



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 Génie Civil et Travaux Publics

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

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie civil & Travaux Publics

Spécialité : Matériaux

Thème :

Etudes des caractéristiques mécaniques et physiques d'un béton végétal

Réalisé par :

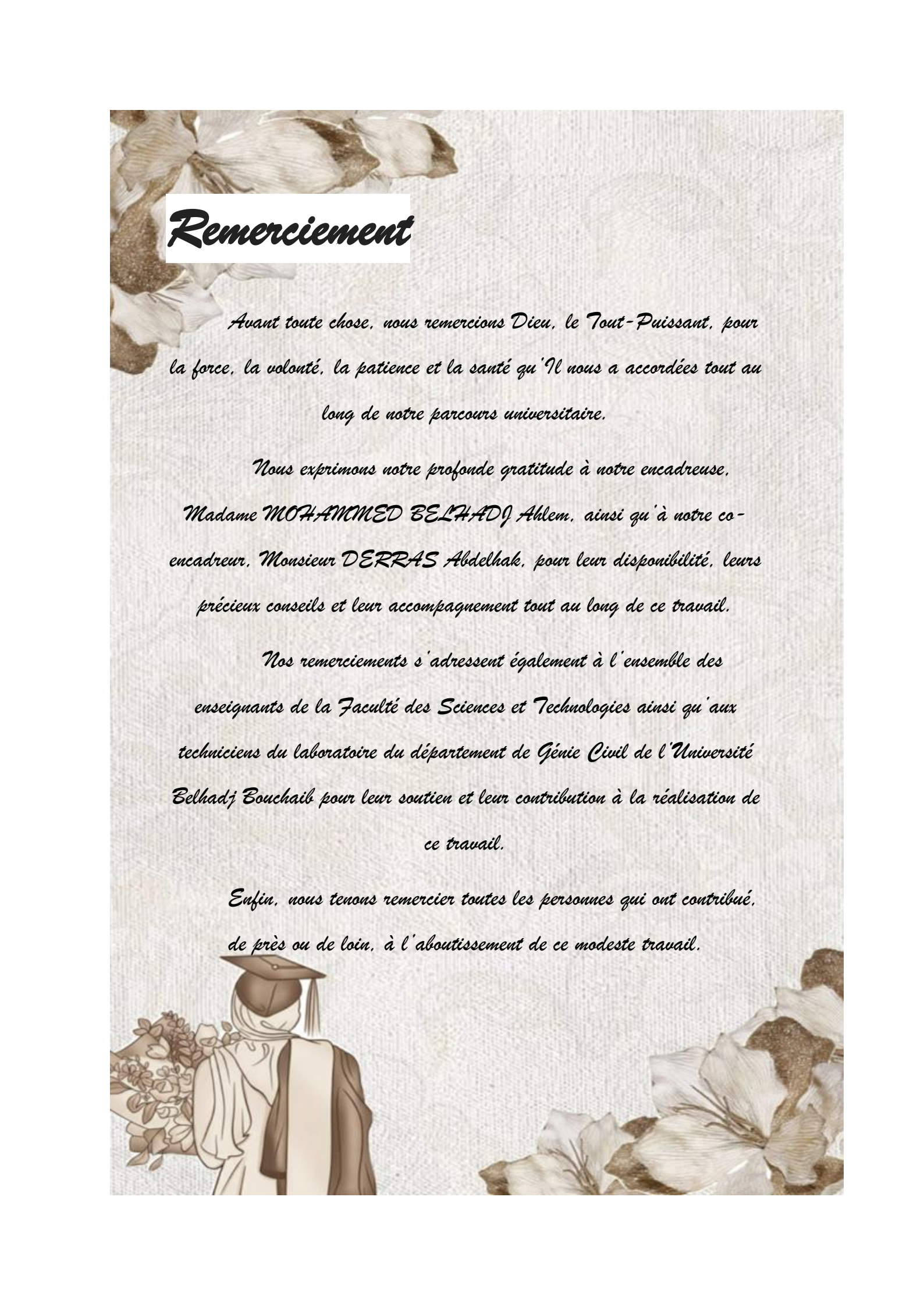
- KADA MAHAMMED NAIMA
- KADDOUR HALIMA

Devant les jurys composés de :

- | | | |
|-------------------------------|------------------------|---------------|
| • Mme. SAID Abderrahmane | U.B.B (Ain Témouchent) | Président. |
| • Mme. MOHAMMED BELHADJ Ahlem | U.B.B (Ain Témouchent) | Encadreur. |
| • Mr. DERRAS Abdelhak | U.B.B (Ain Témouchent) | Co-Encadreur. |
| • Mme. HOUARI Abdelhadi | U.B.B (Ain Témouchent) | Examineur. |

Année Universitaire : 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciement

Avant toute chose, nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, pour la force, la volonté, la patience et la santé qu'Il nous a accordées tout au long de notre parcours universitaire.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreuse, Madame MOHAMMED BELHADJ Ahlem, ainsi qu'à notre co-encadreur, Monsieur DERRAS Abdelhak, pour leur disponibilité, leurs précieux conseils et leur accompagnement tout au long de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences et Technologies ainsi qu'aux techniciens du laboratoire du département de Génie Civil de l'Université Belhadj Bouchaïb pour leur soutien et leur contribution à la réalisation de ce travail.

Enfin, nous tenons remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce modeste travail.



Dédicaces



Je dédie ce travail :

*À la lumière de ma vie, mes chers parents,
qui m'ont soutenu avec patience, amour et sacrifices durant toutes mes années
d'études. Que Dieu les protège et les récompense.*

*À mes sœurs,
pour leurs encouragements permanents et leur présence à mes côtés.*

*À toute ma famille,
qui a toujours cru en moi et m'a donné la force d'avancer.*

*À mes amis(es) et collègues,
avec qui j'ai partagé les meilleurs souvenirs universitaires.*

*À tous mes enseignants,
qui ont contribué à ma formation et à mon savoir.
Et à toute personne ayant participé, de près ou de loin, à l'élaboration de ce
mémoire de Master 2.*

NAIMA.....



Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

*pour leur amour, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien
inconditionnel tout au long de mon parcours universitaire.*

*Aucune expression ne saurait traduire ma profonde gratitude et mon
immense respect.*

À ma famille,

pour leur présence, leur patience et leurs précieux conseils.

À mes amis(es),

*qui ont toujours été à mes côtés dans les moments difficiles comme
dans les moments de joie.*

*À mes enseignants et particulièrement à mon encadreur,
pour leurs orientations, leur disponibilité et leurs conseils précieux.*

*Enfin, à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la
réalisation de ce mémoire de Master 2*

HALIMA...

Résumé

Résumé :

Les fibres naturelles constituent une alternative prometteuse dans le domaine des matériaux de construction durables grâce à leurs propriétés mécaniques, leur faible impact environnemental et leur disponibilité en ressources renouvelables. Dans ce travail de recherche, les propriétés physiques et mécaniques d'un mortier végétal renforcé par des fibres de palmier dattier et d'algues marines ont été étudiées. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'influence de ces fibres sur le comportement du matériau tout en valorisant des ressources locales renouvelables et respectueuses de l'environnement. Plusieurs formulations contenant différents dosages de fibres naturelles ont été élaborées et soumises à une série d'essais normalisés. Les investigations ont porté sur la maniabilité, la masse volumique, l'absorption d'eau, la capillarité, la résistance à la compression, la résistance à la flexion ainsi que d'autres propriétés physiques et mécaniques.

Les résultats obtenus ont montré que l'incorporation des fibres naturelles modifie significativement le comportement du mortier. Les fibres contribuent à limiter la fissuration, à améliorer la ductilité et à renforcer certaines performances mécaniques, tout en réduisant la densité du matériau et en améliorant ses capacités d'isolation thermique. Toutefois, une augmentation de la teneur en fibres entraîne une diminution de la maniabilité ainsi qu'une augmentation de l'absorption d'eau. Les performances observées mettent en évidence le potentiel des fibres de palmier dattier et des algues marines comme matériaux de renforcement pour les composites cimentaires. Leur valorisation ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de matériaux de construction durables, économiques et respectueux de l'environnement.

Mots-clés : mortier végétal, fibres naturelles, palmier dattier, algues marines, propriétés mécaniques, propriétés physiques, matériaux durables.

Abstract :

Natural fibers constitute a promising alternative in the field of sustainable construction materials due to their mechanical properties, low environmental impact, and availability as renewable resources. In this research work, the physical and mechanical properties of a bio-based mortar reinforced with date palm fibers and marine algae fibers were investigated. The main objective of this work is to evaluate the influence of these fibers on the behavior of the material while valorizing local renewable and environmentally friendly resources. Several formulations containing different dosages of natural fibers were prepared and subjected to a series of standardized tests. The investigations focused on workability, bulk density, water absorption, capillary absorption, compressive strength, flexural strength, as well as other physical and mechanical properties.

The obtained results showed that the incorporation of natural fibers significantly modifies the behavior of the mortar. The fibers contribute to reducing cracking, improving ductility, and enhancing certain mechanical performances, while reducing the density of the material and improving its thermal insulation capacity. However, an increase in fiber content leads to reduced workability as well as increased water absorption. The observed performances highlight the potential of date palm fibers and marine algae as reinforcing materials for cementitious composites. Their valorization offers interesting prospects for the development of sustainable, economical, and environmentally friendly construction materials.

Keywords: bio-based mortar, natural fibers, date palm, marine algae, mechanical properties, physical properties, sustainable materials.

ملخص :

تشكل الألياف الطبيعية بديلاً واعداً في مجال مواد البناء المستدامة بفضل خصائصها الميكانيكية، وتأثيرها البيئي المنخفض، وتوفرها كمصادر متجددة. في هذا العمل البحثي، تم دراسة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لملاط نباتي مدعم بألياف نخيل التمر والطحالب البحرية. ويتمثل الهدف الرئيسي من هذا العمل في تقييم تأثير هذه الألياف على سلوك المادة مع تثمين الموارد المحلية المتجددة والصديقة للبيئة. تم تحضير عدة خلطات تحتوي على نسب مختلفة من الألياف الطبيعية وإخضاعها لسلسلة من الاختبارات المعيارية. وشملت هذه الاختبارات قابلية التشغيل، والكتلة الحجمية، وامتصاص الماء، والخاصية الشعرية، ومقاومة الضغط، ومقاومة الانحناء، بالإضافة إلى خصائص فيزيائية وميكانيكية أخرى.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن إدماج الألياف الطبيعية يؤثر بشكل ملحوظ على سلوك الملاط. حيث تساهم الألياف في الحد من التشققات، وتحسين المطيلية، وتعزيز بعض الخصائص الميكانيكية، مع تقليل كثافة المادة وتحسين قدرتها على العزل. غير أن زيادة نسبة الألياف تؤدي إلى انخفاض قابلية التشغيل وارتفاع امتصاص الماء. وتبرز النتائج المتحصل عليها الإمكانيات الواعدة لألياف نخيل التمر والطحالب البحرية كماد تدعيم للمركبات الإسمنتية، مما يفتح آفاقاً مهمة لتطوير مواد بناء مستدامة واقتصادية وصديقة للبيئة.

الكلمات المفتاحية : الملاط النباتي، الألياف الطبيعية، نخيل التمر، الطحالب البحرية، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية، مواد مستدامة.

Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicaces	II
Résumé	IV
Introduction Générale :.....	1

Chapitre 01 : Recherche bibliographique.

Introduction :	4
1. Généralité sur les bétons fibrés :	4
1.1 Historique du béton de fibres :	5
2. Les fibres naturelles :	6
2.1 Les fibres végétales :	7
2.2 Structure de la fibre végétale :	7
2.2.1 La Cellulose :	8
2.2.2 L'hémicellulose :	9
2.2.3 La lignine :	10
2.2.4 Cires :	11
2.2.5 Pectines :	11
2.3 Caractéristiques et classification des fibres végétales :	12
2.4 Présentation de différentes fibres végétales :	12
2.4.1 Palmier dattier :	13
2.4.2 Algue marine :	14
2.4.3 Le Chanvre :	15
2.4.4 La noix de coco :	16
2.5 Les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des fibres végétales :	18
2.5.1 Propriétés mécanique des fibres végétales :	18
2.5.2 Propriétés Physiques des fibres végétales :	18
2.6 Domaine d'utilisation dans le génie civil :	20
2.7 Evaluation de la disponibilité des fibres végétales :	21
2.7.1 Disponibilité les fibres végétales à l'échelle mondiale :	21
2.7.2 Disponibilité les fibres végétales en Algérie :	21
2.8 Avantages et inconvénients des fibres végétales :	22

3.	L'impact des fibres végétales sur les propriétés des matériaux cimentaires :	23
3.1	L'ouvrabilité :	23
3.2	Temps de prise :	24
3.3	Résistance mécanique, résistance à la compression et flexion :	25
3.4	Absorption de l'eau :	26
3.5	Résistance à la carbonisation :	27
4.	Traitement des fibres végétales :	27
4.1	Traitement physique :	28
4.2	Traitement chimique :	28
4.3	Traitement thermique :	28
	Conclusion :	28

Chapitre 02 : Matériaux et méthodes expérimentales.

	Introduction :	31
1.	Présentation des matériaux étudiés :	31
1.1	Le ciment :	31
1.2	Le Sable :	32
1.3	La pouzzolane :	33
1.4	L'eau de gâchage :	34
1.5	Les fibres végétales :	34
1.5.1	Les fibres de palmier dattier :	34
1.5.2	Les fibres des algues marines :	35
2.	Méthodes d'essais :	36
2.1	Les masses volumiques :	36
2.1.1	La masse volumique apparente des granulats et ciment :	36
2.1.2	La masse volumique absolue :	37
2.2	Equivalent de sable :	38
2.3	Analyse granulométrique des granulats :	39
2.3.1	L'analyse granulométrique du sable :	40
2.3.2	L'analyse granulométrique de la pouzzolane (0/3) :	41
2.4	Consistance et temps de prise du ciment :	42
2.4.1	Essai de consistance du ciment :	42
2.4.2	Essai de temps de prise du ciment :	43
3.	Traitement des fibres végétales :	44

3.1 Les catégories des traitements :	45
3.1.1 Les traitements physiques :	45
3.1.2 Les traitements chimiques :	45
3.1.3 Les traitements physico-chimiques :	45
3.1.4 Les traitements biologiques :	45
3.2 Traitement des fibres de palmier dattier :	46
3.3 Traitement des fibres d'algues marines :	46
3.4 Traitement alcalin :	47
4. Formulation et préparation des mortiers :	48
4.1 La composition des mortiers :	48
4.2 Préparation des mortiers :	49
4.2.1 Pesage des composants du mortier :	50
4.2.2 Malaxage des composants du mortier :	50
4.2.3 Remplissage des Éprouvettes (Moulage) :	51
4.2.4 Démoulage et conservation des éprouvettes :	52
5. Caractérisation expérimentale des mortiers :	53
5.1 Les essais à l'état frais :	53
5.1.1 Essai de maniabilité : étalement à la table à secousses :	53
5.2 Les essais à l'état durci des mortiers :	54
5.2.1 Essai de résistance à la flexion :	54
5.2.2 Essai de résistance à la compression :	55
5.2.3 Essai d'Ultrasons :	56
5.2.4 Essai de la conductivité Thermique :	58
5.2.5 Essai d'absorption capillaire :	59
5.2.6 Essai d'Observation microscopique :	60
Conclusion :	62

Chapitre 03 : Résultats et discussions.

Introduction :	65
1. Essais à l'état frais de mortier :	65
1.1 Maniabilité :	65
2. Essais à l'état durci de mortier :	67
2.1 Résistance à la flexion :	67
2.2 Résistance à la compression :	68

2.3 Essai d'Ultrasons :	69
2.4 Essai de mesure la conductivité thermique :	71
2.5 Essai d'absorption capillaire :	72
Conclusion :	74
Conclusion générale :	76

Listes des figures

Chapitre 01 : Recherche bibliographique.

Figure 1.1 : structure d'une paroi végétale [63]	7
Figure 1.2: la structure d'une fibre végétale [64]	8
Figure 1.3 : Représentation de la chaîne de cellulose [65].....	9
Figure 1.4 : Structure hypothétique d'un hémicellulose[67].....	10
Figure 1.5: Structure des précurseurs de la lignine[67].....	11
Figure 1.6: Structure et modèle moléculaire de l'acide palmitique[75].....	11
Figure 1.7: Représentation de la molécule de pectine[76]	12
Figure 1.8: Schéma de palmier[77].....	13
Figure 1.9: Fibres naturelles extraites du palmier dattier[69].....	14
Figure 1. 10 : L'algue vert et l'algue brune[71]	15
Figure 1.11 : Plante de chanvre industriel pour la production de fibre[71].....	16
Figure 1. 12 : Fibre de chanvre	16
Figure 1. 13 : Stockage primaire des enveloppes fibreuse de cocos nucifera	17
Figure 1.14 : Fibre de noix de coco.....	17
Figure 1.15 : Graphique des taux de reprise humidité	19
Figure 1.16 : Production mondiale de fibres textiles en 2021	21
Figure 1.17: Effet du dosage en fibres végétales sur l'ouvrabilité du béton.	23
Figure 1.18: Effet du dosage en fibres végétale sur le temps de prise du ciment	24
Figure 1.19 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	26
Figure 1.20: Analyse comparative par histogramme de la profondeur de carbonatation	27

Chapitre 02 : Matériaux et méthodes expérimentales.

Figure 2.1: Ciment de béli saf	31
Figure 2.2: Sable siliceux.	32
Figure 2.3 : Etuve de séchage.....	33
Figure 2.4 : pouzzolane (0/3)	33
Figure 2.5 : Différentes parties d'un palmier dattier	35
Figure 2.6 : Les étapes d'extraction des fibres du palmier dattier	35
Figure 2.7: fibres d'algues marines après la collecte et séchage.....	36
Figure 2.8 : La masse volumique apparente.....	37

Figure 2.9 :La masse volumique absolu.....	37
Figure 2.10 : Equivalent de sable	38
Figure 2.11 :Analyse granulométrique des granulats	39
Figure 2.12 : Courbe granulométrique du sable.....	41
Figure 2.13 : Courbe granulométrique de la pouzzolane	42
Figure 2.14 :Essai de consistance avec appareil de vicat	43
Figure 2.15:Détermination du temps de début et de fin de prise	44
Figure 2.16:Les étapes de traitement des fibres de palmier dattier	46
Figure 2.17 : Les étapes de traitement des fibres d'algues marines	47
Figure2.18 : Traitement alcalin (NaOH).....	48
Figure 2.19 : Pesage des composants du mortier.....	50
Figure2.20 : Les étapes du malaxage du mortier.....	51
Figure 2.21 : Remplissage d'éprouvettes prismatiques.....	52
Figure 2.22 : Les éprouvettes après démoulage et conservation.....	53
Figure2.23 : Mesure de l'étalement.....	53
Figure2.24 : Appareil de la flexion.....	54
Figure2.25 : Appareil de la c compression.....	55
Figure2.26 : Essai de résistance à la compression.....	56
Figure2.27 : Appareil d'auscultation sonique"ultrason"	57
Figure2.28 : Essai d'Ultrason.....	57
Figure2.29 : Essai de mesure la conductivité thermique.....	59
Figure2.30: Essai d'absorption d'eau par capillarité des échantillons.....	60
Figure 2.31 : Appareil microscope de mesure pour le suivi de la propagation des fissures.....	61
Figure2.32 : Surface de rupture des différentes éprouvettes.....	61
Figure2.33 : Observation microscopique de l'évolution des fissures à 7j.....	62
Figure2.34 : Observation microscopique de l'évolution des fissures à 14j.....	62
Figure 2.35 : Observation microscopique de l'évolution des fissures à 28j.....	62

Chapitre 03 : Résultats et discussions.

Figure 3.1: Evolution de la maniabilité des différentes mortiers étudiés.....	66
Figure 3.2: Evolution de la Résistance à la flexion des mortiers.....	67
Figure 3.3: Evolution de la Résistance à la Compression des mortiers.....	68
Figure 3.4: Evolution de la Vitesse des vagues des mortiers;;;;;.....	79
Figure 3.5: Variation de la conductivité thermique des échantillons à 28j.....	71
Figure 3.6 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 28j.....	73

Liste des tableaux

Chapitre 01 : Recherche bibliographique.

Tableau 1.1 : Densité des principales fibres végétales et gains de masse comparatifs vis-à-vis des renfort industriels traditionnels.....	20
Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	22

Chapitre 02 : Matériaux et méthodes expérimentales.

Tableau 2.1 : Analyse chimique du ciment(LTPO).....	32
Tableau 2.2 : Composition minéralogique du ciment de béli saf.....	32
Tableau 2.3 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente.....	37
Tableau 2.4 : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue.....	38
Tableau 2.5 : Résultats de l'essai de l'équivalent de sable.....	39
Tableau 2.6 : Analyse granulométrique par tamissage du sable.....	40
Tableau 2.7 : Analyse granulométrique par tamissage du pouzzolane.....	41
Tableau 2.8 : Résultats de l'essai de consistance du ciment.....	43
Tableau 2.9 : Résultats de l'essai de temps de prise du ciment.....	44
Tableau 2.10 : Quantités des constituants pour 3 éprouvettes de mortier témoin.....	49
Tableau 2.11 : Les quantités des constituants pour 3 éprouvettes de mortier.....	49
Tableau 2.12 : Opération pour déterminer le mortier normal(témoin).....	51

Chapitre 03 : Résultats et Discussions.

Tableau 3.1 : Type de la formulation de mortier.....	65
Tableau 3.2 : Résultats d'essai de maniabilité.....	66
Tableau 3.3 : Résultats à la flexion.....	67
Tableau 3.4 : Résistance à la compression.....	68
Tableau 3.5 : Résultats d'essai d'ultrason.....	69
Tableau 3.6 : Résultats d'essai de la conductivité thermique.....	71
Tableau 3.7 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent.....	72

Introduction générale.

Introduction Générale :

Face aux défis environnementaux actuels et à la nécessité de réduire l'impact écologique du secteur de la construction, la recherche de matériaux durables et respectueux de l'environnement est devenue une priorité. Dans ce travail de recherche, les matériaux renforcés par des fibres naturelles suscitent un intérêt croissant grâce à leur disponibilité, leur caractère renouvelable et leurs propriétés physiques et mécaniques intéressantes.

Les fibres végétales constituent une alternative prometteuse aux fibres synthétiques traditionnellement utilisées dans les matériaux cimentaires. Leur incorporation permet non seulement de valoriser des ressources naturelles locales souvent sous-exploitées, mais aussi d'améliorer certaines performances des matériaux tout en limitant leur empreinte environnementale. Parmi ces ressources, les fibres de palmier dattier et les algues marines présentent un potentiel important, notamment dans les régions où elles sont abondamment disponibles.

En outre, l'utilisation des fibres naturelles dans les matériaux de construction s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire visant à valoriser les déchets et sous-produits d'origine végétale. Cette approche contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des matériaux conventionnels. Ainsi, le développement de composites cimentaires renforcés par des fibres végétales représente une solution durable conciliant performances techniques, coût réduit et respect de l'environnement.

De nombreuses études ont montré que l'incorporation de fibres végétales dans les matériaux cimentaires permet d'améliorer leur comportement face à la fissuration, d'augmenter leur résistance en traction et en flexion et de renforcer leur ténacité. Toutefois, les effets obtenus dépendent de plusieurs paramètres tels que la nature des fibres, leur dosage, leurs dimensions et leur interaction avec la matrice cimentaire. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches afin de mieux comprendre leur influence et d'optimiser les formulations développées.

L'Algérie dispose d'un patrimoine végétal riche qui offre de nombreuses possibilités pour le développement de matériaux de construction innovants. La valorisation des sous-produits issus du palmier dattier ainsi que des ressources marines représente une voie intéressante pour élaborer des matériaux plus économiques et plus respectueux de l'environnement. Le palmier dattier génère en effet une quantité importante de résidus végétaux souvent peu exploités, tandis que certaines algues marines constituent une ressource renouvelable disponible sur le littoral algérien. Leur utilisation dans les matériaux de

construction pourrait contribuer à la création de produits à forte valeur ajoutée tout en réduisant les impacts environnementaux liés aux déchets.

Cependant, malgré les nombreux travaux consacrés aux matériaux composites à base de fibres naturelles, l'influence de l'incorporation des fibres de palmier dattier et des algues marines sur les caractéristiques physiques et mécaniques d'un béton végétal demeure encore insuffisamment étudiée. Dès lors, la problématique de cette étude consiste à déterminer dans quelle mesure ces fibres peuvent améliorer ou modifier le comportement du matériau.

Afin de répondre à cette problématique, ce travail a pour objectif principal d'évaluer l'effet des fibres de palmier dattier et des algues marines sur les propriétés physiques et mécaniques d'un béton végétal. Plus spécifiquement, il s'agit d'étudier l'influence de ces fibres sur la masse volumique, l'absorption d'eau, ainsi que sur les résistances mécaniques du matériau, tout en mettant en évidence la formulation la plus performante.

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique consacrée aux fibres végétales et à leur utilisation dans les matériaux cimentaires. Le deuxième chapitre décrit les matériaux utilisés, les formulations adoptées ainsi que les différentes méthodes expérimentales mises en œuvre. Enfin, le troisième chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus avant de conclure par une synthèse générale et quelques perspectives de recherche.

Chapitre 01 :
Recherche
bibliographique.

Introduction :

L'incorporation des fibres dans les matériaux cimentaires permet d'améliorer leurs performances mécaniques en limitant la propagation des fissures, en augmentant les résistances à la traction et à la flexion, ainsi qu'en améliorant la ténacité du matériau [1]. Toutefois, les fibres métalliques et synthétiques présentent un coût élevé et un impact environnemental important, ce qui a conduit à un intérêt croissant pour les fibres naturelles comme alternative durable [2].

Les fibres végétales se distinguent par leur caractère biodégradable et renouvelable. Dans certains pays, elles sont issues de la valorisation de ressources locales, ce qui renforce leur intérêt économique et environnemental. Leur incorporation dans les composites cimentaires permet d'obtenir des performances mécaniques satisfaisantes tout en réduisant le coût global du matériau [3]. Néanmoins, leur durabilité dans les matrices cimentaires est affectée par leur minéralisation en milieu alcalin. Des études ont montré que l'utilisation d'ajouts pouzzolaniques permet de réduire ce phénomène et d'améliorer leur durabilité [2]. Par ailleurs, plusieurs recherches ont mis en évidence l'intérêt des fibres végétales pour améliorer les propriétés thermiques des matériaux de construction, contribuant ainsi au développement de bâtiments plus durables et éco-énergétiques [4,5].

1. Généralité sur les bétons fibrés :

Le béton fibré est un matériau composite obtenu par l'incorporation de fibres dans une matrice cimentaire classique (ciment, sable, gravier et eau) [6]. L'ajout de fibres permet d'améliorer certaines propriétés mécaniques et physiques du béton, notamment sa résistance à la traction, sa ductilité et sa durabilité [7].

Les fibres utilisées peuvent être de différentes natures : métalliques, synthétiques ou naturelles. Ces fibres sont réparties de manière aléatoire dans le mélange, ce qui permet de limiter la propagation des fissures et d'augmenter la résistance post-fissuration [7].

Le principal rôle des fibres dans le béton est de contrôler la fissuration. En effet, lors du durcissement ou sous l'effet de charges, des microfissures apparaissent dans la matrice cimentaire. Les fibres agissent comme des ponts qui empêchent l'ouverture et la propagation de ces fissures [8].

On distingue généralement deux types de bétons fibrés : les bétons renforcés par des microfibrilles, utilisés pour réduire la fissuration due au retrait plastique, et les bétons renforcés par des macrofibrilles, qui améliorent les propriétés mécaniques structurelles [7].

Dans une optique de développement durable, l'utilisation de fibres végétales suscite un intérêt croissant. Ces fibres sont renouvelables, biodégradables et permettent de réduire l'impact environnemental des matériaux de construction [9].

1.1 Historique du béton de fibres :

Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. En effet les pharaons ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue d'après Exode 5 :6 comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1ère fois, les fibres d'amiante dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années.

D'autres sources ANTOINE, E.N - Mars 1985 et ACI COMMITTEE 554 Mars Avril 1984 ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, tandis que les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX é siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone.

Par la suite 1911, GRAHAM a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet Américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction. Un deuxième brevet Américain sur ce sujet a été pris par WEAKLY.

En 1912, qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton.

En 1920, A. KLEINLOGEL a déposé le premier brevet Allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important, de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1938, un autre brevet a été établi par N. ZITEVIC en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer approximativement avec 100 mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très semblables aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans de différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres d'acier dans le béton pour améliorer sa

performance. Mais on note ici que celui de G.CONSTANTINESCO, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, mérite une attention particulière.

A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Le premier article dans ce concept peut être attribué à LANKARD et SHEETS. Dans cet article, ils ont confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance.

2. Les fibres naturelles :

L'incorporation de fibres naturelles dans les matrices cimentaires constitue une approche prometteuse permettant d'améliorer les performances des matériaux. Les composites renforcés par des fibres végétales font l'objet d'un développement croissant. Bien que leurs applications restent encore limitées, leur potentiel dans le secteur de la construction est largement reconnu.

Les fibres se caractérisent généralement par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre, et peuvent être classées selon différents critères tels que leur composition chimique, leurs dimensions ou encore leur origine.

Les fibres naturelles se divisent en trois grandes catégories en fonction de leur provenance : les fibres végétales de nature cellulosique, les fibres animales de nature protéinique, et les fibres minérales. L'extraction des fibres à partir de leur source constitue une étape essentielle dans la fabrication des matériaux composites. Plusieurs méthodes existent à cet effet. Par exemple, les fibres libériennes sont extraites des tiges de plantes par un procédé appelé rouissage, qui repose sur l'action combinée de l'humidité et des micro-organismes afin de faciliter la séparation des fibres. Les fibres peuvent également être obtenues à partir des feuilles par des techniques de raclage manuel ou par des procédés mécaniques.

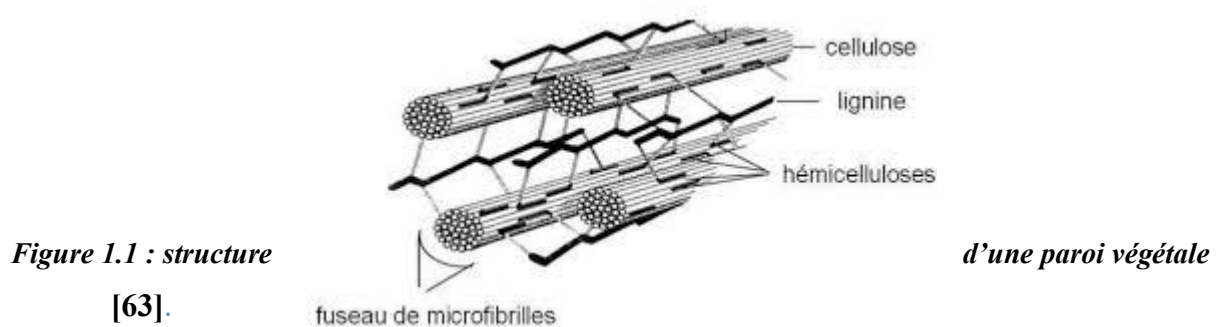
Selon leur origine, les fibres naturelles peuvent être regroupées en trois grandes familles.

Les fibres végétales comprennent les fibres de graines (comme le coton et le kapok), les fibres libériennes issues des tiges (lin, chanvre, jute, ramie), ainsi que les fibres dures provenant des feuilles (sisal), des troncs (chanvre de Manille) ou des enveloppes de fruits (noix de coco).

Les fibres animales proviennent des poils (laine) ou de sécrétions (soie). Enfin, les fibres minérales incluent notamment le basalte.

2.1 Les fibres végétales :

Les fibres végétales sont souvent assimilées à des composites naturels en raison de leur structure complexe. Elles sont constituées principalement de microfibrilles de cellulose intégrées dans une matrice composée de lignine et d'hémicellulose (**Figure 1.1**). Ces microfibrilles sont orientées suivant une structure hélicoïdale caractérisée par un angle appelé angle microfibrillaire [10]. Par ailleurs, plusieurs facteurs tels que les conditions climatiques, l'âge de la plante et les procédés de traitement influencent à la fois la structure des fibres et leur composition chimique [11].



2.2 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 [12]. La structure de la fibre végétale est comparable à un empilement de plis composites, dont la structure est détaillée à la **figure 1.2**. 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.

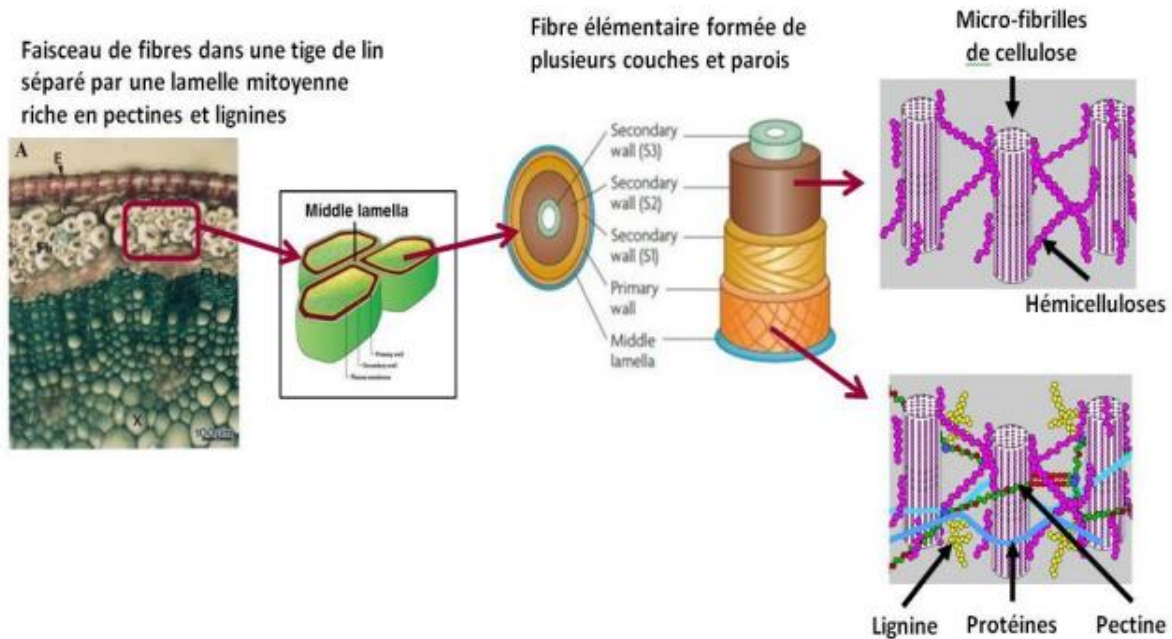


Figure 1.2 : Structure d'une fibre végétale [64].

2.2.1 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 [13].

La cellulose n'est pas hydrosoluble mais est fortement hydrophile, propriété qui est à l'origine, pour les fibres exploitées, de leur grand confort en tant que fibres textiles. Dans les conditions normales d'utilisation, elle peut contenir jusqu'à 70% d'eau plus ou moins liée. Le remplacement d'une partie des interactions inter-chaînes par des liaisons hydrogènes entre la cellulose et l'eau provoque une plastification du matériau et donc une diminution de ses caractéristiques mécaniques.

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 cellulotiques est illustrée sur la figure 1.3. [14]

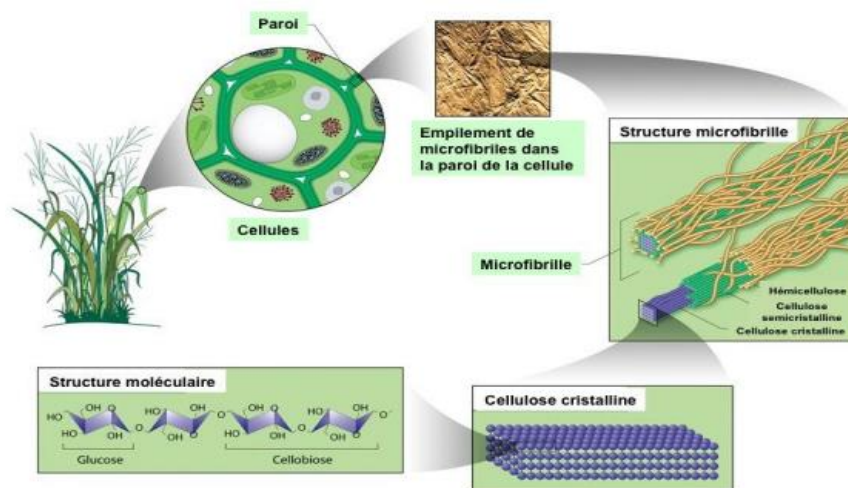


Figure 1.3 : Représentation de la chaîne de cellulose [65].

2.2.2 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'andérose. Du fait 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. 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.

De bois appelé Arabino Glucuronoxylane (xylane) [13].

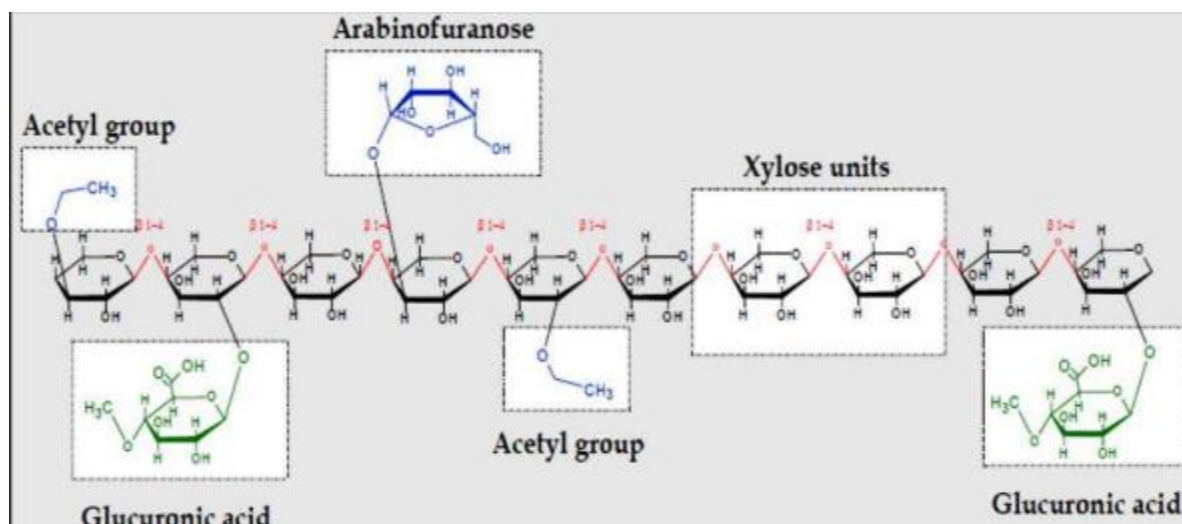


Figure 1.4 : Structure hypothétique d'un hémicellulose [67].

2.2.3 La lignine :

La lignine est le composant liant dans les tiges d'alfa et en général dans les plantes. C'est le liant entre les fibres formant des faisceaux ou des tiges. Sans la lignine, les tiges d'alfa n'existeraient pas. L'extraction des fibres consiste en la libération des fibres ultimes en dégradant les composants non-cellulosiques comme la lignine. L'élimination de la lignine est appelée la délignification.

Une structure de base (**Figure.I.5**) de la lignine existe avec deux groupes fonctionnels qui peuvent varier, ainsi réalisant plusieurs molécules différentes de lignine. Par conséquent en réalité, le nom « la lignine » n'est pas correct car il s'agit de plusieurs molécules. Il est donc mieux de parler « des lignines ».

Les liaisons covalentes sont relativement fortes, conduisant à une bonne résistance biologique et chimique. C'est pour cela que l'élimination de la lignine afin d'obtenir des fibres d'alfa est difficile. Les propriétés mécaniques des lignines sont faibles.

La lignine est une macromolécule extrêmement hétérogène composée de polymères aromatiques. Elle représente, après les polysaccharides, le polymère naturel le plus abondant sur terre. Elle participe à la rigidité structurale des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes. La lignine est une molécule à trois dimensions composée d'unités de phényle propane [14].

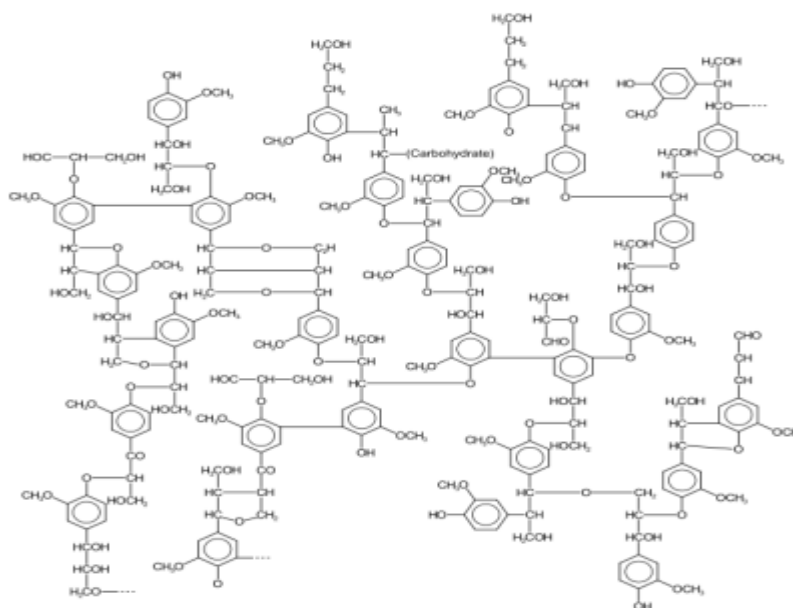


Figure 1.5 : Structure des précurseurs de la lignine [67].

2.2.4 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 [11].

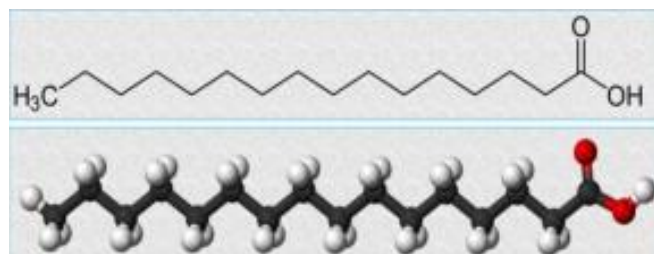


Figure 1.6 : Structure et modèle moléculaire de l'acide palmitique [75].

2.2.5 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 [15].

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 [16].

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.

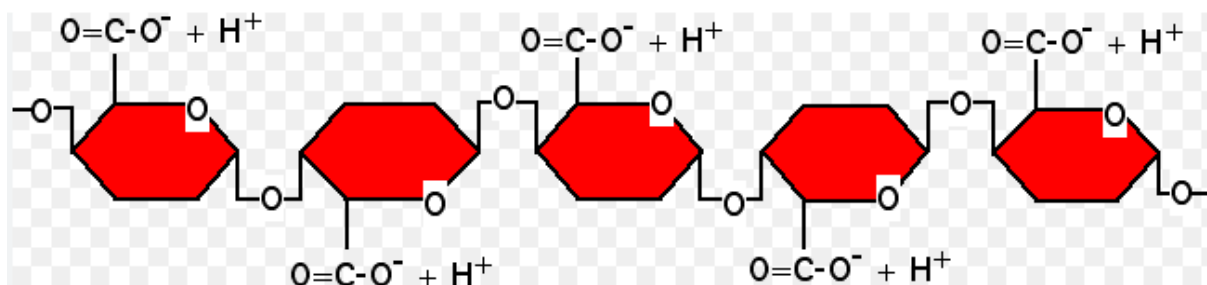


Figure 1.7 : Représentation de la molécule de pectine [76].

2.3 Caractéristiques et classification des fibres végétales :

On retrouve sur le marché plusieurs types de fibres, elles peuvent être classées par familles, un choix approprié du type de fibre à utiliser est essentiel. Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre.

Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants :

- Densité.
- Résistance tension et en compression.
- Résistance aux impacts et à la fatigue.
- Module d'élasticité.
- Conductivités thermique et électrique.
- Stabilité dimensionnelle.
- Résistance aux conditions environnementales.
- Coût.

2.4 Présentation de différentes fibres végétales :

L'intérêt croissant porté aux fibres végétales s'explique par leur disponibilité, leur caractère renouvelable et leurs avantages environnementaux. Ces fibres sont aujourd'hui considérées comme une alternative intéressante aux fibres synthétiques dans la conception de matériaux composites destinés à des applications industrielles. Selon leur origine botanique, elles peuvent être réparties en plusieurs catégories, notamment les fibres provenant des tiges, des feuilles, des fruits et des troncs de plantes.

2.4.1 Palmier dattier :

Les fibres de palmier dattier sont des fibres végétales naturelles extraites principalement des feuilles, des troncs ou des résidus du palmier dattier. Elles sont abondantes dans les régions sahariennes et représentent une ressource locale renouvelable et peu coûteuse [17].

Ces fibres sont composées principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, ce qui leur confère une bonne résistance mécanique et une faible densité. Grâce à ces propriétés, elles sont utilisées comme renfort dans les matériaux composites, notamment dans le béton végétal [18].

L'incorporation des fibres de palmier dattier dans le béton permet d'améliorer certaines caractéristiques, telles que la réduction de la fissuration, l'augmentation de la ductilité et l'amélioration de l'isolation thermique [19]. Elles contribuent également à la valorisation des déchets agricoles et à la réduction de l'impact environnemental.

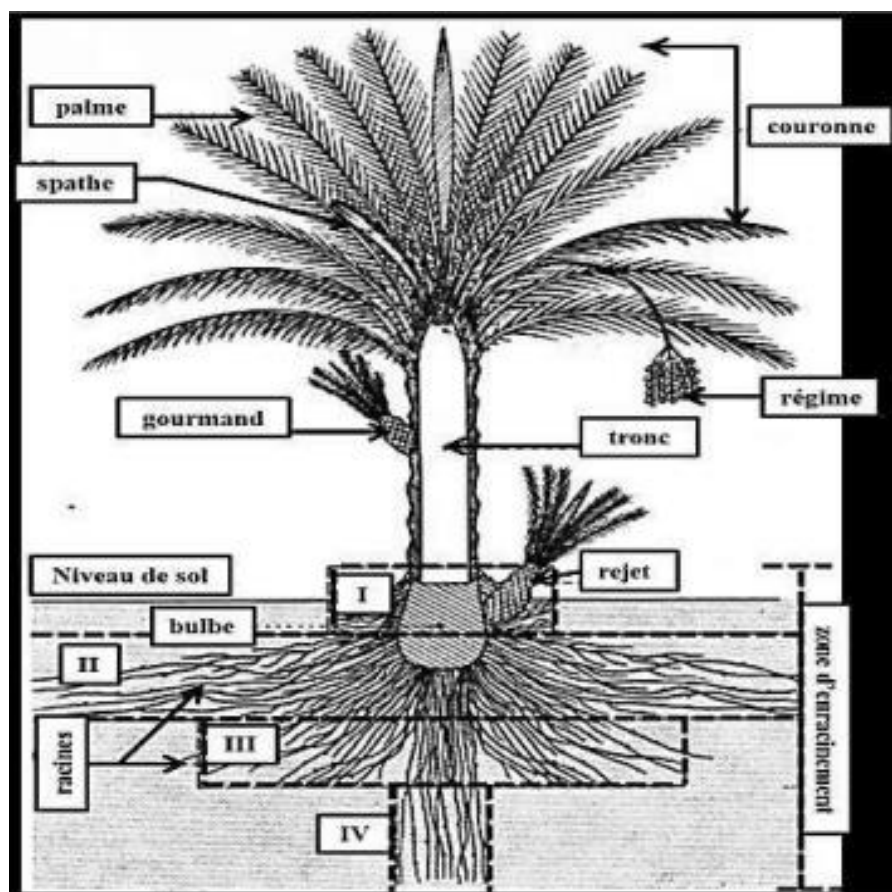


Figure 1.8 : Schéma de palmier dattier [77].



Figure 1.9 : Fibres naturelles extraites du palmier dattier [69].

2.4.2 Algue marine :

Les algues marines sont des organismes photosynthétiques vivant principalement dans les environnements océaniques et côtiers.

Elles jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes marins en assurant une grande part de la production primaire, en contribuant à l'oxygénation des eaux et à la fixation du dioxyde de carbone [20,21].

Elles sont généralement classées en trois grands groupes : les algues vertes (Chlorophyta), les algues brunes (Phaeophyceae) et les algues rouges (Rhodophyta), qui se distinguent par leurs pigments photosynthétiques et leur distribution verticale dans la colonne d'eau [21,22]. En effet, les algues brunes dominent les zones côtières tempérées, tandis que les algues rouges peuvent se développer à de plus grandes profondeurs grâce à leur capacité à capter efficacement la lumière faible [20,21].

Par ailleurs, les algues marines présentent un intérêt considérable dans divers domaines tels que la biotechnologie, l'agriculture et l'industrie pharmaceutique en raison de leurs composés bioactifs et de leurs polysaccharides aux propriétés fonctionnelles [22].



Figure 1.10 : l'algue vert (L'Ulve souvent appelé laitue de mer) et l'algue brune (le fucus ou varech reconnaissable à ses petites boules gonflées d'air [70]).

2.4.3 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 tempérée [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 1.10**). 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 1.11 : Plante de chanvre industriel pour la production de fibres [71].



Figure 1.12 : fibre de chanvre.

2.4.4 La noix de coco :

Les fibres de noix de coco sont des fibres végétales naturelles qui entourent et protègent le fruit du cocotier. Le cocotier se développe dans des régions très ensoleillées et humides. Ces fibres sont extraites de l'enveloppe externe de la noix de coco, provenant du cocotier (*Cocos nucifera*), comme illustré à **la figure 1.13**.

Elles sont aujourd'hui utilisées principalement dans la fabrication artisanale de cordages, de géotextiles, de matelas, pour les garnitures automobiles ainsi que dans les matériaux de construction. Il existe deux types de fibres de noix de coco : les fibres brunes, issues des noix mûres, et les fibres blanches, extraites des noix immatures.

Les fibres brunes sont épaisses, résistantes et présentent une forte résistance à l'abrasion ; tandis que les fibres blanches sont plus lisses, plus fines, mais également moins résistantes [24].

L'Indonésie, les Philippines, l'Inde, le Brésil et le Sri Lanka figurent parmi les principaux producteurs mondiaux de fibres de noix de coco.



Figure 1.13 : Stockage primaire des enveloppes fibreuses de Cocos nucifera avant extraction des fibres de coir [72].



Figure 1.14 : Fibre de noix de coco.

2.5 Les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des fibres végétales :

2.5.1 Propriétés mécanique des fibres végétales :

De par leur composition physique et chimique, les fibres naturelles présentent des propriétés mécaniques très variables conférant ainsi à chaque type de fibre une utilisation bien spécifique. Cette propriété varie significativement en fonction de la morphologie des fibres, de leur composition chimique, de leur cristallinité, du degré de polymérisation de la cellulose ainsi que la méthode d'extraction des fibres.

De nombreuses études ont signalé une grande variabilité des propriétés mécaniques des fibres issues de la même espèce. Ce phénomène peut être lié à la variation naturelle et aux facteurs techniques (procédé d'extraction, méthode de mesure, etc.) Cette variation demeure une préoccupation cruciale des industries utilisatrices des fibres végétales.

Ainsi, les propriétés mécaniques des fibres végétales permettent de définir leur domaine d'application.

Vu leur disposition au sein des matériaux composites, les paramètres les plus importants à étudier dans ce cadre sont l'allongement et la résistance à la rupture étant donné que les fibres sont sollicitées en traction dans la majorité des applications ; Mais, l'étude des propriétés de flexion et de fatigue est également nécessaire dans certains cas.

2.5.2 Propriétés Physiques des fibres végétales :

✓ Dimension des fibres (diamètre et longueur) :

La finesse présente un paramètre très important dans la caractérisation des fibres végétales. Ce paramètre est défini généralement par un facteur de forme (L/d) qui est présenté par le rapport entre les longueurs des fibres (en mm) et leurs diamètres (en μm). Ceci permet de comparer les différentes fibres végétales et de définir ainsi leurs champs d'application. En effet, un facteur de forme faible indique une résistance assez importante, ce qui oriente l'utilisation de ces fibres dans le renforcement des matériaux composites, Par contre, un rapport (L/d) assez élevé oriente l'utilisation des fibres vers le domaine textile.

La longueur et le diamètre des fibres végétales, varient d'une espèce à une autre. Ceci conditionne l'application de ces fibres dans le domaine textile et des matériaux composites également [23].

✓ Taux de reprise des fibres végétales :

L'humidité atmosphérique, liée à la température, exerce une influence sur les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des fibres végétales. La teneur en humidité et le taux de reprise sont deux paramètres qui renseignent sur la quantité d'eau, que peut contenir ou reprendre la fibre dans des conditions climatiques bien définies.

De ce fait, on peut définir le taux de reprise comme étant la quantité d'eau absorbée par 100 grammes de matière sèche dans des conditions climatiques bien déterminées. La teneur en humidité est définie comme étant la quantité d'humidité contenue dans 100 grammes de matière humide dans les mêmes conditions climatiques [23].

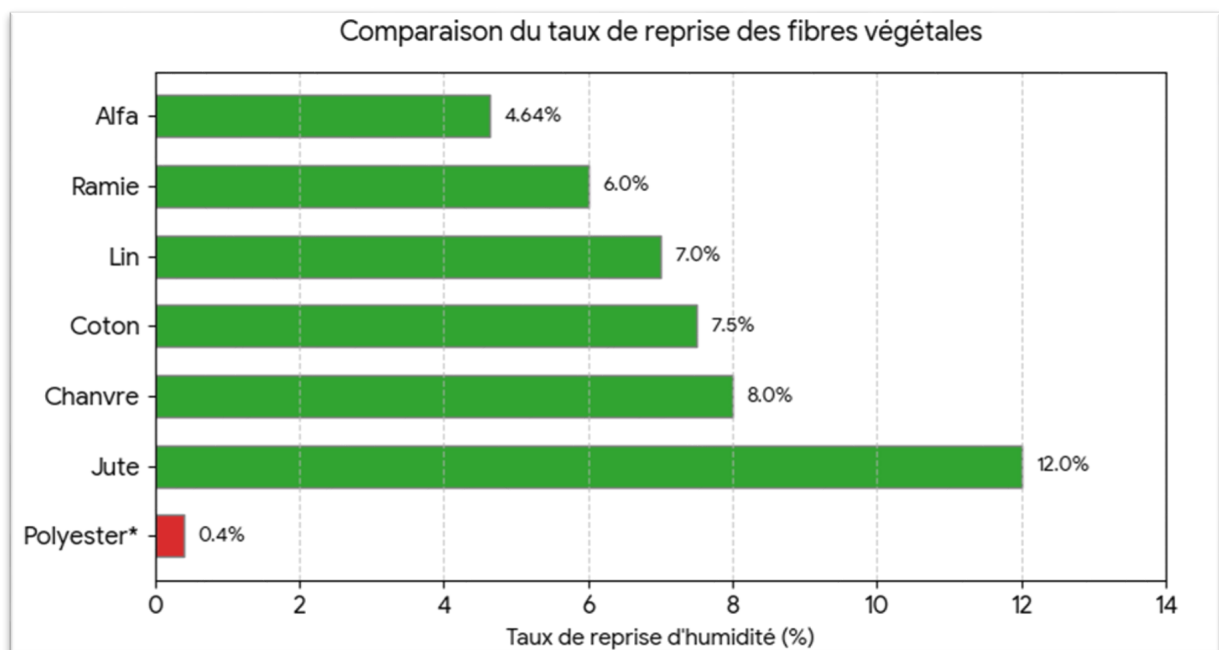


Figure 1.15 : Graphique des taux de reprise humidité.

✓ La densité des fibres végétales :

La densité est une caractéristique très importante puisqu'elle se répercute sur le poids des produits réalisés à partir de ces fibres. Par exemple, les fibres de verre ayant une densité de 2,56 donnent des produits lourds alors que ceux fabriqués à base de fibres de polyéthylène de densité 0,92 seront largement plus légers.

Cette propriété est particulièrement importante pour les applications techniques comme les composites ou les géotextiles.

La densité de la fibre peut être déterminée par plusieurs techniques, à savoir la méthode de colonne à gradient de densité ou bien en utilisant le pycnomètre [24].

Parmi ces deux méthodes, la première technique est basée sur l'observation de la hauteur d'immersion d'une éprouvette, présentée sous forme de nœud, dans une colonne de liquide présentant un gradient linéaire de densité. Ce gradient est réalisé par deux liquides de référence miscibles et de densités différentes. Pour mesurer la densité de la cellulose, on utilise généralement le tétrachlorure de carbone (1,595) et le xylène (0,650). Ces deux liquides n'affectent pas la fibre et ne causent en aucun cas son gonflement.

Tableau 1.1 : Densité des principales fibres végétales et gain de masse comparatifs vis-à-vis des renforts industriels traditionnels.

Type de fibre	Densité moyenne (g/cm ³)	Réduction de masse / Verre E (%)
Alfa	1.35	-47%
Jute	1.37	-46%
Lin	1.45	-43%
Sisal	1.45	-43%
Chanvre	1.48	-42%
Ramie	1.50	-41%
Coton	1.54	-39%
Carbone (Réf.)	1.78	-30%
Verre E (Réf.)	2.55	0% (Témoin)

2.6 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 [25].

2.7 Evaluation de la disponibilité des fibres végétales :

2.7.1 Disponibilité les fibres végétales à l'échelle mondiale :

Au cours des dernières années, l'utilisation de ressources renouvelables à faible coût, en particulier celles d'origine végétale, dans le domaine des matériaux composites, a suscité un intérêt croissant dans les pays industrialisés. Parmi les principaux producteurs mondiaux de fibres végétales figurent notamment l'Inde, la Chine et le Brésil.

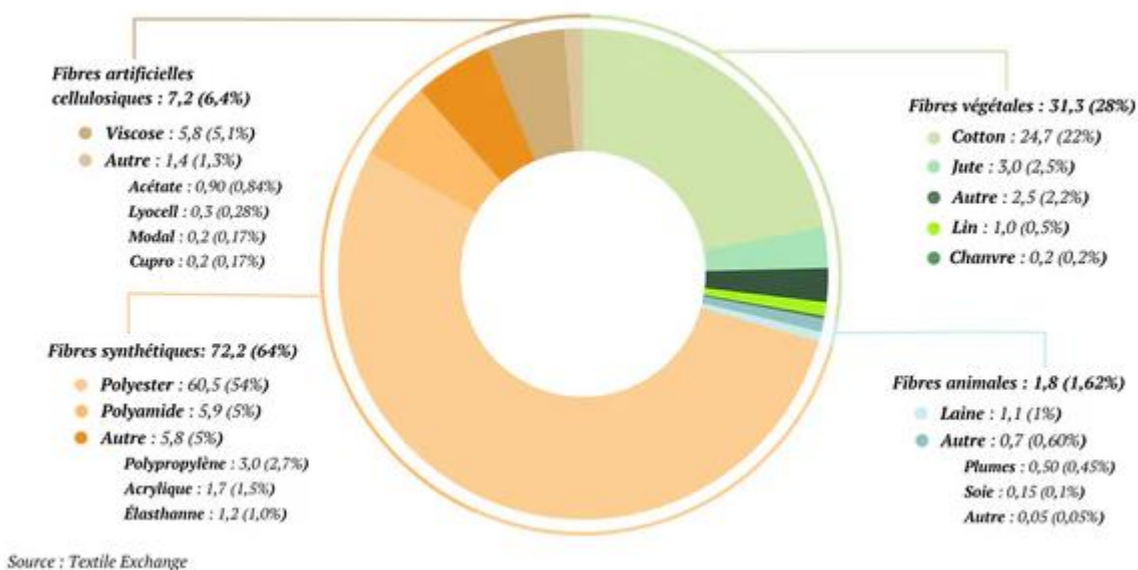


Figure 1.16 : Production mondiale de fibres textiles (en tonnes) en 2021.

2.7.2 Disponibilité les fibres végétales en Algérie :

L'Algérie se distingue par la richesse de ses terres fertiles, offrant une grande diversité biologique. Cette diversité est particulièrement marquée dans les régions montagneuses, les hauts plateaux ainsi que les zones désertiques, où l'on retrouve plusieurs ressources végétales telles que le liège, l'alfa, le diss, le doum, le palmier dattier, le pin, le coton et le lin. Avec une production annuelle estimée à environ 6000 tonnes de liège, le pays figure parmi les six principaux producteurs mondiaux. Par ailleurs, l'alfa occupe près de 4 millions d'hectares du territoire national [26].

Il est également important de noter que l'Algérie abrite près de 10 millions de palmiers dattiers. De plus, de vastes superficies, s'étendant sur des dizaines de milliers d'hectares, sont

riches en autres fibres végétales telles que le diss et le doum. L'exploitation du crin végétal issu des fibres de doum remonte au début du XX^e siècle, durant la période coloniale française. Ainsi, l'Algérie dispose d'un potentiel considérable en fibres végétales, qui reste encore insuffisamment valorisé [27].

2.8 Avantages et inconvénients des fibres végétales :

Les fibres naturelles constituent des biocomposites issus de ressources agricoles. À l'instar des autres matériaux composites, elles présentent de nombreux avantages qui favorisent leur utilisation dans divers domaines d'application, notamment civils et militaires.

Cependant, ces matériaux dits « écologiques » présentent également certaines limites, susceptibles de restreindre leur utilisation, en particulier lorsque les fibres brutes ne font l'objet d'aucun traitement ou amélioration préalable. Le **Tableau 1.2** présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales.

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des fibres végétales.

Les avantages	Les inconvénients
• Faible coût. • Biodégradable (pour l'environnement). • Ressource renouvelable. • Propriétés mécaniques. • spécifiques importantes (résistance et rigidité). • Demande peu d'énergie pour la production. • Bon isolant thermique et acoustique neutre pour l'émission de CO₂. • Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.	• Absorption d'eau. • Biodégradabilité (pour le matériau). • Fibres anisotropes. • Pour des applications industrielles, nécessite de gestion d'un stock. • Faibles stabilité dimensionnelle, • Faible tenue thermique (200 à 300°C max). • Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, des conditions météorologiques. • Renfort discontinu.

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

3.1 L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité des fibres végétales représente un paramètre clé conditionnant leur performance dans différentes applications. Elle est influencée par plusieurs facteurs, notamment la longueur, le diamètre, la flexibilité ainsi que la composition chimique des fibres, qui déterminent directement leur aptitude à la mise en œuvre.

De manière générale, les fibres longues et fines sont plus faciles à transformer et trouvent une large utilisation dans les industries textiles et des matériaux composites. En revanche, les applications à caractère structurel requièrent un équilibre optimal entre résistance mécanique et souplesse. Ainsi, la maîtrise de l'ouvrabilité des fibres végétales constitue un élément fondamental pour leur valorisation dans les secteurs orientés vers des matériaux durables.

Selon les travaux de Kalaivani et al. [28], l'ouvrabilité de la pâte de ciment et du mortier diminue avec l'augmentation de la longueur et de la teneur en fibres de jute. Dans le même contexte, les études menées par Ismail Shah et al [29] indiquent que l'accroissement du dosage en fibres entraîne une réduction de l'affaissement, en raison de l'absorption d'eau par celles-ci. Par ailleurs, Okeola et al [30] ont montré que l'ajout de fibres de sisal dans le béton réduit l'ouvrabilité à l'état frais, phénomène attribué principalement au caractère hygroscopique du sisal, qui diminue la quantité d'eau libre nécessaire à la formation de la pâte cimentaire.

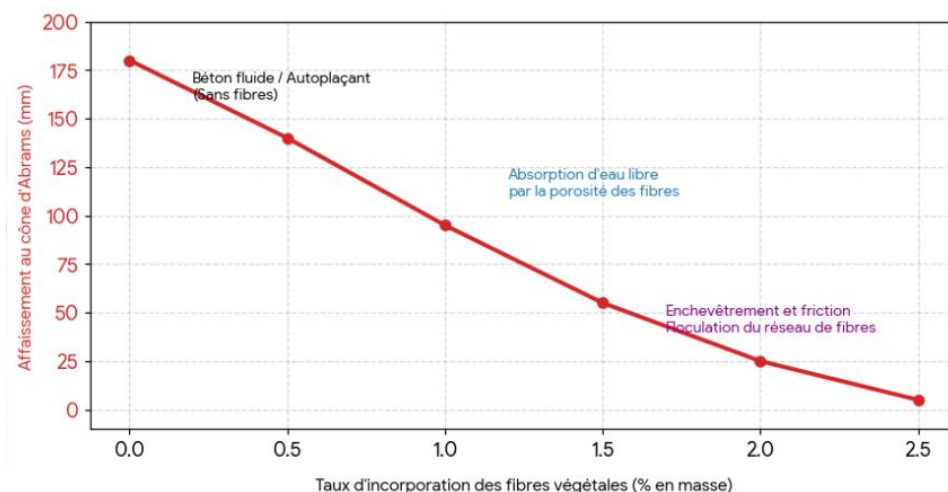


Figure 1.17 : Effet du dosage en fibres végétales sur l'ouvrabilité du béton.

3.2 Temps de prise :

De nombreuses études ont mis en évidence les effets défavorables des fibres naturelles d'origine végétale sur le processus d'hydratation des composés cimentaires. Belba et al. [31] ont observé un allongement du temps de prise ainsi qu'une réduction de la chaleur d'hydratation dans des composites cimentaires renforcés par des fibres de bagasse de canne à sucre. Ce phénomène est attribué à la présence de sucres solubles libérés lors de la dissolution partielle de l'hémicellulose et de la dégradation alcaline de certains constituants.

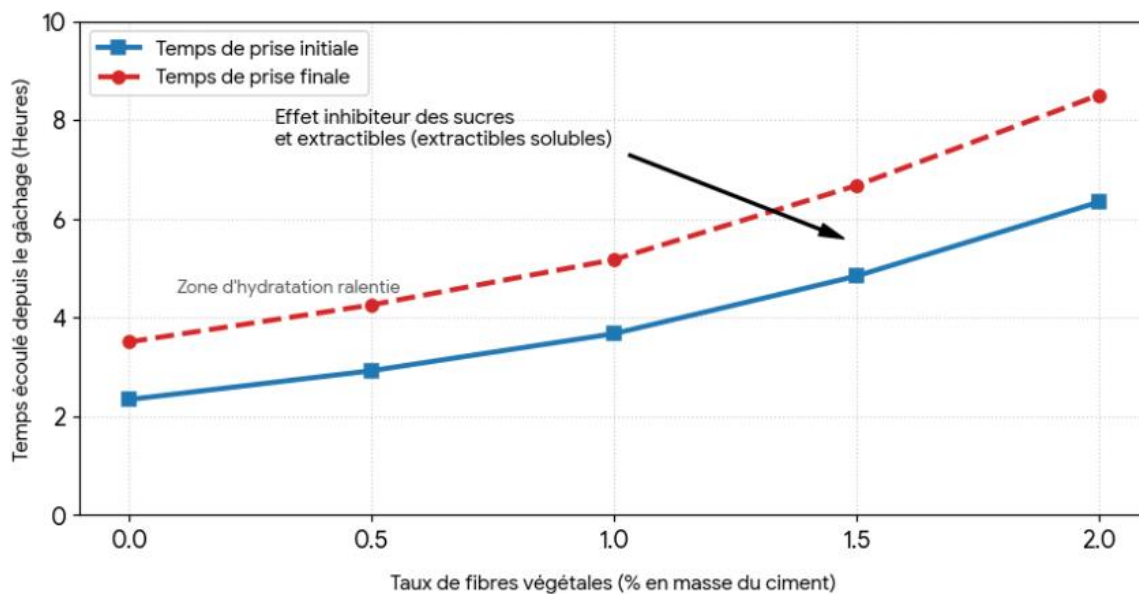


Figure 1.18 : Effet du dosage en fibres végétales sur le temps de prise du ciment.

Dans le même sens, Sudin et Swami [32] ont également constaté un retard de prise dans les systèmes cimentaires contenant des fibres de bambou. Ce comportement est probablement lié à la forte teneur en sucres des fibres, favorisant la formation de composés de calcium et ralentissant ainsi les réactions d'hydratation.

Par ailleurs, Lee et Choi [33] ont souligné l'importance d'une évaluation précise du temps de prise dans les composites cimentaires renforcés par des fibres d'abaca, en raison du retard observé dans les réactions d'hydratation. Ils ont également mis en évidence la nécessité de considérer à la fois les propriétés physiques et chimiques des fibres. En effet, l'interaction interne des fibres peut fausser les résultats du test de Vicat, tandis que la méthode basée sur la chaleur d'hydratation peut négliger l'influence des caractéristiques physiques.

Ainsi, les approches non destructives, telles que la mesure de la vitesse des ondes ultrasonores et leur orientation, apparaissent prometteuses, bien que leurs résultats restent dépendants de la composition des fibres et nécessitent des investigations complémentaires.

3.3 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.

La plupart recommandant 0,5% de fibres naturelles, tandis que certains préconisent 1% de fibres naturelles pour obtenir une résistance maximale. Zhou et al [34] 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 [35] ont découvert que, quel que soit le type de traitement des fibres de lin, les résistances à la compression et à la flexion s'amélioreraient 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.

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

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. [34] 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 importante 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.

3.4 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 structuraux. Par conséquent, en évitant l'absorption d'eau, un béton à haute résistance peut être obtenu.

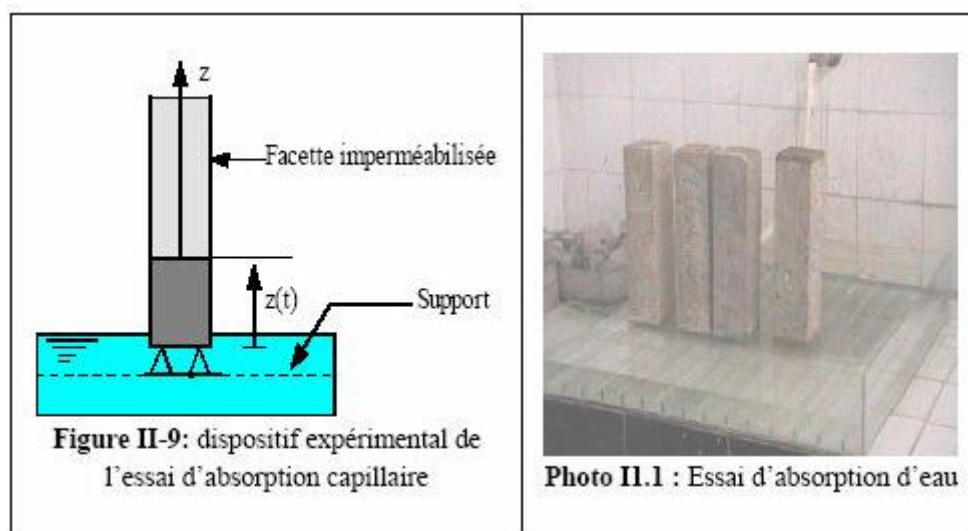


Figure 1.19 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.

Kesikidou et Stefanidou [36] 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.

3.5 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 [37] 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.

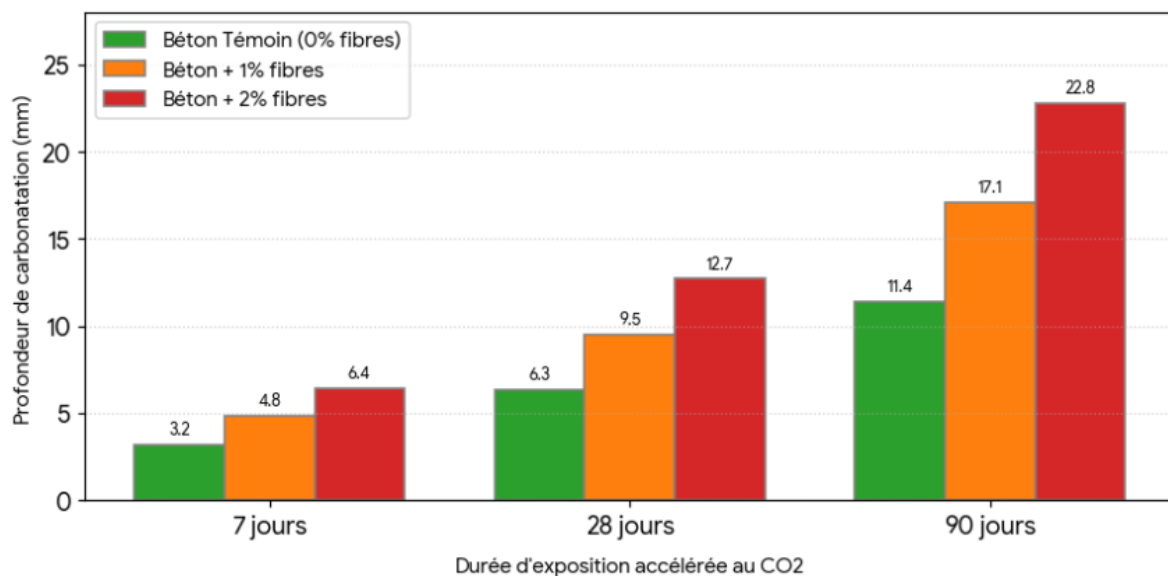


Figure 1.20 : Analyse comparative par histogramme de la profondeur de carbonatation des matrices cimentaires en fonction du dosage en fibres végétales et du temps d'exposition.

D'autre part, Ban et al [38] 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.

4. Traitement des fibres végétales :

Les fibres végétales subissent différents types de traitements (physiques, chimiques et thermiques) afin d'améliorer leurs propriétés, notamment leur stabilité, leur compatibilité avec la matrice minérale, ainsi que leur durabilité dans le temps.

4.1 Traitement physique :

Ce type de traitement vise principalement à modifier les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles des fibres sans altérer leur composition chimique. Il comprend :

Le séchage : permet de réduire la teneur en humidité des fibres et d'éviter le développement de moisissures.

Le décorticage ou défibrage : consiste à séparer les fibres longues des autres constituants.

Le broyage ou la découpe : permet d'obtenir des fibres de taille homogène adaptées à l'usage prévu.

4.2 Traitement chimique :

Ces traitements ont pour objectif de modifier la structure chimique des fibres afin d'améliorer leur adhérence et leur durabilité :

- Alcalinisation (NaOH) : ce traitement permet de nettoyer la surface des fibres en éliminant les composants non cellulosiques, avec une concentration adaptée.
- Traitement acide : utilisé pour purifier les fibres, mais rarement employé seul.
- Acétylation ou agents de couplage au silane : améliorent la résistance des fibres à l'eau et leur compatibilité avec la matrice.
- Traitement à la chaux : permet d'adapter les fibres à l'environnement alcalin des matrices cimentaires.

4.3 Traitement thermique :

Ce type de traitement est utilisé pour modifier et améliorer les propriétés des fibres, notamment leur durabilité, leur stabilité dimensionnelle et leur résistance à l'humidité. Il contribue également à réduire leur biodégradabilité tout en conservant leur caractère respectueux de l'environnement.

Conclusion :

À travers ce chapitre bibliographique, nous avons présenté les généralités relatives aux bétons fibrés ainsi qu'aux fibres végétales utilisées comme matériaux de renforcement dans les composites cimentaires. L'étude a mis en évidence l'intérêt croissant porté aux fibres naturelles en raison de leurs avantages environnementaux, de leur disponibilité et de leurs propriétés physiques et mécaniques intéressantes.

Les différentes familles de fibres végétales, leur structure, leur composition chimique ainsi que leurs principales propriétés ont été exposées. Une attention particulière a été accordée aux fibres de palmier dattier et aux algues marines, qui constituent les fibres retenues dans le cadre de cette étude. Les avantages et les limites liés à leur utilisation dans les matériaux cimentaires ont également été présentés.

Par ailleurs, l'analyse des travaux de recherche antérieurs a montré que l'incorporation des fibres végétales peut influencer de manière significative les propriétés du béton, notamment l'ouvrabilité, les résistances mécaniques, l'absorption d'eau et la durabilité.

Toutefois, certaines contraintes, telles que leur sensibilité à l'humidité et à l'alcalinité du milieu cimentaire, nécessitent souvent des traitements adaptés afin d'améliorer leur comportement à long terme.

Les connaissances bibliographiques développées dans ce chapitre constituent ainsi une base scientifique essentielle pour la compréhension du comportement des bétons végétaux. Elles serviront également de support à l'étude expérimentale présentée dans le chapitre suivant, consacré aux matériaux utilisés, aux formulations adoptées et aux méthodes d'essais mises en œuvre.

Chapitre 02 :
Matériaux et méthodes
expérimentales.

Introduction :

Ce deuxième chapitre expose de manière approfondie les matériaux employés dans l'élaboration des différents mélanges de mortier, en mettant l'accent sur les fibres végétales retenues, notamment celles issues du palmier dattier et des algues, ainsi que sur les traitements spécifiques qui leur sont appliqués.

L'un des objectifs principaux de cette étude consiste à analyser l'effet du traitement alcalin sur les propriétés des fibres, ainsi que son influence sur les performances finales des composites obtenus.

Par ailleurs, ce chapitre présente également les différentes méthodes et techniques mises en œuvre pour caractériser les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites à matrice cimentaire.

1. Présentation des matériaux étudiés :

1.1 Le ciment :

Le ciment utilisé pour la confection des éprouvettes de mortier ordinaire est issu de l'usine de Beni-Saf, localisée dans la wilaya d'Ain Témouchent. Il s'agit d'un ciment composé de type (CPJ CEM II/A 42.7), couramment utilisé dans le domaine de la construction dans le Nord-Ouest de l'Algérie.

Les informations relatives à sa composition chimique et minéralogique, notamment la composition de Bogue, sont présentées dans les tableaux 2.1 et 2.2. Les analyses chimiques ainsi que les études minéralogiques ont été réalisées au Laboratoire des Travaux Publics d'Oran (LTPO).



Figure 2.1 : Gica béton, Ciment de beni saf.

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	C3S	C2S	C3A	C4AF	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 type de sable de mer :

- Sable Siliceux (0-3mm) de la plage el woroud (Wilaya de Ain-Temouchent)



Figure 2.2 : Sable siliceux.

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 pouzzolane :

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques, Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieurs à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer [39].

Elles ont la particularité de réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium en présence d'eau, formant des composés cimentaires stables qui contribuent à l'amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité des matériaux.

L'incorporation de la pouzzolane dans les liants hydrauliques permet de réduire la chaleur d'hydratation, d'améliorer la résistance à long terme et d'augmenter la résistance aux agressions chimiques, notamment aux sulfates. Elle contribue également à diminuer la perméabilité du béton, ce qui améliore sa durabilité dans le temps.

Dans cette étude nous avons utilisé pouzzolane (0/3) à partir matériaux de construction d'université.



Figure 2.4 : pouzzolane 0/3.

1.4 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de mortier, nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier.

Attention: un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours.

Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF EN 1008 [39].

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 Bouchaïb.

1.5 Les fibres végétales :

Cette étude expérimentale porte sur l'utilisation de fibres naturelles d'origine végétale, notamment celles du palmier dattier et des algues marines, comme renfort dans un mortier cimentaire.

L'objectif est d'évaluer leur influence sur les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau. Ce travail s'inscrit dans une démarche de développement de matériaux écologiques, visant à valoriser des ressources renouvelables et à proposer des alternatives durables dans le domaine de la construction.

1.5.1 Les fibres de palmier dattier :

Le palmier dattier est un ancien arbre fruitier, cultivé dans le monde depuis des siècles, s'acclimatant aux conditions maximales d'aridité dans le monde et représentant la source essentielle vitale de la population saharienne [40]

Le palmier dattier a un tronc très élancé (Stipe), haut jusqu'à 30 m, clairement recouvert par les gaines (Pétiole) des feuilles (Palme) tombées et de tissu (Lif) entourant le

Les palmes sont réunies en forme d'une couronne en un nombre de 20 à 30 au maximum. Un ensemble de régimes (Grappe) aux fruits sont suspendus sous la couronne de palmes dispersée [41]. La figure 2.5 présente les différentes parties d'une palme mûre.

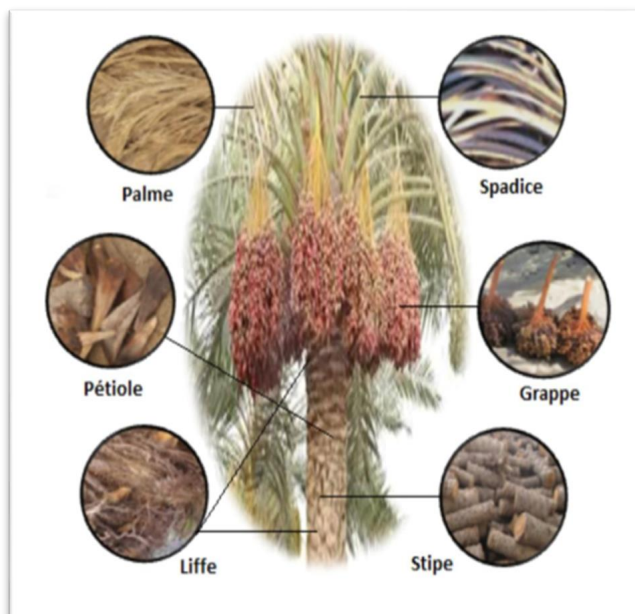


Figure 2.5 : Différentes parties d'un palmier dattier [73].

Après traitement ou manipulation mécanique, ces nappes peuvent être désassemblées afin d'obtenir des fibres élémentaires, dont le diamètre est compris entre 0,1 et 0,8 mm.

Figure 2.6 : Les étapes d'extraction des fibres du palmier dattier.



1.5.2 Les fibres des algues marines :

Les algues sont des espèces végétales aquatiques primitives qui vivent naturellement dans nos plans d'eau. Ces organismes sont, contrairement aux plantes aquatiques, dépourvus de véritables feuilles, tiges et racines. La majorité des algues ne contiennent pas de corps et glissent entre les doigts lorsqu'on tente de les prendre [42]. Les algues sont des organismes photosynthétiques que l'on retrouve dans les milieux aquatiques d'eau douce ou marine, ainsi que dans de nombreux milieux terrestres. Elles comprennent 20 000 à 30 000 espèces dans le monde, soit 18% du règne végétal [43].

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 d'Aïn Témouchent.



Figure 2.7 : Fibres des algues après la collecte et séchage.

2. Méthodes d'essais :

Dans le cadre de la caractérisation des matériaux utilisés, un ensemble d'essais expérimentaux a été conduit au sein du laboratoire de matériaux de génie civil d'Aïn Témouchent.

Ces essais ont été réalisés conformément aux procédures et normes en vigueur, afin de déterminer les propriétés physiques et mécaniques des différents constituants.

Cette étape est essentielle pour évaluer leur comportement et assurer une meilleure compréhension de leur influence sur les performances globales du matériau étudié.

2.1 Les masses volumiques :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme on distingue le volume absolu et le volume apparent.

2.1.1 La masse volumique apparente des granulats et ciment :

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume, sans y compris les pores et les vides. L'essai de détermination de la masse volumique apparente est réalisé selon la norme (NF EN 1097-3) [43].

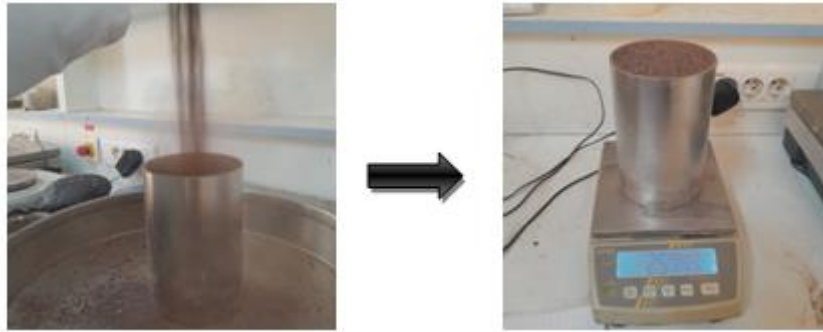


Figure 2.8 : La masse volumique apparente.

La masse volumique apparente est égale :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} = \frac{m1+m2+m3}{3} \times \frac{1}{V}$$

➤ Avec :

ρ_{app} : masse volumique apparente (g/cm³)

M : masse de l'échantillon de granulats (g)

V : volume du récipient utilisé pour la masse (cm³)

Tableau 2.3 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente.

Matériaux	Sable	Ciment	Pouzzolane (0/3)
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.62	1.03	1.29

2.1.2 La masse volumique absolue :

La masse volumique absolue est la masse d'un corps par unité de volume, y compris les vides et les pores. L'essai est défini par la norme (NF EN 1097-3) [43].



Figure 2.9 : La masse volumique absolue des granulats et ciments.

La formule de calcul :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Tableau 2.4 : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue.

Matériaux	Sable	Ciment	Pouzzolane (0/3)	Fibres dattiers	Fibres des algues
Masse volumique apparente (g/cm ³)	2.6	2.85	2.68	0.66	0.8

2.2 Equivalent de sable :

L'essai est défini par la norme (P 18-597) [45] Appelé aussi essai de mesure de propreté, l'objectif de cet essai est de mettre en victoire la proportion des fines dans un sable et son aptitude à être utilisé dans les applications de génie civil. La réalisation de l'essai nous indique la propreté des sables entrant dans la formulation des bétons.



Figure 2.10 : Equivalent de sable.

La formule de calcul :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

- La hauteur h1 : sable propre + éléments fins.
- La hauteur h2 : sable propre seulement.

Tableau 2.5 : Résultats de l'essai de l'équivalent de sable.

Matériaux	Sable
Equivalent de sable	77.67

Le sable étudié présente un niveau de propreté satisfaisant, caractérisé par une faible présence de particules fines argileuses. Étant de nature siliceuse et d'origine marine, ce matériau a subi un traitement préalable en laboratoire, conformément aux normes en vigueur, afin d'éliminer les impuretés indésirables.

Ainsi, il peut être considéré comme apte à une utilisation en génie civil, sans risque d'altérer les performances du mélange.

2.3 Analyse granulométrique des granulats :

L'analyse granulométrique définit par la norme (NF P 18-560) [46] Permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. Les tamis utilisés pour l'analyse de sable et la pouzzolane (0/3), sont : (0,08 ; 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 3.15 ; 5,0).



Figure 2.11 : Analyse granulométrique des granulats (série des tamis).

- **Module de finesse :**

Définit par la norme (XP P 18-540) [47], Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5mm.

Lorsque M_f est compris entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.2 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

- Dans notre cas :

$$M_f = \frac{1.04 + 7.01 + 18.76 + 51.28 + 92.31 + 95.864}{100}$$

$M_f = 2.66$ Donc c'est un sable préférentiel.

2.3.1 L'analyse granulométrique du sable :

La masse de l'échantillon (M_1) = 1000g.

Tableau 2.6 : Analyse granulométrique par tamisage du sable.

Ouverture du tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	RC (%)	TC (%)
5	10.4	10.4	1.04	98.96
3.15	16.1	26.5	2.65	97.35
2.5	43.6	70.1	7.01	92.99
1.25	117.5	187.6	18.76	81.24
0.63	325.2	512.8	51.28	48.72
0.315	410.3	923.1	92.31	7.69
0.16	35.54	958.64	95.864	4.136
0.08	19.68	978.5	97.85	2.15
Fond	21.37	999.87	99.987	0.013
Module de finesse : $M_f = 2.66$				

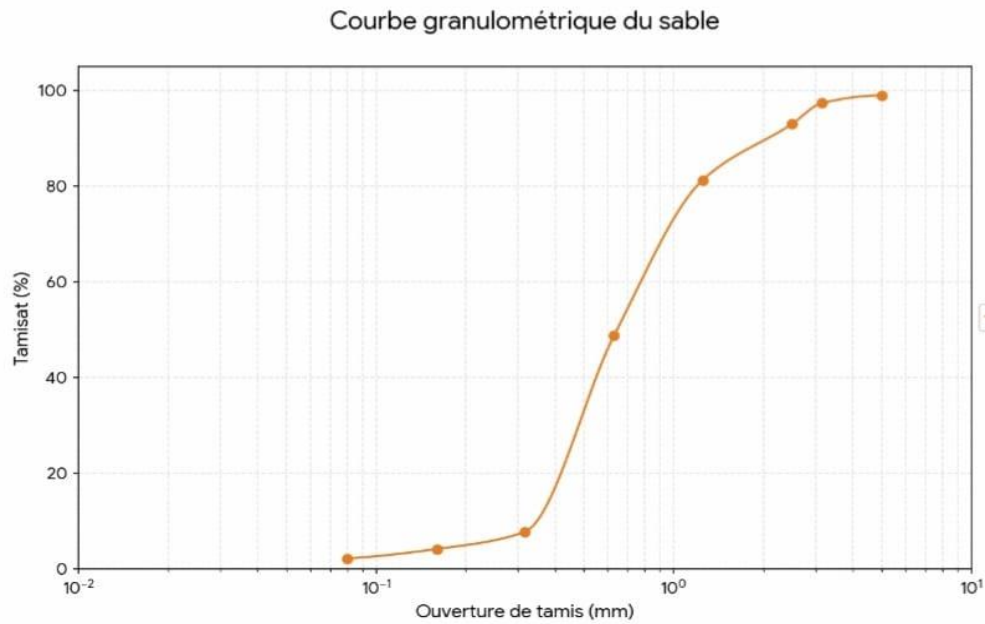


Figure 2.12 : Courbe granulométrique du sable.

2.3.2 L'analyse granulométrique de la pouzzolane (0/3) :

Tableau 2.7 : Analyse granulométrique par tamisage de la pouzzolane (0/3).

Ouverture du tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	RC (%)	TC (%)
5	0	0	0	100
3.15	0.58	0.58	0.058	99.942
2.5	27.93	28.51	2.851	97.149
1.25	214.85	243.36	24.336	75.664
0.63	236.52	479.88	47.988	52.012
0.315	237.73	717.61	71.761	28.239
0.16	70.44	788.05	78.805	21.195
0.08	137.42	925.47	92.547	7.453
Fond	74.5	999.97	99.997	0.003

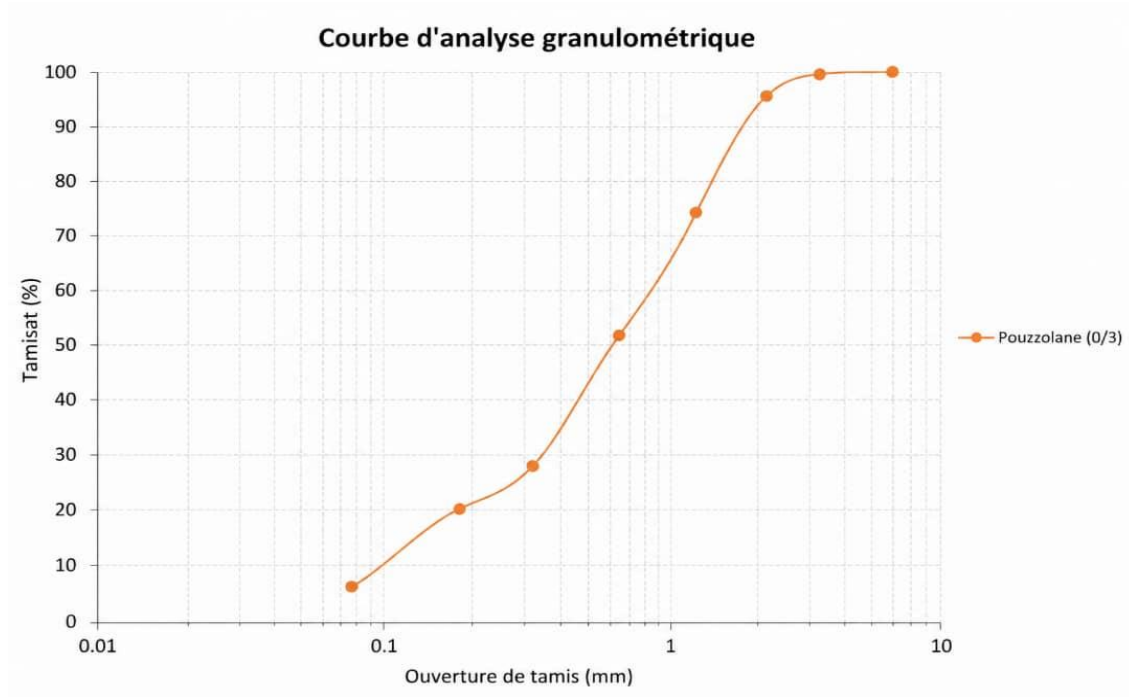


Figure 2.13 : Courbe granulométrique de la pouzzolane (0/3).

2.4 Consistance et temps de prise du ciment :

2.4.1 Essai de consistance du ciment :

La consistance normale caractérise la propriété rhéologique des pâtes. Elle est déterminée par la méthode décrite par la norme NFP.15.402 et consiste en la détermination de la quantité d'eau qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesé pour obtenir une pâte ciment dite normale.

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Il y a deux types d'essai, qui permettent d'apprécier cette consistance [48].

- L'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN 196-3.
- L'essai d'écoulement au cône, conformément à la norme NF P-18-358.

La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement, dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée "consistance Vicat".



Figure 2.14 : Essai de consistance avec appareil de Vicat.

- Si $d = 6 \pm 1 \text{ mm}$, la pâte sera à la consistance normale.
- Si $d \leq 5 \text{ mm}$, la pâte est trop mouillée.
- Si $d \geq 7 \text{ mm}$, la pâte est trop ferme (il n'y a pas assez d'eau).

Pour l'obtention de la consistance normalisée (On commence notre expérience avec un rapport de masse $E/C = 0.28$ pour avoir une pâte de consistance normalisée

Tableau 2.8 : Résultats de l'essai de consistance du ciment.

E/C	E (g)	C(g)	D (mm)	Commentaire
0,28	140	500	6=6mm	La pâte est à la consistance normale

2.4.2 Essai de temps de prise du ciment :

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après quelques heures. Il est donc nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : Le début de prise et la fin de pris.

Tableau 2.8 : Résultats de l'essai de temps de prise du ciment.

CEM II/A 42.7	
Début de prise (heure)	2h 11min
Fin de prise (heure)	1h 45 min

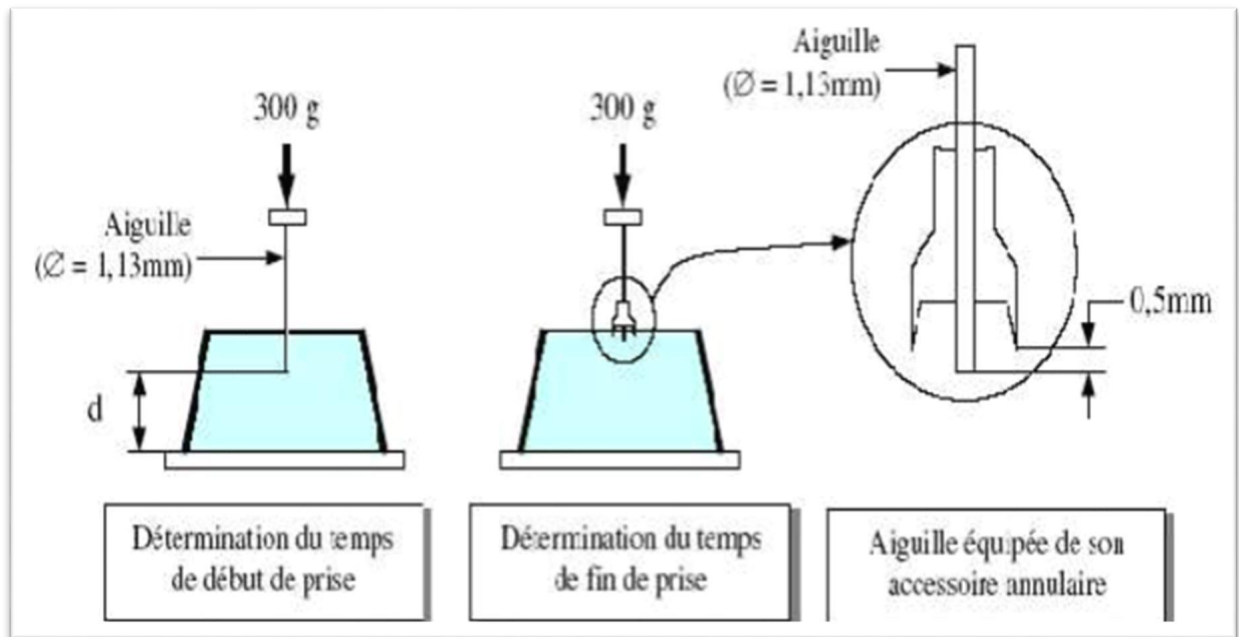


Figure 2.15 : Détermination du temps de début et de fin de prise [74].

3. Traitement des fibres végétales :

Malgré les divers avantages des fibres naturelles, il existe certains inconvénients qui doivent être résolus pour de meilleures propriétés physico-chimiques et mécaniques, par exemple :

L'hydrophile des fibres (absorption de l'humidité), la faible résistance mécanique, la basse stabilité thermique et en particulier la mauvaise compatibilité avec des matrices hydrophobes.

Dans le but d'améliorer leurs différentes propriétés, quatre catégories de traitements sont développées :

3.1 Les catégories des traitements :

3.1.1 Les traitements physiques :

Il existe de nombreux traitements physiques, par exemple : ébullition des fibres avec ou sans pression, traitement aux ultrasons, traitement thermique, traitement par plasma (plasma thermique, froid ou non équilibré), photo-oxydation par éclairage UV, l'explosion de vapeur, rayonnement ionisant, traitement laser, traitement par ozone, traitement sous décharge Corona (couronne) et plasma à pression atmosphérique viennent d'être utilisés pour éliminer l'incohérence de différents substrats [49,50,51].

3.1.2 Les traitements chimiques :

Il existe différents types de traitements chimiques qui ont été pris en compte dans des travaux précédents reportés dans la littérature à savoir :

L'utilisation des solutions telles que les alcalins, isocyanate, cyanoéthylation, permanent de silane, acétylation, peroxyde, organo-silane, vinyle greffé, chlorure de benzoyle, styrène, alcoxy-silane, processus de : blanchiment, mercerisation et déparaffinages traités en utilisant d'autres agents de couplage. Les traitements chimiques des fibres améliorent la liaison hydrogénée intermoléculaire entre les fibres, ce qui limite généralement la dispersion des fibres dans la matrice polymère [51,52].

De plus, ces traitements avec des concentrations et temps adéquats permettent une augmentation considérable des propriétés mécaniques des fibres [53,54].

3.1.3 Les traitements physico-chimiques :

Les traitements physico-chimiques sont ceux qui combinent des traitements physiques, tels que le traitement thermique, ultrasons ou l'explosion de vapeur...etc. avec des traitements chimiques pour favoriser les réactions chimiques afin d'obtenir une meilleure séparation des faisceaux de fibres [50, 55,56].

3.1.4 Les traitements biologiques :

Il y a de nombreuses techniques et traitements biologiques tels que le traitement avec des bactéries, traitement avec des nanofibres de nanocellulose ou de cellulose et récemment un nouveau traitement biologique a été développé dans lequel des enzymes spécifiques sont appliquées pour éliminer les composants non cellulosiques de la surface des fibres [57,58].

3.2 Traitement des fibres de palmier dattier :

Avant leur utilisation dans les composites cimentaires, les fibres de palmier dattier doivent subir certaines opérations de préparation afin d'améliorer leurs caractéristiques physiques et mécaniques.

Les fibres sont tout d'abord triées puis découpées manuellement en segments de 2 à 4 cm de longueur.

Elles sont ensuite nettoyées à l'eau pour enlever les poussières, les particules indésirables ainsi que les substances organiques pouvant affecter leur adhérence avec la pâte cimentaire.

Après cette étape, les fibres sont séchées à l'air libre ou dans une étuve à température modérée afin de diminuer leur humidité et d'assurer une meilleure stabilité. Après on va faire un traitement alcalin à l'aide d'une solution de NaOH est également utilisé pour améliorer la surface des fibres et favoriser l'interaction entre les fibres et la matrice.



Figure 2.16 : Les étapes de traitement des fibres de palmier dattier.

3.3 Traitement des fibres d'algues marines :

Les fibres provenant des algues marines nécessitent également une phase de traitement avant leur incorporation dans les matériaux composites.

Dans un premier temps, les algues sont lavées soigneusement à l'eau douce pour éliminer les sels marins, les sables et les différentes impuretés accumulées.

Après le nettoyage, elles sont découpées en fibres de 2 à 4 cm de longueur puis mises à sécher dans des conditions contrôlées afin d'éviter toute détérioration de leur structure. Une fois sèches, les fibres peuvent être utilisées directement où subir un léger broyage selon les dimensions recherchées.

Afin d'améliorer leur comportement dans les composites cimentaires, certains traitements physiques ou chimiques sont appliqués pour limiter l'absorption d'eau, améliorer leur résistance et augmenter leur compatibilité avec la matrice cimentaire.



Figure 2.17 : Les étapes de traitement des fibres d'algues marines.

3.4 Traitement alcalin :

La majorité des traitements connus (acétylation, benzylation...) sont précédés par un prétraitement dans une solution alcaline. Les fibres sont traitées avec une solution de NaOH (10%) durant une heure. Elles sont ensuite lavées avec de l'eau pour éliminer l'excès de NaOH. Le dernier lavage se fait avec de l'eau distillée contenant un peu d'acide acétique, les fibres sont séchées à l'air. Ce traitement améliore les caractéristiques adhésives de la surface des fibres en éliminant les impuretés naturelles et artificielles [59].



Taha et al [60] ont traité les fibres de palmier dattier dans une solution de soude (2% à 5%) à 23°C pendant 2, 4, 6 et 24h pour l'incorporation dans des composites à base de polymères.

Cette modification a permis un lavage des impuretés de surface des fibres et d'une partie des hémicelluloses qui influe sur les propriétés d'absorption notamment celle de l'humidité. En effet, la réduction des hémicelluloses dans ces fibres réduit la capacité d'absorption d'eau dans la fibre [60].

Pour optimiser l'interface fibre de lin/résine polyester insaturé dans des composites, Balnois et al [61] ont traité les fibres de lin par des traitements successifs : à base de soude (10g/l), d'anhydride acétique et d'acide formique. La modification apporte une augmentation des propriétés d'adhésion entre la fibre et la matrice polymère. De plus, le traitement des fibres de lin par ce procédé rend la surface des fibres plus lisse et diminue sa rugosité [61]. Joshy et al [62] ont traité les fibres d'Isora par 1% d'une solution alcaline à 30°C pendant 4h pour les

utiliser comme renfort dans une matrice polyester. Les propriétés mécaniques des composites formés sont meilleures avec les fibres traitées qu'avec les fibres employées à l'état brut. Le traitement alcalin des fibres d'Isora donne naissance à un matériau composite avec des modules E' et E'' élevés. De plus, le taux en fibres traitées dans le composite peut atteindre 66% en volume pour seulement 45 % dans le cas des fibres non traitées [62].

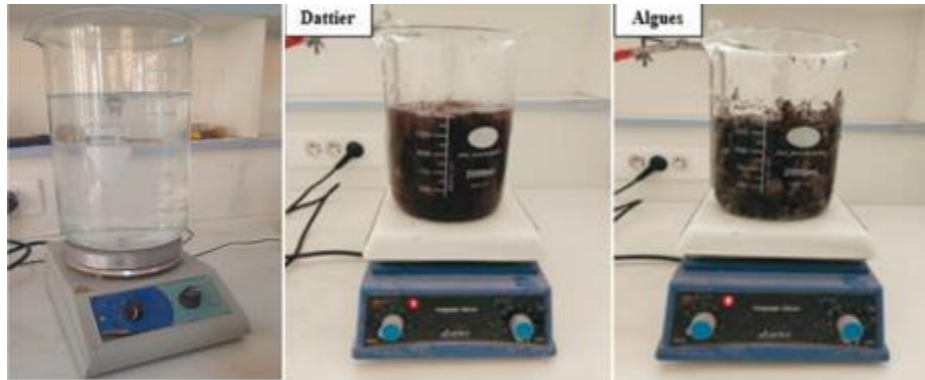


Figure 2.18 : Traitement alcalin (NaOH).

4. Formulation et préparation des mortiers :

4.1 La composition des mortiers :

Cette expérimentale présente la méthode de fabrication des échantillons de mortier composés de pouzzolane, ciment et fibres végétales. La formulation des mortiers utilisés dans cette étude repose sur l'optimisation du squelette granulaire à partir des constituants principaux, notamment la pouzzolane et le ciment, afin d'assurer une compacité élevée du mélange tout en conservant une bonne ouvrabilité. Pour évaluer les performances mécaniques des différents mélanges, les essais ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm³. Les quantités pour une moule dans chaque éprouvette de $4 \times 4 \times 16$ cm (256 cm³).

L'étude expérimentale porte sur quatre types de mortiers se distinguant par la nature des ajouts incorporés, les fibres de palmier dattier et les fibres d'algues marines. Pour chaque formulation, la résistance mécanique a été déterminée à partir de la moyenne de trois essais effectués sur trois éprouvettes aux échéances de 7, 14 et 28 jours.

Par ailleurs, le rapport eau/ciment (E/C) a été maintenu constant à 0,5 dans le but de limiter son influence sur les résultats expérimentaux et de mieux mettre en évidence l'effet des différents ajouts ainsi que leurs proportions sur le comportement du mortier. La composition détaillée des différentes formulations est présentée dans les **tableaux (2.9) et (2.10)**.

Tableau 2.9 : Quantités des constituants pour 3 éprouvettes de mortier témoin.

Formulation	Ciment (g)	Sable (g)	Fibres d'algues (g)	L'eau
F01 (témoin)	450	1350	0	225

Tableau 2.10 : Les quantités des constituants pour 3éprouvettes de mortier.

Formulation	Ciment (g)	Sable (g)	Pouzzolane (g)	Fibres dattier (g)	Fibres d'algues (g)	L'eau	L'adjuvant (%)
F02	450	0	1440.8	0	0	328.3	0
F03	450	0	1234.9	50.68	0	328.3	2%
F04	450	0	1234.9	0	61,44	328.3	2%
F05	450	0	926.2	76.03	61.44	328.3	2%

4.2 Préparation des mortiers :

La préparation des mortiers constitue une étape déterminante du protocole expérimental, car la qualité du malaxage et du moulage conditionne directement la microstructure du matériau final. Cette phase repose sur la transition d'un mélange granulaire hétérogène (liant, pouzzolane et fibres végétales) vers une pâte homogène capable de développer des propriétés mécaniques et thermiques spécifiques.

L'approche adoptée ici suit les prescriptions de la norme **NF EN 196-1**, tout en intégrant des ajustements méthodologiques liés à la forte porosité de la pouzzolane et à la nature hydrophile des constituants végétaux. Les étapes détaillées ci-après décrivent le processus de pesée, de malaxage et de mise en moule, garantissant la représentativité des éprouvettes pour les essais de caractérisation ultérieurs.

4.2.1 Pesage des composants du mortier :

La pesée transforme la formulation théorique en réalité matérielle. Dans un premier temps nous avons pesés individuellement tous les composants du mortier pour chaque formulation du **tableau (2.10)**.

Matériel : Balance électronique de précision (0,1 g).

Procédure :

- Chaque constituant (Ciment, Pouzzolane, Sable, Algues, Fibres) est pesé dans des récipients propres et secs.
- **L'eau :** Elle doit être pesée en dernier pour limiter l'évaporation.
- **Cas du Mortier Végétal :** On pèse séparément les fibres dattier et les algues. Si un adjuvant (plastifiant) est utilisé pour compenser l'absorption d'eau des fibres, il est pesé et mélangé directement à l'eau de gâchage.



Figure 2.19 : Pesage des composants du mortier.

4.2.2 Malaxage des composants du mortier :

Le malaxage est réalisé avec un malaxeur normalisé pour garantir une répartition uniforme des fibres et une bonne hydratation du ciment.

➤ **Pour le Mortier de Référence (Sable + Ciment) :**

- Verser l'eau, puis le ciment dans la cuve.
- Malaxer à vitesse lente pendant 30 s.
- Ajouter le sable régulièrement pendant les 30 s suivantes.
- Passer à vitesse rapide pendant 30 s.
- Arrêter pour racler les parois (90 s).
- Malaxer à vitesse rapide pendant 60 s.

Tableau 2.11 : Opération pour déterminer le mortier normal (témoin).

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction de sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30s	30s	30s	15s	1min15s	60s
Etat de malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide

➤ **Pour le Mortier Végétal (Pouzzolane + Fibres + Algues) :**

- Mélange à sec (Crucial) : Introduire le ciment, la pouzzolane, les fibres dattier et les algues. Malaxer à vide pendant 1 min pour disperser les fibres et éviter les amas (grumeaux).
- Introduction de l'eau : Ajouter l'eau progressivement tout en malaxant à vitesse lente pendant 1 min.
- Homogénéisation : Passer en vitesse rapide pendant 2 min. La porosité de la pouzzolane nécessite un temps de malaxage légèrement plus long pour forcer la pâte de ciment à pénétrer dans les pores du granulat.



Figure 2.20 : Les étapes du malaxage du mortier.

4.2.3 Remplissage des Éprouvettes (Moulage) :

On utilise des moules prismatiques de $4 \times 4 \times 16$ cm.

- Préparation : Les moules sont nettoyés et enduits d'une fine couche d'huile de décoffrage.
- Première couche : Remplir le moule à moitié.

- Serrage : Placer le moule sur une table vibrante (pendant 30 à 60 s) ou appliquer 60 chocs. Cela permet d'éliminer l'air emprisonné par les fibres et d'assurer une bonne compacité.
- Deuxième couche : Remplir jusqu'à déborder légèrement.
- Vibration finale : Répéter l'opération de serrage.
- Arasage : À l'aide d'une règle métallique, araser l'excédent de mortier par un mouvement de va-et-vient pour obtenir une surface plane et lisse.



Figure 2.21 : Remplissage d'éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³.

4.2.4 Démoulage et conservation des éprouvettes :

Après le remplissage des moules et le compactage du mortier, les éprouvettes ont été laissées au repos pendant 24 heures à température ambiante afin d'assurer une prise initiale adéquate.

Les éprouvettes ont ensuite été démoulées avec précaution pour éviter toute détérioration pouvant influencer les résultats des essais.

Après le démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans une eau saturée en chaux afin d'assurer de bonnes conditions de cure et de favoriser les réactions d'hydratation du ciment ainsi que les réactions pouzzolaniques. Cette méthode de conservation permet également de maintenir un milieu alcalin favorable à la stabilité des fibres incorporées dans le mortier.

Les éprouvettes ont été conservées jusqu'aux échéances des essais, réalisés à 7 jours, 14 jours et 28 jours, afin d'étudier l'évolution des propriétés mécaniques du mortier en fonction du temps de cure.



Figure 2.22 : Les éprouvettes après démoulage et conservation.

5. Caractérisation expérimentale des mortiers :

5.1 Les essais à l'état frais :

5.1.1 Essai de maniabilité : étalement à la table à secousses :

La maniabilité du mortier s'est mesurée sur la table à secousse. Selon la norme EN12-358, cet essai d'étalement est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du mortier à s'étaler par écoulement.

L'essai est exécuté sur une table à laquelle on peut imprimer des secousses verticales à l'aide d'une manivelle (Figure 2.21).

Un cône de dimensions ($D_0 = 10 \text{ cm}$; $d_0 = 7 \text{ cm}$; $h = 6 \text{ cm}$) a été rempli en deux couches.

Après chaque couche nous avons donné 10 coups avec la tige de piquage.

On démoule ensuite, sur la table, le cône et on la soumet à une série de 15 secousses, en suite on mesure le diamètre d'étalement "d".



Figure 2.23 : Mesure de l'étalement.

5.2 Les essais à l'état durci des mortiers :

5.2.1 Essai de résistance à la flexion :

Après la période de conservation dans l'eau (trois éprouvettes pour chaque formulation) les éprouvettes sont retirées puis laissées à l'air libre afin de sécher naturellement à température ambiante.

Cette étape permet d'éliminer l'excès d'humidité présent à la surface des éprouvettes avant la réalisation des essais mécaniques.

Le séchage naturel est effectué dans des conditions normales de laboratoire, sans recours à un chauffage artificiel, jusqu'à l'obtention d'un état de surface sec.

Après ça on a fait L'essai de flexion qui effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm afin d'évaluer le comportement du mortier sous l'effet des efforts de flexion.

Ensuite, elles sont placées sur les appuis de la machine d'essai et soumises à une charge progressive appliquée au centre de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

La valeur de la résistance à la flexion est déterminée à partir de la charge maximale supportée par l'éprouvette avant rupture. Le résultat final retenu pour chaque formulation correspond à la moyenne des trois mesures obtenues.

$$\bullet \quad R_f = \frac{1,5FL}{b^3} \dots\dots\dots \text{Eq1}$$



Figure 2.24 : Appareil de l'essai de la flexion.

5.2.2 Essai de résistance à la compression :

Après l'essai de flexion, chaque éprouvette rompue est divisée en deux demi-éprouvettes identiques.

Ces dernières sont ensuite soumises à un essai de résistance à la compression afin d'évaluer leur comportement mécanique sous l'effet d'une charge de compression croissante. Cet essai permet de déterminer la capacité du mortier à résister aux efforts de compression avant la rupture.

Chaque demi-éprouvette est soigneusement placée entre les plateaux de la presse de compression, de manière à assurer une bonne répartition de la charge appliquée. La charge est ensuite appliquée progressivement et de façon continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La valeur maximale de la charge enregistrée au moment de la rupture est utilisée pour calculer la résistance à la compression.

Pour chaque formulation de mortier, plusieurs essais sont réalisés afin d'obtenir des résultats plus fiables et représentatifs.

La résistance à la compression est déterminée à partir de l'équation 2, qui permet de calculer la contrainte maximale supportée par l'éprouvette en fonction de la charge appliquée et de la surface de compression ; Les résultats obtenus permettent ensuite de comparer les performances mécaniques des différentes formulations de mortier étudiées.

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \dots \dots \dots \text{Eq2}$$

- **R_c** : la résistance à la compression
- **F_c** : charge de rupture en (N)
- **b²** : épaisseur de l'éprouvette est égale 40



Figure 2.25 : Appareil de l'essai de la compression.



Figure 2.26 : Essai de résistance à la compression.

5.2.3 Essai d'Ultrasons :

L'essai ultrasonique constitue une méthode non destructive utilisée pour apprécier la qualité et l'homogénéité des éprouvettes de mortier ou de béton sans les détériorer. Cette technique permet également d'évaluer indirectement la compacité et la résistance du matériau à partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.

- **Principe de l'essai :**

Le principe de cette méthode repose sur la transmission d'ondes ultrasoniques longitudinales à travers l'échantillon. Le temps nécessaire à l'onde pour parcourir une distance connue est mesuré à l'aide de deux transducteurs : un émetteur et un récepteur.

La vitesse de propagation des ondes dépend des caractéristiques internes du matériau. Plus le mortier est dense et homogène, plus la vitesse mesurée est élevée, ce qui indique généralement une meilleure résistance mécanique et une faible présence de défauts internes tels que les fissures ou les vides.

- **Représentation de l'appareil Utilisé :**

L'équipement employé pour réaliser l'essai ultrasonique comprend principalement :

- un générateur d'impulsions électriques ;
- une paire de transducteurs (émetteur/récepteur) ;
- un dispositif électronique permettant la mesure du temps de propagation ;
- un amplificateur et un écran d'affichage numérique ;
- un barreau d'étalonnage servant à vérifier la précision de l'appareil avant les mesures.



Figure 2.27 : Appareil d'auscultation sonore « Ultrason ».

- **Mode Opérateur :**

Pour effectuer l'essai ultrasonique, les étapes suivantes doivent être respectées :

- ✓ S'assurer que les piles de l'appareil sont bien installées et en bon état.
- ✓ Relier les deux transducteurs à l'appareil à l'aide des câbles, sans tenir compte du rôle émetteur ou récepteur.
- ✓ Mettre l'appareil sous tension en utilisant l'interrupteur de démarrage.
- ✓ Sélectionner une zone de mesure propre, lisse et exempte de fissures.
- ✓ Étaler une légère couche de gel couplant sur les surfaces des transducteurs afin d'assurer un bon contact.
- ✓ Positionner les deux sondes sur la surface à contrôler en exerçant une pression suffisante.
- ✓ Déplacer légèrement les transducteurs tout en gardant le contact jusqu'à l'obtention d'une valeur stable et minimale.
- ✓ Relever les résultats affichés puis refaire les mesures sur plusieurs points de l'éprouvette pour garantir la fiabilité des résultats.



Figure 2.28 : Essai d'Ultrason.

5.2.4 Essai de la conductivité Thermique :

La conductivité thermique c'est une grandeur physique qui quantifie la faculté d'un matériau à conduire plus ou moins la chaleur. Les coefficients de conductivité thermique sont souvent appelés « Lambda » et notés λ .

Lorsque deux surfaces d'un objet présentent une différence de température, un flux de chaleur apparaît entre ces deux surfaces. Ce flux permet d'égaliser plus moins rapidement la température de ces dernières. La quantité de chaleur qui passe d'une face à l'autre par unité de temps dépend notamment de deux paramètres : de l'amplitude de la différence de température et de la distance en mètre entre les deux parois.

Un matériau sera considéré comme conducteur s'il a une conductivité thermique élevée. À l'inverse on appellera matériaux isolants des matériaux pour lesquels le λ faible. La conductivité thermique est une propriété physique qui ne varie que faiblement avec la température.

Elle appelée également conductance thermique, représente l'aptitude d'un matériau à transférer la chaleur. Cette caractéristique dépend principalement de la nature du matériau ainsi que de la température à laquelle il est soumis. Elle correspond au coefficient reliant le flux de chaleur au gradient de température à travers le matériau.

- **L'objectif de l'essai :**

Permet d'évaluer le comportement thermique du matériau ainsi que son aptitude à assurer l'isolation thermique.

- **Mode Opératoire :**

- ✓ Après le séchage des échantillons, les laisser au repos pendant une durée de 24 heures.
- ✓ Réaliser deux trous dans l'échantillon, de 2 mm de diamètre et de 1 cm de profondeur.
- ✓ Injecter une petite quantité de colle à l'intérieur des trous réalisés.
- ✓ Mettre l'appareil en marche.
- ✓ Introduire les connecteurs dans les deux trous préparés.
- ✓ Démarrer la mesure puis relever les valeurs affichées par l'appareil.



Figure 2.29 : Essai de mesure la conductivité thermique.

5.2.5 Essai d'absorption capillaire :

Les essais de capillarité ont été effectués conformément aux exigences de la norme NF P 18-555. Afin d'assurer une absorption d'eau dans une seule direction, les faces latérales des éprouvettes ont été recouvertes d'un revêtement imperméable.

Avant le début de l'essai, les échantillons ont été séchés dans une étuve à une température de 60 °C jusqu'à obtention d'une masse constante.

Après refroidissement à l'air libre, ils ont été pesés à l'aide d'une balance de précision de 0,01 g pour déterminer leur masse sèche initiale notée M_0 .

Par la suite, les éprouvettes ont été disposées sur une couche de gravier placée dans des bacs en plastique contenant une faible quantité d'eau. Le niveau d'immersion a été maintenu entre 2 et 3 mm afin de permettre l'absorption capillaire.

À chaque intervalle de temps prévu, les échantillons ont été retirés de l'eau, essuyés délicatement avec du papier absorbant pour éliminer l'eau superficielle, puis pesés afin de déterminer leur masse à l'instant t , notée M_t .

- **Le Principe d'essai :**

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est mesuré sur des éprouvettes de mortier prismatiques, dans les conditions prescrites, à la pression atmosphérique.

Après séchage jusqu'à masse constante, une face de l'éprouvette est immergée dans 5 mm à 10 mm d'eau pendant une durée spécifique. On détermine alors l'augmentation de la masse.



Figure 2.30 : Essai d'absorption d'eau par capillarité des échantillons.

L'absorption est mesurée à partir de l'expression suivante :

$$C_a = \frac{M_x - M_0}{A} \dots \dots \dots \text{Eq3}$$

Ou :

- **M_x** : Masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg).
- **M₀** : Masse initiale de l'éprouvette (kg).
- **A** : la section de l'éprouvette (m²).

5.2.6 Essai d'Observation microscopique :

L'observation microscopique des fissures (ou analyse fractographique) permet d'identifier l'origine et le mode de propagation d'une rupture (fatigue, choc, fragilisation, etc.).

Elle se réalise généralement après une analyse visuelle en combinant différentes techniques selon l'échelle et la nature du matériau.

L'essai d'observation microscopique des fissures dans le mortier permet d'analyser la morphologie (largeur, profondeur), l'origine (thermique, mécanique) et le réseau de propagation du matériau.

Il s'appuie sur deux techniques principales : le microscope optique et le Microscope Électronique à Balayage.

- **Le principe d'essai :**

Après la réalisation des essais de compression, certaines éprouvettes ont présenté des fissures visibles à leur surface, Ces éprouvettes fissurées ont ensuite été conservées puis soumises de nouveau au chauffage.

Après cette étape, elles ont été retirées et observées à l'aide d'un microscope afin d'examiner l'évolution et la propagation des fissures au sein du matériau.



Figure 2.31 : Appareil microscope de mesure pour le suivi de la propagation des fissures.

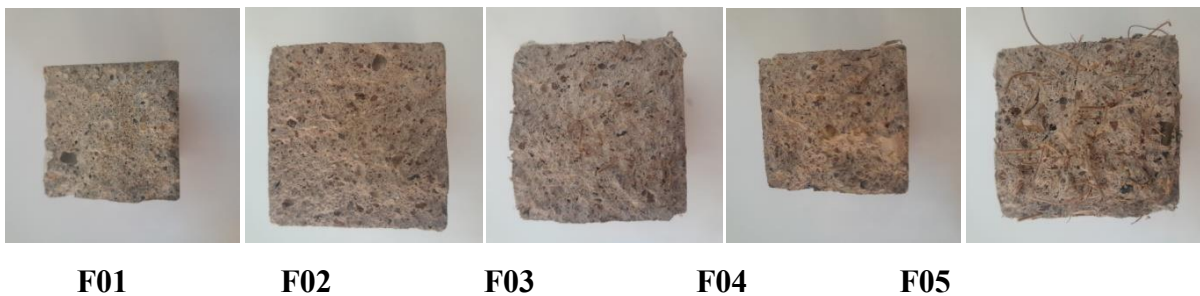


Figure 2.32 : Surface de rupture des différentes éprouvettes (F1-F5) sélectionnées pour une analyse microstructurale par microscopie.

- L'observation des fissures à 7j :

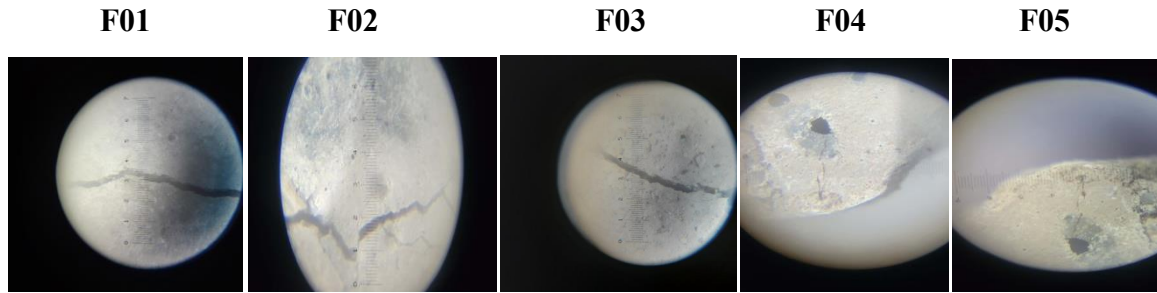


Figure 2. 33 : Observation microscopique de l'évolution des fissures dans le mortier à 7jours des différentes formulations.

- L'observation des fissures à 14j :

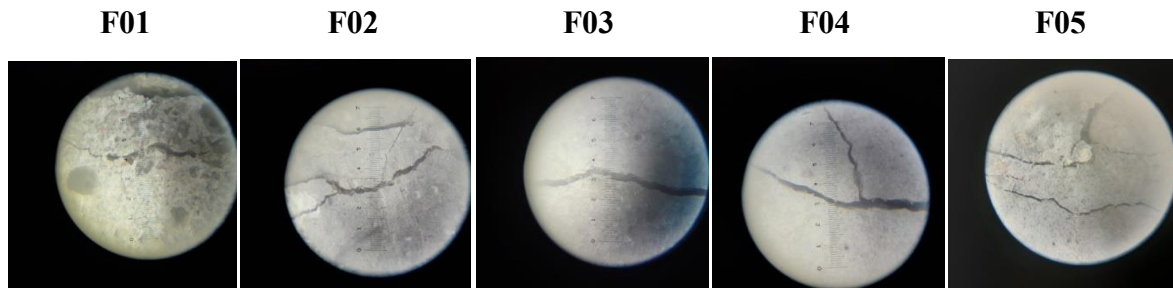


Figure 2.34 : Observation microscopique de l'évolution des fissures dans le mortier à 14jours des différentes formulations.

- L'observation des fissures à 28j :

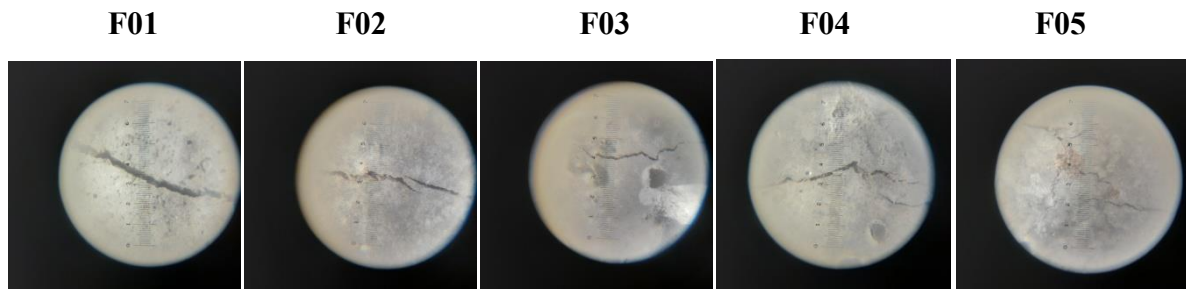


Figure 2.35 : Observation microscopique de l'évolution des fissures dans le mortier à 28jours des différentes formulations.

Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a été consacré à la présentation et à la caractérisation des matériaux utilisés dans la formulation des mortiers.

Les différentes étapes de préparation, notamment le mélange, la mise en forme, le séchage ainsi que les méthodes de traitement appliquées aux fibres végétales, ont été décrites en détail afin d'assurer une bonne compréhension de la démarche expérimentale adoptée.

Une attention particulière a été portée aux fibres naturelles, telles que les fibres de palmier dattier et d'algues, dont l'intégration vise à améliorer les propriétés des composites élaborés.

Les différents essais réalisés à l'état frais et à l'état durci ont permis d'évaluer les performances physiques, mécaniques, thermiques et acoustiques des matériaux étudiés.

L'ensemble de cette étude expérimentale permettra ainsi de mieux comprendre l'influence des fibres végétales sur le comportement des mortiers composites et d'identifier les formulations les plus performantes pour des applications potentielles dans le domaine du bâtiment, notamment en matière d'isolation et de durabilité.

Chapitre 03 :
Résultats et discussions.

Introduction :

Le mortier renforcé par des fibres végétales est considéré comme un matériau composite constitué de deux composants hétérogènes : le mortier et les fibres végétales. Les propriétés et les performances de ce matériau dépendent de plusieurs paramètres essentiels, notamment la composition du mortier de base, le dosage ainsi que les dimensions des fibres incorporées.

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus à partir des différents essais réalisés sur les mortiers étudiés. Les essais effectués à l'état frais portent principalement sur la maniabilité et le taux d'air occlus.

Par ailleurs, des essais ont été menés sur les mortiers à l'état durci afin d'évaluer leurs propriétés mécaniques et physiques, notamment la résistance à la flexion, la résistance à la compression, l'essai aux ultrasons, la conductivité thermique ainsi que l'absorption capillaire du matériau. Tous ces essais ont été réalisés conformément aux procédures expérimentales décrites dans le chapitre 2.

Les résultats obtenus après 7, 14 et 28 jours font l'objet d'une analyse détaillée accompagnée de discussions et d'interprétations des différents paramètres étudiés. Cette étude permet également de comparer les performances des mortiers renforcés par des fibres avec celles du mortier témoin sans fibres.

1. Essais à l'état frais de mortier :

Tableau 3.1 : Type de la formulation de mortiers.

Formulations	F01	F02	F03	F04	F05
Types	Témoin	70 % Pouzzolane	60% pouzzolane 10% fibres dattiers	60% pouzzolane 10% fibres algues	45%pouzzolane 15% f.dattiers 10% f.d'algues

1.1 Maniabilité :

Le temps d'écoulement du mortier permet d'évaluer sa consistance. Plus ce temps est faible, plus le mortier présente une bonne fluidité et une meilleure maniabilité, comme le montre le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Résultats d'essai de maniabilité.

Types de formulation	Temps d'écoulement (s)	Classe de consistance
F01 (témoin)	12.80	Très plastique
F02	13.50	Très plastique
F03	15.70	Très plastique
F04	15.10	Très plastique
F05	17.90	Très plastique

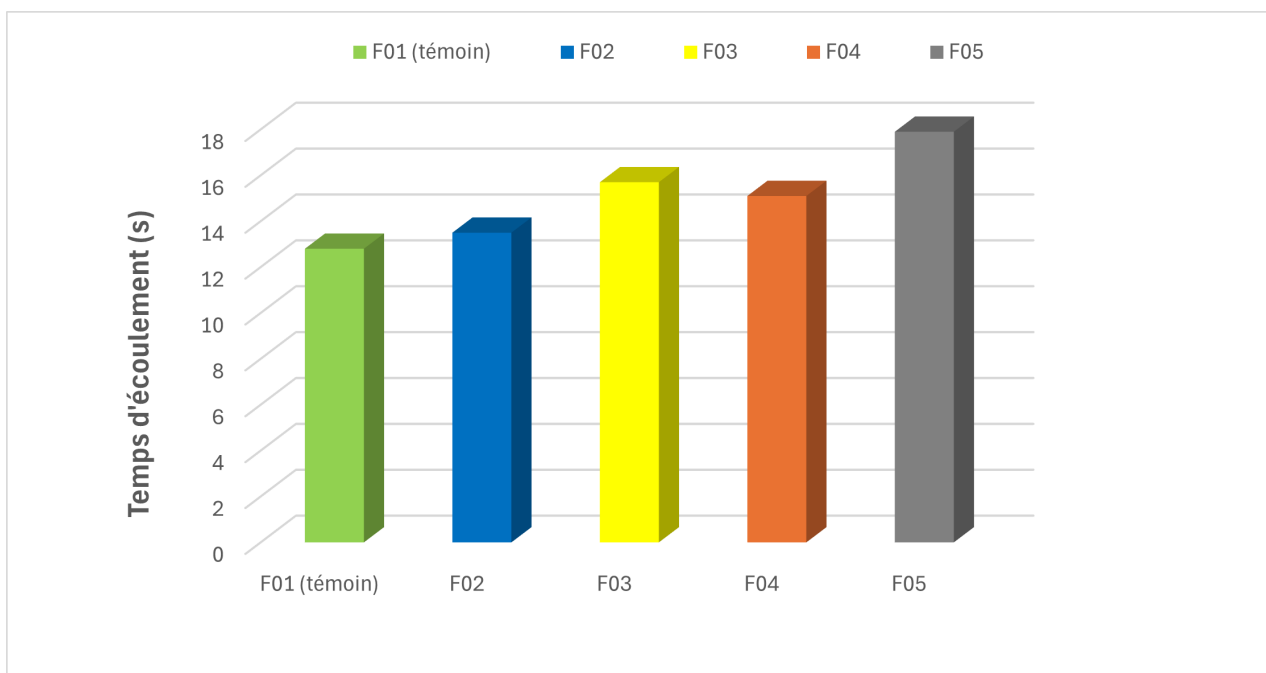


Figure 3.1 : Evolution de la maniabilité des différents mortiers étudiés.

On observe une augmentation progressive du temps d'écoulement avec l'incorporation de la pouzzolane et des fibres végétales. La formulation témoin présente le temps d'écoulement le plus faible, tandis que la formulation 5 contenant simultanément des fibres de dattier et des fibres d'algues enregistre la valeur la plus élevée. Cette augmentation est liée à la capacité d'absorption d'eau des fibres et à l'accroissement des frottements internes dans le mortier. Toutefois, toutes les formulations restent classées comme « très plastiques ».

2. Essais à l'état durci de mortier :

2.1 Résistance à la flexion :

Tableau 3.3 : Résistance à la flexion.

Types	Résistance à la flexion (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
F01 (témoin)	3.98	4.69	6.56
F02	3.05	3.98	5.16
F03	3.52	4.22	4.69
F04	2.34	3.52	3.98
F05	3.05	3.75	4.45

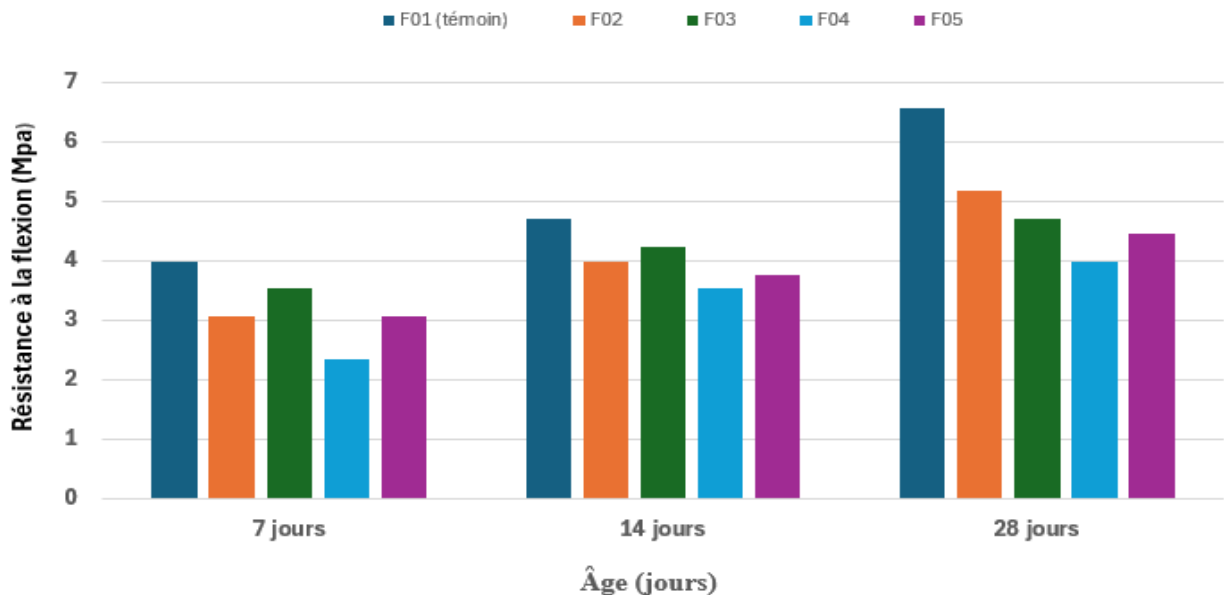


Figure 3.2 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers.

2.2 Résistance à la compression :

Tableau 3.4 : Résistance à la compression.

Types	Résistance à la compression (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
F01 (témoin)	15.44	17.81	21.44
F02	11.31	12.81	18.06
F03	10.75	13.12	16.69
F04	11.56	12.87	14.81
F05	10.81	12.31	13.25

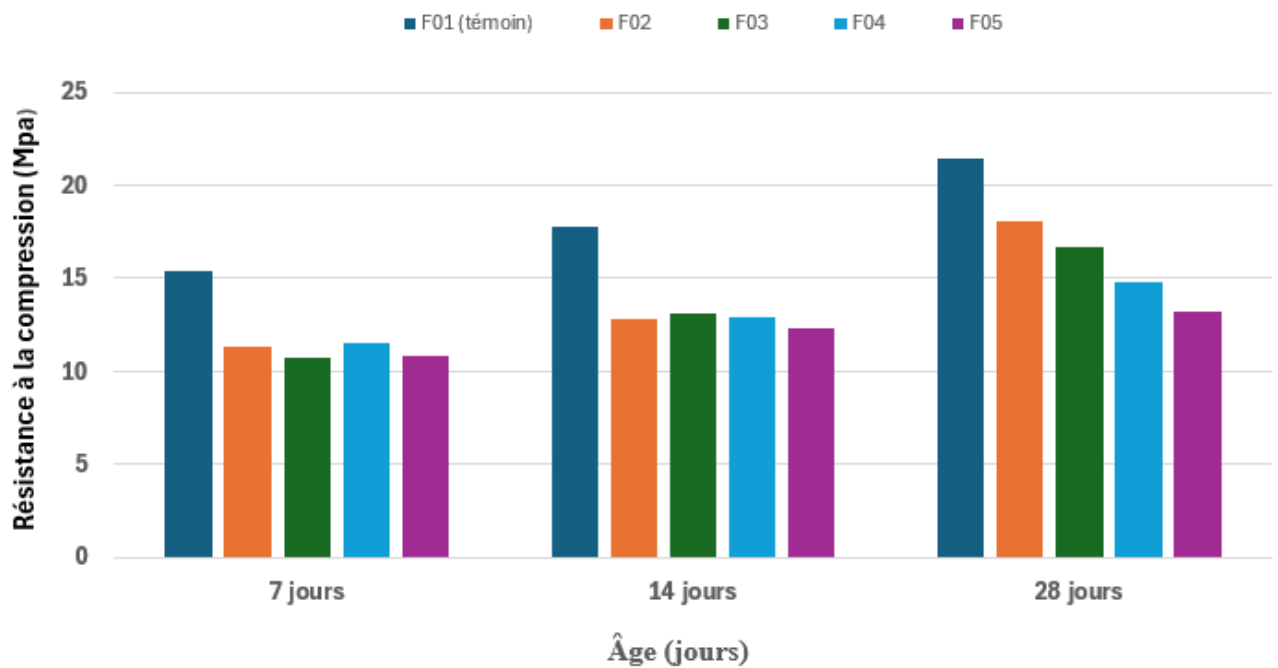


Figure 3.3 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers.

Les résultats obtenus montrent que, pour l'ensemble des formulations étudiées, les résistances à la flexion et à la compression évoluent de manière croissante avec l'augmentation de l'âge de cure. Cette progression est attribuée au développement continu des produits d'hydratation du ciment, entraînant une amélioration progressive de la cohésion et de la compacité de la matrice cimentaire.

Par ailleurs, il a été observé que les formulations contenant des fibres dattiers présentent globalement de meilleures performances mécaniques que celles incorporant uniquement les algues marines. Ce comportement traduit une meilleure interaction entre les fibres dattiers et la matrice cimentaire, favorisant ainsi une transmission plus efficace des efforts.

En revanche, la formulation combinant les deux types de fibres présente des résistances intermédiaires, inférieures à celles contenant uniquement les fibres les plus performantes. Cela peut s'expliquer par une répartition moins homogène des fibres et par un effet de déséquilibre dans l'interaction fibre-matrice, ce qui influence légèrement la compacité du matériau.

De manière générale, les résultats mettent en évidence que les performances mécaniques des mortiers sont fortement influencées à la fois par l'âge de cure et par la nature des fibres incorporées.

2.3 Essai d'Ultrasons :

Tableau 3.5 : Résultats d'essai d'Ultrasons.

Types	Vitesse (m/s)		
	7 jours	14 jours	28 jours
F01 (témoin)	3902	4087	4140
F02	3104	3113	3220
F03	2830	3017	3191
F04	2661	2742	2982
F05	2799	2963	3069

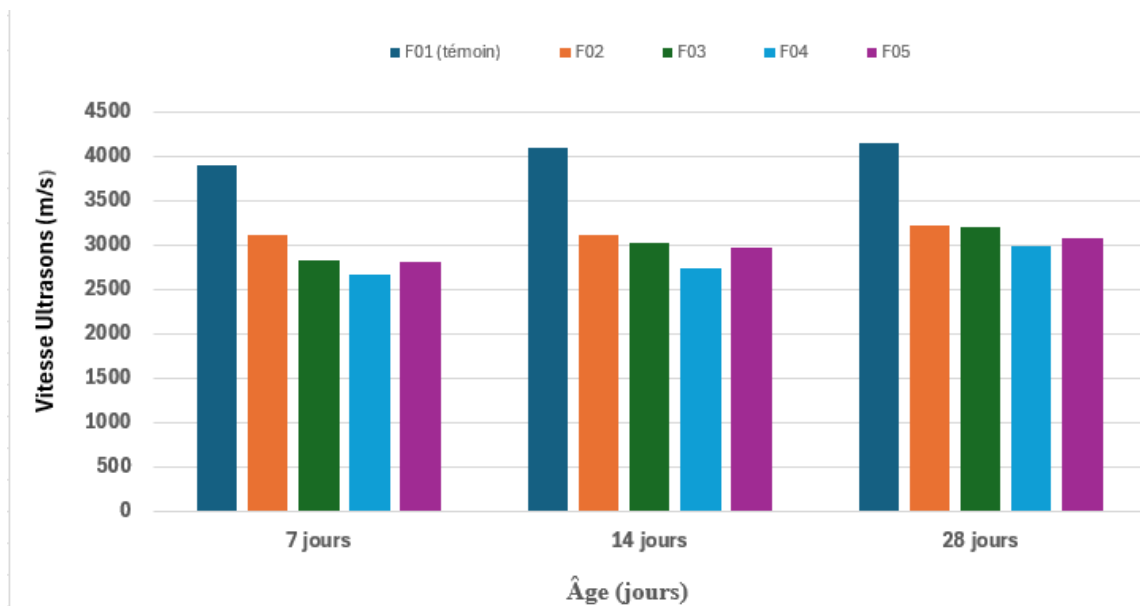


Figure 3.4 : L'Évolution de la vitesse des vagues d'onde des mortiers.

L'analyse des résultats des essais aux ultrasons montre une augmentation progressive des vitesses de propagation avec l'âge de cure pour l'ensemble des formulations étudiées, traduisant la densification continue de la matrice cimentaire grâce aux réactions d'hydratation.

Les résultats indiquent également que le mortier témoin présente les vitesses ultrasonores les plus élevées, ce qui reflète une meilleure compacité et une structure plus homogène en comparaison avec les mortiers incorporant des fibres végétales.

Par ailleurs, il a été observé que les formulations contenant uniquement des fibres de dattier présentent des vitesses ultrasonores plus élevées que celles contenant uniquement des algues marines. Cette différence peut être attribuée à une meilleure interaction entre les fibres de dattier et la matrice cimentaire, ainsi qu'à une porosité plus limitée au sein de la structure.

En revanche, les formulations à base d'algues marines présentent des vitesses plus faibles, ce qui peut être lié à une plus grande discontinuité interne et à une absorption d'eau plus importante affectant la compacité du matériau.

D'une manière générale, les résultats montrent que la vitesse ultrasonore est influencée à la fois par l'âge de cure et par la nature des fibres incorporées, avec une performance plus favorable pour les fibres de dattier.

2.4 Essai de mesure la conductivité thermique :

Tableau 3.6 : Résultats d'essai de la conductivité thermique à l'âge de 28 jours.

Type de formulation	T (°c)	K (w/m. k)	C (MJ/m ³ . K)	D (mm ² /s)	Rho (°c.cm/w)
F01 (témoin)	23.05	1.074	1.740	0.617	93.13
F02	22.49	0.436	1.882	0.232	229.2
F03	23.09	0.440	1.144	0.384	227.4
F04	23.08	0.408	1.778	0.220	245.1
F05	24.30	0.483	2.359	0.205	207.1

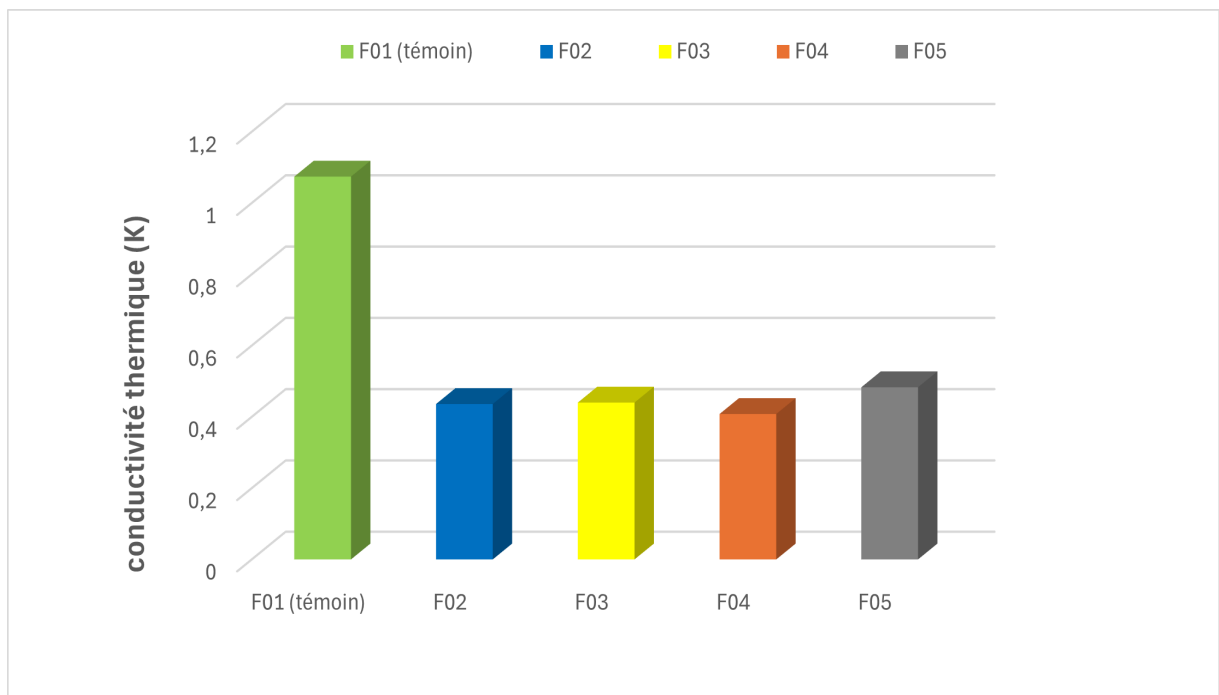


Figure 3.5 : Variation de la conductivité thermique des échantillons à 28 jours.

L'analyse des résultats à 28 jours révèle que l'incorporation des fibres végétales dans les mortiers entraîne une diminution de la conductivité thermique, ce qui améliore leur capacité d'isolation. Cette amélioration est principalement due à l'augmentation de la porosité et à la présence de vides créés dans la matrice cimentaire par les fibres, réduisant ainsi le transfert de chaleur. Les résultats montrent également que les performances thermiques varient selon le type de fibres et leur combinaison, ce qui souligne l'importance de la formulation. Globalement, l'utilisation de fibres végétales permet d'obtenir des mortiers plus isolants et plus performants sur le plan énergétique, tout en valorisant des matériaux naturels et durables.

2.5 Essai d'absorption capillaire :

Tableau 3.7 : Coefficient d'absorption d'eau dans un temps différent.

Le temps / Coefficient d'absorption d'eau (g/cm ²)	Les éprouvettes	T01	T02	T03	T04	T05
	Masse sèche (g)	504.1	431.5	418.6	409.5	392.9
	5 min	0.037	0.231	0.212	0.081	0.087
	10 min	0.05	0.319	0.325	0.144	0.125
	15 min	0.075	0.381	0.394	0.206	0.169
	20 min	0.081	0.519	0.456	0.269	0.231
	30 min	0.1	0.531	0.569	0.375	0.306
	60 min	0.143	0.794	0.756	0.506	0.45
	90 min	0.193	0.95	0.894	0.662	0.562
	2h	0.231	1.062	1.019	0.762	0.656
	3h	0.287	1.219	1.212	0.968	0.825
	4h	0.337	1.306	1.337	1.1	0.944

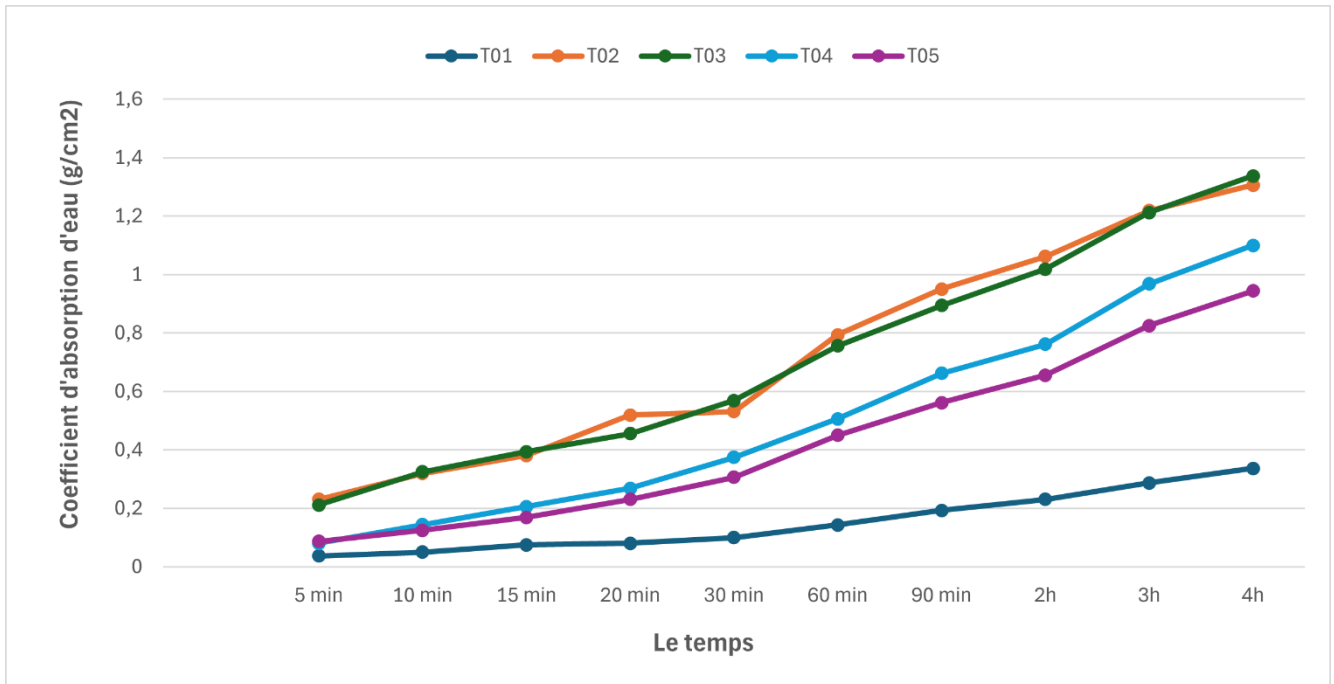


Figure 3.6 : Coefficient d'absorption des mortiers en fonction de temps après 28 jours.

L'analyse des résultats du coefficient d'absorption d'eau en fonction du temps montre une augmentation progressive pour l'ensemble des éprouvettes étudiées. Cette évolution traduit le phénomène de capillarité, caractérisé par la pénétration progressive de l'eau dans la porosité ouverte du matériau au cours du temps.

Les résultats mettent en évidence des différences significatives entre les formulations. Le mortier témoin présente les valeurs les plus faibles d'absorption, ce qui indique une porosité plus limitée et une structure plus compacte. À l'inverse, les mortiers contenant des fibres végétales présentent des coefficients d'absorption plus élevés, traduisant une augmentation de la porosité et une plus grande capacité d'absorption d'eau.

Par ailleurs, les variations observées entre les différentes formulations fibrées montrent que la nature des fibres influence directement le comportement hydrique du matériau. Certaines formulations présentent une absorption plus importante que d'autres, ce qui peut être attribué à une distribution non homogène des fibres et à la création de chemins préférentiels favorisant la pénétration de l'eau.

D'une manière générale, les résultats montrent que l'absorption d'eau augmente avec le temps et est fortement influencée par l'incorporation des fibres végétales, lesquelles modifient la structure poreuse du mortier et augmentent sa perméabilité.

Conclusion :

Les essais réalisés montrent que l'incorporation de la pouzzolane et des fibres végétales (dattier et algues marines) influence clairement les propriétés des mortiers. À l'état frais, les fibres réduisent la maniabilité en augmentant le temps d'écoulement, mais les mélanges restent faciles à mettre en œuvre grâce à leur consistance plastique.

À l'état durci, les résistances mécaniques augmentent avec l'âge de cure pour toutes les formulations, même si les mortiers fibrés restent légèrement moins résistants que le mortier témoin. Les fibres de dattier offrent de meilleures performances que celles d'algues marines. Les essais ultrasoniques confirment une structure plus poreuse dans les mortiers fibrés.

Sur le plan thermique, l'ajout des fibres permet de réduire la conductivité thermique, améliorant ainsi l'isolation. En revanche, l'absorption d'eau augmente à cause de la porosité plus importante.

En conclusion, la combinaison pouzzolane–fibres végétales permet d'obtenir des mortiers plus légers, plus isolants et globalement performants, malgré une légère baisse des propriétés mécaniques.

Conclusion générale.

Conclusion générale :

Ce travail a porté sur l'étude des mortiers composites renforcés par des fibres végétales, notamment les fibres de palmier dattier et les algues marines, afin d'évaluer leur influence sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du matériau.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation des fibres végétales modifie significativement le comportement global des mortiers.

À l'état frais, une augmentation du temps d'écoulement a été observée avec l'ajout des fibres et de la pouzzolane, traduisant une diminution de la maniabilité due à l'absorption d'eau et à l'augmentation des frottements internes.

À l'état durci, les essais mécaniques révèlent une amélioration progressive des résistances avec l'âge de cure pour l'ensemble des formulations. Toutefois, le mortier témoin présente systématiquement les performances mécaniques les plus élevées. L'ajout de fibres entraîne une diminution des résistances à la flexion et à la compression, attribuée à l'augmentation de la porosité et à la création d'interfaces fibre-matrice moins compactes.

Les essais non destructifs par ultrasons confirment ces résultats en montrant une réduction de la vitesse de propagation des ondes dans les mortiers fibrés, indiquant une compacité plus faible par rapport au témoin. De même, les essais thermiques montrent que les mortiers renforcés par fibres présentent une conductivité thermique plus faible, ce qui améliore leurs performances d'isolation thermique.

Par ailleurs, les essais d'absorption capillaire mettent en évidence une augmentation de l'absorption d'eau dans les mortiers fibrés, traduisant une porosité plus importante et une perméabilité accrue.

De manière générale, les résultats obtenus démontrent que l'incorporation des fibres végétales constitue une solution intéressante pour améliorer certaines propriétés spécifiques des mortiers, notamment l'isolation thermique, tout en entraînant une réduction des performances mécaniques. Le choix des formulations doit donc être optimisé en fonction de l'application visée.

Ainsi, ce travail confirme le potentiel des fibres végétales comme matériaux de renforcement écologiques dans le domaine du bâtiment, ouvrant la voie à des perspectives de développement de matériaux composites durables et performants.

Bibliographie.

Références bibliographiques :

- [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]. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill.
- [7]. Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. CRC Press.
- [8]. Aïtcin, P.-C. (2000). *Bétons haute performance*. Presses de l'Université de Sherbrooke.
- [9]. Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press.
- [10]. Baley C. (2013), "Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites". *Techniques de l'Ingénieur*, pp. 1-23
- [11]. Bledzki A.K., Gassan J. (1999), "Composites reinforced with cellulose based fibres". *Progress in Polymer Science*, Vol. 24, pp. 221-274.
- [12]. John MJ, Thomas S. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*. 2008 ;71(3) :343-64
- [13]. Stokke D. *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites* 2013.

- [14]. Do Thi VV. Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non: Université de Grenoble; 2011.
- [15]. Montiers Lpv-Ppe, alimentaires non azotés GVe, Paris (1980)
- [16]. Sharma NL, N.C. Dhuldhoya, S.U. Merchant and U.C., Merchant Lucid “Colloids Limited Jodhpur”-342005 R, India,2006
- [17]. FAO (2013). Date Palm Products. Food and Agriculture Organization.
- [18]. Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. CRC Press.
- [19]. Alawar, A., Hamed, A. M., & Al-Kaabi, K. (2009). “Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement.” Composites Part B
- [20]. Lobban, C. S., & Harrison, P. J. (1997). Seaweed Ecology and Physiology. Cambridge University Press.
- [21]. Graham, L. E., Graham, J. M., & Wilcox, L. W. (2016). Algae. Jones & Bartlett Learning.
- [22]. Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology. CRC Press
- [23]. Association Française de Normalisation. (1987). Textiles - Fibres et fils - Détermination de la masse commerciale d'un lot (NF G08-001-1). AFNOR
- [24]. Badji, C. (2017) « Vieillissement de matériaux composites renforcés de fibres naturelles : étude de l'impact sur les propriétés d'aspect et sur les émissions dans l'air intérieur ».
- [25]. M-GC.VOA-2019-11 : Effets des fibres végétales sur les propriétés physicomécaniques du béton
- [26]. 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.
- [27]. 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.
- [28]. 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.

- [29]. 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
- [30]. 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
- [31]. 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
- [32]. Sudin, R., & Swamy, N. (2006). Bamboo and wood fibre cement composites for sustainable infrastructure regeneration. *Journal of materials science*, 41, 6917-6924
- [33]. Fan, M., Ndikontar, M. K., Zhou, X., & Ngamveng, J. N. (2012). Cementbonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. *Construction and Building Materials*, 36, 135-140
- [34]. Zhou, X., Saini, H., & Kastiukas, G. (2017). Engineering properties of treated natural hemp fiber-reinforced concrete. *Frontiers in built environment*, 3, 33
- [35]. 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
- [36]. Kesikidou, F., & Stefanidou, M. (2019). Natural fiber-reinforced mortars. *Journal of Building Engineering*, 25, 100786
- [37]. Talavera-Pech, W. A., Montiel-Rodríguez, D., Paat-Estrella, J. D. L. A., LópezAlcántara, 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
- [38]. 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
- [39]. centre d'information sur le ciment et ces application ; « fiche technique : ciment et béton l'essentiel » ; collection cimbéton ; paris ; janvier 2005
- [40]. GUETTAF TEMAM, T., Modélisation du comportement mécanique des constituants du palmier dattier. 2017, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.

- [41]. Djoudi, T., Elaboration et caractérisation de composites bio-sourcés à base de fibres de palmier dattier. 2019, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [42]. Rivard-Sirois C. 2005 : Les algues. 732.
- [43]. LECLERC V. & FLOC'H J.Y. (2010). Les Secret des Algues. Editions Quae. Editions Quae. France.
- [44]. NF EN 1097-3, essais de détermination des masses volumiques apparentes et absolues des granulats. Aout 1998.
- [45]. P 18-597, essais de détermination de la propreté de sable « équivalent de sable ». Décembre 1990.
- [46]. NF P 18-560, essai d'analyse granulométrique des granulats. Septembre 1990.
- [47]. XP P 18-540, « granulats – définitions, conformité, spécifications ». Octobre 1997.
- [48]. Association française de Normalisation. (1963). Liants hydrauliques - Technique des essais – Pate normale (NF P15-402). Boutique AFNOR.
- [49]. M. Ramesh, C. Deepa, Processing of Green Composites, in: Subramanian Senthilkannan Muthu (Ed.), Green Composites Processing, Characterisation and Applications for Textiles, Springer, Singapore, 2019: pp. 47–72.
- [50]. M.A. Fuqua, S. Huo, C.A. Ulven, Natural fiber reinforced composites, Polymer Reviews, 52 (2012) 259–320.
- [51]. S. Mukhopadhyay, R. Figueiro, Physical Modification of Natural Fibers and Thermoplastic Films for Composites — A Review, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 22 (2009) 135–162.
- [52]. K. Jha, R. Kataria, J. Verma, S. Pradhan, Potential biodegradable matrices and fiber treatment for green composites: A review, AIMS Materials Science, 6 (2019) 119–138.
- [53]. S. Amroune, A. Bezazi, A. Belaadi, C. Zhu, F. Scarpa, S. Rahatekar, A. Imad, Tensile mechanical properties and surface chemical sensitivity of technical fibres from date palm fruit branches (*Phoenix dactylifera* L.), Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 71 (2015) 98–106.

- [54]. B. Abderrezak, A. Salah, F. Scarpa, Analyse statistique et effet des traitements chimique sur le comportement physico-mécanique des fibres des bras de grappe des palmiers dattier., *Rev. Sci. Technol., Synthèse*, 31 (2016) 108–120.
- [55]. A. Pietak, S. Korte, E. Tan, A. Downard, M.P. Staiger, Atomic force microscopy characterization of the surface wettability of natural fibres, *Applied Surface Science*, 253 (2007) 3627–3635.
- [56]. A.B. Thomsen, A. Thygesen, V. Bohn, K.V. Nielsen, B. Pallesen, M.S. Jørgensen, Effects of chemical-physical pre-treatment processes on hemp fibres for reinforcement of composites and for textiles, *Industrial Crops and Products*, 24 (2006) 113–118.
- [57]. A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu, A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications, *Journal of Materials Science*, 55 (2020) 829–892.
- [58]. T. Fatma, Surface Modification of Bast-Based Natural Fibers through Environment Friendly Methods, in: *Generation, Development and Modifications of Natural Fibers*, IntechOpen, 2020.
- [59]. Hamada, H., Ikuta, N., Nishida, N., Maekawa, Z. Effect of interfacial silane network structure on interfacial strength in glass fibre composites, *Composites*, 1994, v.25, p.512.
- [60]. Taha, I., Steuernagel, L., Ziegmann, G. Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.669-684.
- [61]. Balnois, E., Busnel, F., Baley, C., Grohens, Y. An AFM study of the effect of chemical treatments on the surface microstructure and adhesion properties of flax fibres. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.715-731.
- [62]. Joshy, M. K., Mathew, L., Joseph, R. Studies on interfacial adhesion in unidirectional isorafibre reinforced polyester composites. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.631-646

- [63]. Ritter S.K. (2008), "Lignocellulose: A Complex Biomaterial". Chemical & Engineering News, Vol. 86, p. 15.
- [64]. Le Moigne N, Otazaghine B, Corn S, Angellier-Coussy H, Bergeret A. Surfaces and Interfaces in Natural Fibre Reinforced Composites: Fundamentals, Modifications and Characterization: Springer; 2018.
- [65]. Kalia S. Lignocellulosic Composite Materials: Springer; 2017.
- [66]. Al-Oqla FM, Salit MS. 5 - Material selection of natural fiber composites. In: Al Oqla FM, Salit MS, editors. Materials Selection Alotaibi, M. D., et al. (2019).
- [67]. Dallel M. Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima* L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil: Université de Haute Alsace-Mulhouse; 2012.
- [68]. Kareem, A., et al. (2025). A Review on Date Palm Fiber as a Sustainable Reinforcement for Concrete Applications. International Journal of Concrete Structures and Materials
- [69]. Alotaibi, M. D., et al. (2019). Characterization of natural fiber obtained from different parts of date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.). International Journal of Biological Macromolecules, 135, 1121–1131.
- [70]. Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology. CRC Press
- [71]. Aleks.(2007). Récolte.,chanvre1.jpg [Photographie]. Wikimedia Commons.
- [72]. Dumona. (s.d.). Fibre de coco : ses avantages et sa fabrication.
- [73]. Y. Djebbloun, M. Hecini, T. Djoudi, and B. Guerira, "Experimental determination of elastic modulus of elasticity and Poisson's coefficient of date palm tree fiber," Journal of Natural Fibers, vol. 16, pp. 357-6-367, 2018.
- [74]. AFNOR, NF EN 196-3 : Méthodes d'essais des ciments — Détermination du temps de prise et de la stabilité, Association Française de Normalisation, Paris, France
- [75]. ACHOUR A. Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles: valorisation des plantes locales 2017
- [76]. Hambaba, L. (2020). Structure et Fonction des complexes formés avec des polysaccharides. [Support de cours Polyosides / Master Bioproduits], Département de

Biochimie et Microbiologie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Batna 2, Al,Algérie, pp. 12-15

[77]. P. Munier, le palmier dattier-techniques agricoles et productions tropicales. France : maisonneuve et larousse, 1973