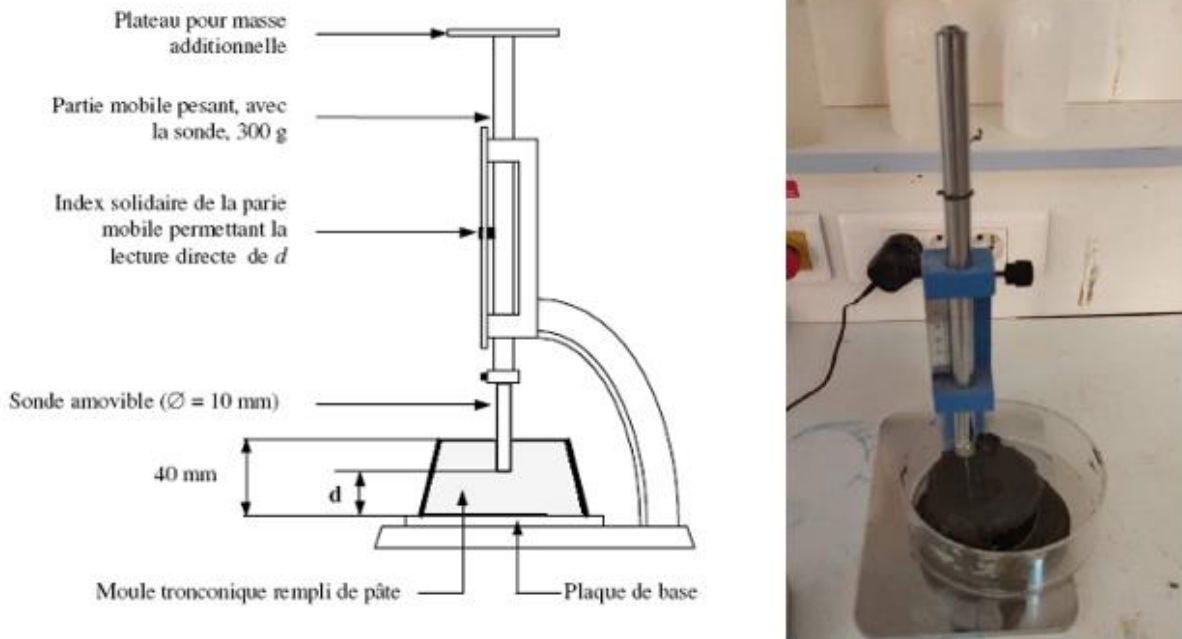


Figure 2.18 : Essai de prise avec appareil de Vicat.

Le temps de prise est déterminé avec le même appareil qui est utilisé (dans les mêmes conditions) à l'exception de la sonde qui cisaille l'échantillon, le diamètre est beaucoup plus petit ($\theta = 1.13 \text{ mm}$). Une fois la pâte à consistance normale obtenu, on procède au changement de la sonde de Vicat par l'aiguille de Vicat et on l'amène à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

- Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (~10-15 mn) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} + 1\text{mm}$.
- Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment testé.

Il est recommandé de reporter les résultats obtenus sur un graphique (minimum 3 points) en vue de déterminer le temps de début de prise avec précision.

Tableau 2.11 : Résultats de l'essai de Consistance et temps de prise du ciment.

| Pâte du Ciment (CEMCII/A 42.7) | |
|--------------------------------|----------------|
| E/C | 0.5 |
| Début de prise (heure) | 2h 16min 43sec |
| Fin de prise (heure) | 1h 41min 23sec |

2.6 La finesse de mouture (surface spécifique Blaine) du ciment :

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment.

La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface, La détermination a été réalisée en utilisant la méthode du perméabilimètre de Blaine.



Figure 2.19 : Perméabilimètre de Blaine.

Le résultat obtenu de la surface spécifique Blaine du ciment est indiqué ci-dessous dans le tableau. **2.12.**

Tableau 2.12 : Résultats de l'essai de surface spécifique Blaine.

| Ciment | t1, t2, t3 (s) | K | N | t0 (s) | M abs (g/cm ³) | η (pas/s) | Ssp (cm ² /g) |
|--------|----------------|-------|-----|--------|----------------------------|----------------|--------------------------|
| CEM | 60.000 | 3.133 | 0.5 | 60.667 | 2.82 | 0.00001828 | 4525.674 |
| | 62.000 | | | | | | |
| | 60.000 | | | | | | |

III. Traitement des fibres végétales :

Les fibres de palmier dattier sont découpées manuellement en segments de 3 à 5 cm de longueur (figure 2.20), puis soigneusement lavées à l'eau afin d'éliminer toute trace de poussière ou d'impuretés. Par la suite, elles sont mises à sécher dans une étuve à 55°C pendant une durée de 24 heures, ce qui permet de stabiliser leur taux d'humidité. À l'issue de ce traitement, les fibres ainsi obtenues sont qualifiées de fibres brutes.



Figure 2.20 : fibres dattier après lavage et coupe.



Figure 2.21 : Caractérisation dimensionnelle des fibres végétales.

3.1 Traitement alcalin (NaOH) :

Le traitement alcalin constitue l'une des méthodes chimiques les plus répandues pour modifier les fibres naturelles. Son effet principal réside dans la rupture des liaisons hydrogène au sein de la structure en réseau de ces fibres, ce qui entraîne une augmentation notable de la rugosité de leur surface [73]. Les fibres naturelles subissent un traitement alcalin à l'aide de l'hydroxyde de sodium (NaOH), visant à éliminer partiellement la lignine, les cires et les huiles présentes à la surface externe des parois cellulaires. Ce procédé entraîne une dépolymérisation de la cellulose, mettant ainsi en évidence des cristallites de dimensions plus réduites [73,74], comme illustré dans la figure 2.22.

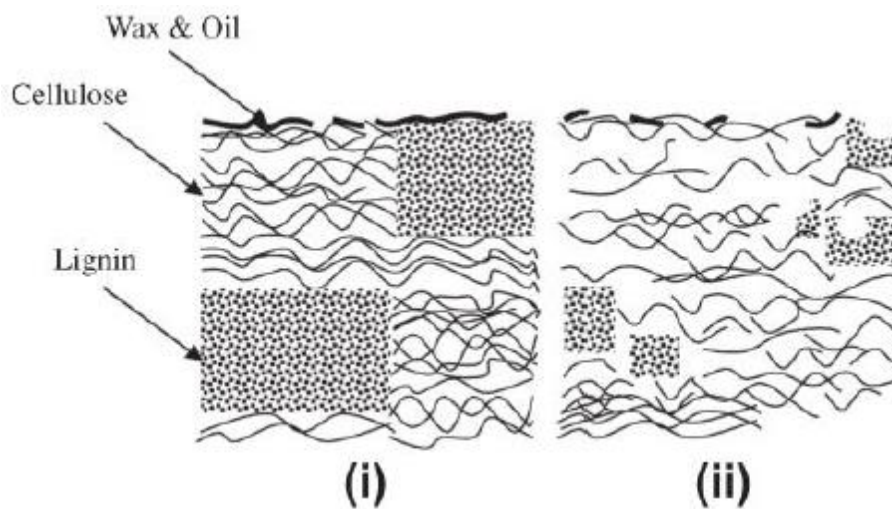


Figure 2.23 : Structure typique de la fibre lignocellulosique (i) non traitée et (ii) et après traitement alcalin.

De plus, lors du traitement alcalin, certaines substances cimentaires telles que les composés hémicellulosiques et la lignine sont éliminées, ce qui a un impact sur la composition chimique des fibres végétales, l'orientation moléculaire des cristallites de cellulose et le degré de polymérisation [75]. Comme représenté dans l'équation :



Dans le cadre de ce protocole expérimental, les fibres préalablement préparées ont été soumises à un traitement alcalin en les immergeant dans une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium, préparée à raison de 400 g de NaOH dissous dans 1 L d'eau distillée. Ce traitement a été effectué à température ambiante pendant une durée de 30 minutes.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

À l'issue de l'immersion, les fibres ont été soigneusement rincées à l'eau distillée afin d'éliminer tout résidu alcalin persistant à leur surface. Enfin, les échantillons ont été séchés dans une étuve à 55 °C pendant 24 heures. Les mêmes étapes de traitement à l'aide de NaOH ont été appliquées aux fibres d'algues.

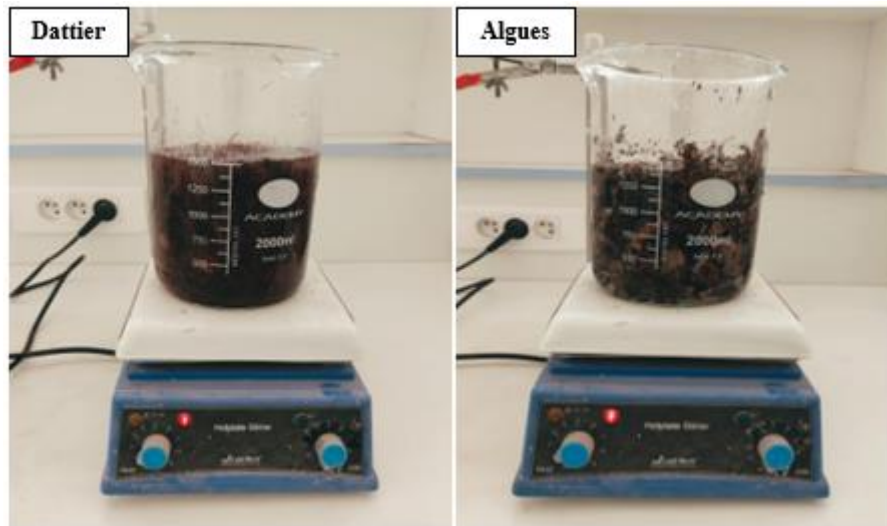


Figure 2.24 : Traitement alcalin (NaOH).

IV. Formulation et préparation des mortiers :

4.1 La composition de mortiers :

Les méthodes de formulation des mortiers courants sont basées sur l'optimisation du squelette granulaire en fonction de la granularité des principaux composants (sable et ciment) afin d'obtenir une compacité maximale du mélange pour une ouvrabilité fixée. Afin d'avoir des bons résultats de la résistance mécanique du mortier on a opté pour chaque combinaison, une moyenne de trois mesures prises sur trois éprouvettes à l'âge de 7, 28, 60 et 90 jours. Cette étude est réalisée sur cinq types de mortiers de forme prismatique de dimensions 4x4x16 cm³. La différence entre chaque type de mortier réside dans le type d'ajout (perlite, fibres dattier et fibres d'algues).

Le rapport E/C a été délibérément fixé à 0,5 afin de neutraliser son influence et permettre une analyse plus précise de l'effet des autres variables introduites, notamment la nature et la proportion des ajouts. Le tableau 2.13 présente la composition des éprouvettes fabriquées en mortier.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

Tableau 2.13 : Composition des différentes formulations de mortier.

| Formulation | Ciment (g) | Sable (g) | Perlite (g) | Fibres dattier (g) | Fibres d'algues (g) | L'eau (g) | L'adjuvant (%) |
|-------------|---------------|--------------|----------------|--------------------------|---------------------------|--------------|-------------------|
| F01(témoin) | 450 | 1350 | 0 | 0 | 0 | 225 | 0% |
| F02 | 450 | 1350 | 0 | 0 | 22.5 | 225 | 2% |
| F03 | 450 | 1350 | 0 | 22.5 | 0 | 225 | 2% |
| F04 | 450 | 945 | 405 | 0 | 0 | 225 | 0.5% |
| F05 | 450 | 945 | 405 | 11.25 | 11.25 | 225 | 1.5% |
| F06 | 450 | 945 | 405 | 13.5 | 9 | 225 | 1.5% |
| F07 | 450 | 945 | 405 | 9 | 13.5 | 225 | 1.5% |

4.2 Préparation des mortiers :

Cette opération influe d'une façon notable sur le produit final. La préparation des différents types de mortiers a été réalisée selon les étapes suivantes :

Les matériaux secs (ciment, sable, perlite, fibres) sont d'abord pesés selon les proportions définies dans le tableau **2.13**. Le dosage est fixé à 450 ± 2 g de ciment et 225 ± 2 g d'eau pour toutes les formulations. La quantité de sable varie en fonction de la présence d'ajouts (perlite ou fibres), tout en respectant les rapports de substitution préétablis, l'adjuvant est ajouté en pourcentage du poids de ciment selon chaque cas.

Tableau 2.14 : Conduite des opérations du malaxage.

| Opération | Introduire du sable / Sable+ perlite | Ajouter l'eau + adjuvant | Ajouter Le ciment | Malaxage (Vites lente) | Incorporation progressive des fibres | Malaxage (Vites rapide) | Raclage De la cuve | Malaxage final (Vites rapide) |
|---------------------|---|--------------------------------|-------------------------|------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------|--|
| Durée | — | — | — | 30 s | 30 s | 60 s | — | 60 s |
| Etat du malaxeur | Arrêt | Arrêt | Arrêt | Lente | Lente | Rapide | Arrêt | Rapide |



Figure 2.25 : Les étapes du malaxage du mortier.

4.2.1 Moulage des éprouvettes :

Dès la fin de la préparation du mélange de mortier, le moulage des éprouvettes doit être effectué sans délai. Le moule est fixé sur la table à chocs (voir fig. 2.26), conformément aux exigences de la norme P 18-196-1. Les étapes de moulage sont réalisées comme suit :

- ✓ Le mortier est introduit en deux couches successives à l'aide d'une cuillère appropriée dans chaque compartiment du moule.
- ✓ Chaque couche est répartie uniformément à l'aide d'une spatule large.
- ✓ La première couche est compactée par l'application de 60 chocs.
- ✓ La seconde couche est ensuite versée puis compactée également par 60 chocs.
- ✓ Après compactage, le moule est soigneusement retiré de la table à chocs et la rehausse est enlevée.
- ✓ L'excès de mortier est immédiatement éliminé à l'aide d'une règle métallique.
- ✓ La surface est ensuite nivelée en douceur avec la même règle.

Enfin, les résidus de mortier autour du moule sont nettoyés après l'arasement pour assurer une finition propre.



Figure 2.26 : Appareil à choc.



Figure 2.27 : Remplissage d'éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³.

4.2.2 Démoulage et conservation des éprouvettes :

Le démoulage est effectué avec précaution après un temps de repos de 24 heures, afin de préserver l'intégrité des éprouvettes. Ces dernières sont ensuite immergées sans délai dans de l'eau propre, à l'intérieur de récipients adaptés. L'immersion peut se faire en position horizontale ou verticale, selon le type de récipient, en veillant à ce que les éprouvettes soient correctement identifiées. Cette étape permet d'assurer une bonne hydratation et de favoriser le développement des caractéristiques mécaniques du mortier. Effectuer les différents essais à des âges fixés dans les limites : 07, 28, 60, 90 jours.



Figure 2.28 : Les éprouvettes après démoulage et conservation.

V. Caractérisation expérimentale des mortiers :

5.1 Essais à l'état frais des mortiers :

Les premiers essais sur mortiers frais que nous présentons, sont des essais classiques qui s'effectuent traditionnellement sur des mortiers. Aucune modification n'a été effectuée pour les appliquer aux mortiers. Les essais réalisés sur mortier sont :

5.1.1 Maniabilité :

La maniabilité du mortier frais est déterminée à l'aide d'appareil de maniabilité B, il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique à des dimensions connus, posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

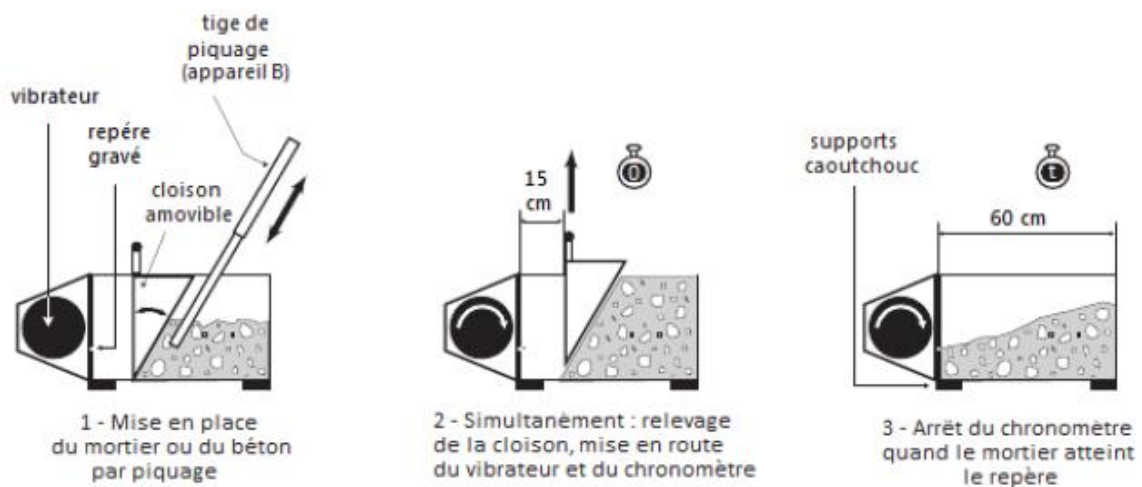


Figure 2.29 : Principe de fonctionnement de la maniabilité.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

➤ But de l'essai :

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, on super plastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance.

➤ Principe de l'essai :

Dans ces essais la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

➤ Matériaux utilisés :

L'appareil utilisé est appelé (maniabilimètre B) et schématisé sur la figure. Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (9cm×10cm×20cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil.



Figure 2.30 : Maniabilimètre de mortier.

5.1.2 L'air Occlus :

Cette méthode consiste à introduire de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus d'un échantillon de béton compacté de volume connu se trouvant dans une enceinte étanche et à appliquer sur l'eau une pression d'air prédéterminée. On mesure la diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton en observant la valeur de la baisse du niveau d'eau.

➤ Conduite de l'essai :

- ✓ Placer le béton dans le récipient d'une manière à éliminer autant d'air occlus que possible.
- ✓ Introduire le béton en deux couches d'épaisseur approximativement égale qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 10 fois par couche. Afin d'éliminer les bulles d'air occlus mais pas l'air entraîné.
- ✓ Nettoyer soigneusement les rebords du récipient et l'ensemble du couvercle.
- ✓ Plaquer le couvercle et fixer l'ensemble, s'assurer de la bonne étanchéité sous pression entre le couvercle et le récipient.
- ✓ Remplir l'appareillage d'eau et éliminer l'air adhérent aux surfaces intérieures du couvercle. Amener le niveau d'eau à zéro dans le tube vertical en purgeant par le petit robinet.
- ✓ A l'aide de la pompe à air, appliquer la pression.
- ✓ Mesurer la diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton en observant la valeur de la baisse du niveau d'eau.



Figure 2.31 : Appareil de mesure de la teneur en air occlus.

5.2 Essais à l'état durci des mortiers :

5.2.1 Essais de chauffage et de refroidissement :

Après le démoulage, les échantillons de mortier ont été soumis à des cycles de chauffage et de refroidissement. Toutes les éprouvettes ont été chauffées à une vitesse de 1 °C/min, puis refroidies à une vitesse moyenne de 0,5 °C/min jusqu'à la température ambiante. Les échantillons sont laissés refroidir à l'intérieur du four afin d'éviter les chocs thermiques.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

Les essais sont réalisés dans un four électrique programmable, (figure 2.32). La température maximale du four est de 1200°C, Le pilotage du four est réalisé à l'aide d'un régulateur programmeur.



Figure 2.32 : Four utilisé pour le chauffage des éprouvettes à température maximale 1200 °C.

Les éprouvettes ont subi un chauffage de 200°C ; 400°C et 600°C en respectant le cycle de chauffage. Il est important de noter aussi que le maintien en température envisagée était d'une 2 heures dans le cas de toutes les températures choisies (pour toutes les séries des échantillons de mortiers). La méthode de chauffage et refroidissement des éprouvettes de mortier choisie peut être donc illustrée par le schéma suivant :

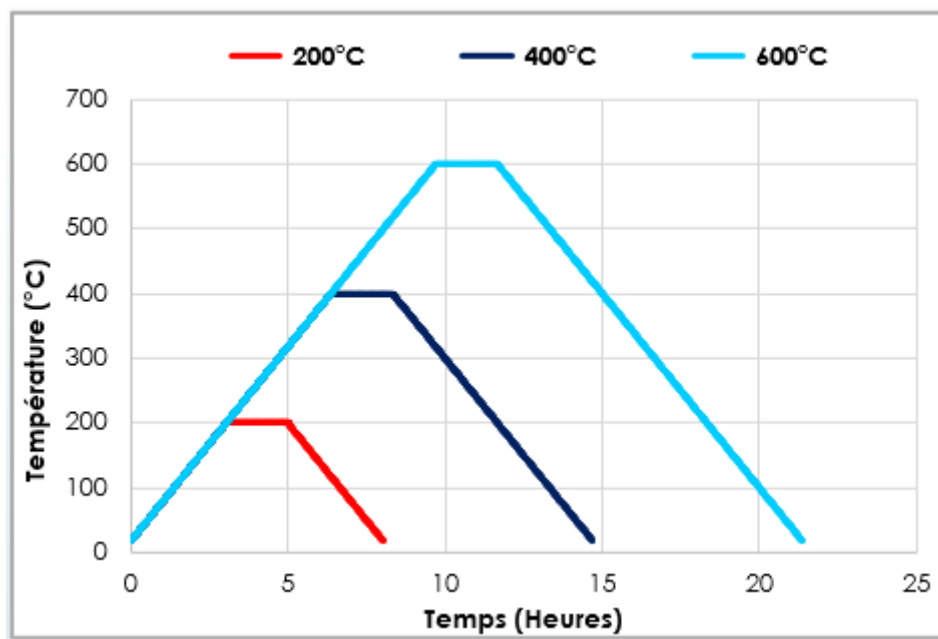


Figure 2.33 : Cycle de chauffage / refroidissement des éprouvettes de mortier.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentale.

Les échantillons de mortier ont été observés à l'aide d'une loupe après leur extraction du four. Cette observation visait à examiner l'état de surface et l'apparition éventuelle de fissures dues à l'exposition thermique.

À 200°C aucune fissure n'est observée, traduisant une bonne stabilité du mortier. À 400°C de fines fissures apparaissent, signalant le début de la dégradation thermique. À 600°C les fissures deviennent plus profondes et marquées, témoignant d'une perte progressive de la cohésion interne.

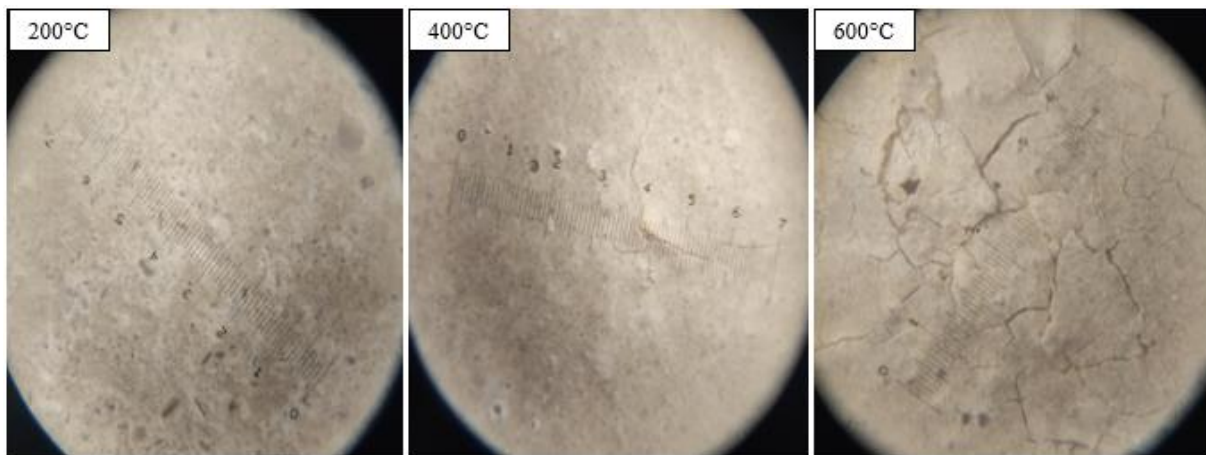


Figure 2.34 : Observation microscopique de l'évolution des fissures dans le mortier après exposition thermique à 200, 400 et 600°C.

5.2.2 Essai de résistance à la flexion :

L'essai de flexion est réalisé conformément à la norme européenne EN 196-1. Les éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm³ sont confectionnées puis soumises à des essais aux âges définis conformément au protocole expérimental, afin d'évaluer l'évolution de la résistance à la flexion en fonction du temps. Pour chaque formulation du mélange, la valeur retenue correspond à la moyenne de trois essais.

La résistance à la flexion des mortiers est déterminée à partir de l'apparition de la première fissure visible, à l'aide de l'équation.1. Le dispositif de l'essai de flexion est présenté dans la figure 2.35.

$$R_f = \frac{1.5 F_f \times L}{b^3} \dots\dots\dots\text{éq.1}$$



Figure 2.35 : Appareil de l'essai de la flexion.

5.2.3 Essai de résistance à la compression :

En ce concerne l'essai de compression, il consiste à centrer chaque demi-prisme (obtenu suite à l'essai de la flexion) latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement, de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm (fig. 2.36). L'application de la charge de compression doit être avec une vitesse constante jusqu'à la rupture, Les valeurs obtenues correspondent à la moyenne de 3 essais à partir de l'équation 2.

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \dots\dots\dots \text{éq.2}$$



Figure 2.36 : Essai de résistance à la compression.

5.2.4 Essai d'absorption capillaire :

Les mesures de capillarité sont réalisées selon les prescriptions de la norme NF P 18-555, Pour garantir une absorption d'eau uni axiale, les surfaces latérales des échantillons sont recouvertes d'un matériau imperméable. Avant l'essai, les échantillons sont séchés dans une étuve à 60 °C jusqu'à stabilisation de la masse, puis exposés à l'air libre et pesés à l'aide d'une balance de précision 0.01 g afin de déterminer leur poids à l'état sec M_0 .

Les échantillons sont ensuite placés sur un lit de gravier dans des récipients en plastique peu profonds, contenant de l'eau. La profondeur d'immersion des surfaces d'échantillon pendant le test d'absorption est de 2 à 3 mm Après chaque échéance de submersion, les échantillons sont prélevés de l'eau, essuyés et séchés superficiellement à l'aide d'un papier absorbant pour enlever l'excès d'eau présente sur la surface puis pesés (M_t).

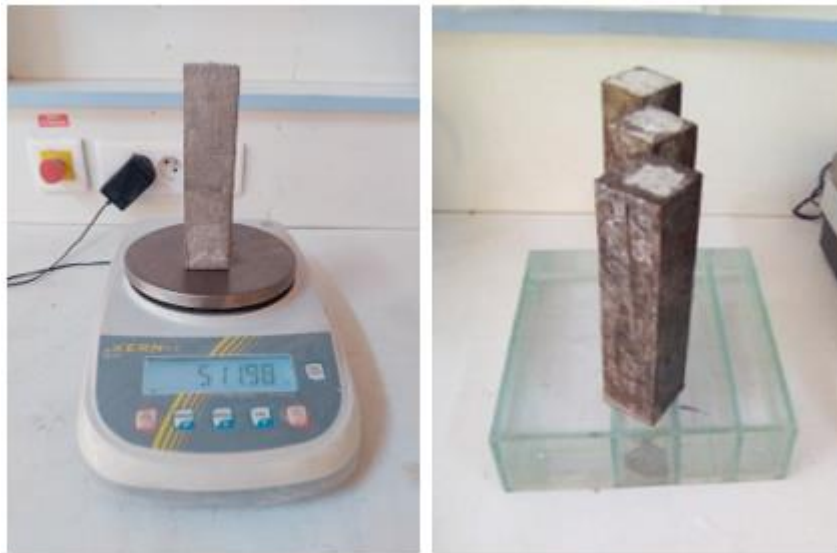


Figure 2.37 : Eprouvettes dans le récipient en position verticale avec un niveau d'eau constant de 3mm.

L'absorption est mesurée par pesées successives, à partir de l'expression suivante :

$$C_a \% = \frac{M_x - M_0}{A} \text{ g / cm}^2 \dots\dots\dots\text{éq.3}$$

Où :

C_a : Coefficient d'absorption capillaire (kg/m^2).

M_x : Masse de l'éprouvette à l'instant t (kg).

M_0 : Masse initiale de l'éprouvette (kg).

A : Section immergée de l'éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3 = 0.016 \text{ (m}^2\text{)}$.

5.2.5 Essai de mesure la conductivité thermique :

La conductivité thermique ou la conductance thermique d'un matériau quantifie la capacité de celui-ci à transmettre la chaleur. Cette propriété varie en fonction de la température et de la composition du matériau, la conductivité est une propriété thermique qui est définie comme étant le coefficient de proportionnalité entre le flux thermique et le gradient de température.

➤ Méthode du fil chaud :

Cette méthode est surtout utilisée pour mesurer la conductivité thermique des matériaux réfractaires isolants à haute température des matériaux isolants en vrac, ainsi que des matériaux cimentaires tels que le mortier. Un fil résistif est utilisé comme source de chauffage. Le fil généralement en platine sert aussi de capteur de température.



Figure 2.38 : mesure de conductivité thermique.

➤ Mode d'emploi :

- ✓ Après séchage des échantillons.
- ✓ Laissez l'échantillon repose pendant 24 heures.
- ✓ Percez l'échantillon avec un diamètre de 2 mm et une profondeur de 1 cm.
- ✓ Versez la colle dans les deux trous.
- ✓ Allumez l'appareil.
- ✓ Placez les connecteurs à l'intérieur des deux trous.
- ✓ Allumez l'appareil et lire les données.
- ✓ Répéter l'opération température de 200°, 400° et 600°C.

5.2.6 Essai d'Ultrasons :

Cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) la quelle est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance connue. L'appareil comprend avec capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digital du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs, la vitesse d'onde, V , dans un milieu homogène, isotrope et élastique.

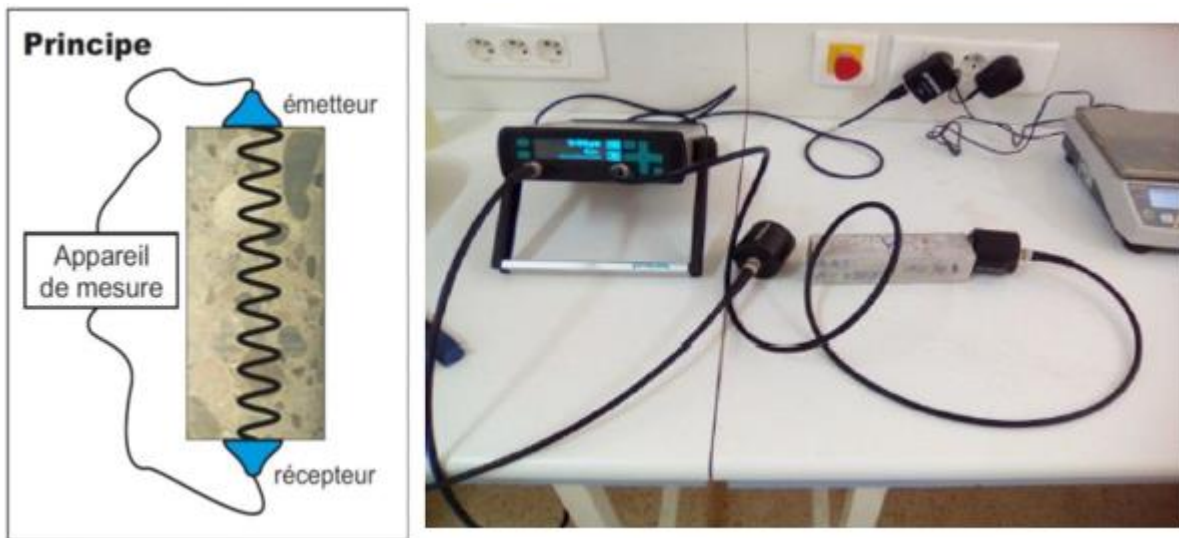


Figure 2.39 : Appareil d'auscultation sonore « Essai d'ultrason ».

➤ Objectif :

Ultrason c'est un essai non destructif très important qui nous permet de détecter à la fois plusieurs caractéristiques du béton durci, tels que le degré de compacité, l'homogénéité, la résistance à la compression, le taux de fissuration, ...etc.

➤ Description de l'appareil « Ultrason » :

L'appareil d'auscultation dynamique génère des impulsions ultrasoniques qui sont transmises en contact avec la zone à évaluer, le temps de propagation à travers le béton est visualisé l'afficheur digital.

- Une tête de transmission et une tête de réception ;
- Deux câbles de connexion ;
- Deux piles alcalines 1,5 V type « D ».
- Un afficheur digital.

Conclusion :

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un mortier joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures, les propriétés essentielles du mortier sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants. De ce fait, Ce chapitre est dans le but de décrire dans les détails et de caractériser les matériaux utilisés pour la préparation des mortiers objet de cette étude. Le détail des différentes formulations a été présenté dans cette partie ainsi que des dispositifs expérimentaux et des modes opératoires, Notamment les fibres de palmier dattier et d'algues, ainsi que les méthodes de traitement et d'essai appliquées à l'état frais et l'état durci des mortiers.

À travers cette analyse, nous cherchons à déterminer l'influence précise des fibres végétales sur les performances des matériaux composites et à identifier les avantages potentiels de l'intégration de ces fibres dans des applications pratiques. Les essais expérimentaux adoptés nous permettront de mieux comprendre le comportement de ces composites dans différentes conditions d'utilisation.

Chapitre III : Résultats et discussions.

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les mortiers étudiés à l'état frais (maniabilité et l'air occlus), ainsi que les essais réalisés sur le mortier confectionné pour évaluer ses propriétés à l'état durci (résistance à la flexion et résistance à la compression ainsi que l'essai d'Ultrasons et la conductivité thermique et l'absorption capillaire du matériau), Conformément aux modes opératoires mentionnés dans le chapitre 2.

Une analyse et des discussions des résultats et les interprétations des différents paramètres obtenues après 7 ; 28 ; 60 ; 90 jours. Il permet de comparer les performances des mortiers fibrés et sans fibres(témoin) sous l'effet de la température (200°, 400° et 600°C), en mettant en évidence les principaux mécanismes de dégradation observés.

1.1 Essais à l'état frais de mortier :

Tableau 3.1 : Type de la formulation de mortiers

| F01 | F02 | F03 | F04 | F05 | F06 | F07 |
|--------|--------------------|---------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Témoin | Fibre algues 5% | Fibre dattier 5% | Perlite 30 % | 2.5% d'algues + 2.5% dattier | 3% dattier + 2% d'algues | 3% d'algues + 2% dattier |

1.1.1 Maniabilité :

Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, comme illustré dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Classe de consistance selon la durée d'écoulement.

| Class de consistance | Durée en (s) |
|----------------------|------------------|
| Ferme | $t \geq 40$ |
| Plastique | $20 < t \leq 30$ |
| Très plastique | $10 < t \leq 20$ |
| Fluide | $t \leq 10$ |

Tableau 3.3 : résultats d'essai de maniabilité.

| Type de formulation | Temps d'écoulement (s) | Classe de consistance |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| F01 témoin | 12.63 | Très plastique |
| F 02 | 13.22 | Très plastique |
| F 03 | 15.00 | Très plastique |
| F 04 | 14.92 | Très plastique |
| F 05 | 17.60 | Très plastique |
| F 06 | 15.21 | Très plastique |
| F 07 | 18.00 | Très plastique |

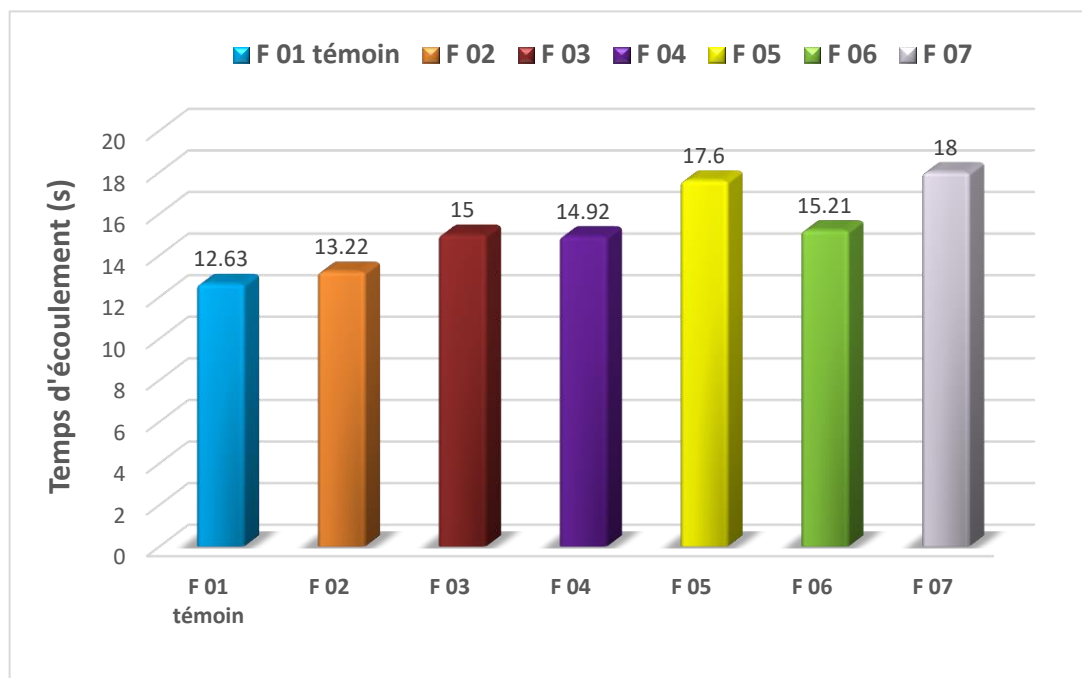


Figure 3.1 : Evolution de la maniabilité des différents mortiers étudiés.

1.1.2 L'air occlus :

Tableau 3.4 : résultats d'essai d'air occlus.

| Type de formulation | Résultat |
|---------------------|----------|
| F01 témoin | 17 % |
| F 02 | 13 % |
| F 03 | 15 % |
| F 04 | 18 % |
| F 05 | 14 % |
| F 06 | 10 % |
| F 07 | 12 % |

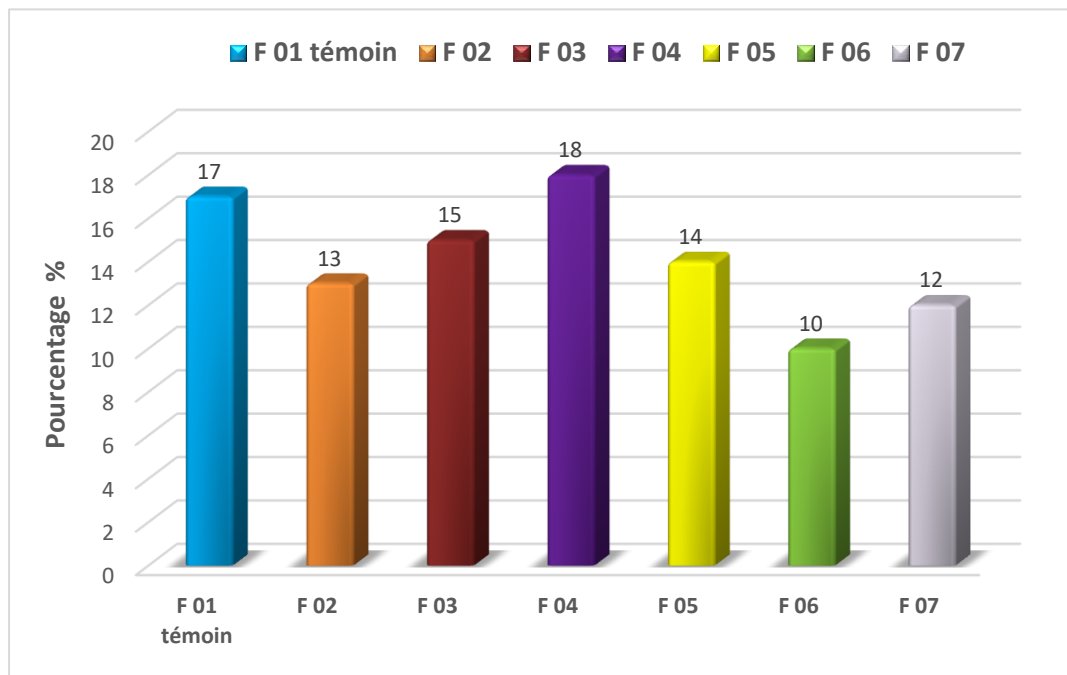


Figure 3.2 : Evolution de l'air occlus dans les différents mortiers étudiés.

1.2 Essais à l'état durci de mortier :

1.2.1 Résistance à la flexion :

➤ À Température = 200°C :

Tableau 3.5 : Résistance à la flexion à T= 200°C.

| Type | Résistance à la flexion (Mpa) | | | |
|------------|-------------------------------|----------|----------|----------|
| | 07 jours | 28 jours | 60 jours | 90 jours |
| F01 témoin | 5.15 | 4.92 | 6.62 | 7.26 |
| F 02 | 3.28 | 3.75 | 4.21 | 4.22 |
| F 03 | 4.15 | 4.48 | 6.09 | 6.56 |
| F 04 | 4.39 | 4.92 | 5.62 | 6.09 |
| F 05 | 4.45 | 4.92 | 5.63 | 6.09 |
| F 06 | 4.21 | 5.15 | 6.09 | 7.27 |
| F 07 | 4.22 | 4.92 | 5.16 | 5.86 |

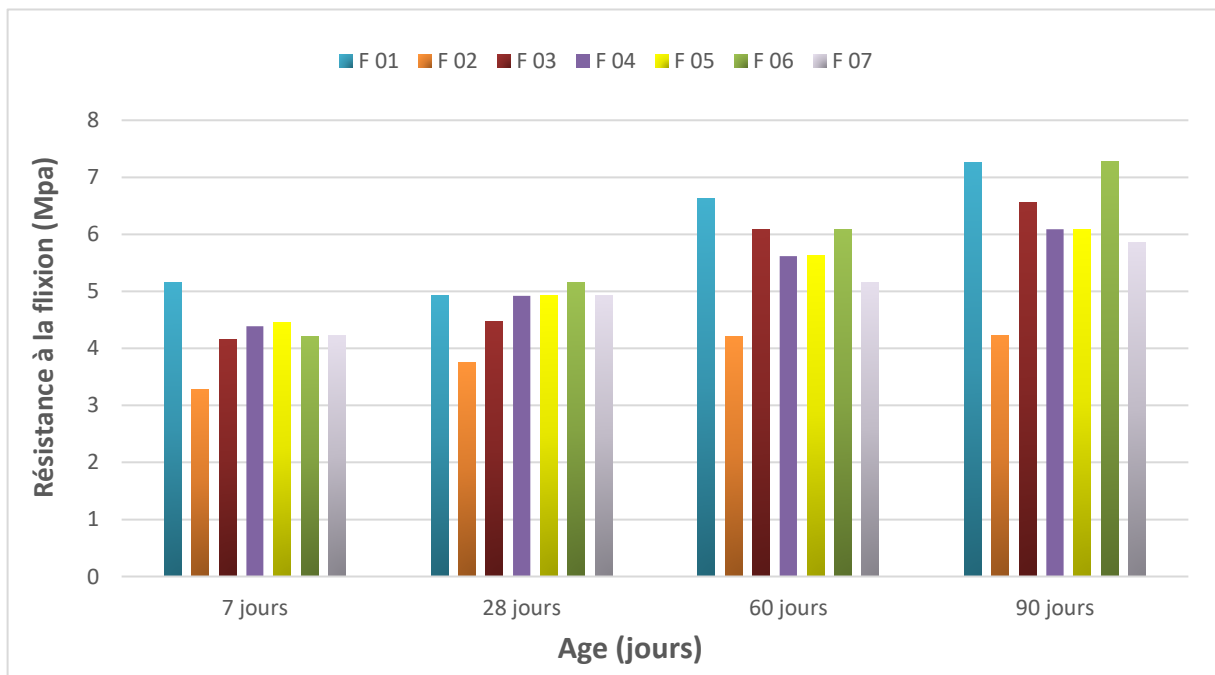


Figure 3.3 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à T= 200°C.

➤ À Température = 400°C :

Tableau 3.6 : Résistance à la flexion à T= 400°C.

| Type | Résistance à la flexion (Mpa) | | | |
|------------|-------------------------------|----------|----------|----------|
| | 07 jours | 28 jours | 60 jours | 90 jours |
| F01 témoin | 3.75 | 4.21 | 4.45 | 5.15 |
| F 02 | 2.34 | 2.57 | 2.81 | 2.81 |
| F 03 | 3.28 | 3.75 | 4.21 | 4.48 |
| F 04 | 3.28 | 3.52 | 4.21 | 4.22 |
| F 05 | 3.05 | 3.28 | 3.53 | 4.21 |
| F 06 | 3.52 | 3.75 | 4.22 | 4.45 |
| F 07 | 2.81 | 3.04 | 3.28 | 3.75 |

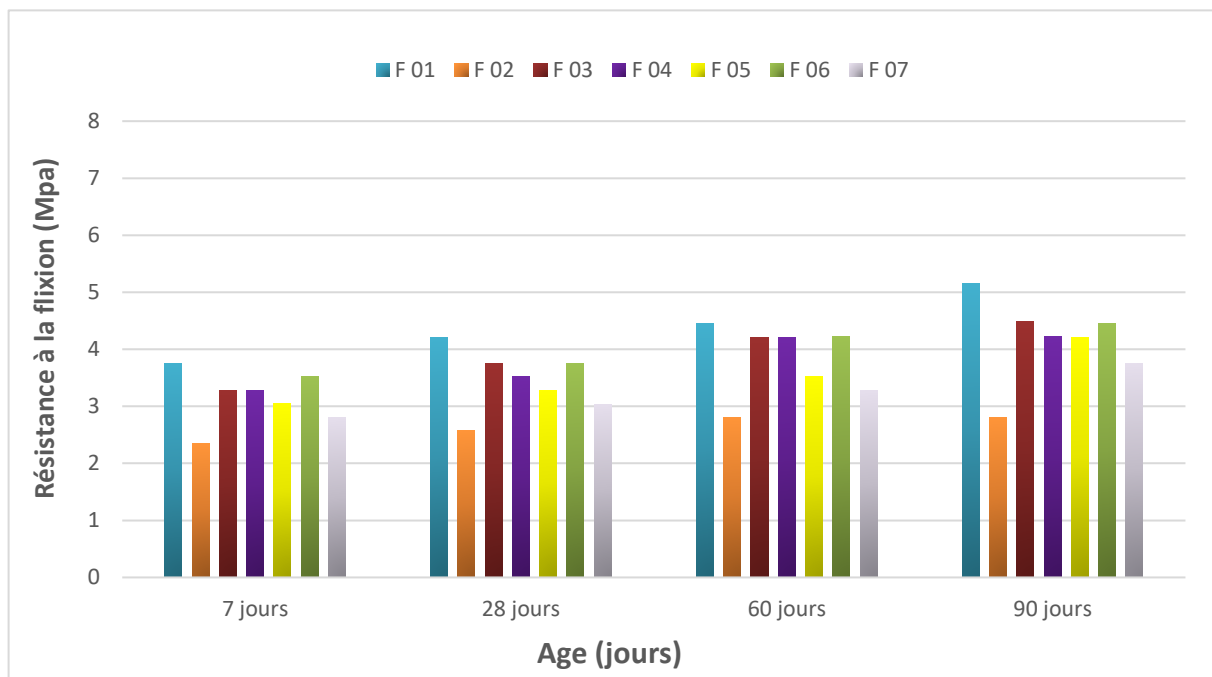


Figure 3.4 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à T= 400°C.

➤ À Température = 600°C :

Tableau 3.7 : Résistance à la flexion à T= 600°C.

| Type | Résistance à la flexion (Mpa) | | | |
|------------|-------------------------------|----------|----------|----------|
| | 07 jours | 28 jours | 60 jours | 90 jours |
| F01 témoin | 1.87 | 2.1 | 2.1 | 2.34 |
| F 02 | 1.17 | 1.17 | 1.41 | 1.41 |
| F 03 | 1.41 | 1.64 | 1.64 | 1.88 |
| F 04 | 1.64 | 1.88 | 1.76 | 2.11 |
| F 05 | 1.41 | 1.41 | 1.64 | 1.88 |
| F 06 | 1.64 | 1.88 | 2.1 | 2.1 |
| F 07 | 1.41 | 1.52 | 1.64 | 1.64 |

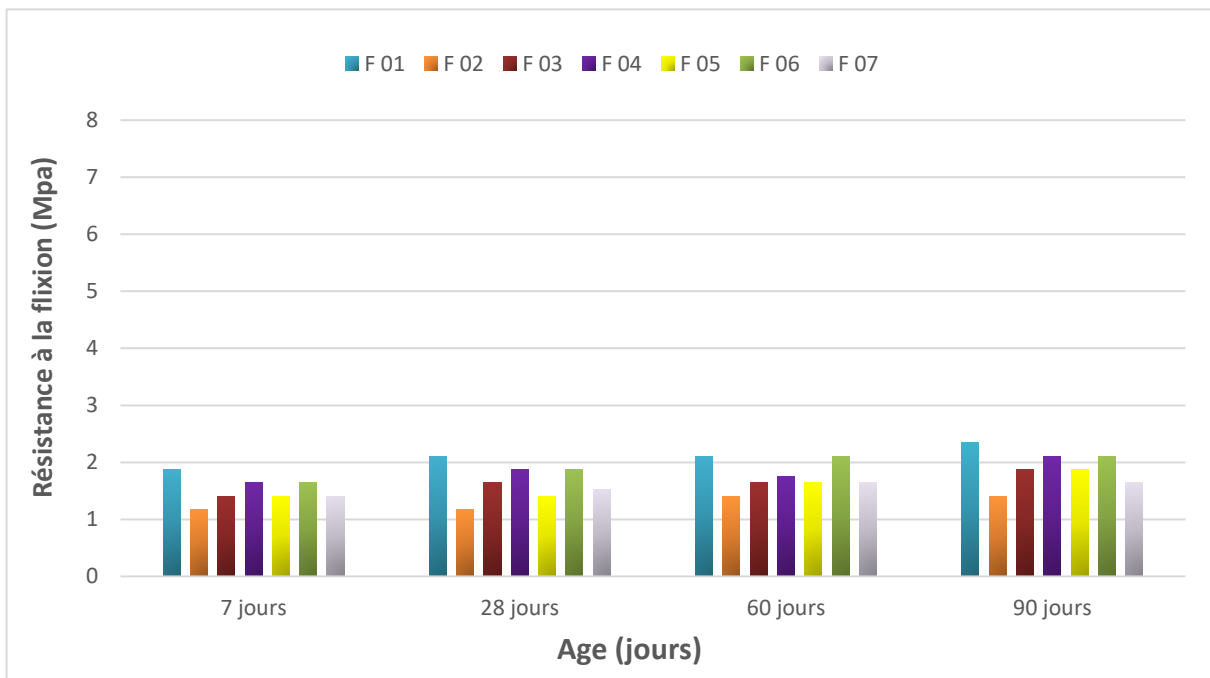


Figure 3.5 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à T= 600°C.

D'après les résultats illustrés sur les figures (3.3, 3.4 et 3.5), On a observé que la résistance à la flexion augmente en fonction de l'âge des éprouvettes à (7, 28, 60 et 90 jours) diminue progressivement avec l'élévation de la température (200, 400, 600°C), pour tous les mortiers testés, avec une baisse plus marquée à partir de 400°C.

Chapitre III : Résultats et discussions.

1.2.2 Résistance à la compression :

➤ À Température = 200°C :

Tableau 3.8 : Résistance à la compression à T= 200°C.

| Type | Résistance à la compression (Mpa) | | | |
|------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| | 07 jours | 28 jours | 60 jours | 90 jours |
| F01 témoin | 24.5 | 25.44 | 27.2 | 34.12 |
| F 02 | 9.31 | 11.31 | 13.5 | 15.18 |
| F 03 | 17.68 | 19.19 | 21.81 | 24.06 |
| F 04 | 20.12 | 21.03 | 23.06 | 23.38 |
| F 05 | 18.31 | 20.06 | 22.22 | 23.03 |
| F 06 | 18.87 | 20.84 | 23.69 | 25.78 |
| F 07 | 17.56 | 20.28 | 23.01 | 24.81 |

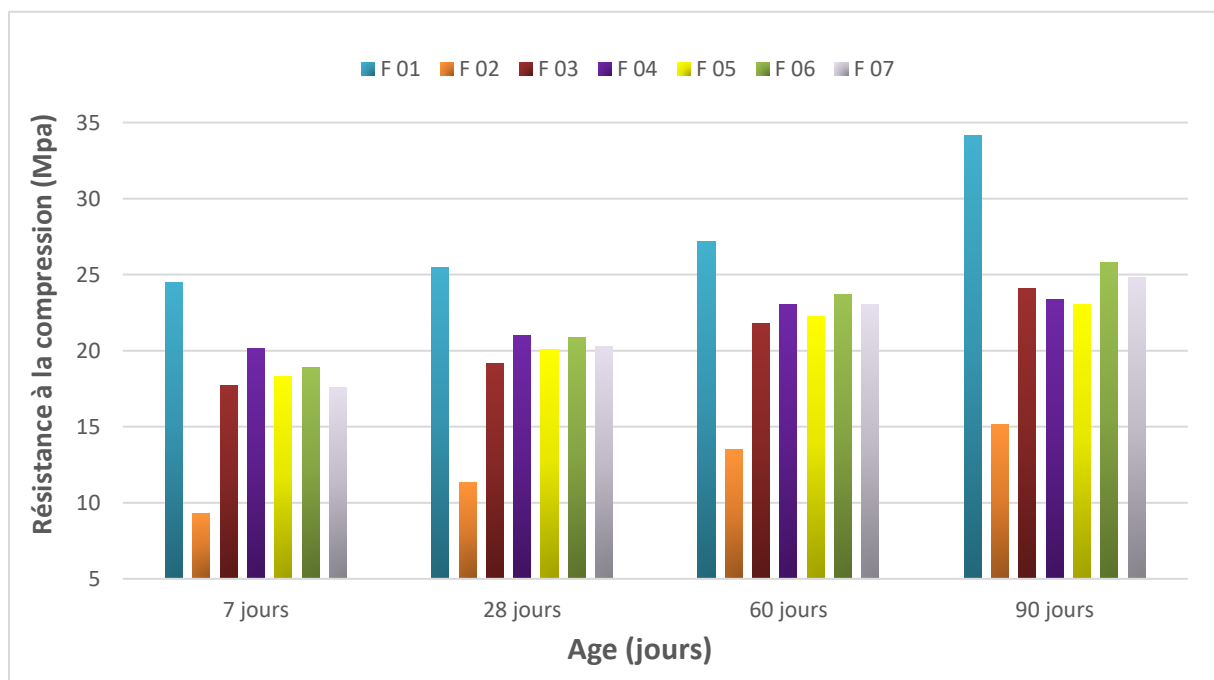


Figure 3.6 : Evolution de la résistance à la compression à T= 200°C.

➤ À Température = 400°C :

Tableau 3.9 : Résistance à la compression à T= 400°C.

| Type | Résistance à la compression (Mpa) | | | |
|------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| | 07 jours | 28 jours | 60 jours | 90 jours |
| F01 témoin | 20.31 | 22.17 | 21.15 | 23.38 |
| F 02 | 7.78 | 8.81 | 11.19 | 11.34 |
| F 03 | 15.25 | 17.97 | 18.87 | 19.03 |
| F 04 | 17.91 | 18.31 | 18.81 | 21 |
| F 05 | 13.40 | 15.46 | 17.63 | 18.81 |
| F 06 | 14 | 18.88 | 20.47 | 20.91 |
| F 07 | 12.38 | 15.31 | 17.56 | 18.59 |

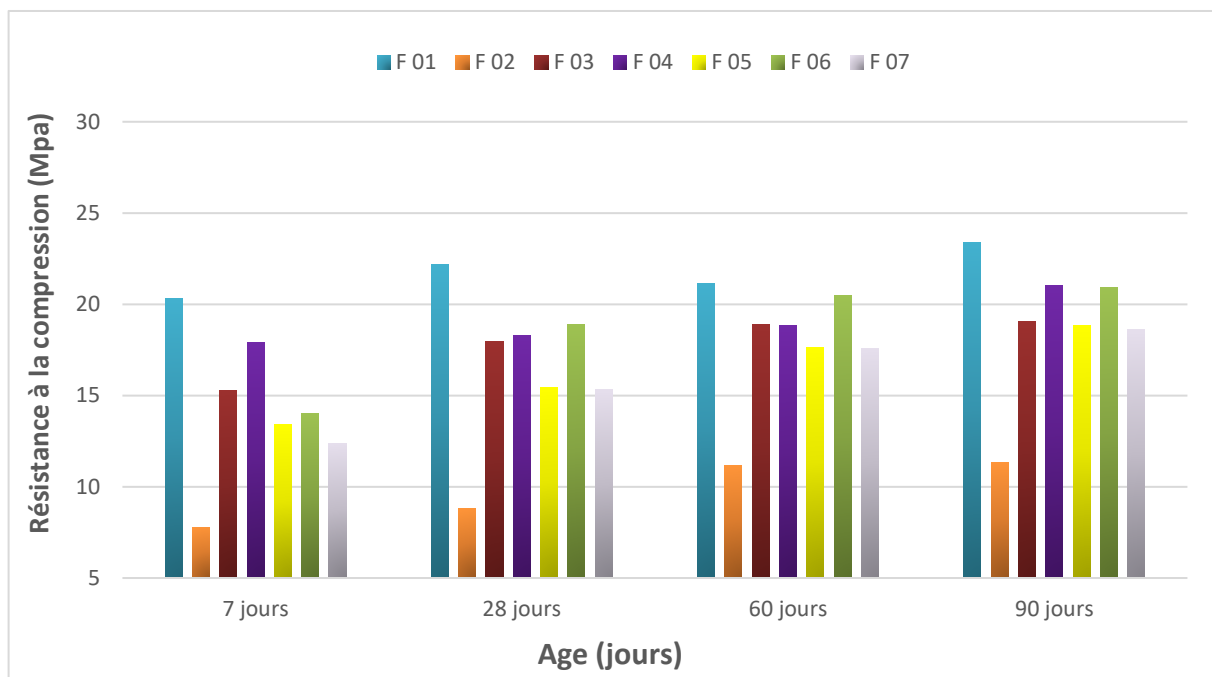


Figure 3.7 : Evolution de la résistance à la compression à T= 400°C.

Chapitre III : Résultats et discussions.

➤ À Température = 600°C :

Tableau 3.10 : Résistance à la compression à T= 600°C.

| Type | Résistance à la compression (Mpa) | | | |
|------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| | 07 jours | 28 jours | 60 jours | 90 jours |
| F01 témoin | 14.75 | 15.36 | 15.53 | 16.33 |
| F 02 | 6.02 | 6.49 | 7.51 | 8.12 |
| F 03 | 9.44 | 10.23 | 10.53 | 11.31 |
| F 04 | 11.13 | 11.7 | 12.28 | 13.67 |
| F 05 | 9.44 | 10.08 | 10.57 | 11.32 |
| F 06 | 9.96 | 10.5 | 11.69 | 12.3 |
| F 07 | 8.13 | 9.06 | 9.34 | 11.23 |

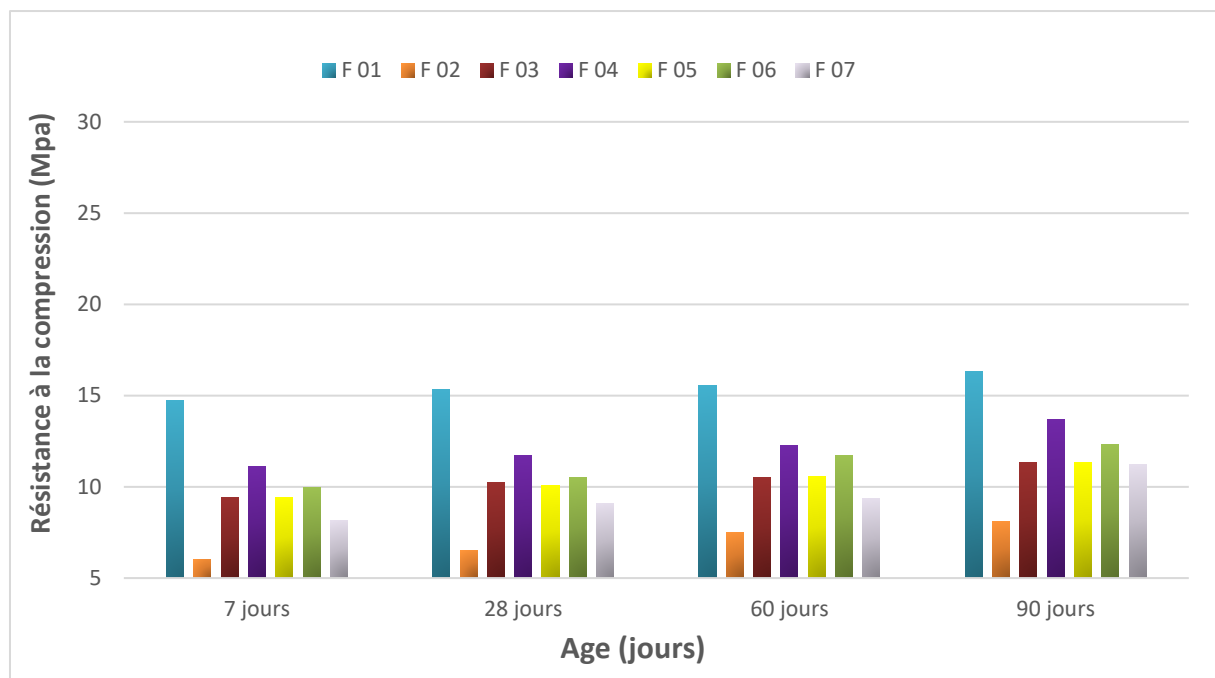


Figure 3.8 : Evolution de la résistance à la compression à T= 600°C.

La même observation a été faite pour l'essai de la résistance à la compression. D'après les résultats illustrés sur les Figures (3.6, 3.7 et 3.8), On a observé que la résistance à la compression diminue de façon significative avec l'augmentation de la température, notamment à 400°C et 600°C, pour tous les types de mortiers testés.

Chapitre III : Résultats et discussions.

Les résultats présentés dans les tableaux et graphiques révèlent une évolution sensible des résistances à la flexion et à la compression selon le type de fibres incorporées, la température appliquée et la durée de conservation. Les mélanges fibrés montrent des performances mécaniques plus stables que le témoin, particulièrement à 200°C et 400°C. À 600°C, une diminution marquée est observée pour toutes les formulations. La formulation F03 et F06 se distingue par des résistances supérieures à plusieurs âges, traduisant une certaine efficacité du couplage (algues-dattier).

❖ Relation entre les résistances à la flexion et à la compression du matériau :

Dans le but de comparer les résistances à la compression et à la traction par flexion des mortiers étudiés, et de vérifier les évolutions des deux résistances.

Nous pouvons constater, à partir des résultats obtenus, que les deux résistances diminuent progressivement avec l'élévation de la température, notamment à partir de 400-600°C, pour tous les types de mortiers étudiés.

1.2.3 Essai d'Ultrasons :

➤ À Température = 200°C :

Tableau 3.11 : résultats d'essai d'Ultrasons à T = 200°C.

| | Vitesse (m/s) | | | |
|-----------|---------------|----------|----------|----------|
| | 7 jours | 28 jours | 60 jours | 90 jours |
| F1 témoin | 3558 | 3629 | 3766 | 3865 |
| F 02 | 2483 | 2648 | 2941 | 2745 |
| F 03 | 3494 | 3620 | 3642 | 3763 |
| F 04 | 3287 | 3466 | 3510 | 3624 |
| F 05 | 3145 | 3294 | 3558 | 3567 |
| F 06 | 3482 | 3532 | 3545 | 3567 |
| F 07 | 3239 | 3292 | 3351 | 3458 |

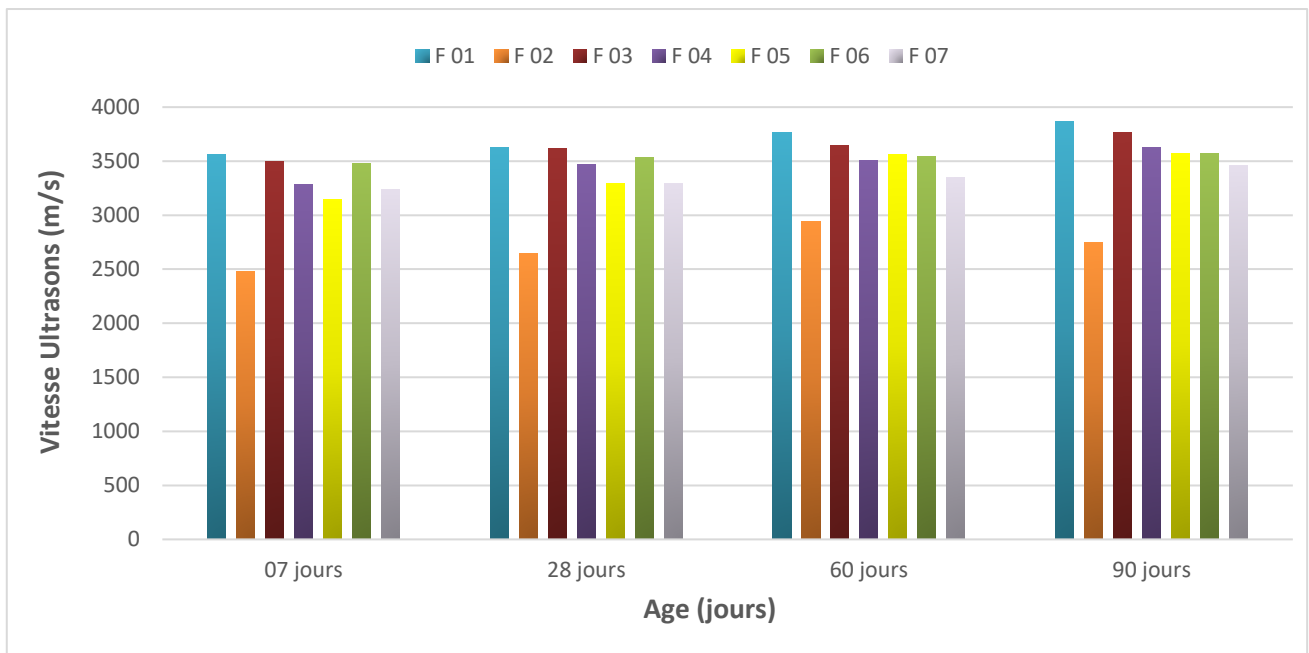


Figure 3.9 : L'Évolution de la vitesse des vagues d'onde des mortiers à $T = 200^{\circ}\text{C}$.

➤ À Température = 400°C :

Tableau 3.12 : résultats d'essai d'Ultrasons à $T = 400^{\circ}\text{C}$.

| | Vitesse (m/s) | | | |
|-----------|---------------|----------|----------|----------|
| | 7 jours | 28 jours | 60 jours | 90 jours |
| F1 témoin | 2452 | 2513 | 2725 | 2787 |
| F 02 | 1733 | 1765 | 1816 | 1859 |
| F 03 | 2197 | 2284 | 2487 | 2493 |
| F 04 | 2274 | 2409 | 2455 | 2516 |
| F 05 | 2168 | 2191 | 2405 | 2568 |
| F 06 | 2284 | 2427 | 2518 | 2622 |
| F 07 | 1989 | 2130 | 2175 | 2205 |

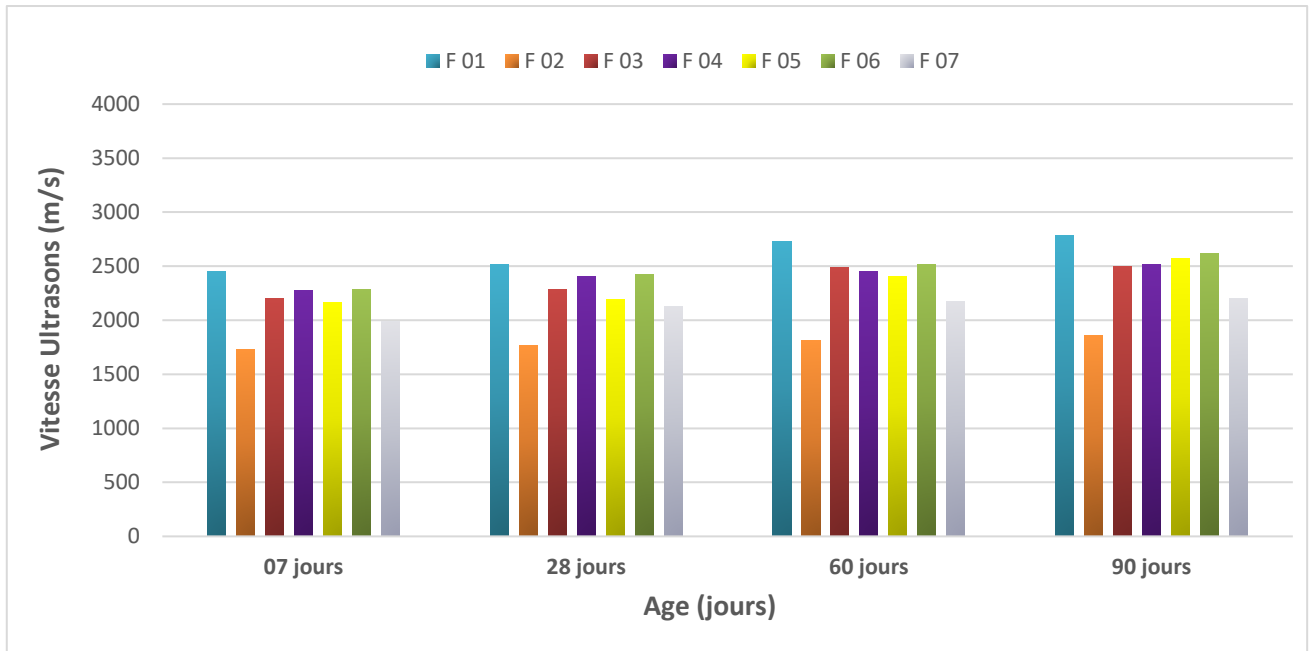


Figure 3.10 : L'Évolution de la vitesse des vagues d'onde des mortiers à T = 400°C.

➤ À Température = 600°C :

Tableau 3.13 : résultats d'essai d'Ultrasons à T = 600°C.

| | Vitesse (m/s) | | | |
|-----------|---------------|----------|----------|----------|
| | 7 jours | 28 jours | 60 jours | 90 jours |
| F1 témoin | 1305 | 1348 | 1375 | 1394 |
| F 02 | 971 | 1008 | 1047 | 1050 |
| F 03 | 1239 | 1258 | 1277 | 1300 |
| F 04 | 1314 | 1320 | 1324 | 1326 |
| F 05 | 1178 | 1190 | 1236 | 1249 |
| F 06 | 1219 | 1224 | 1240 | 1256 |
| F 07 | 1096 | 1109 | 1154 | 1160 |

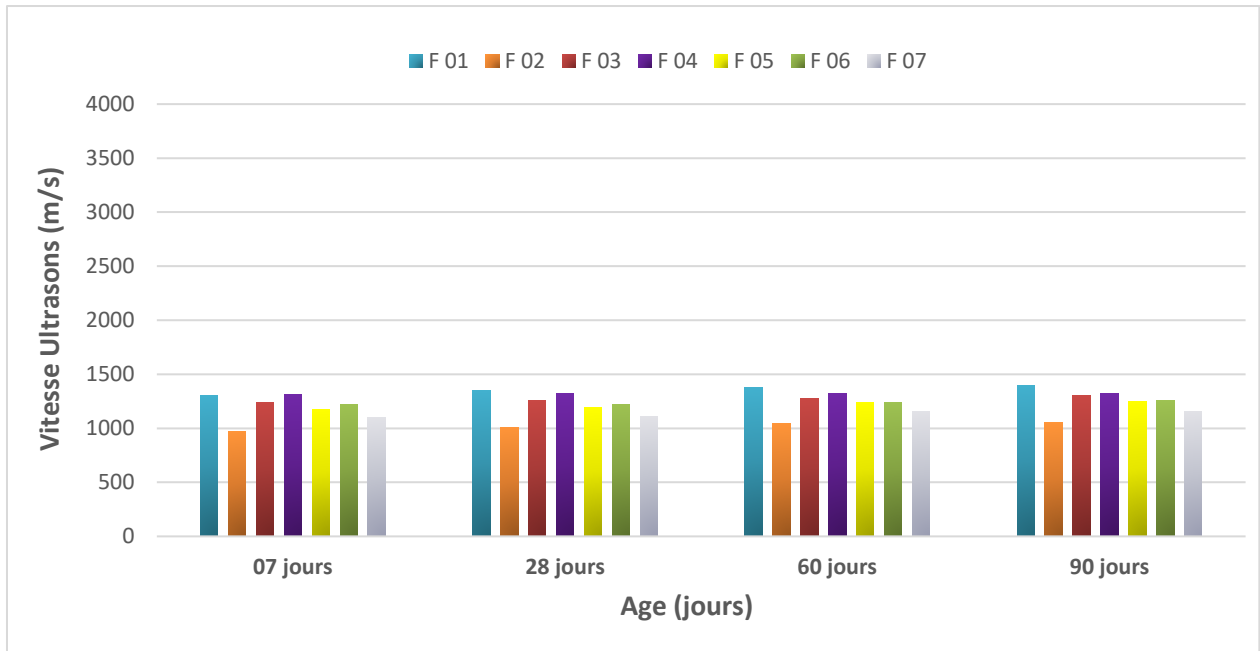


Figure 3.11 : L'Évolution de la vitesse des vagues d'onde des mortiers à T = 600°C.

Tableau 3.14 : qualité de béton en fonction de la vitesse de propagation des ondes.

| Qualité | Vitesse de propagation (m /s) | Supérieur à 4200 |
|---------------|-------------------------------|-------------------|
| Excellente | | 3700-4200 |
| Douteuse | | 3200-3700 |
| Mauvaise | | 2500-3200 |
| Très mauvaise | | Inférieure à 2500 |

L'analyse des vitesses ultrasonores mesurées sur les éprouvettes de mortier montre une tendance décroissante en fonction de l'élévation de la température, notamment à 600°C. Cette diminution est observée progressivement à tous les âges (7, 28, 60 et 90 jours), traduisant une perte de compacité au fil du temps sous l'effet thermique.

La majorité des échantillons fibrés présentent des vitesses situées entre 2500 et 3700 m/s, correspondant à une qualité allant de douteuse à mauvaise selon le tableau de classification. Ces résultats confirment la sensibilité des mortiers à base de fibres végétales face aux sollicitations thermiques.

Chapitre III : Résultats et discussions.

1.2.4 Essai de mesure la conductivité thermique :

Dans cette dernière étape, les mesures de laboratoire ont été prises pour tester la conductivité thermique, Nous nous sommes appuyés sur des mesures avec un changement de température de 200, 400 et 600°C. Les résultats sont résumés dans les tableaux ci-dessous.

Les valeurs affichées par appareil de la mesure de conductivité thermique :

- ✓ T : température actuelle (°C).
- ✓ K : conductivité thermique (w/m. k).
- ✓ C : capacité thermique spécifique (MJ/m³.k).
- ✓ D : diffusivité thermique (mm²/s).
- ✓ Rho : résistivité thermique.

Tableau 3.15 : résultats d'essai de la conductivité thermique à l'âge de 7 jours.

| À température = 200 °C | | | | | |
|------------------------|--------|------------|--------------------------|------------------------|--------|
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F1 témoin | 20.17 | 3.415 | 2.354 | 0.547 | 128.6 |
| F 02 | 22.64 | 0.436 | 0.805 | 0.418 | 297.4 |
| F 03 | 19.88 | 2.166 | 0.645 | 4.912 | 31.58 |
| F 04 | 20.52 | 1.543 | 5.575 | 0.088 | 220.51 |
| F 05 | 19.43 | 0.899 | 3.218 | 0.404 | 176.98 |
| F 06 | 21.81 | 1.138 | 0.786 | 0.557 | 228.3 |
| F07 | 20.75 | 0.679 | 0.902 | 0.309 | 358.6 |
| À température = 400 °C | | | | | |
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F1 témoin | 20.28 | 2.524 | 2.165 | 0.532 | 112.5 |
| F 02 | 22.14 | 0.380 | 0.741 | 0.412 | 247.3 |
| F 03 | 21.75 | 2.058 | 0.492 | 0.270 | 83.6 |
| F 04 | 19.45 | 0.833 | 3.147 | 0.485 | 211.9 |
| F 05 | 20.48 | 0.718 | 1.960 | 0.381 | 144.3 |
| F 06 | 22.48 | 1.087 | 0.563 | 0.432 | 188.9 |
| F07 | 21.18 | 0.523 | 0.725 | 0.283 | 213.7 |

Chapitre III : Résultats et discussions.

| À température = 600 °C | | | | | |
|------------------------|--------|------------|--------------------------|------------------------|-------|
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F1 témoin | 19.24 | 1.714 | 2.273 | 0.425 | 122.9 |
| F 02 | 20.17 | 0.243 | 0.221 | 0.324 | 187.2 |
| F 03 | 20.38 | 0.928 | 1.254 | 0.217 | 147.5 |
| F 04 | 21.47 | 0.617 | 0.217 | 1.369 | 475.3 |
| F 05 | 19.25 | 0.447 | 3.214 | 1.172 | 224.6 |
| F 06 | 20.47 | 0.828 | 2.147 | 0.357 | 189.2 |
| F07 | 20.98 | 0.334 | 0.217 | 2.387 | 324.2 |

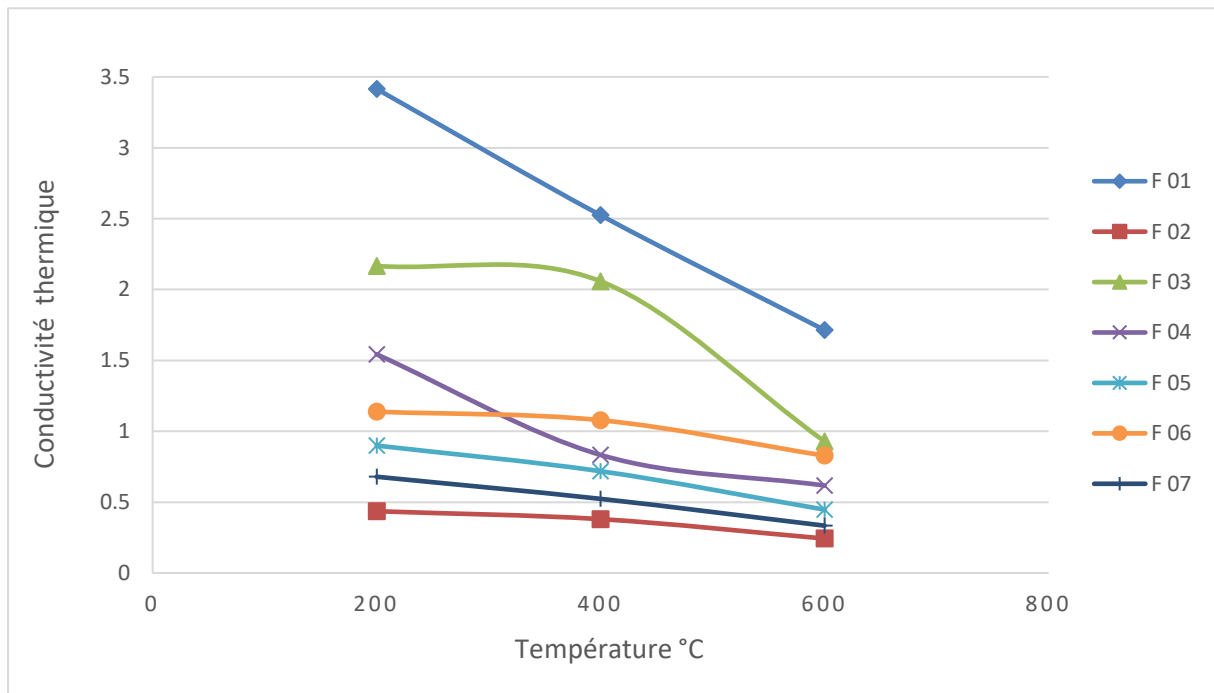


Figure 3.12 : Diminution de la conductivité thermique due à l'augmentation des températures (mortier à l'âge de 7 jours).

Chapitre III : Résultats et discussions.

Tableau 3.16 : résultats d'essai de la conductivité thermique à l'âge de 28 jours.

| À température = 200 °C | | | | | |
|------------------------|--------|------------|--------------------------|------------------------|-------|
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F 01 | 21.28 | 3.432 | 1.954 | 0.314 | 147.1 |
| F 02 | 22.98 | 0.445 | 2.001 | 0.367 | 136.2 |
| F 03 | 20.44 | 2.175 | 0.869 | 0.448 | 174.2 |
| F 04 | 19.41 | 1.566 | 2.213 | 0.256 | 176.5 |
| F 05 | 21.97 | 0.905 | 2.146 | 0.468 | 129.4 |
| F 06 | 22.49 | 1.182 | 1.421 | 0.291 | 186.7 |
| F07 | 22.65 | 0.684 | 1.630 | 0.422 | 252.3 |
| À température = 400 °C | | | | | |
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F 01 | 20.47 | 2.357 | 0.224 | 0.547 | 147.3 |
| F 02 | 21.81 | 0.384 | 0.465 | 0.347 | 214.1 |
| F 03 | 19.87 | 2.102 | 0.238 | 4.578 | 78.6 |
| F 04 | 21.60 | 0.858 | 2.366 | 0.256 | 137.9 |
| F 05 | 22.14 | 0.723 | 0.417 | 2.135 | 124.7 |
| F 06 | 20.17 | 1.107 | 3.147 | 0.643 | 235.4 |
| F07 | 22.57 | 0.514 | 2.586 | 0.568 | 124.9 |
| À température = 600 °C | | | | | |
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F 01 | 22.14 | 1.743 | 1.247 | 0.279 | 214.3 |
| F 02 | 21.32 | 0.209 | 0.278 | 1.247 | 124.3 |
| F 03 | 21.47 | 1.075 | 2.176 | 2.024 | 141.9 |
| F 04 | 19.24 | 0.678 | 0.247 | 1.277 | 181.5 |
| F 05 | 20.17 | 0.584 | 0.247 | 0.873 | 174.6 |
| F 06 | 20.43 | 0.837 | 1.247 | 0.247 | 165.1 |
| F07 | 21.07 | 0.369 | 1.255 | 0.861 | 237.4 |

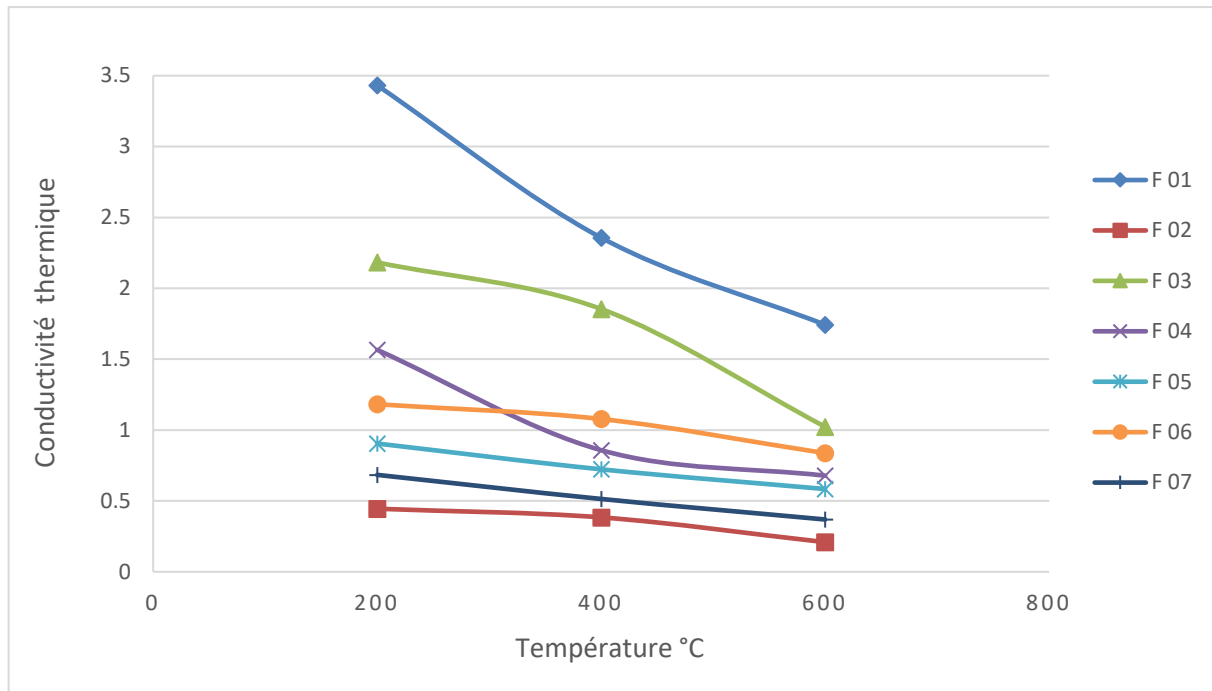


Figure 3.13 : Diminution de la conductivité thermique due à l'augmentation des températures (mortier à l'âge de 28 jours).

Tableau 3.17 : résultats d'essai de la conductivité thermique à l'âge de 60 jours.

| À température = 200 °C | | | | | |
|------------------------|--------|------------|--------------------------|------------------------|--------|
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F1 témoin | 24.71 | 3.461 | 2.258 | 0.838 | 52.85 |
| F 02 | 20.12 | 0.455 | 0.927 | 0.675 | 159.8 |
| F 03 | 22.08 | 2.183 | 0.425 | 0.312 | 162.5 |
| F 04 | 21.14 | 1.659 | 3.107 | 0.534 | 160.28 |
| F 05 | 23.39 | 0.869 | 1.663 | 0.447 | 134.5 |
| F 06 | 25.27 | 1.244 | 1.431 | 0.485 | 144.1 |
| F07 | 25.02 | 0.693 | 2.743 | 0.289 | 126.2 |
| À température = 400 °C | | | | | |
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F1 témoin | 19.32 | 2.374 | 0.457 | 3.014 | 158.3 |
| F 02 | 19.24 | 0.381 | 0.325 | 2.567 | 147.2 |

Chapitre III : Résultats et discussions.

| F 03 | 21.24 | 1.854 | 0.357 | 2.358 | 234.8 |
|-------------------------------|--------|------------|--------------------------|------------------------|-------|
| F 04 | 21.17 | 0.921 | 0.964 | 1.674 | 231.4 |
| F 05 | 20.86 | 0.676 | 0.765 | 1.358 | 114.3 |
| F 06 | 20.37 | 1.147 | 2.024 | 2.587 | 254.8 |
| F07 | 21.22 | 0.427 | 2.321 | 3.578 | 203. |
| À température = 600 °C | | | | | |
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F1 témoin | 21.34 | 1.752 | 2.631 | 0.814 | 227.1 |
| F 02 | 20.17 | 0.154 | 2.142 | 0.276 | 124.7 |
| F 03 | 22.36 | 1.023 | 0.954 | 0.427 | 231.2 |
| F 04 | 21.85 | 0.832 | 1.358 | 1.387 | 248.8 |
| F 05 | 22.36 | 0.205 | 0.527 | 0.274 | 214.3 |
| F 06 | 21.38 | 0.911 | 1.381 | 0.328 | 125.3 |
| F07 | 21.87 | 0.304 | 0.247 | 2.388 | 189.4 |

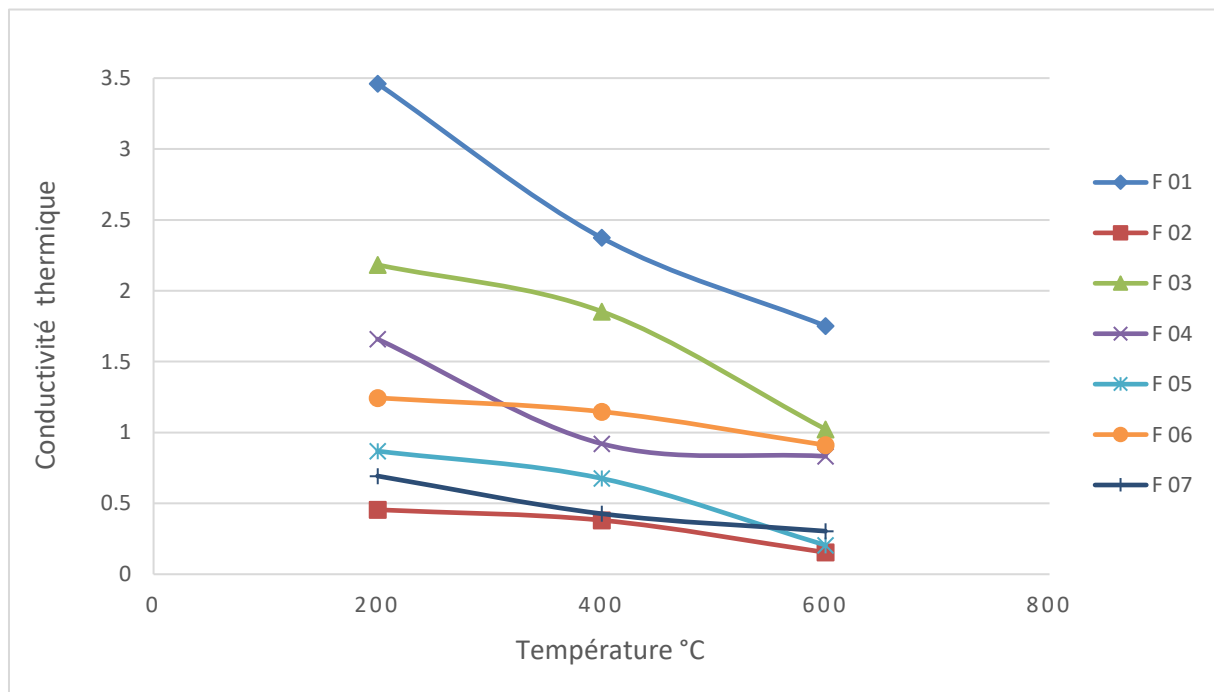


Figure 3.14 : Diminution de la conductivité thermique due à l'augmentation des températures (mortier à l'âge de 60 jours).

Chapitre III : Résultats et discussions.

Tableau 3.18 : résultats d'essai de la conductivité thermique à l'âge de 90 jours.

| À température = 200 °C | | | | | |
|------------------------|--------|------------|--------------------------|------------------------|-------|
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F1 témoin | 24.64 | 3.481 | 2.049 | 0.365 | 126.7 |
| F 02 | 21.07 | 0.522 | 1.535 | 0.375 | 173.9 |
| F 03 | 24.6 | 2.196 | 2.791 | 0.345 | 103.9 |
| F 04 | 24.51 | 1.741 | 1.317 | 0.335 | 226.9 |
| F 05 | 25.17 | 0.869 | 2.152 | 0.393 | 150.6 |
| F 06 | 24.18 | 1.614 | 3.801 | 0.214 | 122.9 |
| F07 | 24.71 | 0.674 | 2.282 | 0.252 | 174.1 |
| À température = 400 °C | | | | | |
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F1 témoin | 19.74 | 3.014 | 0.012 | 0.188 | 105.1 |
| F 02 | 20.17 | 0.402 | 1.253 | 0.563 | 172.6 |
| F 03 | 21.14 | 2.63 | 1.322 | 0.412 | 118.2 |
| F 04 | 20.46 | 1.124 | 1.397 | 0.475 | 152.8 |
| F 05 | 19.78 | 0.530 | 1.826 | 0.287 | 143.6 |
| F 06 | 21.18 | 1.255 | 1.871 | 0.189 | 120.4 |
| F07 | 21.46 | 0.479 | 1.753 | 0.330 | 172.8 |
| À température = 600 °C | | | | | |
| Type de formulation | T (°c) | K (w/m. k) | C (MJ/m ³ .k) | D (mm ² /s) | Rho |
| F1 témoin | 24.22 | 1.822 | 3.543 | 1.038 | 127.2 |
| F 02 | 24.46 | 0.179 | 2.147 | 0.368 | 158.9 |
| F 03 | 24.67 | 1.391 | 0.657 | 0.402 | 255.4 |
| F 04 | 24.48 | 0.837 | 1.552 | 0.309 | 208.5 |
| F 05 | 25.65 | 0.309 | 2.574 | 2.367 | 187.3 |
| F 06 | 24.94 | 1.017 | 0.447 | 2.058 | 217.6 |
| F07 | 25.51 | 0.209 | 1.712 | 0.431 | 135.5 |

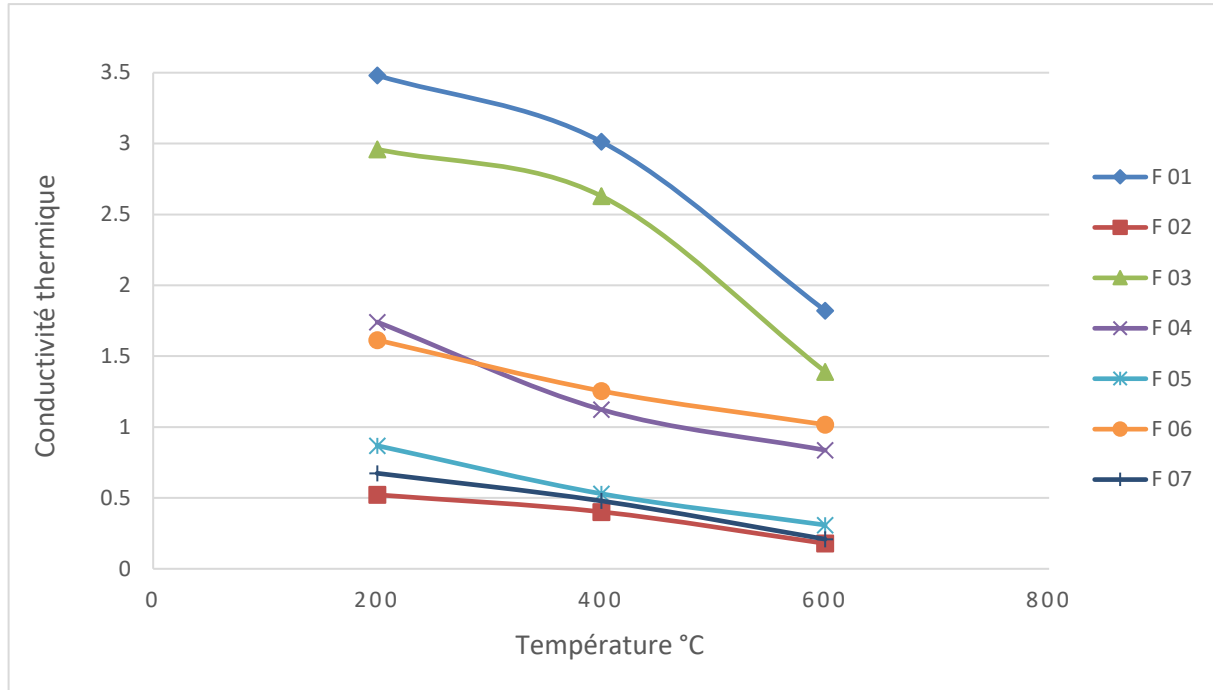


Figure 3.15 : Diminution de la conductivité thermique due à l'augmentation des températures (mortier à l'âge de 90 jours).

À travers les courbes, on constate que le mortier témoin (F01) présente une conductivité thermique plus élevée, tandis que les échantillons fibrés, notamment F03 et F06, affichent des valeurs plus faibles à tous les âges (7, 28, 60 et 90 jours), indiquant une meilleure capacité d'isolation.

Sur la base de ce résultat, nous concluons que l'échantillon F03 et F06 est le meilleur isolant thermique, grâce à l'effet combiné des fibres d'algues et de palmier, et ce, de manière constante au cours du temps.

Nous notons également que la conductivité thermique diminue progressivement avec l'élévation de la température, en particulier à 600°C, ce qui en fait le meilleur isolant thermique.

1.2.5 Essai d'absorption capillaire :

Exemple de calcul pour le mortier témoin :

$$C a = \frac{568.87 - 568.48}{16} = 0.024 \text{ g/cm}^2$$

Les coefficients d'absorption capillaire sont donnés dans les tableaux suivants :

Chapitre III : Résultats et discussions.

➤ À Température = 200°C :

Tableau 3.19 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent à T= 200°C.

| 7 jours | | | | | | | | | |
|-----------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 568.48 | 0.024 | 0.039 | 0.053 | 0.062 | 0.071 | 0.103 | 0.121 | 0.196 |
| F 02 | 439.90 | 0.007 | 0.023 | 0.045 | 0.062 | 0.081 | 0.11 | 0.129 | 0.199 |
| F 03 | 526.30 | 0.01 | 0.023 | 0.031 | 0.048 | 0.068 | 0.071 | 0.101 | 0.158 |
| F 04 | 510.51 | 0.012 | 0.023 | 0.033 | 0.041 | 0.056 | 0.078 | 0.089 | 0.13 |
| F 05 | 538.22 | 0.011 | 0.025 | 0.040 | 0.056 | 0.079 | 0.116 | 0.154 | 0.208 |
| F 06 | 517.34 | 0.012 | 0.022 | 0.032 | 0.043 | 0.054 | 0.075 | 0.096 | 0.163 |
| F 07 | 509.63 | 0.014 | 0.026 | 0.041 | 0.05 | 0.066 | 0.096 | 0.119 | 0.186 |
| 28 jours | | | | | | | | | |
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 539.46 | 0.016 | 0.03 | 0.033 | 0.044 | 0.064 | 0.093 | 0.111 | 0.179 |
| F 02 | 528.10 | 0.006 | 0.023 | 0.039 | 0.049 | 0.067 | 0.081 | 0.119 | 0.175 |
| F 03 | 483.90 | 0.012 | 0.027 | 0.043 | 0.054 | 0.067 | 0.073 | 0.087 | 0.165 |
| F 04 | 508.51 | 0.011 | 0.022 | 0.04 | 0.053 | 0.068 | 0.089 | 0.105 | 0.17 |
| F 05 | 525.84 | 0.016 | 0.029 | 0.041 | 0.045 | 0.062 | 0.088 | 0.107 | 0.166 |
| F 06 | 513.58 | 0.01 | 0.02 | 0.033 | 0.041 | 0.051 | 0.074 | 0.082 | 0.127 |
| F 07 | 501.49 | 0.02 | 0.048 | 0.059 | 0.067 | 0.078 | 0.107 | 0.128 | 0.2 |
| 60 jours | | | | | | | | | |
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 547.24 | 0.037 | 0.055 | 0.071 | 0.087 | 0.108 | 0.161 | 0.184 | 0.25 |
| F 02 | 481.33 | 0.014 | 0.024 | 0.033 | 0.044 | 0.063 | 0.074 | 0.101 | 0.148 |
| F 03 | 520.79 | 0.043 | 0.054 | 0.064 | 0.073 | 0.095 | 0.134 | 0.163 | 0.224 |

Chapitre III : Résultats et discussions.

| | | | | | | | | | |
|--------------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| F 04 | 546.26 | 0.016 | 0.024 | 0.029 | 0.038 | 0.053 | 0.087 | 0.102 | 0.151 |
| F 05 | 504.58 | 0.016 | 0.034 | 0.069 | 0.09 | 0.124 | 0.164 | 0.210 | 0.285 |
| F 06 | 519.44 | 0.035 | 0.049 | 0.071 | 0.08 | 0.096 | 0.118 | 0.151 | 0.204 |
| F 07 | 514.38 | 0.038 | 0.058 | 0.076 | 0.093 | 0.108 | 0.148 | 0.17 | 0.266 |
| 90 jours | | | | | | | | | |
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 538.29 | 0.052 | 0.071 | 0.089 | 0.108 | 0.134 | 0.198 | 0.229 | 0.297 |
| F 02 | 496.76 | 0.046 | 0.057 | 0.068 | 0.079 | 0.098 | 0.139 | 0.165 | 0.222 |
| F 03 | 524.33 | 0.046 | 0.059 | 0.072 | 0.083 | 0.106 | 0.155 | 0.187 | 0.252 |
| F 04 | 538.84 | 0.041 | 0.049 | 0.058 | 0.067 | 0.082 | 0.108 | 0.126 | 0.165 |
| F 05 | 512.46 | 0.045 | 0.060 | 0.081 | 0.096 | 0.123 | 0.170 | 0.208 | 0.274 |
| F 06 | 526.20 | 0.043 | 0.052 | 0.063 | 0.071 | 0.086 | 0.109 | 0.129 | 0.177 |
| F 07 | 517.68 | 0.045 | 0.057 | 0.071 | 0.082 | 0.102 | 0.141 | 0.167 | 0.223 |

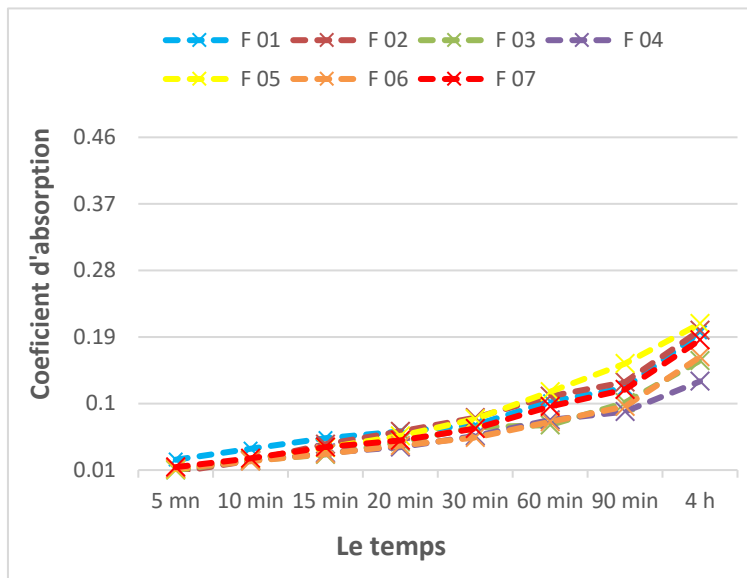


Figure 3.16 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 7 jours.

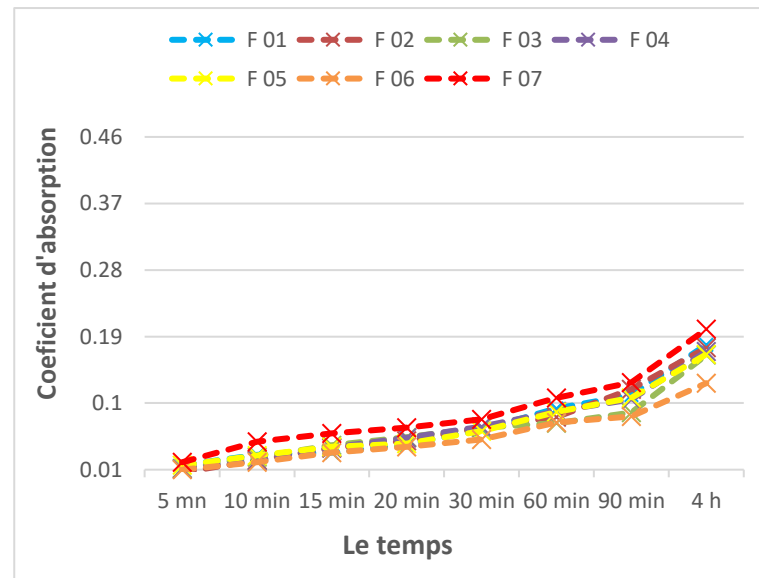


Figure 3.17 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 28 jours.

Chapitre III : Résultats et discussions.

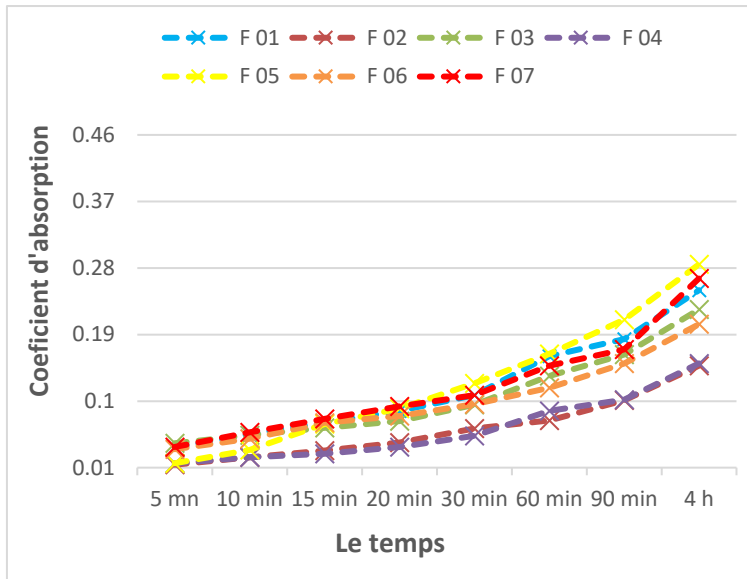


Figure 3.18 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 60 jours.

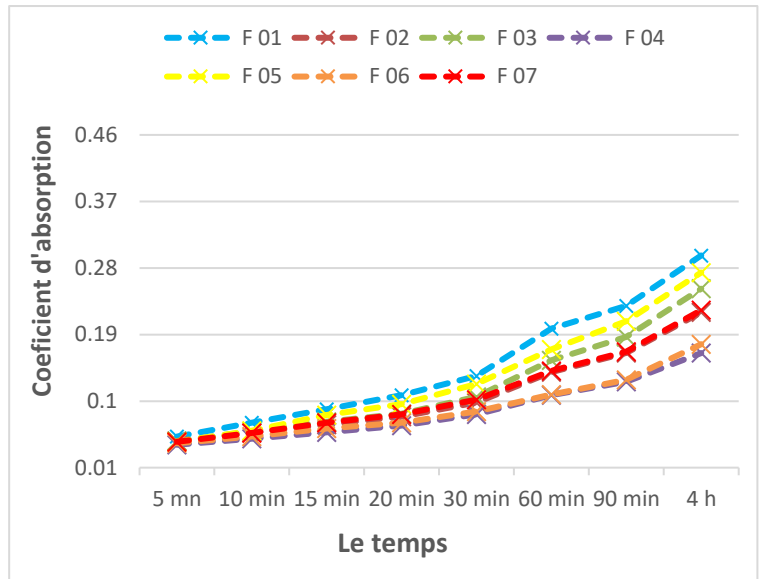


Figure 3.19 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 90 jours.

➤ À Température = 400°C :

Tableau 3.20 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent à T= 400°C.

| 7 jours | | | | | | | | | |
|-----------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 568.48 | 0.034 | 0.054 | 0.073 | 0.088 | 0.108 | 0.164 | 0.192 | 0.257 |
| F 02 | 439.90 | 0.026 | 0.054 | 0.083 | 0.108 | 0.145 | 0.212 | 0.247 | 0.329 |
| F 03 | 526.30 | 0.029 | 0.060 | 0.086 | 0.115 | 0.154 | 0.205 | 0.262 | 0.335 |
| F 04 | 510.51 | 0.063 | 0.096 | 0.116 | 0.136 | 0.164 | 0.222 | 0.258 | 0.313 |
| F 05 | 538.22 | 0.022 | 0.055 | 0.084 | 0.114 | 0.144 | 0.215 | 0.265 | 0.327 |
| F 06 | 517.34 | 0.031 | 0.060 | 0.087 | 0.114 | 0.146 | 0.213 | 0.257 | 0.330 |
| F 07 | 509.63 | 0.050 | 0.103 | 0.132 | 0.162 | 0.221 | 0.268 | 0.341 | 0.417 |
| 28 jours | | | | | | | | | |

Chapitre III : Résultats et discussions.

| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
|-----------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 539.46 | 0.029 | 0.049 | 0.062 | 0.079 | 0.104 | 0.159 | 0.185 | 0.248 |
| F 02 | 528.10 | 0.026 | 0.054 | 0.085 | 0.111 | 0.147 | 0.205 | 0.265 | 0.337 |
| F 03 | 483.90 | 0.030 | 0.061 | 0.092 | 0.113 | 0.153 | 0.211 | 0.255 | 0.337 |
| F 04 | 508.51 | 0.062 | 0.093 | 0.108 | 0.133 | 0.170 | 0.213 | 0.267 | 0.334 |
| F 05 | 526.84 | 0.025 | 0.057 | 0.085 | 0.103 | 0.136 | 0.201 | 0.241 | 0.307 |
| F 06 | 513.58 | 0.029 | 0.058 | 0.091 | 0.111 | 0.141 | 0.211 | 0.249 | 0.313 |
| F 07 | 501.49 | 0.070 | 0.109 | 0.143 | 0.164 | 0.227 | 0.303 | 0.348 | 0.423 |
| 60 jours | | | | | | | | | |
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 547.24 | 0.040 | 0.061 | 0.081 | 0.100 | 0.127 | 0.192 | 0.223 | 0.283 |
| F 02 | 481.33 | 0.029 | 0.055 | 0.082 | 0.108 | 0.145 | 0.207 | 0.256 | 0.324 |
| F 03 | 520.79 | 0.045 | 0.075 | 0.102 | 0.127 | 0.167 | 0.243 | 0.293 | 0.368 |
| F 04 | 546.26 | 0.065 | 0.092 | 0.113 | 0.132 | 0.162 | 0.231 | 0.265 | 0.324 |
| F 05 | 504.58 | 0.025 | 0.059 | 0.099 | 0.130 | 0.167 | 0.242 | 0.292 | 0.366 |
| F 06 | 519.44 | 0.042 | 0.072 | 0.106 | 0.133 | 0.167 | 0.235 | 0.283 | 0.351 |
| F 07 | 514.38 | 0.079 | 0.118 | 0.151 | 0.181 | 0.241 | 0.308 | 0.359 | 0.441 |
| 90 jours | | | | | | | | | |
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 538.29 | 0.051 | 0.075 | 0.097 | 0.119 | 0.151 | 0.228 | 0.265 | 0.331 |
| F 02 | 496.76 | 0.049 | 0.077 | 0.109 | 0.139 | 0.179 | 0.265 | 0.319 | 0.390 |
| F 03 | 524.33 | 0.051 | 0.084 | 0.117 | 0.145 | 0.191 | 0.280 | 0.337 | 0.420 |
| F 04 | 538.84 | 0.085 | 0.117 | 0.143 | 0.164 | 0.197 | 0.270 | 0.308 | 0.368 |
| F 05 | 512.46 | 0.041 | 0.078 | 0.114 | 0.145 | 0.182 | 0.269 | 0.320 | 0.394 |
| F 06 | 526.20 | 0.050 | 0.081 | 0.113 | 0.142 | 0.180 | 0.257 | 0.303 | 0.374 |
| F 07 | 517.68 | 0.092 | 0.131 | 0.166 | 0.197 | 0.267 | 0.357 | 0.408 | 0.485 |

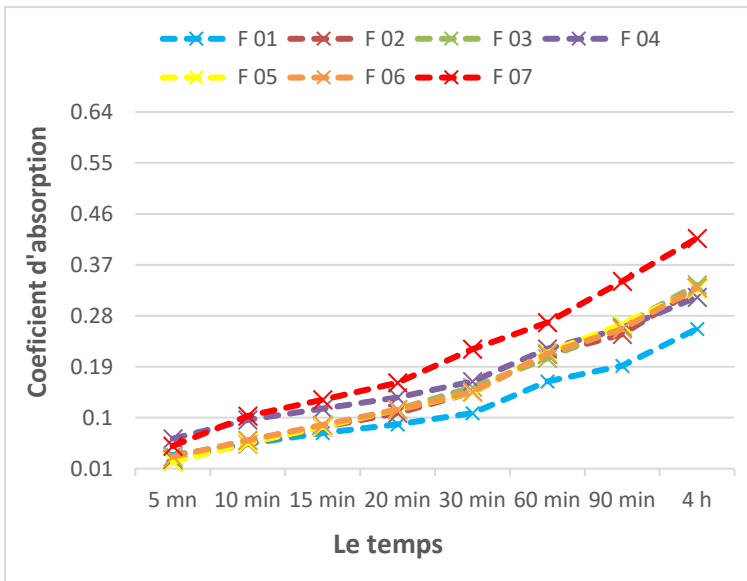


Figure 3.20 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 7 jours.

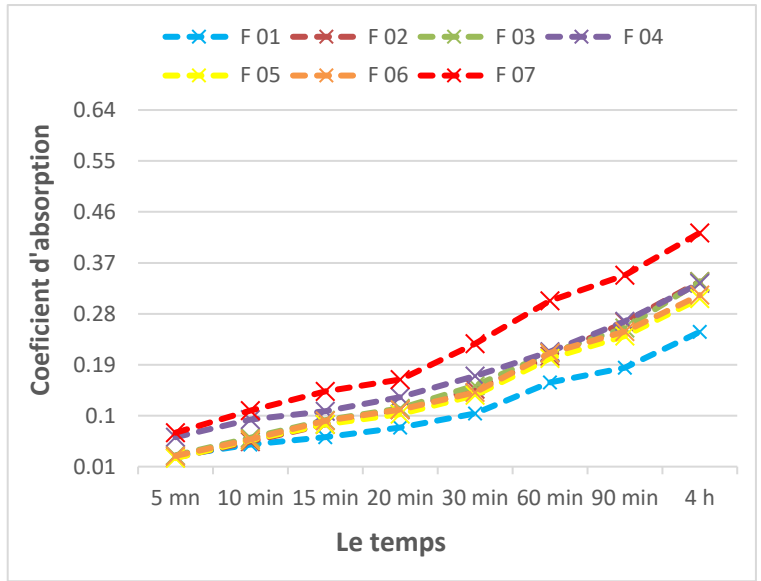


Figure 3.21 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 28 jours.

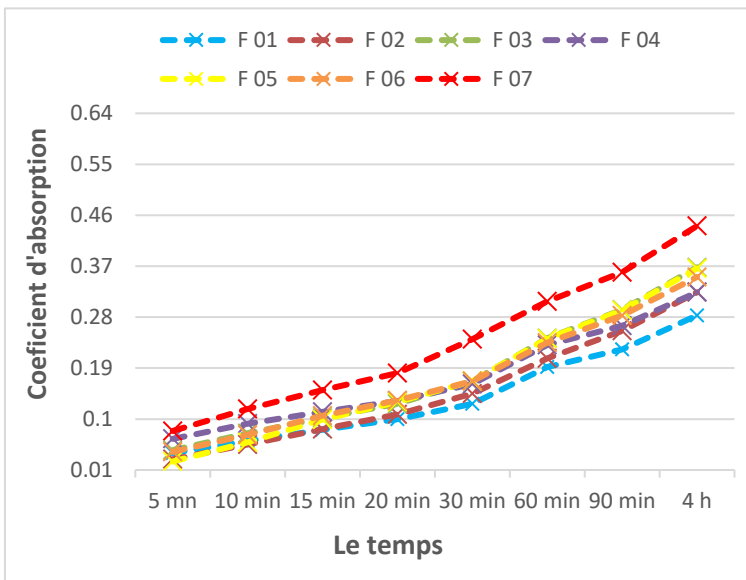


Figure 3.22 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 60 jours.

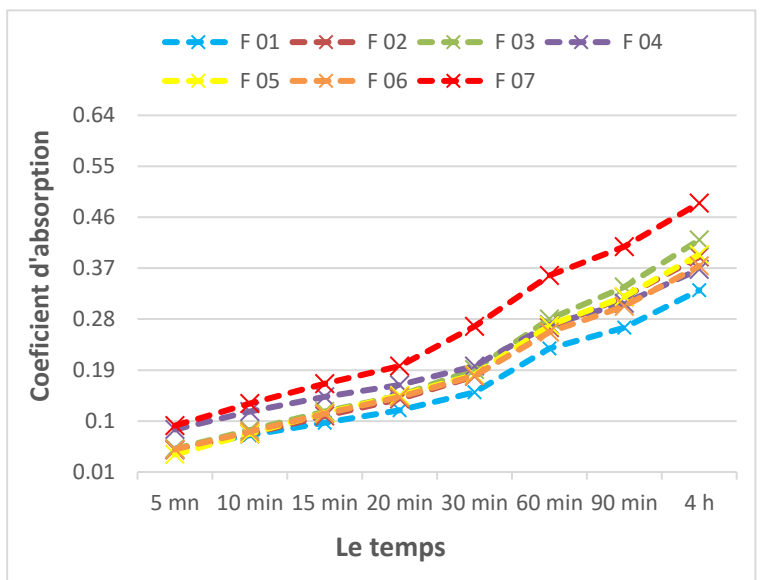


Figure 3.23 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 90 jours.

Chapitre III : Résultats et discussions.

➤ À Température = 600°C :

Tableau 3.21 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent à T= 600°C.

| 7 jours | | | | | | | | | |
|-----------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 548.13 | 0.043 | 0.069 | 0.093 | 0.114 | 0.146 | 0.224 | 0.262 | 0.318 |
| F 02 | 451.86 | 0.045 | 0.085 | 0.122 | 0.155 | 0.209 | 0.313 | 0.366 | 0.459 |
| F 03 | 519.33 | 0.049 | 0.097 | 0.142 | 0.182 | 0.241 | 0.338 | 0.423 | 0.512 |
| F 04 | 523.72 | 0.114 | 0.169 | 0.198 | 0.230 | 0.271 | 0.366 | 0.428 | 0.496 |
| F 05 | 534.68 | 0.033 | 0.084 | 0.129 | 0.171 | 0.209 | 0.313 | 0.376 | 0.446 |
| F 06 | 526.45 | 0.049 | 0.097 | 0.142 | 0.185 | 0.239 | 0.351 | 0.418 | 0.497 |
| F 07 | 521.93 | 0.086 | 0.181 | 0.223 | 0.274 | 0.376 | 0.440 | 0.563 | 0.648 |
| 28 jours | | | | | | | | | |
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 545.09 | 0.043 | 0.068 | 0.091 | 0.113 | 0.145 | 0.224 | 0.260 | 0.317 |
| F 02 | 526.55 | 0.045 | 0.085 | 0.131 | 0.173 | 0.227 | 0.328 | 0.412 | 0.499 |
| F 03 | 489.42 | 0.048 | 0.096 | 0.141 | 0.172 | 0.239 | 0.349 | 0.423 | 0.509 |
| F 04 | 512.63 | 0.114 | 0.165 | 0.177 | 0.212 | 0.272 | 0.336 | 0.428 | 0.497 |
| F 05 | 531.88 | 0.033 | 0.084 | 0.129 | 0.160 | 0.209 | 0.313 | 0.376 | 0.448 |
| F 06 | 568.11 | 0.049 | 0.096 | 0.150 | 0.181 | 0.231 | 0.348 | 0.417 | 0.499 |
| F 07 | 513.49 | 0.120 | 0.169 | 0.227 | 0.260 | 0.376 | 0.499 | 0.568 | 0.647 |
| 60 jours | | | | | | | | | |
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 524.18 | 0.043 | 0.068 | 0.091 | 0.113 | 0.146 | 0.223 | 0.261 | 0.316 |
| F 02 | 497.04 | 0.045 | 0.086 | 0.130 | 0.173 | 0.227 | 0.34 | 0.411 | 0.499 |
| F 03 | 539.27 | 0.048 | 0.096 | 0.141 | 0.18 | 0.24 | 0.352 | 0.423 | 0.511 |

Chapitre III : Résultats et discussions.

| | | | | | | | | | |
|--------------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| F 04 | 516.91 | 0.113 | 0.160 | 0.197 | 0.226 | 0.271 | 0.375 | 0.427 | 0.496 |
| F 05 | 508.87 | 0.033 | 0.084 | 0.129 | 0.169 | 0.21 | 0.320 | 0.375 | 0.447 |
| F 06 | 518.57 | 0.048 | 0.095 | 0.141 | 0.185 | 0.238 | 0.352 | 0.416 | 0.497 |
| F 07 | 509.61 | 0.121 | 0.178 | 0.226 | 0.27 | 0.375 | 0.5 | 0.565 | 0.649 |
| 90 jours | | | | | | | | | |
| Les éprouvettes | Le temps / Coefficient d'absorption d'eau | | | | | | | | |
| | Masse sèche (g) | 5 min | 10 min | 15 min | 20 min | 30 min | 60 min | 90 min | 4 h |
| F1 témoin | 514.36 | 0.051 | 0.079 | 0.105 | 0.131 | 0.167 | 0.257 | 0.301 | 0.364 |
| F 02 | 484.03 | 0.052 | 0.098 | 0.150 | 0.199 | 0.261 | 0.391 | 0.473 | 0.557 |
| F 03 | 541.34 | 0.055 | 0.110 | 0.162 | 0.207 | 0.276 | 0.405 | 0.487 | 0.589 |
| F 04 | 538.21 | 0.130 | 0.184 | 0.227 | 0.260 | 0.312 | 0.431 | 0.491 | 0.571 |
| F 05 | 517.32 | 0.038 | 0.096 | 0.148 | 0.194 | 0.241 | 0.368 | 0.432 | 0.514 |
| F 06 | 549.65 | 0.056 | 0.109 | 0.163 | 0.212 | 0.274 | 0.405 | 0.478 | 0.572 |
| F 07 | 504.89 | 0.139 | 0.205 | 0.261 | 0.311 | 0.432 | 0.574 | 0.649 | 0.746 |

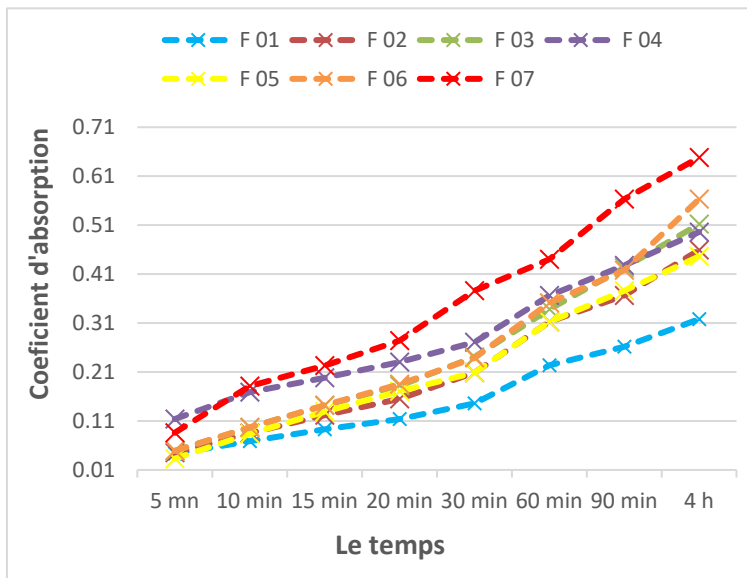


Figure 3.24 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 7 jours.

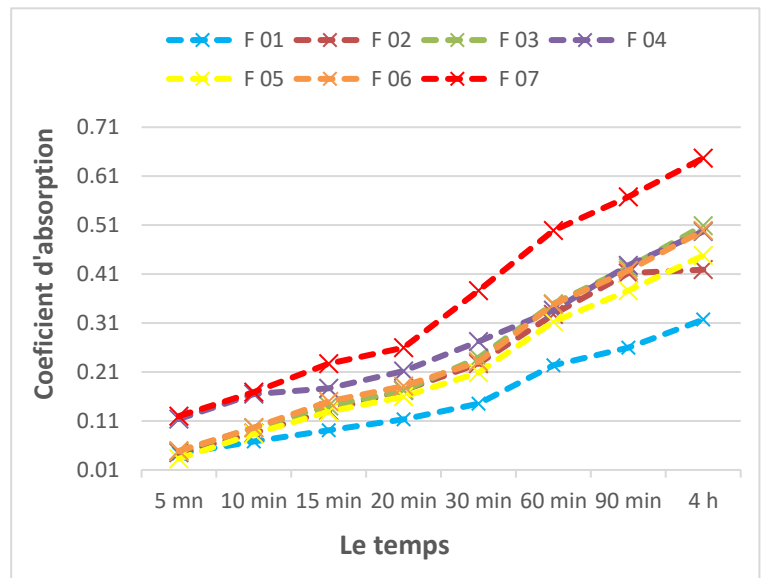


Figure 3.25 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 28 jours.

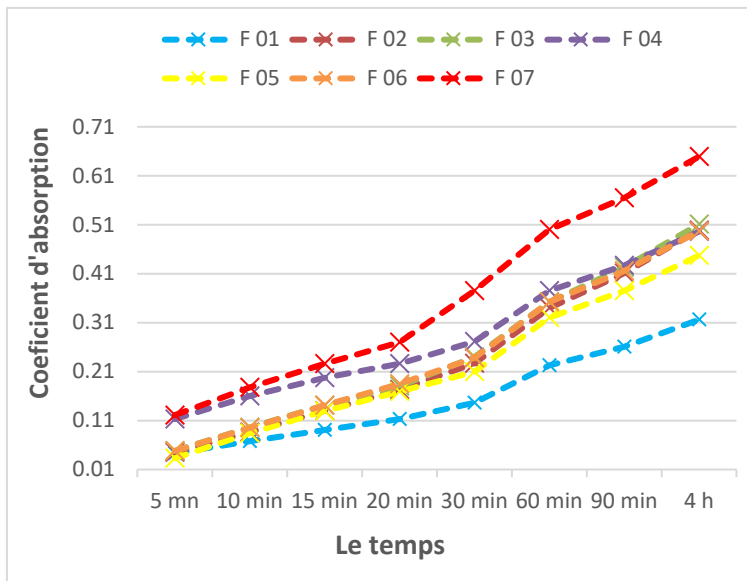


Figure 3.26 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 60 jours.

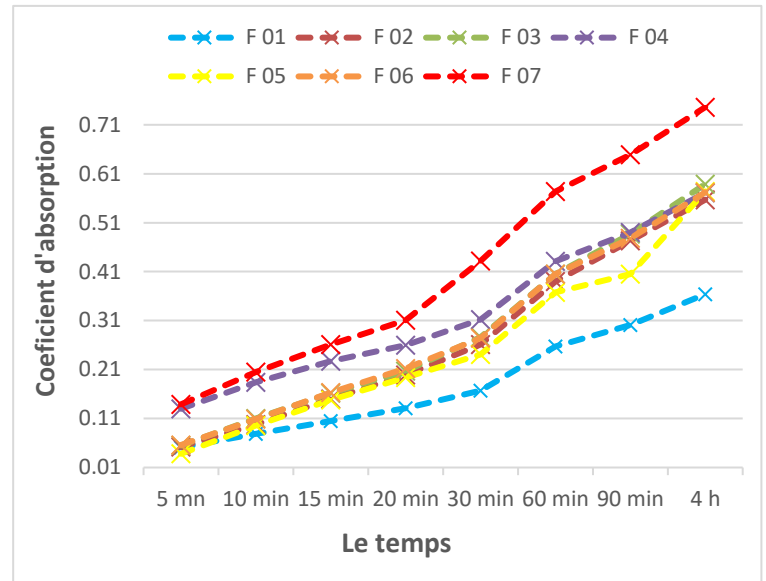


Figure 3.27 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 90 jours.

Sur les figures représentant l'évolution du coefficient d'absorption d'eau des mortiers soumis à différentes températures (200, 400 et 600°C), on observe une augmentation progressive du coefficient d'absorption avec l'élévation de la température. Cette évolution s'explique par la dégradation progressive de la microstructure des mortiers, entraînant une augmentation de la porosité capillaire.

À 200°C, les variations restent relativement faibles, traduisant un comportement encore stable du mortier. À 400°C les courbes corrigées montrent une augmentation modérée et réaliste, positionnée logiquement entre celles des températures de 200°C et 600°C, ce qui confirme la cohérence des résultats obtenus. Enfin à 600°C l'absorption devient nettement plus importante, en raison de la détérioration avancée de la matrice cimentaire, ce qui favorise la pénétration capillaire de l'eau.

L'ensemble des résultats illustre clairement l'impact thermique sur les propriétés d'absorption des mortiers, confirmant que l'élévation de température induit une perte de compacité et une augmentation des vides internes.

Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter et d'interpréter les résultats expérimentaux obtenus sur les différentes formulations de mortiers contenant des fibres végétales (fibres de palmier dattier et algues) et de la perlite comme substitut partiel du sable, soumis à des températures élevées.

Les essais effectués à l'état frais ont montré que l'incorporation des fibres végétales influence négativement la maniabilité du mortier à cause de leur pouvoir absorbant, tandis que la perlite a contribué à alléger le mélange sans altérer ses propriétés de mise en œuvre.

Les essais de résistance mécanique ont révélé une amélioration des performances à la flexion et à la compression à température ambiante grâce à la présence des fibres, notamment celles du palmier. Cependant, au-delà de 200°C, la dégradation thermique des fibres entraîne une baisse progressive de la résistance, en particulier à 400°C et 600°C. Quant à la perlite, elle a montré un effet positif sur les propriétés thermiques et sur la réduction de l'absorption capillaire.

Conclusion Générale.

Conclusion Générale.

Conclusion générale :

Le présent travail de recherche s'est inscrit dans le cadre de l'étude expérimentale de l'influence de la température sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers à base de fibres végétales, notamment celles issues du palmier dattier et des algues. Cette approche s'inscrit dans une logique de valorisation des ressources naturelles locales et renouvelables, et dans la perspective d'un développement durable des matériaux de construction.

L'objectif principal était d'analyser le comportement thermomécanique des mortiers fibrés soumis à des températures élevées (200°C, 400°C, 600°C), et d'évaluer l'effet des fibres végétales sur la résistance du matériau face à ces sollicitations thermiques. Pour cela, des formulations spécifiques ont été élaborées, intégrant différentes fibres traitées et soumises à une série d'essais à l'état frais (maniabilité, air occlus) et à l'état durci (résistances mécaniques, absorption capillaire, conductivité thermique, essais ultrasonores...).

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence plusieurs conclusions significatives :

- À l'état frais, les fibres végétales influencent la maniabilité du mortier, du fait de leur caractère hydrophile, qui absorbe une partie de l'eau de gâchage, réduisant ainsi l'ouvrabilité du mélange.
- À l'état durci, les fibres, notamment celles du palmier dattier, ont contribué à une meilleure résistance à la flexion et à la compression jusqu'à une certaine température seuil. Au-delà une dégradation thermique des constituants organiques des fibres entraîne une perte progressive des performances mécaniques.
- En termes de durabilité, les fibres végétales traitées ont démontré une amélioration de la résistance à l'absorption capillaire et à la conductivité thermique, soulignant leur potentiel en tant qu'agents d'isolation thermique naturelle.
- L'effet de la température a révélé des mécanismes de dégradation progressive du mortier fibré, liés à la décomposition thermique des composants des fibres (cellulose, lignine, hémicellulose), ce qui influe directement sur l'intégrité de la matrice cimentaire.

Ces observations confirment que l'introduction des fibres végétales dans les mortiers peut améliorer certaines propriétés, à condition de bien maîtriser leur traitement préalable et leur dosage. Le traitement alcalin notamment s'est avéré crucial pour améliorer l'adhésion fibre-matrice et la stabilité thermique du composite.

Bibliographie

Références

- [1]. Ali, M., Li, X., & Chouw, N. Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete. *Materials & Design*, 44, 596-605, 2013.
- [2]. Wei, J., & Meyer, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. *Cement and Concrete research*, 73, 1-16, 2015.
- [3]. Denzin Tonoli, G. H., de Souza Almeida, A. E. F., Pereira-da-Silva, M. A., Bassa, A., Oyakawa, D., & Savastano, H., Surface properties of eucalyptus pulp fibres as reinforcement of cement-based composites. *Holzforschung*, 64(5), 595-60, 2010.
- [4]. Agoudjil, B., Benchabane, A., Boudenne, A., Ibos, L., & Fois, M. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and buildings*, 43(2-3), 491-497, 2011.
- [5]. Pinto, J., Paiva, A., Varum, H., Costa, A., Cruz, D., Pereira, Agarwal, J. Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material. *Energy and buildings*, 43(8), 1985-1990, 2011.
- [6]. Bledzki A.K., Gassan J. (1999), "Composites reinforced with cellulose based fibres". *Progress in Polymer Science*, Vol. 24, pp. 221-274.
- [7]. Bongarde, U. S., & Shinde, V. D. (2014). Review on natural fiber reinforcement polymer composites. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 3(2), 431-436.
- [8]. Ramamoorthy, S. K., Skrifvars, M., & Persson, A. (2015). A review of natural fibers used in biocomposites: Plant, animal and regenerated cellulose fibers. *Polymer reviews*, 55(1), 107-162.
- [9]. Mohammed, L., Ansari, M. N., Pua, G., Jawaid, M., & Islam, M. S. (2015). A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International journal of polymer. Science*, 2015.
- [10]. Baley C. (2013), "Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites". *Techniques de l'Ingénieur*, pp. 1-23.

Bibliographie

- [11]. John MJ, Thomas S. Biofibres and biocomposites. Carbohydrate Polymers. 2008 ;71(3) :343-64.
- [12]. Stokke D. Introduction to Wood and Natural Fiber Composites 2013.
- [13]. Al-Oqla FM, Salit MS. 5 - Material selection of natural fiber composites. In: Al-Oqla FM, Salit MS, editors. Materials Selection for Natural Fiber Composites: Woodhead Publishing; 2017. p. 107-68.
- [14]. Montiès Lpv-Ppe, alimentaires non azotés GVe, Paris (1980).
- [15]. Sharma NL, N.C. Dhuldhoya, S.U. Merchant and U.C., Merchant Lucid "Colloids Limited Jodhpur"-342005 R, India, 2006.
- [16]. Sedan D. (2007), "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite". Thèse de Doctorat, université de limoges, p.130.
- [17]. Shahzad A. "Hemp fiber and its composites – a review". Journal of Composite Materials, 2012, Vol. 46, pp. 973-986.
- [18]. Rubilar M., Gutierrez C., Verdugo M., Shene C., Sineiro J. (2010), "Flaxseed as a Source of Functional Ingredients" Journal of Soil Science and Plant Nutrition, Vol. 10, pp.373-377.
- [19]. Chabaud C. (2015), "Les filières lin et chanvre au coeur des enjeux des matériaux biosourcés émergents". Journal officiel de la république française, p. 90.
- [20]. Bernacchia R., Preti R., Vinci G. (2014), "Chemical Composition and Health Benefits of Flaxseed". Austin Journal of Nutrition and Food Sciences, Vol. 2, p. 9.
- [21]. GEORGEL PC. (2009), "Résines époxydes renforcées avec des fibres naturelles". Thèse de Doctorat, Université Laval de Canada, p. 121.
- [22]. Hejazi S.M., Sheikhzadeh M., Abtahi S.M., Zadhoush A. (2012), "A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers". Construction and Building Materials, Vol. 30, pp.100-116.

Bibliographie

- [23]. Mesquita R.G.A., Marconcini J.M., Sanadi A.R. (2016), “Coir and Sisal Fibers as Fillers in the Production of Eucalyptus Medium Density Particleboards – MDP”. *Materials Research*, Vol. 19, pp. 1429-1436.
- [24]. Ali M., Liu A., Sou H., Chouw N. (2012), “Mechanical and dynamic properties of coconut fiber reinforced concrete”. *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp. 814-825.
- [25]. Agoudjil B., Benchabane A., Boudenne A., Ibos L., Fois M. (2011), “Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood”. *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 491-497.
- [26]. Kriker A., Bali A., Debicki G. (2006), “Caractérisations physiques et mécaniques des fibres végétales de palmier dattier entrant dans le renforcement des bétons”. *Séminaire International sur la Normalisation et Qualité dans la Construction*, Tlemcen, p. 8.
- [27]. Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose-based fibres. *Progress in Polymer Science*. 1999;24(2):221-74.
- [28]. Väisänen T, Haapala A, Lappalainen R, Tomppo L. Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review. *Waste Management*.2016;54:62-73.
- [29]. Sbiai A. Epoxy matrix composites filled with date palm fibers: effect of tempo oxidation on fiber, INSA de Lyon; 2011.
- [30]. Ahmad F, Choi HS, Park Mk. A Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2014;300.
- [31]. Kocak D, Mistik S. The use of palm leaf fibres as reinforcements in composites. 2015. p. 273-81.
- [32]. Benmansour N, Agoudjil B, Gherabli A, Abdelhak K, Boudenne A. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*. 2014 ;81 : 98–104.
- [33]. M-GC.VOA-2019-11 : Effets des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques du béton.

Bibliographie

- [34]. Al-Oqla FM, Salit MS. 5 - Material selection of natural fiber composites. In: Al-Oqla FM, Salit MS, editors. *Materials Selection for Natural Fiber Composites*: Woodhead Publishing; 2017. p. 107-68.
- [35]. Dallel M. (2012), "Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima* L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil ". Thèse de Doctorat, Université de Haute alsace, p. 142.
- [36]. Kriker A., Debicki G., Bali A., Khenfer M.M., Chabannet M. (2005), "Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 554-564.
- [37]. Magniont C. (2010), "Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources". Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, p. 343.
- [38]. Pacheco-Torgal F., Jalali S. (2011), "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review". *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 575-581.
- [39]. Ramadan, R., Ghanem, H., Khatib, J. M., & ElKordi, A. M. (2024). Effect of Plant-based natural fibers on the mechanical properties and volume change of cement paste. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*.
- [40]. Shah, I., Li, J., Yang, S., Zhang, Y., & Anwar, A. (2022). Experimental investigation on the mechanical properties of natural fiber reinforced concrete. *Journal of Renewable Materials*, 10(5), 1307.
- [41]. Okeola, A. A., Abuodha, S. O., & Mwero, J. (2018). Experimental investigation of the physical and mechanical properties of sisal fiber-reinforced concrete. *Fibers*, 6(3), 53.
- [42]. Bilba, K., Arsène, M. A., & Ouensanga, A. (2003). Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement and concrete composites*, 25(1), 91-96.
- [43]. Sudin, R., & Swamy, N. (2006). Bamboo and wood fibre cement composites for sustainable infrastructure regeneration. *Journal of materials science*, 41, 6917-6924.

Bibliographie

- [44]. Fan, M., Ndikontar, M. K., Zhou, X., & Ngamveng, J. N. (2012). Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. *Construction and Building Materials*, 36, 135-140.
- [45]. Zhou, X., Saini, H., & Kastiukas, G. (2017). Engineering properties of treated natural hemp fiber-reinforced concrete. *Frontiers in built environment*, 3, 33.
- [46]. Rahimi, M., Omran, A., & Tagnit-Hamou, A. (2022). Role of homogenization and surface treatment of flax fiber on performance of cement-based composites. *Cleaner Materials*, 3, 100037.
- [47]. Kesikidou, F., & Stefanidou, M. (2019). Natural fiber-reinforced mortars. *Journal of Building Engineering*, 25, 100786.
- [48]. Talavera-Pech, W. A., Montiel-Rodríguez, D., Paat-Estrella, J. D. L. A., López-Alcántara, R., Pérez-Quiroz, J. T., & Pérez-López, T. (2021). Improvement in the carbonation resistance of construction mortar with cane bagasse fiber added. *Materials*, 14(8), 2066.
- [49]. Ban, Y., Zhi, W., Fei, M., Liu, W., Yu, D., Fu, T., & Qiu, R. (2020). Preparation and performance of cement mortar reinforced by modified bamboo fibers. *Polymers*, 12(11), 2650.
- [50]. Baker, M. C. (1967). Déformation des matériaux de construction par suite des variations thermiques et hygrométriques. *Digest de la construction au Canada, 1967-12*. National Research Council. Canada. DOI : 10.4224/40000898.
- [51]. Latta, J. K. (1964). *L'eau et les matériaux de construction*. NRC Publications Archive. Retrieved from <https://doi.org/10.4224/40000894>.
- [52]. P. Navi and F. Heger, 2005. *Comportement thermo-hydrromécanique du bois* : Press polytechniques et universitaires romandes You sent.
- [53]. J. Gassan and K. Bledzki, 2001 "Thermal Degradation of Flax and Jute Fibers," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 82, pp. 1427-1422.
- [54]. M. N. Bora, D. Saikia, R. Saikai, and C. Talukdar, 1997. "Thermophysical properties of some natural plant fibres by thermogravimetric and derivative thermogravimetric methods," *High temperature High pressure*, vol. 29, pp. 683-688.

Bibliographie

- [55]. Y. M. Leonard and P. A. Martin, 2001. "Chemical modification of Hemp, Sisal, Jute, and Kapok fibers by alkalization," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 84, pp. 2222-2234.
- [56]. D. S. Varma, M. Varma, and I. K. Varma, 1986. "Thermal behaviour of coir fibres," *Thermochimica Acta*, vol. 108, pp. 199-210.
- [57]. J. Bodig and B. A. Jayne, 1993. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar. Flor.
- [58]. C. Navin and S. A. R. Hashmi, 1993. "Mechanical properties of sisal fibre at elevated temperatures," *Journal of Materials science*, vol. 28, pp. 6724-6728.
- [59]. T. Nilsson, P.J. Gustafsson, Influence of dislocations and plasticity on the tensile behaviour of flax and hemp fibres, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 38 (2007) 17221728. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.01.018>.
- [60]. M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, F. Cardona, Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview, *Compos. Part B Eng.* 43 (2012) 2883-2892.
- [61]. A. A. Stamboulis, C.A. Baillie, T. Peijs, Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 32 (2001) 1105-1115.
- [62]. Xu, L., Song, D., Liu, N., & Tian, W. (2021). Study on mechanical properties of Basalt fiber-reinforced concrete with high content of stone powder at high temperatures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 1-15.
- [63]. Varghese, A., & Unnikrishnan, S. (2023). Mechanical strength of coconut fiber reinforced concrete. *Materials Today : Proceedings*.
- [64]. DREUX, J. FESTA. *Nouveau guide du béton*. s.l. : ÉditionEyrolles, 1997.
- [65]. Myttenaere, Olivier et Beeldens, Anne." *Code de bonne pratique pour l'exécution des revêtements en béton*", 2009, p 03.

Bibliographie

[66]. IMERYYS. [Online] Imerys S.A. - 43 Quai de Grenelle, 75015 Paris.
<https://www.imerys.com/fr/mineraux/perlite>.

[67]. LSUNMA., 1999 : Livret des substances utiles non métalliques de la Wilaya de Tlemcen Edition du service géologique d'Algérie.

[68]. Guenanou F., "Durabilité des mortiers contenant la perlite vis-à-vis de la corrosion des armatures", Thèse de Doctorat en Sciences, 2018.

[69]. Demirboğa, R., Gül, R., & Özkan, M. (2001). Thermal conductivity and compressive strength of lightweight concrete containing expanded perlite aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1467-1472.

[70]. Hamadache M., 2015: « Non-destructive Testing for the Evaluation of Pozzolanic Mortar reinforced to corrosion », *Advanced Materials Research*, Vol. 1064 (2015) pp 42-48 (2015) Trans Tech Publications, 10.4028/www.scientific.net/AMR.1064.42.

[71]. Agoun, O., Lounis, S., (2012). Aspects physiologiques et biologiques des algues rouges.

[72]. Abdi S. (2020). Etude bibliographique sur les algues, leur l'intérêt dans le domaine de la phytothérapie et la médecine curative et valorisation des composés actifs et nutritionnels de l'espèce *Fucus vesiculosus*. Mémoire de Master en Biologie. Université des Frères Mentouri Constantine.

[73]. A. Benyahia, A. Merrouche, M. Rokbi, Z. Kouadri, Study the effect of alkali treatment of natural fibers on the mechanical behavior of the composite unsaturated Polyester-fiber Alfa, *composites*, 2 (2013).

[74]. A. Benyahia, A. Merrouche, Effect of chemical surface modifications on the properties of alfa fiber-polyester composites, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 53 (2014)403-410.

Bibliographie

- [75]. M.Y. Hashim, M.N. Roslan, A.M. Amin, A.M.A. Zaidi, S. Ariffin, Mercerization treatment parameter effect on natural fiber reinforced polymer matrix composite: A brief review, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 6 (2012) 784-790.
- [76]. Mémoire RAMANAMBAHOAKA Haingonirina Alexandra Soutenu le 23 avril 2015 essai de fabrication d'un matériau composite : matrice polyester renforcée de fibres de sisal.
- [77]. Ritter S.K. (2008), "Lignocellulose: A Complex Biomaterial". *Chemical & Engineering News*, Vol. 86, p. 15.
- [78]. Baley C. (2013), "Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites". *Techniques de l'Ingénieur*, pp. 1-23.
- [79]. Stokke D. *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites* 2013.
- [80]. Al-Oqla FM, Salit MS. 5 - Material selection of natural fiber composites. In: Al-Oqla FM, Salit MS, editors. *Materials Selection for Natural Fiber Composites*: Woodhead Publishing; 2017. p. 107-68.
- [81]. Chamoin J. (2013), "Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation". Thèse de Doctorat, Université de Rennes, p. 200.
- [82]. Braun L. (2014), "Canadian flax industry update". *Flax Industry Update Fall*, p. 8.
- [83]. Nerini F.F., Andreoni A., Bauner D., Howells M. (2016), "Powering production. The case of the sisal fibre production in the Tanga region, Tanzania". *Energy Policy*, Vol. 98, pp. 544-556.
- [84]. Bradley W.L., Poel J., Huang H. (2006), "Cocos nucifera: An Abundant Renewable Source of Energy". *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries*, Baylor University, Waco, Texas. p.5.
- [85]. Kriker A., Bali A., Debicki G. (2006), "Caractérisations physiques et mécaniques des fibres végétales de palmier dattier entrant dans le renforcement des bétons". *Séminaire International sur la Normalisation et Qualité dans la Construction*, Tlemcen, p. 8.

