

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : M^{elle} GOUASMIA Imene

Thème

**Revue systématique sur le renforcement des mortiers avec
des fibres naturelles : Synthèse des pratiques et des
perspectives d'application en Génie Civil**

Sous la direction de : Dr. BOUMAAZA Messaouda

Juin 2024



{ وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا }

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier le miséricordieux **ALLAH** pour m'avoir donné la force et le courage de réaliser ce modeste travail.

Mes remerciements les plus sincères vont à mon encadreur Docteur **BOUMAAZA Messaouda**, du Département Génie Civil de l'Université 8 Mai 1945 GUELMA, pour son aide précieuse, sa confiance, ses conseils avisés, ses encouragements et surtout la totale liberté pour laquelle m'a laissé à chaque étape de ce travail. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour sa disponibilité et pour tous les efforts qu'elle a déployés tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier tous les enseignants du département de génie civil.

Je remercie chaleureusement les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de l'évaluer.

Enfin, je tiens à remercier mes **Parents** pour leur soutien moral et affectif tout au long de ces années. Leur présence à mes côtés m'a été un véritable réconfort.

GOUASMIA Imene

DEDICACES

Avec l'aide du Dieu le tout-puissant, qui a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail humble et sérieux, que je dédie aux êtres les plus précieux du monde.

Je dédie ce mémoire à la lumière de mon cœur, à mes parents, qui sont la source de mon succès et qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes différents choix.

Mon cher père **Lotfi**, les mots ne suffisent pas pour exprimer mon amour et ma gratitude les plus profonds pour les innombrables sacrifices que vous avez fait pour mon éducation. Vous n'êtes pas simplement un enseignant, mais un modèle d'honnêteté, de sérieux et de responsabilité. Votre présence incarne pour moi l'essence de la persévérance, de la créativité et du dévouement sans limite.

Ma merveilleuse maman **Sabrina**, qui m'a donné la vie, l'amour et le courage de réussir, ses prières et ses bénédictions m'ont beaucoup aidé dans mes études, je ne peux pas exprimer pleinement l'amour et la gratitude que je ressens envers elle, son infinie tendresse m'apporte du réconfort à chaque instant, elle a toujours été à mes côtés, je la remercie pour sa présence rassurante et son amour inconditionnel, cela a vraiment été ma plus grande force.

« je prie pour que Dieu les bénisse et prolonge leur vie ».

À ma très chère grand-mère, bien-aimée **Houria**, que Dieu ait pitié d'elle. Tu as été une lumière dans ma vie, une source inépuisable d'amour, de sagesse et de réconfort.

Tes sourires ont illuminé mes jours et tes prières ont guidé mes pas. Je te remercie d'avoir été cette grand-mère exceptionnelle, toujours présente avec ta bienveillance et ton affection. Que Dieu t'accueille dans Son vaste Paradis et apaise ton âme. Tu resteras à jamais gravée dans mon cœur (Allah yarhamha wa yaskinha aljanna, Amin).

A ma chère grand-mère **Zohra**, toute ma gratitude pour son soutien,

Je dédie également ces mots à mon meilleur frère du monde, **Iyed**.

Tu es bien plus qu'un frère pour moi. Un confident et un ami qui a toujours su trouver les mots justes pour me remonter le moral et me redonner confiance en mes capacités.

Mes frères **Yahia** et **Khalil**, vous êtes mes rois. Je suis reconnaissante de partager avec vous ces moments. Je vous aime plus que tout et je vous dédie cela pour vous rappeler que vous êtes toujours dans mon cœur.

Je remercie mon cher fiancé **Taki Eddine Sahri**, qui a été mon pilier et mon encouragement pour terminer ce travail. Ton soutien inconditionnel et ta présence ont été ma plus grande motivation et ma Belle-mère **Nassima**.

A toute ma famille, mes tantes et mes oncles, **Radia, Nadia, Karima, Rafik, Malek et Walid**.

Je dédie également ces mots à mes plus chères amies **Yousra** et **Randa**, qui ont été mes confidentes et mon pilier dans les moments difficiles. Leur présence à mes côtés a rendu ce parcours plus doux.

A mes très chères amies particulières, que j'aime, **Anfel, Yousra, Sameh, Soundes, Ahlem, Chiraz, Maissa, Kamar** et **Nada**.

Je dédie également ces mots à tous ceux que je n'ai pas cité nommément, tout ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

« **Merci à tous du fond de mon cœur** »

GOUASMIA Imene

TABLE DES MATIERES

RESUME

ABSTRACT

ملخص

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE I METHODOLOGIE DE RECHERCHE

I.1	Introduction	3
I.2	Publications entre 1979 et Avril 2024	4
I.3	Journaux et auteurs les plus influents dans le domaine des RMFNs	4
I.3.1	Revue contributrices dans le domaine des RMFNs.....	4
I.3.2	Principaux auteurs contribuant dans le domaine des RMFNs	5
I.4	Principaux pays actifs dans le domaine.....	9
I.5	Mots-clés de recherche liés au RMFNs.....	10
	Conclusion	12

CHAPITRE II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES FIBRES NATURELLES

II.1	Introduction	13
II.2	Les fibres naturelles :	13
II.3	Les fibres végétales	14
II.3.1	Aperçu historique	14
II.3.2	Classification des fibres végétales	14
II.3.3	Présentation des différentes fibres végétales	15
II.3.4	Composition physique des fibres végétales	21
II.3.5	Composition chimique des fibres.....	23

II.4 Propriétés physiques et mécaniques	29
II.5 Extraction des fibres	29
II.5.1 Extraction mécanique.....	30
II.5.2 Extraction biologique.....	31
II.5.3 Extraction chimique	32
II.6 Traitements des fibres végétales	32
II.6.1 Traitement chimique	32
II.6.2 Traitement biologique	34
II.7 Qualité des fibres végétales disponibles en Algérie.....	35
II.8 Intérêt de l'utilisation des fibres naturelles	35
II.9 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites	36
II.10 Applications des fibres végétales	36
II.10.1 En construction	37
II.10.2 En automobile	37
II.10.3 En Infrastructure	37
II.10.4 Autres applications.....	37
Conclusion.....	38

CHAPITRE III
RENFORCEMENT DES MORTIERS AVEC LES FIBRES NATURELLES

III.1 Introduction	38
III.2 Propriétés de smortiers renforcés par des fibres naturelles	38
III.2.1 Propriétés mécaniques.....	38
III.2.2 Propriétés thermiques.....	39
III.2.3 Durabilité	41
III.3 Impact du traitement des fibres sur le renforcement des mortiers.....	44

III.3.1 Propriétés mécaniques.....	48
III.3.2 Propriétés thermiques.....	50
III.3.3 Durabilité	52
III.4 Discussion.....	54
III.4.1 Réduction de la densité du mortier	56
III.4.2 Amélioration de la porosité.....	56
III.4.3 Augmentation de la capacité d'absorption d'eau:	56
III.4.4 Impact sur les performances du mortier.....	57
III.5 Eco-construction des mortiers renforcés par des fibres naturelles	57
III.5.1 La performance énergétique :	58
III.5.2 La performance environnementale :	58
III.5.3 La performance sanitaire :.....	58
Conclusions	61
Conclusion générale	61

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Figure I. 1 : Méthodologie de recherche.	3
Figure I. 2 : Répartition par années.	4
Figure I. 3 : Les revues les plus productives dans le domaine des (RMFNs)	5
Figure I. 4 : Répartition géographique des publications.	9
Figure I. 5: Carte de visualisation des mots-clés.....	10

CHPITRE II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUE LES FIBRES NATURELLES

Figure II. 1 : Classification des fibres naturelles.....	13
Figure II. 2 : Plantes de chanvre.....	16
Figure II. 3 : Plante de Lin.	18
Figure II. 4 : Plante de coton.	19
Figure II. 5 : Plante de Kénaf.	19
Figure II. 6 : Plante de jute.....	20
Figure II. 7 : Plante de Sisal.	21
Figure II. 8 : Plante de Coco avec ces fibres.....	21
Figure II. 9 : Structure de la fibre végétale	22
Figure II. 10 : Modèle de description de la structure d'une fibre végétale	23
Figure II. 11 : La structure de la cellulose	25
Figure II. 12 : Association des polymères en microfibrilles.	26
Figure II. 13 : Structure moléculaire de l'hémicellulose	27
Figure II. 14 : Structure de la pectine	27
Figure II. 15 : Structure de la lignine	28
Figure II. 16 : Différentes techniques d'extraction des fibres végétales.....	30

Figure II. 17 : Gisement de fibres végétales en Algérie	35
---	----

CHAPITRE III

RENFORCEMENT DES MORTIERS AVEC LES FIBRES NATURELLES

Figure III. 1 : Absorption d'eau	41
Figure III. 2 : Effet des cendres de balle de riz sur la durabilité des composites de ciment renforcés par des fibres de sisal,.....	43
Figure III. 3 : (a) différentes doses de fibres de sisal qui donnent une résistance optimale à la compression et (b) amélioration moyenne de la résistance à la compression par des fibres de sisal traitées avec des matériaux pouzzolaniques et alcalins	48
Figure III. 4 : Résistance en compression et en traction	50
Figure III. 5 : Spectre infrarouge en mode ATR des fibres non traitées, prétraitées et traitées	51
Figure III. 6 : Comportement des fibres de sisal et de noix de coco vieilles dans des solutions alcalines et dans l'eau du robinet.	54
Figure III. 7 : Les trois aspects essentiels pour un bâtiment durable.	59
Figure III. 8 : Les matériaux respectueux de l'environnement.	60

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Tableau I. 1 : Principaux auteurs contribuant dans le domaine des RMFNs.	7
---	---

CHPITRE II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUE DES FIBRES NATURELLES

Tableau II. 1 : Classification des différentes parties de la plante.	15
Tableau II. 2 : Composition chimique des quelque fibres végétales	24
Tableau II. 3 : Coefficient d'absorption d'eau de différentes fibres végétales utilisée	29
Tableau II. 4 : les caractéristiques physico-mécaniques de quelques fibres végétales	29
Tableau II. 5 : Avantages / Inconvénients des fibres végétales.	36

CHAPITRE III RENFORCEMENT DES MORTIERS AVEC LES FIBRES NATURELLES

Tableau III. 1 : L'impact des fibres naturelles traité.	45
--	----

RESUME

La recherche dans le domaine du développement durable se concentre sur la production de matériaux de construction respectueux de l'environnement, notamment les matériaux composites. Les fibres végétales sont utilisées dans l'industrie de la construction pour renforcer les matériaux et améliorer leur résistance mécanique, ainsi que pour isoler thermiquement les bâtiments. Ces fibres offrent une alternative économique et écologique aux fibres synthétiques. Cette étude résume la recherche sur l'utilisation des fibres naturelles pour renforcer les mortiers dans la construction, sur la base d'une analyse bibliométrique de 297 publications publiées entre 1979 et avril 2024 dans la base de données Scopus. Une attention particulière a été accordée au traitement des fibres naturelles pour le renforcement. Les résultats indiquent que le traitement des fibres améliore non seulement l'adhérence des matériaux composites obtenus, mais aussi leur capacité à absorber l'eau, à réduire la conductivité thermique, augmentant ainsi leur durabilité. L'objectif de cette analyse est de guider les chercheurs vers des recherches plus approfondies dans ce domaine prometteur du renforcement du mortier à l'aide de fibres naturelles.

Mots Clés : Fibres naturelles, fibres végétales, traitement, renforcement, mortier cimentaire.

Abstract

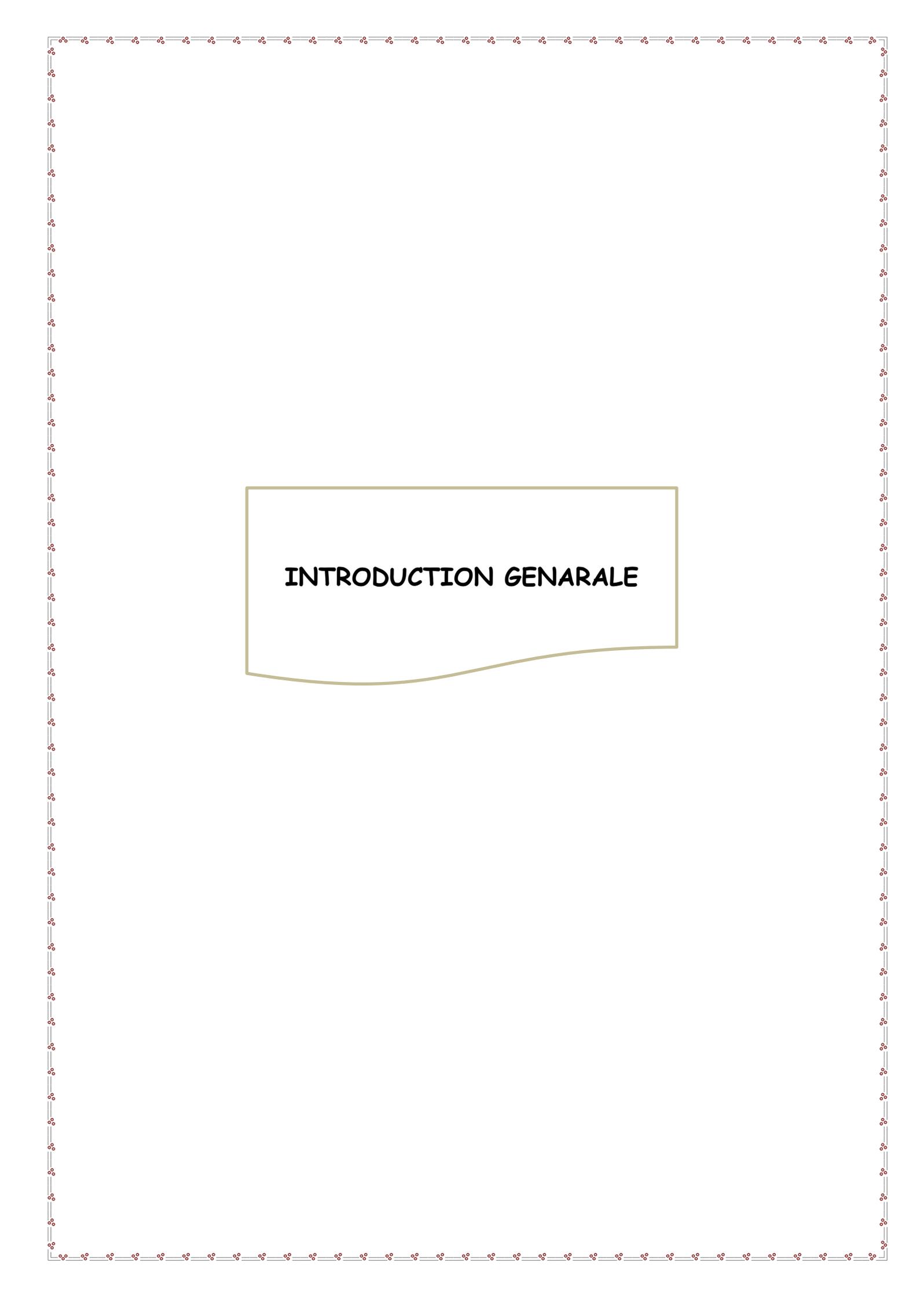
Research in the field of sustainable development focuses on the production of environmentally-friendly building materials, in particular composite materials. Plant fibers are used in the construction industry to reinforce materials and improve their mechanical strength, as well as to thermally insulate buildings. These fibers offer an economical and ecological alternative to synthetic fibers. This study summarizes research on the use of natural fibers to reinforce mortars in construction, based on a bibliometric analysis of 297 publications published between 1979 and April 2024 in the Scopus database. Particular attention was paid to the processing of natural fibers for reinforcement. The results indicate that fiber treatment not only improves the adhesion of the resulting composite materials, but also their ability to absorb water and reduce thermal conductivity, thereby increasing their durability. The aim of this analysis is to guide researchers towards further research in this promising field of mortar reinforcement using natural fibers.

Keywords : Natural fiber, plant fiber, treatment, reinforcement, cementitious mortar.

ملخص

يركز البحث في مجال التنمية المستدامة على إنتاج مواد بناء صديقة للبيئة، وخاصة المواد المركبة. وتستخدم الألياف النباتية في صناعة البناء والتشييد لتقوية المواد وتحسين قوتها الميكانيكية، وكذلك لتوفير العزل الحراري للمباني. وتوفر هذه الألياف بديلاً اقتصادياً وصديقاً للبيئة للألياف الاصطناعية. تلخص هذه الدراسة الأبحاث حول استخدام الألياف الطبيعية لتقوية الملاط في البناء، استناداً إلى تحليل ببليومتري لـ 297 منشورًا نُشر بين عامي 1979 وأبريل 2024 في قاعدة بيانات Scopus. تم إيلاء اهتمام خاص لمعالجة الألياف الطبيعية للتقوية. تشير النتائج إلى أن معالجة الألياف لا تحسن من التصاق المواد المركبة التي تم الحصول عليها فحسب، بل أيضاً قدرتها على امتصاص الماء وتقليل التوصيل الحراري، وبالتالي زيادة متانتها. والهدف من هذا التحليل هو توجيه الباحثين نحو إجراء المزيد من الأبحاث في هذا المجال الواعد لتقوية الملاط باستخدام الألياف الطبيعية.

كلمات مفتاحية: الألياف الطبيعية، الألياف النباتية، المعالجة، التسليح، الملاط الأسمنتي



INTRODUCTION GENARALE

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur de la construction est en perpétuelle évolution, cherchant constamment à améliorer les performances des matériaux tout en répondant aux exigences environnementales croissantes. Les matériaux composites sont largement employés dans les applications quotidiennes en raison de leur légèreté, de leur grande résistance mécanique, de leur résistance à la fatigue et de leur excellent comportement à haute température. Parmi les matériaux de construction les plus utilisés, les mortiers cimentaires occupent une place prépondérante en raison de leur facilité de mise en œuvre et de leurs propriétés mécaniques avantageuses. Cependant, ces mortiers présentent des limitations, notamment en termes de résistance à la fissuration et de durabilité face aux sollicitations mécaniques et environnementales.

Pour pallier ces insuffisances, l'incorporation de fibres dans les matrices cimentaires est une approche largement explorée. Traditionnellement, des fibres synthétiques, telles que les fibres de verre ou de polypropylène, sont utilisées pour renforcer les mortiers. Cependant, ces fibres présentent des inconvénients, notamment en termes de coût, d'empreinte carbone et de recyclabilité. Dans ce contexte, les fibres naturelles émergent comme une alternative prometteuse.

Les fibres naturelles, issues de ressources renouvelables telles que le lin, le jute, le sisal ou encore le coco, offrent des avantages notables. Elles sont non seulement économiques et écologiquement viables, mais possèdent également des propriétés mécaniques et physiques intéressantes pour le renforcement des matériaux cimentaires. L'incorporation de ces fibres dans les mortiers peut améliorer la résistance à la fissuration, augmenter la ténacité et prolonger la durabilité des structures tout en contribuant à une réduction de l'impact environnemental du secteur de la construction.

Ce renouveau d'intérêt pour les fibres naturelles s'inscrit dans une démarche globale de développement durable, visant à minimiser l'utilisation de ressources non renouvelables et à promouvoir des pratiques constructives plus respectueuses de l'environnement. La recherche sur le renforcement des mortiers cimentaires par les fibres naturelles explore non seulement les performances techniques des matériaux, mais aussi leur comportement à long terme et leur interaction avec la matrice cimentaire.

Ainsi, cette étude se propose d'examiner les différents types de fibres naturelles disponibles, leurs caractéristiques intrinsèques, et leur effet sur les propriétés mécaniques et durables des mortiers cimentaires. En mettant en lumière les potentialités et les défis associés à l'utilisation des fibres naturelles, elle vise à contribuer au développement de matériaux de construction plus performants et durables.

Le travail de recherche réalisé au cours de cette étude est présenté en trois chapitres :

Le premier chapitre consiste en une analyse des publications de la RMFNs entre 1979 et Avril 2024 afin de comprendre le contexte mondial de notre recherche. Cette analyse porte sur les domaines pour lesquels des études ont été menées, les auteurs les plus cités, les mots-clés les plus utilisés, les revues les plus citées et les pays qui ont contribué à cette étude. La visualisation des réseaux bibliométriques et l'expression des relations entre les éléments bibliographiques ont été explorées, mettant en évidence des groupes d'éléments liés dans différentes couleurs, fournissant une vue d'ensemble du domaine et identifiant les articles, les auteurs clés et les collaborations. Cette recherche vise à cartographier le domaine des RMFNs afin d'identifier les tendances clés et les dynamiques de collaboration.

Le deuxième chapitre aborde les différents types de fibres naturelles, leur disponibilité dans le monde entier, leur composition chimique, leur extraction, leur structure, leurs propriétés, leurs avantages et inconvénients et leurs domaines d'application.

Le dernier chapitre se focalise sur l'utilisation de composites à matrice cimentaire renforcés par des fibres végétales. Ce chapitre met en lumière les résultats des études menées sur les caractéristiques mécaniques, thermiques et de longévité des mortiers renforcés à partir de fibres naturelles, en mettant l'accent sur l'impact des divers traitements chimiques appliqués aux fibres utilisés.

CHAPITRE I

METHODOLOGIE DE RECHERCHE

I.1 Introduction

Cette étude vise à analyser de manière systématique les publications concernant le renforcement des mortiers cimentaires par les fibres naturelles (RMFNs), indexées dans la base de données Scopus, en utilisant des méthodes d'analyse de visualisation. La recherche examine de manière quantitative les publications sur les RMFNs entre 1979 et 2024 afin d'explorer de façon globale le paysage de la recherche sur ce sujet. Plus spécifiquement, cette investigation a suivi l'organigramme présenté dans la **Figure I.1**. L'analyse a porté sur les secteurs dans lesquels les recherches les plus mises en ligne, les auteurs les plus mentionnés ont été étudiés, l'association entre les auteurs, les mots-clés les plus fréquemment utilisés, les journaux les plus mentionnés, qui ont publié le plus d'articles de recherche sur le RMFNs, ainsi que la coopération entre les pays qui ont le plus contribué dans ce domaine de recherche. La visualisation du réseau a été illustrée à l'aide du logiciel VOSViewer, largement utilisé pour visualiser les réseaux bibliométriques.

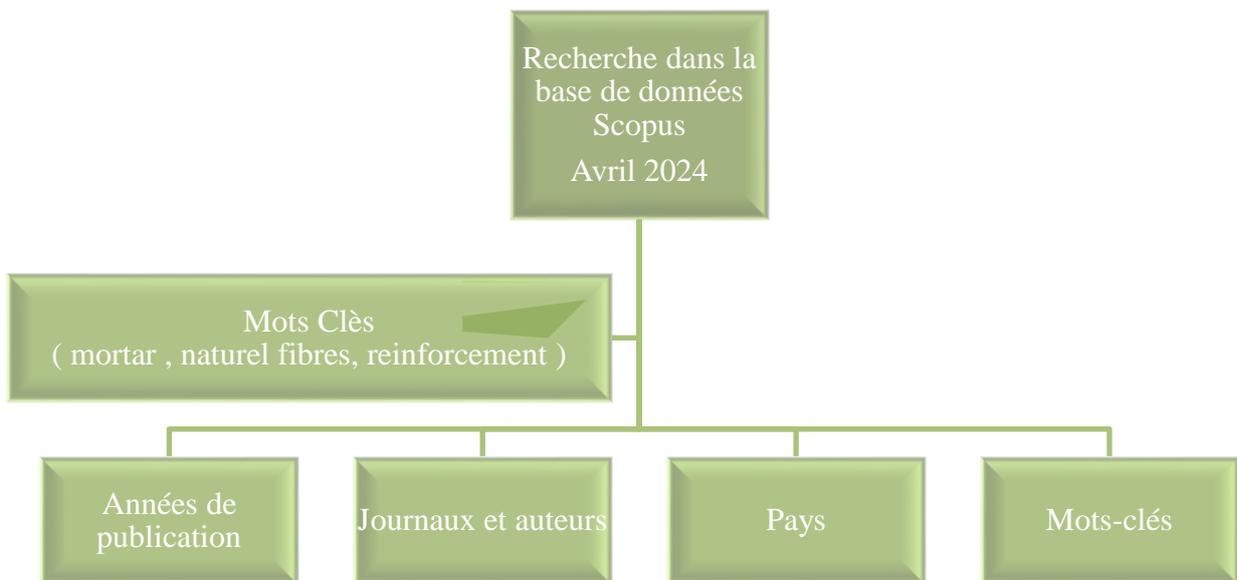


Figure I. 1 : Méthodologie de recherche.

Nous avons exploré les aspects suivants sur la période de 1979 au mois d'Avril 2024, les questions de recherche abordées dans cette étude sont:

1. Comment se répartissent les publications pendant cette période ?
2. Quels journaux et auteurs sont les plus influents dans ce domaine ?
3. Quels pays les plus influents dans ce domaine ?
4. Quels mots-clés de recherche sont essentiels pour cette période ?

I.2 Publications entre 1979 et Avril 2024

Cet examen révèle le renforcement des mortiers avec des fibres naturelles (RMFNs) depuis 1979 jusqu'au mois d'Avril 2024. Selon la **Figure I.2**, le nombre annuel d'articles de recherche publiés sur les RMFN entre 1979 et 2004 n'a pas dépassé 3, et a atteint un maximum de 16 publications pendant les années 2010 et 2018. Après 2018, le nombre d'articles publiés a augmenté, atteignant un total de 45 articles publiés en 2021. Par conséquent, l'année 2021 est celle qui a enregistré le plus grand nombre d'articles publiés, puisque le nombre d'articles publiés après cette année-là jusqu'au 2024 se situe entre 15 et 30 articles.

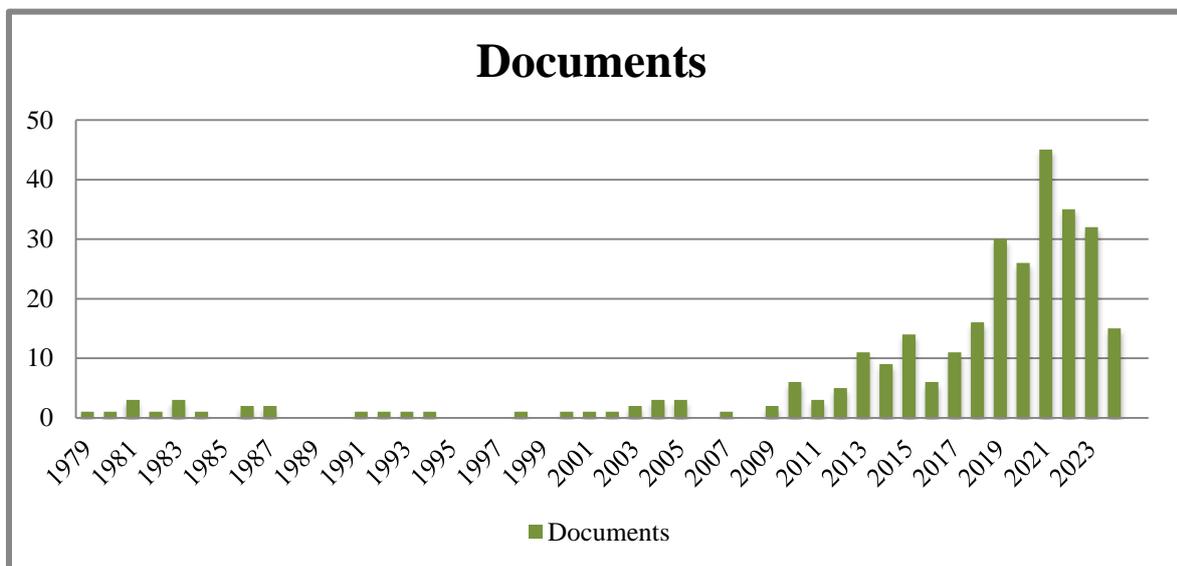


Figure I. 2 : Répartition par années.

I.3 Journaux et auteurs les plus influents dans le domaine des RMFNs

I.3.1 Revues contributrices dans le domaine des RMFNs

Dans l'analyse réalisée des revues, les plus citées, (Publication totale, Citation totale, Score de citation du journal, L'article le plus cité), ont été choisis comme critères d'analyse tel que présenté dans le **Tableau II.1**.

- La revue la plus productive concernant le RMFNs est « Construction And Building Materials », avec un total de publications de 15337 et une citation totale de 210794, en plus de 35 publications dans le RMFNs.

- En second, vient la revue « Key Engineering Materials » en deuxième position, avec un total de publications de 4388 et une citation totale de 4525, en plus de 14 publications.
- La troisième position est « Materials », avec un total de publications générales nombre de 30 074 et une citation totale de 173 411, en plus de 13 publications. En effet, la répartition des revues les plus productives concernant le RMFNs sont présentées en conséquence dans la **Figure I.3**.

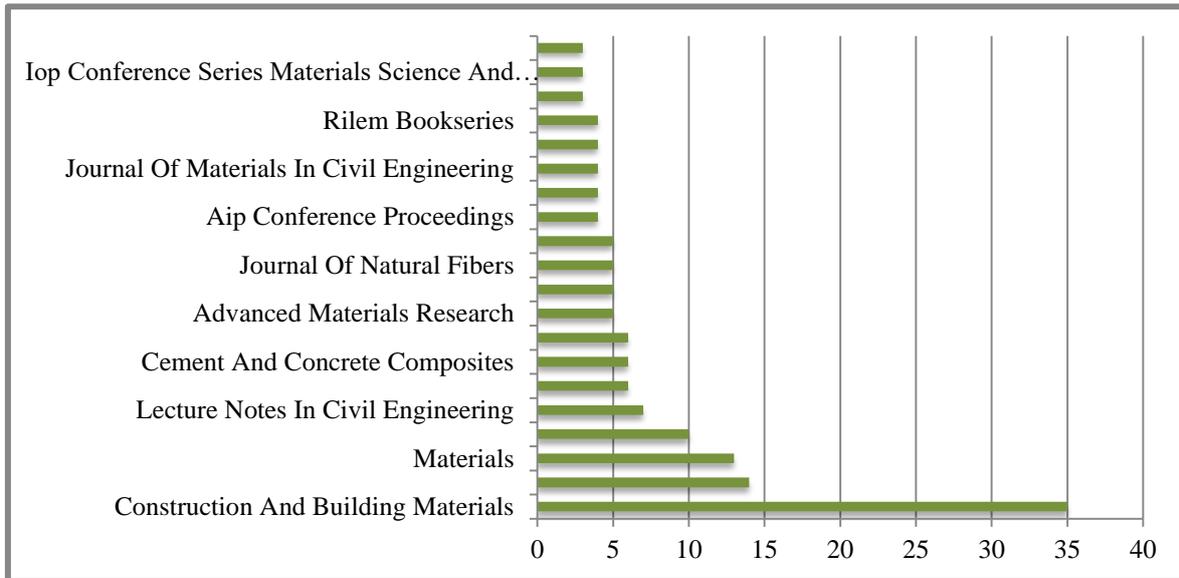


Figure I. 3 : Les revues les plus productives dans le domaine des (RMFNs)

I.3.2 Principaux auteurs contribuant dans le domaine des RMFNs

Les articles ont été sélectionnés par les auteurs les plus cités dans le domaine de la recherche sur les RMFNs à partir de 297 articles. L'analyse des auteurs prolifiques dans ce domaine a pris en compte des critères tels que "Auteur", "Titre de publication plus cité", "Citation Total", "type du journal" et "Référence", comme présenté dans le **Tableau I.1**.

La première fréquence est celle pour Pepe, M. et al. [1] avec 209 citations dont l'intitulé est : «Procédés alternatifs de transformation des granulats recyclés dans le béton structural» Parue dans Construction and Building Materials en 2014. La présente activité de recherche a montré la faisabilité du béton écologique à usage structural, caractérisé par un remplacement significatif des granulats naturels par des granulats recyclés, produits à partir du traitement des déchets de démolition de construction. De Azevedo A. R. G. et al. [2] occupe la deuxième position avec 148 citations pour l'article intitulé « Performance technologique des mortiers à

base de ciment renforcés de fibres naturelles d'açaí » publié dans le Journal Of Building Engineering en 2021.

Dans cette étude, l'auteur a examiné les effets de l'incorporation de fibres d'açaí dans des mortiers cimentaires (à des concentrations de 1,5%, 3,0% et 5,0%) traitées avec NaOH, dans des mélanges de ciment et de chaux. Ferrara, G. et al. [3] occupe la troisième position avec 53 citations pour son article intitulé "Capacité de cisaillement des murs en maçonnerie renforcés extérieurement à l'aide des systèmes composites lin-MRT : essais expérimentaux et évaluation comparative" publié dans Construction And Building Materials en 2020.

Cette étude expérimentale s'est concentrée sur l'évaluation de la capacité de cisaillement des murs renforcés par du mortier textile (TRM) utilisant différents renforts textiles d'origine végétale, tels que le lin, le chanvre, la fibre de coco, le sisal et le jute. Monteiro, S.N. et al. [4] se classe en quatrième position avec 391 citations pour son article intitulé "Composites à matrice polymère à fibres naturelles : moins chers, plus résistants et plus respectueux de l'environnement" publié dans Journal Of the Minerals en 2009.

L'étude a présenté les avantages et les inconvénients de l'utilisation de fibres naturelles, y compris certaines moins connues, comme renforts de composites à matrice polymère. L'analyse du comportement mécanique des composites contenant des fibres spécifiques est abordée en mettant en lumière l'impact de la micromorphologie de surface et de l'interaction fibre/matrice.

Tableau I. 1 : Principaux auteurs contribuant dans le domaine des RMFNs

Auteur	Titre	Citation Total	Type du journal	Référence	Publication Total
Pepe, M. et al.	Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete	209	Construction and Building Materials,	[1]	183
De Azevedo A. R. G. et al.	Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars	148	Journal Of Building Engineering	[2]	152
Ferrara, G. et al.	Shear capacity of masonry walls externally strengthened using Flax-TRM composite systems: experimental tests and comparative assessment	53	Construction And Building Materials	[3]	24
Monteiro, S.N. et al.	Natural-fiber polymer-matrix composites: Cheaper, tougher, and environmentally friendly	391	Journal Of Minerals	[4]	1084
Aiello, M.A. et Leuzzi, F.	Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state	289	Waste Management	[5]	184
De Felice, S. et al.	Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry	247	Materials And Structures	[6]	77

Leone, M. et al.	Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate	207	Composites Part B: Engineering,	[7]	63
Mezazigh, S. et Levacher, D.	Laterally loaded piles in sand: slope effect on P-Y reaction curves	137	Revue géotechnique canadienne ,	[8]	88
A. R. G. de Azevedo et al.	Investigation of the Potential Use of Curauá Fiber for Reinforcing Mortars	70	Fibres ,	[9]	20
Majumder, A. et al.	Thermal Characterization of Recycled Materials for Building Insulation	24	Energies,	[10]	11
Ramakrishna, G.et Thirumalai, S.	Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: A comparative study	287	Cement and Concrete Composites,	[11]	24
Stefanidou, M. et Papayianni, I.	Influence of nano-SiO ₂ on the Portland cement pastes	321	Composites Part B: Engineering,	[12]	102
Stochino, F. et al.	Constitutive models for strongly curved beams in the frame of isogeometric analysis	137	Mathematics and Mechanics of Solids	[13]	68
Ardanuy, M. et al.	Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research	467	Construction and Building Materials,	[14]	329

I.4 Principaux pays actifs dans le domaine de RMFNs

La répartition des publications dans le monde entier est illustrée dans la **Figure I.4**. Les publications sont dispersées sur tous les continents, avec une concentration des leaders de la recherche en RMFNs au centre, notamment en Italie et au Brésil. L'Italie se positionne en tête avec 59 publications (17%), suivie par le Brésil avec 38 publications (11%), L'Inde avec 26 publications (7%), la France avec 21 publications (6%), l'Algérie avec 13 publications (6%) et le Royaume Unie avec 12 publications (6%).

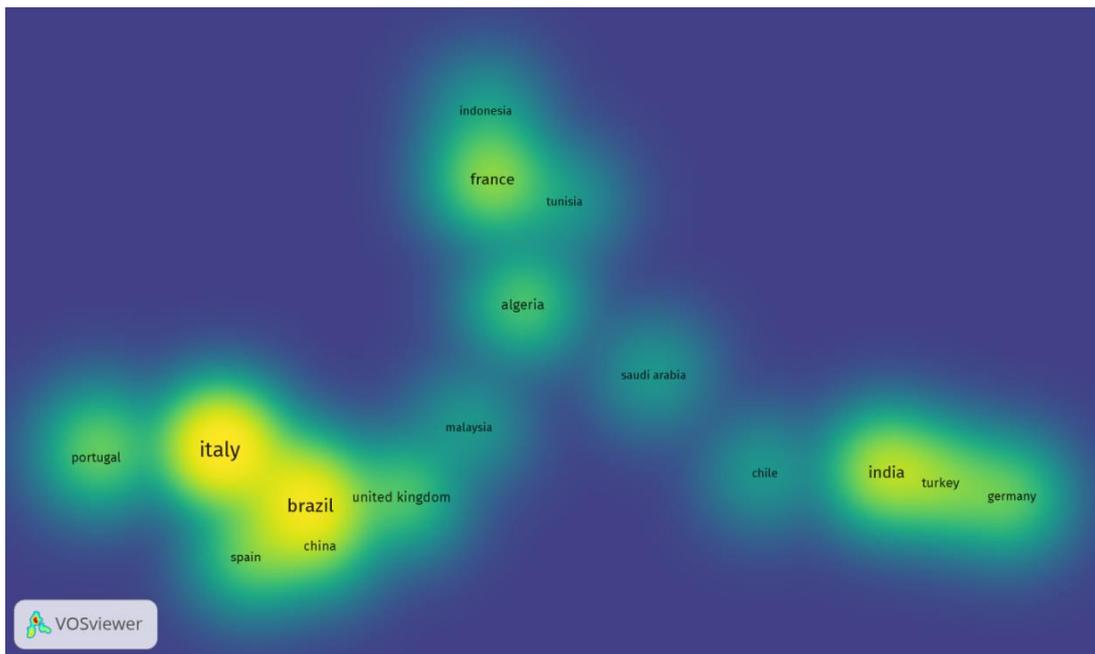


Figure I. 4 : Répartition géographique des publications.

❖ Concernant l'Algérie

L'Algérie est classée cinquième dans cette thématique de recherche en raison de la grande disponibilité des fibres végétales dans le pays. Elle se distingue dans la recherche sur l'utilisation de fibres végétales dans les matériaux de construction grâce à leur abondance dans le pays. Les fibres des plantes telles que le palmier dattier, l'Halfa, le diss, le liège, le coton et le lin etc... sont courantes dans les hautes plaines, les montagnes et le désert saharien du pays. Ces fibres naturelles sont un choix écologique, léger et abordable par rapport aux fibres traditionnelles comme l'amiante, le verre, le carbone et l'aramide. Elles offrent des avantages tels qu'une faible densité, un faible coût, une bonne isolation thermique et acoustique, ainsi que des propriétés mécaniques élevées. Les fibres végétales sont utilisées dans les bétons fibrés pour améliorer leur résistance à la fissuration due au retrait plastique et pour améliorer

L'ajout de fibres renforce la résistance et la durabilité du mortier. L'incorporation de fibres augmente la résistance du mortier à la flexion, renforçant ainsi la rigidité de la structure.

Groupe 2 (Bleu) : Propriétés mécaniques, fibres naturelles, renforcement, mortiers.

Le renforcement des mortiers par des fibres naturelles est une pratique visant à améliorer les propriétés mécaniques de ces matériaux de construction. Les fibres ajoutées au mortier contribuent à renforcer sa résistance et sa durabilité, en particulier en termes de résistance à la flexion et à la compression.

Groupe 3 (Vert) : Composite, fibre naturelle, lin.

Dans le contexte des composites, l'utilisation de fibres naturelles, tel que le lin, pour le renforcement des matériaux composites est explorée. Les fibres de lin sont étudiées pour leur potentiel de renforcement dans les composites, offrant des alternatives durables et écologiques.

Groupe 4 (Violet) : Béton, matériaux composite, porosité, durabilité

Les termes "béton", "matériaux composites", "porosité" et "durabilité" sont liés à l'étude des propriétés des matériaux de construction. La dimension écologique et durable de cette recherche est reflétée par des termes comme "développement durable", "empreinte carbone", et "recyclabilité". L'analyse de la porosité et de la durabilité des bétons et des composites est essentielle pour garantir la qualité et la longévité des structures. Par ailleurs, des concepts tels que "matériaux composites", "interaction matrice-fibres", et "comportement à long terme" décrivent les aspects techniques et scientifiques de ces études.

Groupe 5 (Jaune) : Fibres naturelles, composite cimentaire

Les fibres naturelles sont explorées pour leur utilisation dans les composites cimentaires, visant à renforcer ces matériaux de construction. L'intégration de fibres naturelles dans les composites cimentaires offre des solutions durables et écologiques pour améliorer les performances des structures.

Ensemble, ces mots clés constituent un cadre essentiel pour la compréhension et l'analyse bibliométrique de l'utilisation des fibres naturelles dans le renforcement des mortiers cimentaires.

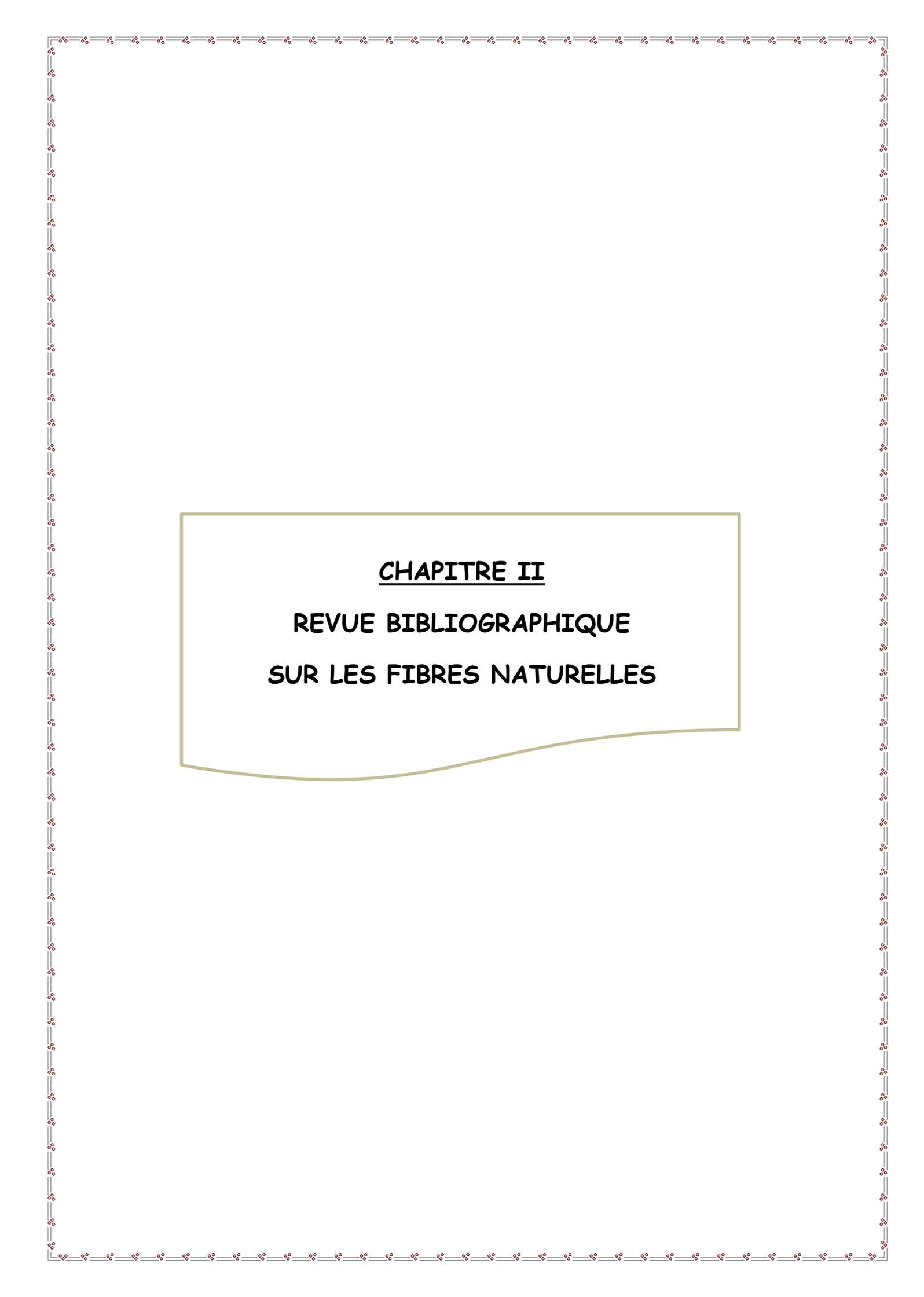
Conclusion

Cette analyse s'est concentrée sur l'état de renforcement des mortiers avec des fibres naturelles. Une analyse de 297 publications dans la base de données SCOPUS a permis une classification claire des études. Les cartes bibliographiques montrent les tendances et les évolutions technologiques dans le domaine des RMFNs.

L'interaction entre les auteurs, les mots-clés et l'évolution des publications de 1979 jusqu'au mois d'avril 2024 ont été analysés par pays. Ces dernières années, la recherche sur le renforcement du mortier a progressé avec un intérêt croissant pour les fibres naturelles en raison de leur faible coût, de leur densité, de leur résistance et de leur disponibilité dans le monde entier, ainsi que de leurs propriétés mécaniques, physiques et thermiques.

Les chercheurs se sont particulièrement intéressés par l'étude de différentes fibres naturelles, en mettant l'accent sur les propriétés mécaniques et la durabilité.

Les préoccupations environnementales ont également stimulé la recherche sur les matériaux durables et écologiques. Le renforcement des mortiers avec des fibres végétales offre des opportunités intéressantes pour des solutions innovantes.



CHAPITRE II
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LES FIBRES NATURELLES

II.1 Introduction

Depuis plusieurs années, les industries manifestent un intérêt grandissant pour les fibres naturelles. Ces fibres présentent de nombreux avantages pour la création de matériaux composites, et elles sont de plus en plus utilisées dans des domaines tels que la construction et l'industrie automobile. Ce chapitre présente une recherche bibliographique sur les fibres naturelles, précisément les fibres végétales, leurs classifications, structures et compositions chimiques, propriétés physiques et mécaniques et leurs applications.

II.2 Les fibres naturelles :

Les fibres naturelles se divisent en plusieurs catégories en fonction de leur origine. On distingue les fibres d'origine végétale, animale et minérale. La (Figure II.1). Présentent les différents types des fibres naturelles. Pour des raisons de disponibilité et de coût, des fibres naturelles d'origine végétale sont les plus utilisées pour le renforcement de matériaux composites. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges.

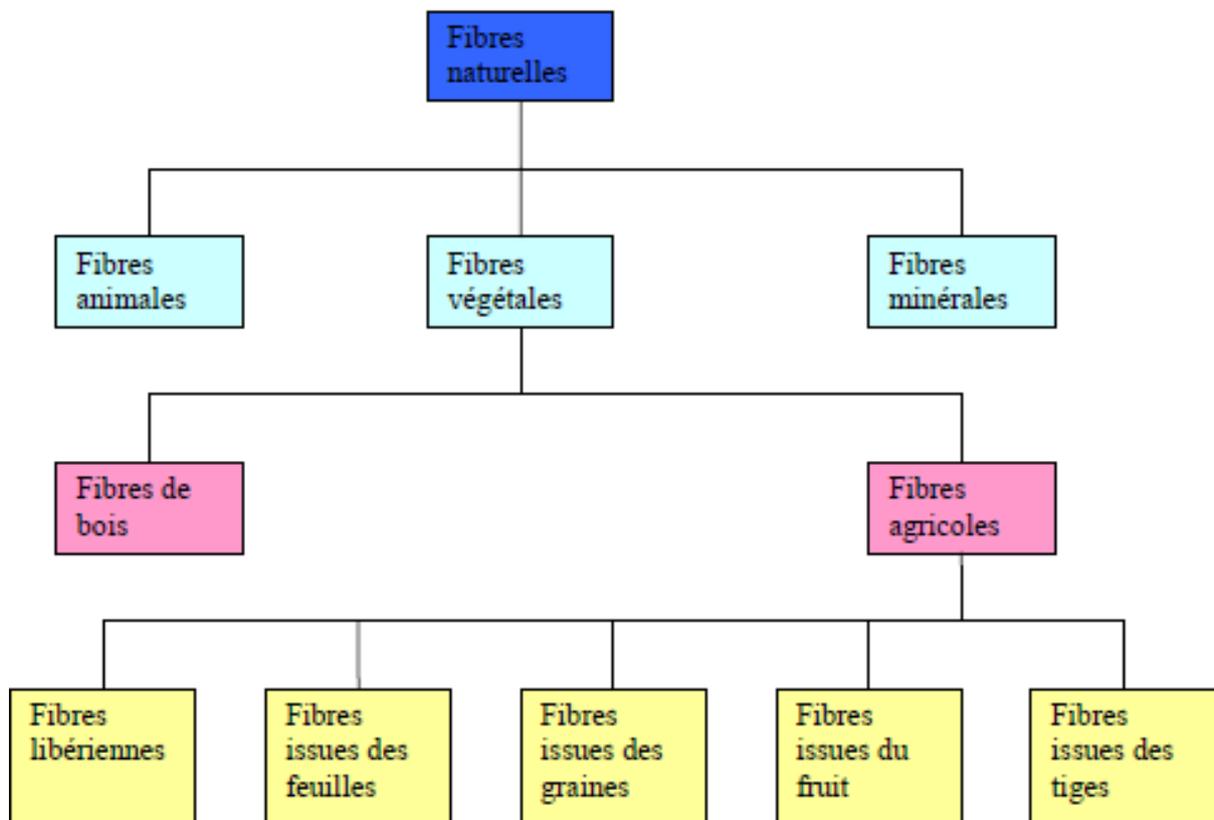


Figure II. 1 : Classification des fibres naturelles [1].

II.3 Les fibres végétales

II.3.1 Aperçu historique

Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles ne sont pas récents. En 1908, par exemple, des composites associant la Bakélite au coton ou au papier ont été développés pour la réalisation industrielle de panneaux et de tubes pour l'électronique. Dans le domaine automobile, Henry Ford a réalisé en 1941 un prototype dont les panneaux de carrosserie étaient élaborés à base de fibres de chanvre et d'une matrice formulée à partir de protéines de soja. Par ailleurs, des éléments de la carrosserie de la « Trabant » (toit, capot, aile et portes), lancée en 1958 en Allemagne de l'Est, étaient réalisés en composites fibres de coton/résine phénolique.

Les fibres végétales naturelles sont issues d'éléments végétaux comme des graines, des tiges, des feuilles ou de l'écorce. On dit qu'elles sont naturelles puisqu'on les trouve dans la nature contrairement aux fibres animales ou aux fibres synthétiques et artificielles (qui sont créées par l'homme). Les fibres naturelles jouent un rôle crucial dans une multitude de secteurs grâce à leurs propriétés écologiques et polyvalentes. Dans l'industrie cosmétique, elles sont utilisées pour fabriquer des produits de soins et de beauté naturels, offrant une alternative plus durable aux ingrédients synthétiques. Dans le domaine de la mode, ces fibres sont prisées pour la création de textiles écologiques, permettant de réduire l'empreinte environnementale de l'industrie vestimentaire. De plus, le secteur de la construction bénéficie largement de l'intégration des fibres naturelles, où elles sont employées pour concevoir des matériaux de construction innovants et des bioplastiques. Ces matériaux offrent des solutions durables et performantes, contribuant à la réduction de l'empreinte carbone et à l'amélioration de la durabilité des constructions. L'adoption des fibres naturelles dans ces divers domaines illustre leur potentiel à transformer les pratiques industrielles vers des approches plus respectueuses de l'environnement.

II.3.2 Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres.

- Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en différentes parties de la plante : des feuilles (fibres de sisal, de bananier, de palmier, d'Halfa), des graines (fibres de coton, de kapok, etc.), de la tige (kénaf, lin, chanvre, jute, ramie, bambou, etc.), des fruits (fibres de coco, etc.).

Tableau II. 1 : Classification des différentes parties de la plante.

Les fibres des feuilles	Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides
Les fibres des tiges	Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de lin, de kénaf et de chanvre
Les fibres des bois	Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous
Les fibres des surfaces	Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autres le coton et la noix de coco. Les fibres de coco ont donné de bons résultats pour la résistance à la flexion du ciment de fibre [5].

- Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels ligneux tels que le bois d'oeuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kenaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [16].
- Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupés en deux catégories : fibres longues, dites libériennes, provenant des tiges et d'écorces de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues [17]. La plupart des fibres végétales mesurent entre 10 et 150 mm de long pour un diamètre de 10 à 50 micromètres, soit un rapport longueur sur diamètre compris entre 10 et 100 [5].

II.3.3 Présentation des différentes fibres végétales

II.3.3.1 Le chanvre

La fibre de chanvre est une fibre naturelle très utilisée dans le milieu du textile mais aussi dans le domaine de la construction. Il a mauvaise réputation puisqu'on l'associe souvent au

chanvre indien ou cannabis, aux propriétés psychotropes. C'est bien dommage puisqu'il possède de nombreuses qualités. C'est une fibre très résistante, absorbante et antibactérienne. D'ailleurs, il semblerait que le chanvre filtre une grande partie des UV. C'est aussi une fibre qui s'adoucit au fur et à mesure des lavages. De plus, ses qualités isolantes sont très utiles notamment dans le domaine de la construction.

Le chanvre est une fibre libérienne, caractérisé par des fibres externes longues et étroites ainsi que des fibres internes ligneuses, présentes chez toutes les plantes de cette famille (**Figure II.2**). En Europe, la France se distingue en tant que premier producteur de chanvre. Les fibres de chanvre sont utilisées dans la fabrication de textiles tels que tapis et vêtements, ainsi que dans divers produits industriels comme les géotextiles, la toile anti-Érosion, le renfort de composite et le remplissage. Cette fibre est appréciée pour sa grande solidité et son intérêt économique, ce qui en fait un matériau polyvalent et recherché dans de nombreuses applications.



Figure II. 2 : Plantes de chanvre.

II.3.3.2 Le lin :

Le lin est très populaire parmi les fibres naturelles écologiques. Dans la plante du lin, tout est utilisé. Elle ne produit donc pas de déchets. Le lin utilise toutes les ressources naturelles du sol et, d'ailleurs, il n'a pas besoin d'irrigation ? Très résistant, il est aussi très peu gourmand en pesticides et en herbicides. Solide, légère et souple à la fois, la fibre de lin a une très longue durée de vie. La pectine, macromolécule que l'on retrouve dans les parois de la fibre de lin, permet de structurer et de maintenir les différentes fibres entre elles. C'est également ce qui rend le lin hydrophile, c'est-à-dire très absorbant, mais aussi antistatique.

Le lin est une plante présente annuellement à l'échelle mondiale, se développe dans diverses régions, y compris en Asie. La fibre de lin provient des tiges de la plante ainsi que de l'huile extraite des graines. Cette fibre se distingue par sa longueur significative, en moyenne 25 mm, et sa robustesse (**Figure II.3**). Le lin peut être employé en remplacement du coton et est utilisé dans la fabrication de papiers fins tels que les papiers à cigarettes ou le papier Bible.





Figure II. 3 : Plante de Lin.

II.3.3.3 Le coton

Cotonnier, un petit arbuste annuel mesurant entre 1 et 1,50 m de hauteur, est cultivé dans les régions chaudes d'Amérique, d'Afrique et d'Asie. Le coton est la fibre textile la plus utilisée dans le monde. Elle est malheureusement très gourmande en eau et donc très polluante. En revanche, le coton biologique est, lui, plus respectueux de l'environnement puisqu'il consomme moins d'eau (avec son sol plus riche, il retient mieux l'eau et donc nécessite moins d'irrigation). Les fibres de coton, appelées linters, proviennent des graines de cette plante. Ces fibres, reconnues pour leurs excellentes propriétés physiques et mécaniques, sont utilisées dans la fabrication de papiers de qualité supérieure. Elles sont notamment employées dans la production de papiers de luxe, de papiers fiduciaires et principalement dans la fabrication des billets de banque, où la résistance au pliage est une caractéristique essentielle (**Figure II.4**).





Figure II. 4 : Plante de coton.

II.3.3.4 Le kenaf :

Une plante herbacée dont la tige peut atteindre 3 mètres de hauteur, est présente principalement dans les régions tropicales et en Amérique du Sud. La production de kenaf est limitée et exclusivement destinée à l'industrie papetière. Les fibres de kénaf, avec une longueur moyenne de 1,5 mm, se situent entre les fibres de feuilles en termes de longueur (**Figure II.5**).



Figure II. 5 : Plante de Kénaf.

II.3.3.5 Le jute :

Une plante buissonnante originaire du sud-est asiatique, est principalement cultivée en Inde et au Bangladesh. Les fibres de jute utilisées dans l'industrie papetière produisent des résidus de culture et de filature. Avec une longueur moyenne de 2 mm et une largeur de 20 μm , ces fibres présentent des caractéristiques similaires à celles du kenaf (**Figure II.6**).



Figure II. 6 : Plante de jute.

II.3.3.6 Le sisal

Une plante vivante caractérisée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire pouvant atteindre jusqu'à 2 m de long, est une plante tropicale largement cultivée en Amérique du Sud et en Afrique. Les fibres de sisal ont une longueur moyenne de 3 mm (**Figure II.7**).

Les fibres de sisal sont issues de l'agave sisalana, originaire du Mexique. Le sisal pousse toute l'année dans des climats chauds et arides ? Tout au long de son cycle de vie, il absorbe plus de dioxyde de carbone qu'il n'en produit. De plus, au cours de sa transformation, il génère principalement des déchets organiques et des résidus de feuilles. Une fois tressée, la fibre de cette plante dispose des caractéristiques idéales pour la fabrication de tapis, de revêtements de sols ou d'objets de décoration.





Figure II. 7 : Plante de Sisal.

II.3.3.7 Le coco

Les fibres de coco sont extraites de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Après avoir été associées dans l'eau, ces fibres sont filées et tissées. Le filage grossier et irrégulier confère au coco un aspect rustique (**Figure II.8**). Le coco est très résistant, isolant, imputrescible et antibactérien, ce qui le rend idéal pour des pièces spacieuses.



Figure II. 8 : Plante de Coco avec ces fibres.

II.3.4 Composition physique des fibres végétales

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de microfibrille cellulosiques en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaisons hydrogènes et covalentes à la lignine [14].

La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposées en couches superposées dans le sens radial. Ces différentes couches forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. Ces dernières bordent un lumen de diamètre variable suivant l'espèce. La paroi secondaire est composée de trois couches de microfibrilles (S1, S2, S3) (**Figure II.9**).

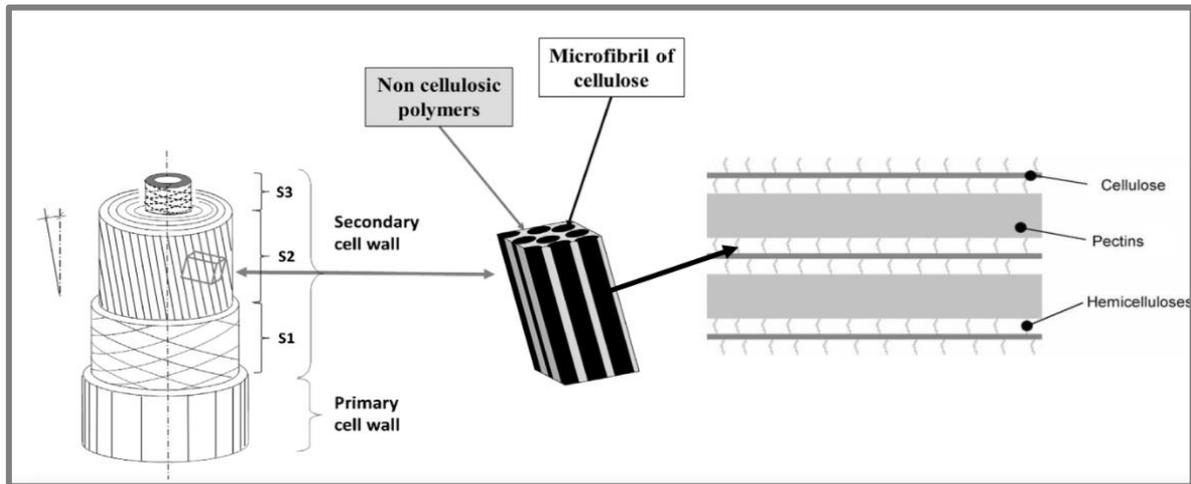


Figure II. 9 : Structure de la fibre végétale [4].

De manière générale, l'examen des parois cellulaires peut être effectué à différentes échelles d'observation et se décompose en :

Macrofibrilles de 0,5 μm de diamètre.

Microfibrilles de 10 à 30 nm de diamètre.

Fibrilles élémentaires appelées micelles de 3,5 à 5 nm de diamètre.

Molécules de cellulose ; une micelle est constituée d'environ 50 à 100 molécules de cellulose.

Entre les fibres, on trouve une lamelle moyenne, constituée de pectine, une substance amorphe, qui réunit fortement les parois cellulaires contiguës. La paroi primaire renferme de la cellulose dans une proportion estimée de 8 à 14 %. Les microfibrilles sont enchevêtrées et forment un maillage lâche, un arrangement dit en structure dispersée. Elles sont disposées dans une matrice de composition très analogue à la pectine de la lamelle moyenne. Il y a continuité entre la matrice et la lamelle moyenne. La paroi primaire est très élastique, elle se laisse détendre et déformer. Elle peut ainsi suivre l'augmentation de taille de la cellule en croissance.

La paroi secondaire renferme nettement plus de cellulose que la paroi primaire. Elle présente une stratification aussi bien microscopique que submicroscopique.

Les microfibrilles décrivent par rapport à l'axe de la fibre, un angle micro fibrillaire (MAF) dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres. Plus l'angle des microfibrilles augmente, plus le module d'Young (une mesure de la rigidité) décroît, tandis que l'extensibilité des parois augmente (**Figure II.10**).

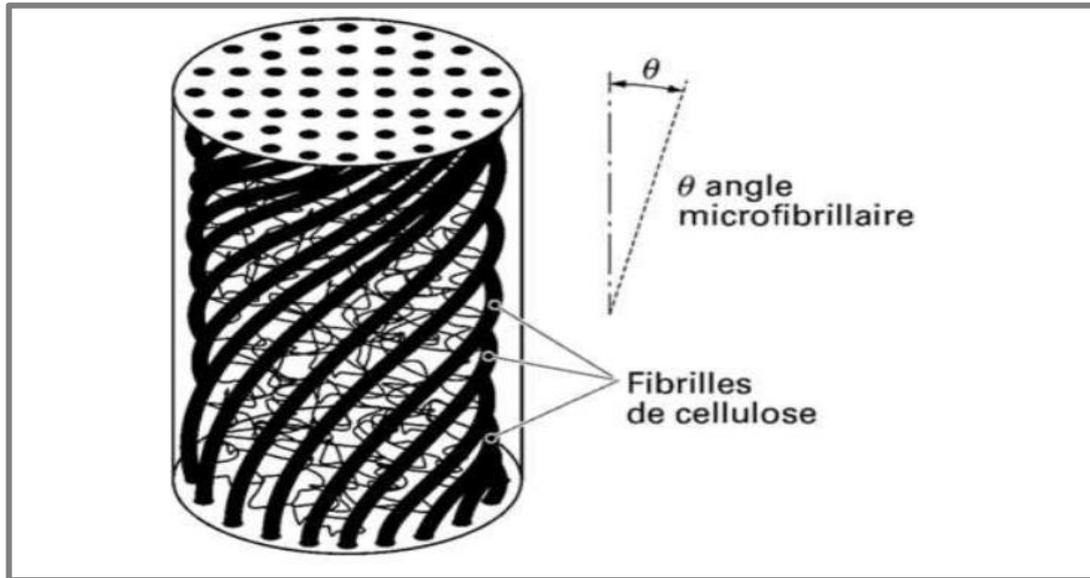


Figure II. 10 : Modèle de description de la structure d'une fibre végétale [5].

II.3.5 Composition chimique des fibres

La composition chimique de certaines fibres végétales est présentée dans le **Tableau II.2**. La structure microscopique des fibres végétales est complexe. Elles sont constituées par des fibrilles, elles-mêmes formées par des chaînes de cellulose. Les chaînes de cellulose s'associent entre elles de façon parallèle par des liaisons hydrogènes pour former des microfibrilles dont la section (de l'ordre de quelques nm) est variable selon les espèces végétales. Enfin, les fibres se présentent sous la forme d'un composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant un élément structurant très rigide qui est la cellulose. La composition chimique des fibres végétales dépend en grande partie des besoins particuliers de la plante dont elles sont extraites. Cependant, cellulose, hémicellulose en sont les principaux constituants, et leur teneur dépend de l'âge, l'origine et des conditions d'extraction des fibres.

Tableau II. 2 : Composition chimique des quelque fibres végétales [6].

Fibre	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)	Références
Coton	85-90	5,7	0,5-1,6	5,7	[14,20,29]
Noix de coco	32-46	0,15-0,3	40-45	4	[20,29]
Jute	64,4-84	12-20	12-13	0,2	[14,20,29]
Lin	64,1-81	16,7-20,6	2-3	0,9-1,8	[14,20,29]
Chanvre	68-92	15-22	10	0,9	[20,29]
Ramie	68,6-76,2	13,1-16	0,6-0,7	1,9-2	[14,20,29]
Sisal	65,8	12	9,9	0,8-2	[14,20,29]
Palmier	32-35,8	24,4-28,1	26,7-28,7	-	[30,31]

II.3.5.1 La cellulose

L'existence de la cellulose comme matériau commun dans les parois cellulaires végétales était d'abord découverte par Anselme Payen en 1838. La cellulose représente la molécule biologique la plus abondante sur terre. D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée par une très longue chaîne stéréo régulière composée de maillons de glucose $C_6H_{12}O_6$ (Figure II.11). La cellulose possède une structure fibrillaire et partiellement cristalline. Les micro- fibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées.

Dans la zone cristalline, les chaînes cellulosiques sont disposées parallèlement les unes aux autres, liées par des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogènes qui se développent entre les chaînes. Les interactions moléculaires sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs. Grâce à sa grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. La cellulose est de nature très hydrophile.

En résumé

Structure de la cellulose :

La cellulose est un polymère naturel du glucose. Les macromolécules sont liées les unes aux autres avec des liaisons hydrogène.

La structure géométrique :

Les glucoses sont reliés entre eux par des liaisons osidiques **β -1,4-glucose**.

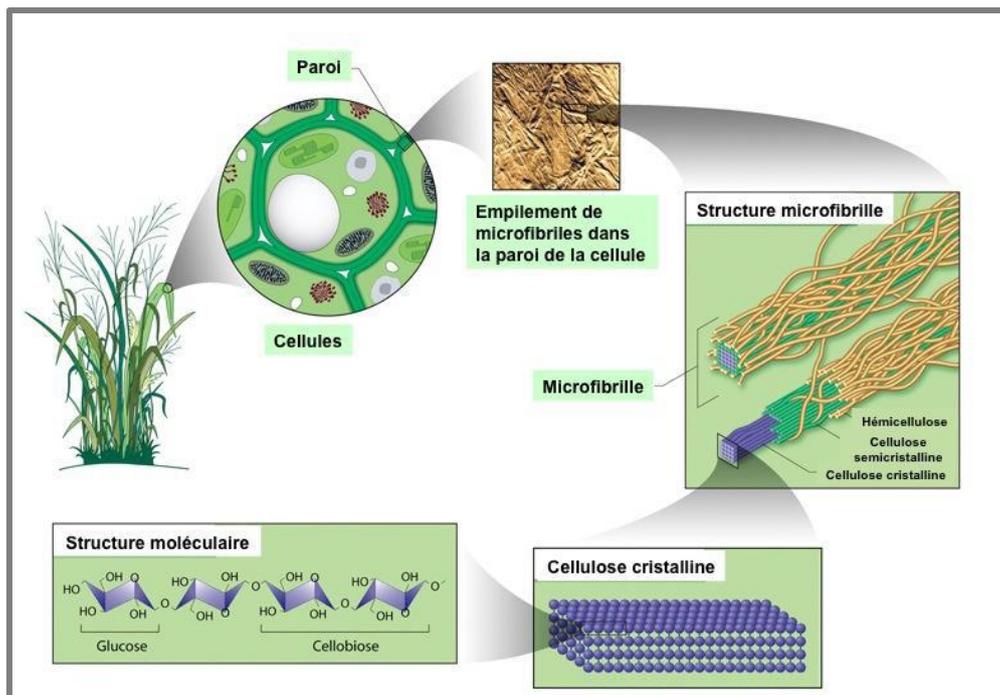


Figure II. 11 : La structure de la cellulose [3].

Le motif de répétition est le dimère cellulose Le polymère est le **β -1,4-glucose**.

Les macromolécules qui possèdent une masse moléculaire élevée sont liées les unes aux autres avec des liaisons hydrogène.

Organisation de la cellulose

Le degré de polymérisation diffère énormément selon l'origine de la cellulose ; sa valeur peut varier de quelques centaines à quelques dizaines de milliers. La longueur d'une chaîne polymère, constituée de monomère, se mesure en DP (Degré de Polymérisation) (**Figure II.12**). La cellulose possède une structure en grande partie cristalline et elle est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé environ 136 GPa.

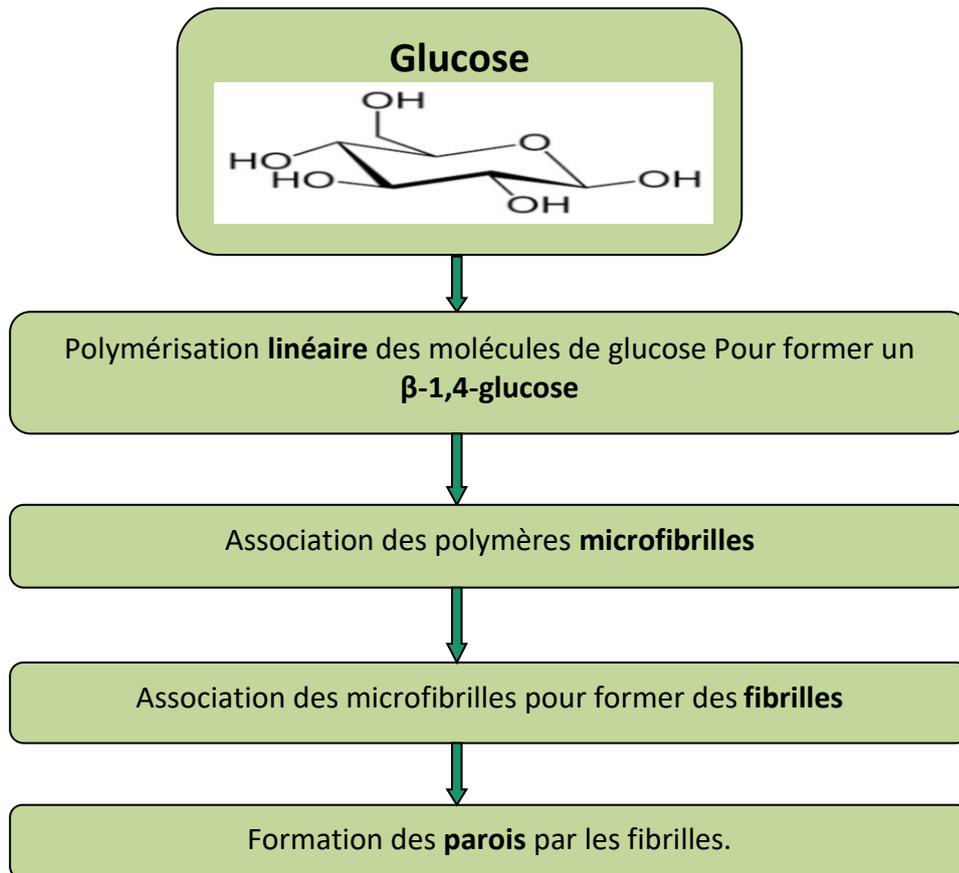


Figure II. 12 : Association des polymères en microfibrilles.

II.3.5.2 Les hémicelluloses

Dans la plupart des fibres naturelles, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides composés d'une combinaison de cycles à 5 et 6 carbones (**Figure II.13**). Les hémicelluloses présentent une grande variété de structures polymères amorphes. Les hémicelluloses ne sont ni une cellulose ni une substance pectinique, mais plutôt des polysaccharides complexes à faible poids moléculaire. Elles sont implantées dans les parois végétales. Les arabinanes, les xylanes, les galactanes, les mannanes et les glucanes sont parmi les hémicelluloses. Elles assurent le maintien d'une structure pariétale bien structurée, elles jouent un rôle de liaison entre les fibrilles de cellulose. On peut les extraire aisément à l'aide de solutions alcalines et elles sont solubles dans l'eau. Elles possèdent une structure en hélice qui leur donne une certaine flexibilité [18]. L'hémicellulose est très sensible à l'eau, soluble dans des milieux alcalins et hydrolysable facilement dans les acides. En outre, la structure chimique de l'hémicellulose varie considérablement en fonction de l'origine végétale, du type cellulaire, de sa localisation dans la paroi ou encore de l'âge des tissus.

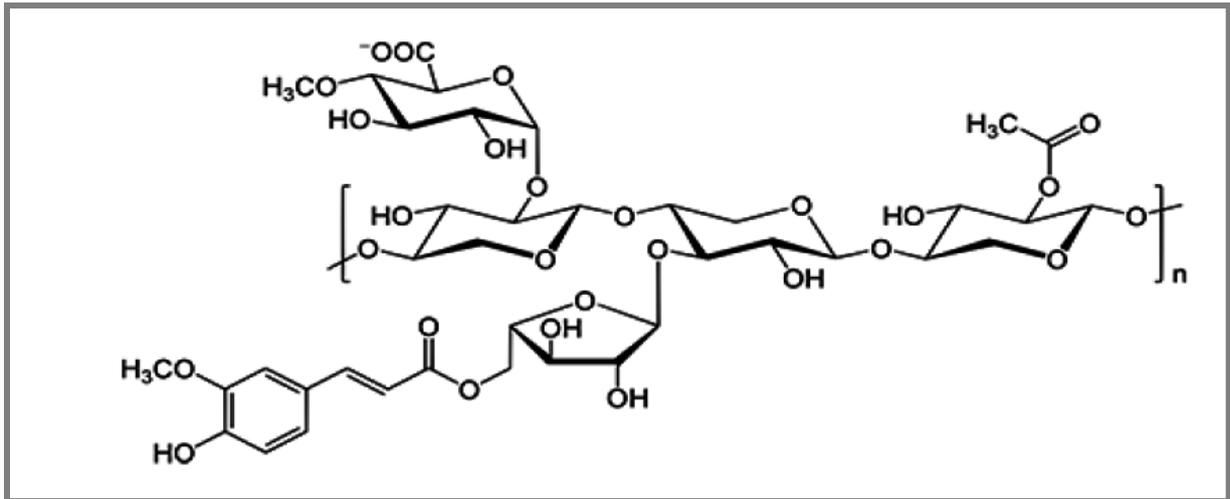


Figure II. 13 : Structure moléculaire de l'hémicellulose [7].

II.3.5.3 Les 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. 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), interrompu par la présence d'unités L-rhamnopyranose (**Figure II.14**). Les pectines portent aussi des substances non sucrées, essentiellement le méthanol, l'acide acétique, l'acide phénolique et parfois des groupes d'amide. 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.

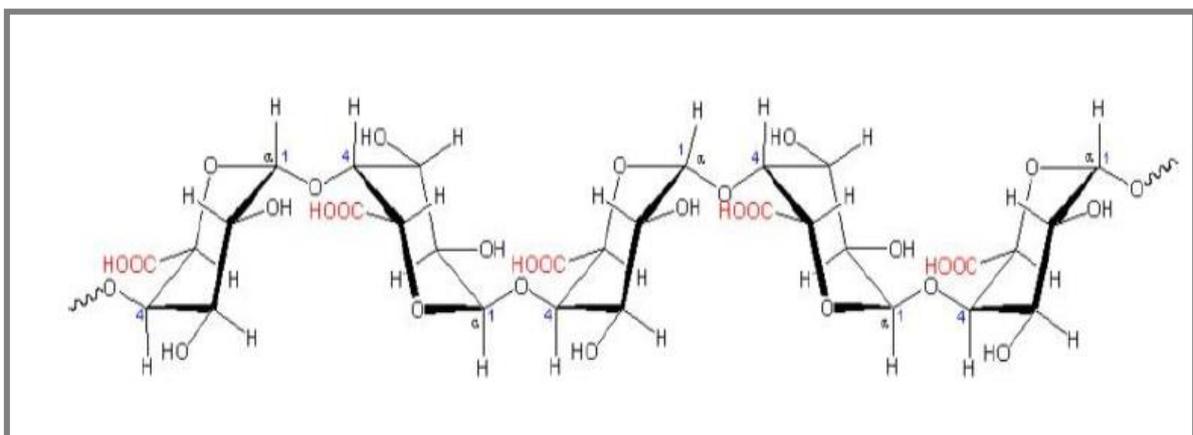


Figure II. 14 : Structure de la pectine [7].

II.3.5.4 La lignine

La lignine est la seconde substance organique renouvelable la plus présente sur la terre après la cellulose. Elle participe à la rigidité structurale des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes. La lignine ou « les lignines » sont des polymères tridimensionnels provenant de la polymérisation radicalaire de trois alcools phénylpropénoïques dont la structure, dépendant de l'espèce végétal ; est indiquée sur (la Figure II.15) ; a- l'alcoolcoumarylique, b- l'alcoolconiférylique et c- l'alcool sinapylique. La lignine a une structure très hétérogène variant en fonction des différentes espèces végétales. La lignine est soluble dans une solution alcaline chaude et ne peut être hydrolysée par des acides. Ce constituant est totalement amorphe et de nature hydrophobe. Il donne la rigidité aux plantes. La lignine est thermiquement stable ; mais très sensibles aux ultraviolets (UV) [18].

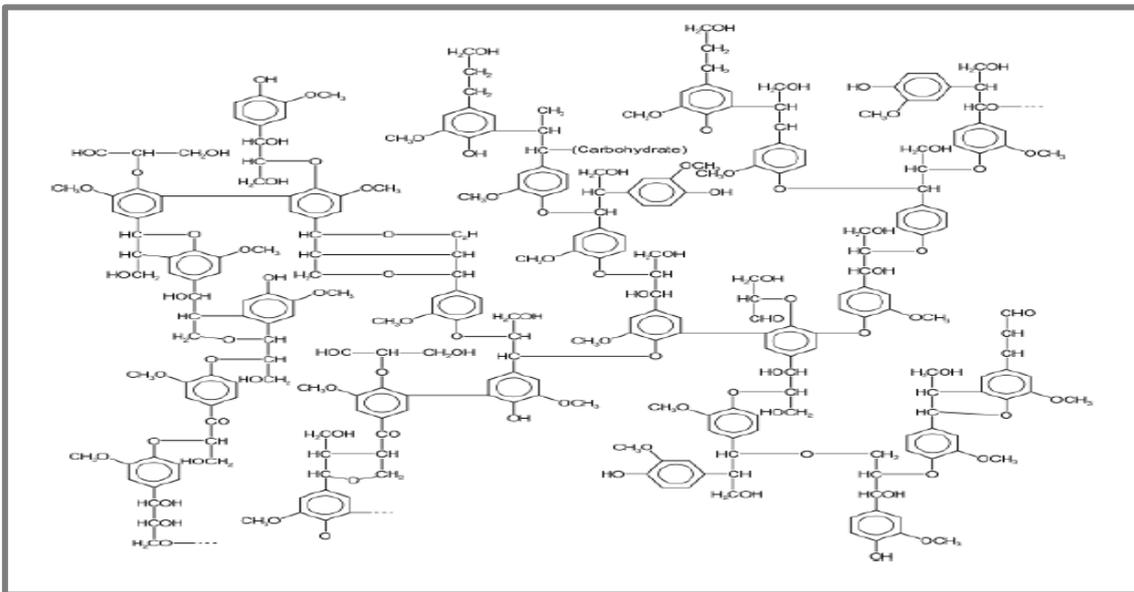


Figure II. 15 : Structure de la lignine [7].

II.3.5.5 Extractibles

La composition en extractibles varie en fonction de l'essence considérée et influe sur la couleur et l'odeur. Il s'agit de tanins, de pectines, de sucre et d'autres composés [19].

II.3.5.6 Cires

Les cires sont des constituants des fibres naturelles, qui peuvent être extraits avec des solutions organiques.

Ces matériaux se composent de différents types d'alcools insolubles dans l'eau et de plusieurs acides tels que l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique [19].

II.4 Propriétés physiques et mécaniques

En général les fibres végétales sont caractérisées physiquement par leur diamètre, leur densité, leur teneur en eau et leur pourcentage d'absorption (**Tableau II.2**). Mécaniquement, elles se caractérisent par la résistance à la traction, allongement à la rupture et le module d'élasticité (**Tableau II.3**).

Tableau II. 3 : Coefficient d'absorption d'eau de différentes fibres végétales utilisée [3].

Fibre	Absorption d'eau %
Bagasse	122,5
Coco	93,8
Jute	281
Palmier	129,9
Bambou	51
Sisal	110

Tableau II. 4 : les caractéristiques physico-mécaniques de quelques fibres végétales [5].

Fibre	Densité	Module de traction	Résistance en traction	Allongement
-	(g/cm ²)	(GPa)	(MPa)	(%)
Kénaif	1,47	6-8	1580	2,7
Jute	1,45	13-27	350-550	1,2-2,5
Chanver	1,48	29-70	550-900	1,6-3,5
Lin	1,5	28	345-1100	2,7-3,2
Abaca	1,35	20	900	3,5
Sisal	1,45	9-20	400-700	2-14
Coco	1,15	4-6	130-120	15-40
Coton	1,5	5-12	300-800	3-10

II.5 Extraction des fibres

Parmi les techniques utilisées pour séparer et présenter les fibres sont : l'extraction mécanique, biologique et chimique. La **Figure II.16** montre ces différentes techniques pour l'extraction des fibres.

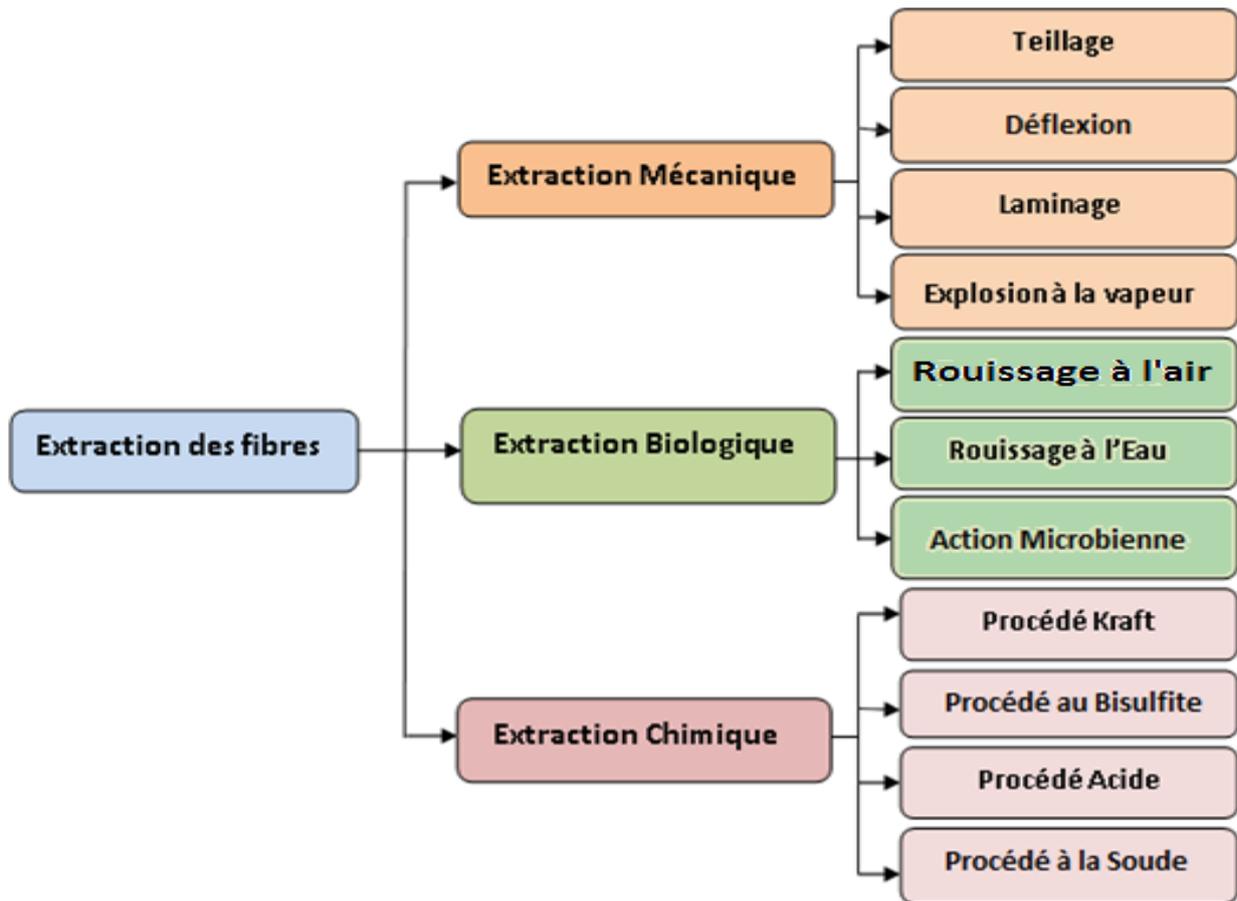


Figure II. 16 : Différentes techniques d'extraction des fibres végétales.

Avant de débiter l'extraction des fibres, une étape préliminaire est essentielle pour préparer efficacement les fibres aux traitements ultérieurs. Cette préparation vise à faciliter et à améliorer l'efficacité des opérations d'extraction à venir. À l'arrivée de la matière première sous forme de bottes pesant généralement entre 1 et 5 kg, il est fréquent de trouver de la terre, des racines, de la poussière ou d'autres impuretés, ainsi que des tiges mortes. La première étape consiste donc à éliminer toutes ces impuretés et corps étrangers afin de ne conserver que des tiges propres et utilisables.

II.5.1 Extraction mécanique

Cette méthode repose sur la séparation des fibres à travers des procédures mécaniques, que ce soit à l'aide d'une machine ou manuellement. Le traitement mécanique présente généralement deux problèmes majeurs. Le premier concerne le risque élevé de réduire les propriétés mécaniques en raison de contraintes mécaniques présentes agressives. Le deuxième problème réside dans la modification des caractéristiques impliquées des fibres.

II.5.1.1 Teillage

Cette méthode consiste à séparer le bois des tiges par action mécanique : broyage et battage. Cette technique est plutôt utilisée pour extraire les fibres de lin ou de chanvre, les tiges sont prises par leurs extrémités et insérées dans le tilleul ou l'écang (instrument manuel à levier) si l'opération est manuelle. Les tiges sont battues pour enlever le bois, et cette opération est répétée jusqu'à ce que les fibres soient plus souples. Cette méthode ancestrale a été toujours effectuée manuellement, avant de laisser la place aux machines, nous retrouvons aujourd'hui des systèmes complètement automatisés qui engagent, maintiennent et dégagent automatiquement les tiges sans aucune intervention humaine grâce à des systèmes de roues cannelées à grosses dentures au début puis à plus fines denture (Figure 28). Par la suite, elles passent sous la cannelure des rouleaux avec un angle proche de 90° pour rendre le broyage plus efficace. L'opération est effectuée successivement côté pied et côté tête. Les fibres courtes appelées aussi étoupes, moins résistantes, et les anas sont récupérées par aspiration et séparées

II.5.1.2 Laminage

Les tiges sont fragmentées en morceaux qui subissent ensuite un processus d'écrasement sous presse, par laminage ou par une combinaison de ces deux méthodes. Cette opération est répétée plusieurs fois jusqu'à ce que les fibres soient séparées de manière optimale.

II.5.2 Extraction biologique

C'est une technique naturelle pour l'extraction des fibres, par l'utilisation d'agents microbiens ou en développant des micro-organismes capables de séparer les éléments non cellulotiques de la partie fibreuse de la plante en éliminant les liaisons qui les unissent. Cette méthode est très efficace. Cependant, ils ne peuvent pas éliminer la polymérisation de la pectine et sont généralement basés sur des conditions naturelles et des conditions agressives.

II.5.2.1 Le rouissage à l'air

Le rouissage est un procédé naturel destiné à favoriser l'extraction des fibres. Il consiste à étaler les tiges (de lin par exemple) dans un champ après sa récolte, afin de bénéficier de l'action combinée du soleil et de la pluie favorisant le développement de microorganismes capables de séparer les éléments non cellulotiques de la partie fibreuse de la plante. Cette opération peut durer de 6 à 8 semaines en fonction de la météo. Malgré l'efficacité de cette méthode, elle connaît plusieurs inconvénients qui résident dans sa dépendance entière des conditions météorologiques (excès d'humidité, vent très fort). Donc le rouissage à l'air est un

procédé efficace si la météo est bonne mais qui reste très lent, par conséquent, c'est un procédé aléatoire.

II.5.2.2 Le rouissage à l'eau

Ce type de rouissage repose sur le même principe de développement de micro-organismes que le rouissage à l'air, la différence est que les tiges (de chanvre par exemple) sont plongées dans l'eau pendant plusieurs jours. Les bottes de 5 à 7 Kg sont soumises à l'action de bactéries anaérobies. Dès que les fibres se détachent sur toute la longueur, la plante est sortie de l'eau pour être séchée. Cette technique donne des résultats moins aléatoires que la première mais elle présente un inconvénient majeur : la pollution de l'eau. En effet, le rouissage du lin et du chanvre est très répandu au nord de l'Europe (France, Belgique, Pays Bas). Le rouissage à l'eau est effectué ensuite en cuve, dans de l'eau tempérée (37°C) jusqu'à ce que les fibres soient délignifiées et non adhérentes. Cette technique est en régression continue, au profit du rouissage à terre.

II.5.3 Extraction chimique

Dans littérature scientifique plusieurs méthodes qui dépendent de la séparation chimique de la cellulose des autres composants non cellulosiques sont proposées. Les méthodes d'extraction chimique des fibres végétales permettent d'éviter les inconvénients d'extraction mécanique, et surtout d'économiser beaucoup de temps et d'énergie.

II.6 Traitements des fibres végétales

Divers types de traitement ont été utilisés afin d'améliorer les propriétés des fibres végétales : traitement chimique pour réduire leur caractère hydrophile, enzymatique pour dissocier les composants polysaccharidiques, physique pour fragmenter la fibre en filament individuel et enrobage pour créer une zone de faible alcalinité autour de la fibre.

II.6.1 Traitement chimique

Le rôle des traitements chimiques est de modifier la surface des fibres : amélioration du mouillage des fibres par la matrice par modification de l'état de surface des fibres et création des liaisons chimiques avec le polymère. L'intérêt de la création de liaisons chimiques est de former une interface durable, résistant aux environnements agressifs, en particulier l'humidité. Le choix du traitement se fait en fonction de la nature des fibres. Plusieurs méthodes ont été essayées, notamment : De nombreux traitements chimiques peuvent être appliqués aux fibres en fonction de leur type, du processus de rouissage à appliquer et des applications finales.

II.6.1.1 Traitement des fibres par mercerisation

Le traitement des fibres le plus couramment utilisé est la mercerisation. La définition standard du mercerisage est la suivante : procédé qui consiste à soumettre une fibre végétale à une interaction avec une solution aqueuse concentrée d'une base forte, dans le but de provoquer un gonflement important résultant en des changements dans la structure fine, la dimension, la morphologie et les propriétés mécaniques. Ce traitement permet d'éliminer les constituants indésirables de la fibre, telles que la lignine, l'hémicellulose et la pectine. Ce qui entraîne des changements dimensionnels, morphologiques et mécaniques des fibres. La texturation de surface par apparition des micro fibrilles donne une rugosité de surface pour faciliter l'adhérence mécanique. L'effet de la soude sur la fibre de cellulose est une réaction de gonflement, au cours de laquelle la structure cristalline naturelle de la cellulose relaxe.



II.6.1.2 Procédé Kraft :

Ce procédé alcalin vise à éliminer la lignine, les pectines et les hémicelluloses sous l'action d'une solution d'Hydroxyde de Sodium (NaOH) et de Sulfure de Sodium (Na₂S). Le soufre de sodium, qui est un réducteur, protège la cellulose et évite son oxydation. La température de cuisson est comprise entre 170° et 175°C pour une durée de 2 à 4 heures. La soude joue également un rôle de délignification qui s'associe à celui du soufre et de ses dérivés. La liqueur appliquée au matériau est appelée liqueur blanche. La liqueur extraite du réacteur contenant les composés éliminés de la paroi est appelée liqueur noire.

II.6.1.3 Procédé au bisulfite

Le procédé au bisulfite permet de séparer la lignine des fibres de cellulose en utilisant divers sels de l'acide sulfureux, tels que les sulfites (SO₃²⁻) ou les bisulfites (HSO₃⁻). Ce processus est basé sur la réaction de la lignine avec l'hydrogénosulfite de calcium, sodium, ammonium ou magnésium, contenant de l'anhydride sulfureux libre. L'anhydride sulfureux est préparé par combustion à partir du soufre dans un excès d'air, et le bisulfite est directement obtenu par réaction de l'anhydride sulfureux. Le pH est situé entre 1,5 et 5 (sulfites ou bisulfites), la durée est comprise entre 4 et 14 heures, et la température est de 130 à 160°C, également en fonction de la base utilisée.

II.6.1.4 Procédé acide

Les composants non cellulosiques sont éliminés en utilisant un acide, de préférence fort, tel que l'acide sulfurique, qui convertit la lignine en acide lignosulfonique soluble. Alternativement, l'acide chlorhydrique, grâce à ses ions chlorates, forme des chlorolignines solubles dans l'hydroxyde de sodium.

II.6.1.5 Procédé Soude-Anthraquinone

Le procédé Soude-Anthraquinone ou Kraft-Anthraquinone fait appel à un catalyseur tel que les composés quinones, dont l'anthraquinone. Cela permet de réduire le temps de cuisson et d'augmenter le rendement en pâte. Les propriétés de ces pâtes sont similaires à celles des pâtes kraft.

II.6.1.6 Procédé au sulfate neutre de sodium

Les fibres sont extraites en utilisant une solution de sulfate de sodium avec du carbonate de sodium à une température de 170° à 180°C sous pression (en autoclave). Ce processus permet de délignifier, sulfoner et dépolymériser les substances ligneuses, tout en dissolvant les hémicelluloses. Cela conduit à la libération des fibres cellulosiques.

II.6.2 Traitement biologique

Le traitement biologique des fibres végétales est une méthode qui utilise des microorganismes, tels que des enzymes ou des bactéries, pour décomposer les parois cellulaires des plantes extraire des fibres.

II.6.2.1 Rouissage à terre

Le rouissage à terre (au champ), une méthode naturelle visant à faciliter l'extraction des fibres, implique de disposer les tiges dans un champ après la récolte pour profiter de l'effet combiné du soleil et de la pluie. Ce processus favorise le développement de micro-organismes capables de séparer les éléments non cellulosiques des fibres végétales en rompant les liaisons qui les unissent. La durée de cette opération varie généralement entre 6 et 8 semaines, selon les conditions météorologiques. Malgré le risque que les tiges soient emportées par un vent trop fort vers l'extrémité du champ, le rouissage à terre reste une pratique attrayante pour les agriculteurs en raison de ses coûts réduits en main-d'œuvre et du rendement élevé des fibres. Pour un bon rouissage, il est essentiel d'avoir une alternance entre des périodes de sécheresse et d'humidité, accompagnée d'un vent léger.

II.6.2.2 Rouissage à l'eau

Dans cette technique, les tiges sont immergées dans l'eau ou dans l'eau de mer (figure I.15). L'eau pénètre dans les parties centrales de la tige et rompt la couche la plus externe, ce qui augmente l'absorption. Un de l'humidité et de la communauté bactérienne pectinolytique développée. Les fibres extraites par rouissage à l'eau sont généralement très longues (longues comme la longueur de la tige) et relativement fortes. Athijayamani et coll. ont extrait les fibres de roselle et de sisal par rouissage dans l'eau pendant 3-4 jours suivis d'un lavage à l'eau courante. El Oudiani et al. ont procédé à l'extraction des fibres d'Agave américaine en utilisant trois méthodes : manuelle, rouissage à l'eau distillée et à l'eau de mer. Ils ont constaté que les fibres extraites présentent manuellement des propriétés mécaniques élevées.

II.7 Qualité des fibres végétales disponibles en Algérie

Avec ses montagnes, ses hauts plateaux et son Sahara luxueux, l'Algérie possède des ressources végétales inépuisables, notamment le liège, l'Halfa, le dis, le doum, le palmier dattier, le pin, le coton, le lin, etc. Avec une production annuelle de 6000 tonnes de liège de près, l'Algérie occupe la sixième place mondiale. Environ 4 millions d'hectares sont occupés par l'Halfa. Il convient également de souligner que l'Algérie compte plus de 10 millions de palmiers dattiers. Par ailleurs, l'Algérie possède de nombreux végétaux tels que le Diss et le Doum... qui demeurent aujourd'hui inexploités [20].

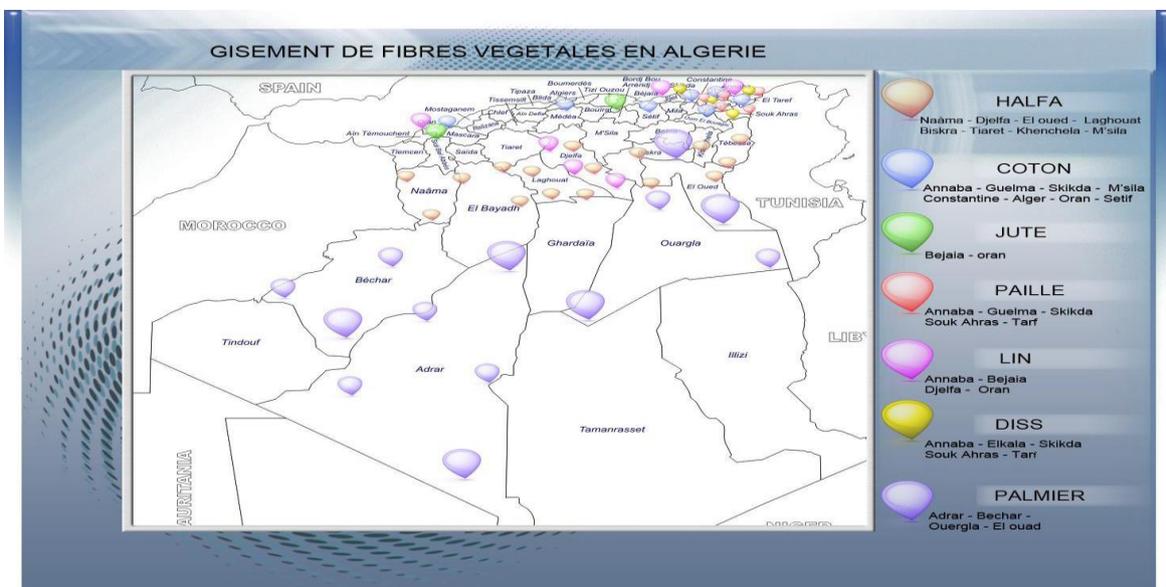


Figure II. 17 : Gisement de fibres végétales en Algérie [3].

II.8 Intérêt de l'utilisation des fibres naturelles

L'encouragement d'utilisation des fibres naturelles à l'échelle mondiale, comme source de renforcement dans les matériaux composites, permet la valorisation des sous-produits agricoles tout en respectant le développement durable. En effet, cette technique ouvre plusieurs perspectives surtout pour les pays les moins industrialisés, avec un minimum d'impact environnemental [21].

II.9 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites :

L'utilisation des fibres végétales en tant que renforts dans les matériaux composites, présente beaucoup d'avantages à condition de remédier à certains inconvénients par différents traitements proposés par la littérature. Les propriétés physico-mécaniques des fibres végétales peuvent être influencées par divers facteurs tels que les conditions de croissance, le climat, l'âge et l'origine végétale. Elles contribuent de manière positive aux propriétés physico-mécaniques des composites. Globalement, ces fibres constituent d'excellents renforts pour les matrices en raison de leur résistance relativement élevée et de leur faible densité. Contrairement aux fibres synthétiques, les fibres ligno cellulosiques renouvelables ont l'avantage de former des boucles plutôt que de se rompre lors de leur transformation et fabrication. De plus, la cellulose présente une plaque à section ovale qui améliore le transfert de charge en offrant un rapport d'aspect efficace plus élevé. Cependant, malgré ces nombreux avantages, les fibres végétales présentent certaines limites et inconvénients lors de leur utilisation comme renfort dans les composites (Tableau II.5).

Tableau II. 5 : Avantages et Inconvénients des fibres végétales.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Faible coût, -Biodégradable (pour l'environnement), - Ressource renouvelable, - Propriétés mécaniques, - spécifiques importantes (résistance et rigidité), -Demande peu d'énergie pour la Production, - Non abrasif pour les outillages, -Bon isolant thermique et acoustique. Neutre pour l'émission de CO₂, - Pas de résidus après incinération, - Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres. 	<ul style="list-style-type: none"> -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 discontinues.

II.10 Applications des fibres végétales

Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont actuellement en cours de développement pour remplacer les matériaux traditionnels. Les principaux marchés sont aujourd'hui l'automobile et la construction.

II.10.1 En construction

Les fibres de diverses natures sont largement utilisées dans la construction pour améliorer les performances mécaniques et physiques de différents ouvrages. L'incorporation de fibres végétales dans le renforcement des ciments est une pratique relativement récente, avec de nombreuses recherches en cours visant à remplacer les fibres d'amiante par des fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus employées dans la fabrication de dalles, de tuiles, de dallages de stationnement et dans le renforcement du plâtre. Par ailleurs, l'utilisation de fibres de polymère, de carbone et d'acier est de plus en plus répandue dans divers domaines, notamment dans la fabrication de panneaux ainsi que dans la restauration et la réparation d'ouvrages anciens endommagés. Les fibres végétales sont utilisées en renfort de matériaux, notamment d'isolation, de produits en ciment, profilés de portes, de fenêtre, panneaux décoratifs...etc.

II.10.2 En automobile

Les entreprises comme Opel Audi, BMW, Renault, Ford, Seat, fabriquent des composites renforcés de fibres végétales : garnitures et panneaux de portes, planches arrière, revêtements intérieurs et passage de roues, voûte interne de pneu, pare-chocs, tableau de bord...etc.

II.10.3 En Infrastructure

Trottoirs, digues, signalisation routières, isolant phoniques...etc.

II.10.4 Autres applications

Les palettes, le mobilier (table de camping ou chaise), équipement de jeux publics [13].

Conclusion

Les fibres végétales possèdent une structure complexe et une composition chimique variable, largement influencées par des facteurs tels que les conditions climatiques, l'âge de la plante et le type de sol, ce qui rend leur étude difficile. Cependant, ces fibres offrent divers avantages pour les applications composites en raison de leur structure creuse et poreuse, qui leur confèrent d'excellentes propriétés isolantes thermiques et acoustiques. Malgré cela, leur forte capacité d'absorption d'eau et la dégradation de certaines composantes chimiques comme l'hémicellulose et la lignine en milieux alcalins limitent leur utilisation comme renfort.

La cellulose, la lignine et la pectine sont responsables respectivement de la résistance, de la rigidité et de la flexibilité des plantes. Les végétaux contenant de l'hémicellulose et de la lignine nécessitent un traitement par des solutions alcalines pour les extractions.

La résistance à la traction des fibres dépend fortement de leur pourcentage total en cellulose, tandis que l'allongement à la rupture est lié à l'angle micro-fibrillaire. De plus, l'orientation de cet angle micro-fibrillaire détermine la ductilité ou la rigidité de la fibre.

CHAPITRE III
RENFORCEMENT DES MORTIERS
AVEC LES FIBRES NATURELLES

III.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'exploitation de la fibre naturelle en tant que renfort pour les matériaux de construction en raison de leurs caractéristiques : renouvelables, biodégradable, souples, de faible densité, peu coûteuses offrant une résistance à la fatigue, de bonnes performances mécaniques (résistance à la traction), une résistance aux températures élevées et une bonne isolation thermique grâce à leur structure creuse et poreuse. La disponibilité mondiale des fibres naturelles telles que le coton, le chanvre, le sisal, le palmier, la canne à sucre, le coco... permet d'offrir des avantages significatifs en termes de durabilité, de respect de l'environnement et de recyclabilité. Leur production nécessite moins de produits chimiques que celle des fibres synthétiques, ce qui réduit la pollution de l'eau et des sols. Actuellement, il est essentiel de modifier la surface des fibres par des traitements chimiques pour améliorer leur adhérence avec la matrice cimentaire, ce qui améliore les propriétés mécaniques.

III.2 Propriétés des mortiers renforcés par des fibres naturelles

III.2.1 Propriétés mécaniques

Wu, Z. et al. [22] ont réalisé un plan expérimental pour tester les propriétés du béton de polystyrène expansé avec l'ajout de fibres de paille de maïs et de particules de béton de polystyrène expansé. Les auteurs ont évalué la densité des échantillons, l'absorption d'eau, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à la traction. La perte de masse et de résistance après les cycles de gel-dégel et les changements de conductivité thermique ont également été évalués. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres de paille de maïs améliore les propriétés mécaniques du béton tout en réduisant sa densité. La résistance du béton a également été affectée après les cycles de gel-dégel, et la perte de qualité du béton avec l'ajout de paille de maïs s'est avérée être de 4,23%. En outre, les performances d'isolation thermique du béton avec l'utilisation de granulats fibres de paille de maïs ont été améliorées de 4 %, et la faible valeur de conductivité thermique était de 0,0402 W/(m·°C). De plus, cette étude a contribué à la sélection de matériaux d'isolation appropriés pour les bâtiments situés dans des régions à fortes variations de température.

Garikapati, P. et Sadeghian P.[23] ont examiné l'utilisation d'un type particulier de béton, appelé béton de lin et de chaux, afin de réduire l'empreinte environnementale dans le domaine de la construction. Les chercheurs ont utilisé un liant à base de chaux mélangé à des déchets de production de fibres de lin pour créer ce béton sans granulats de pierre. Neuf poutres en

béton de lin et de chaux ont été préparées avec les mêmes proportions de mélange, et une couche de tissu a été placée au centre pour renforcer les spécimens. Les chercheurs ont ensuite modifié la position et le nombre de couches de tissu pour améliorer la capacité de charge et la flexion en trois points. Les propriétés physiques et mécaniques des échantillons ont été étudiées, notamment la densité, la capacité de charge, le mode de défaillance et le comportement en flexion sous charge. Les résultats ont montré que la variation de la position et du nombre de couches de tissu augmentait la capacité de flexion et l'absorption d'énergie des blocs de béton de lin et de chaux, ce qui en fait un matériau isolant idéal pour remplir les blocs de maçonnerie et les cavités murales dans les bâtiments.

Sabarish, K.V. et al. [24] ont examiné un béton renforcé par des fibres de sisal pour améliorer la solidité du béton. Dans cette étude, les propriétés du béton renforcé par ces fibres ont été analysées. Des tests de résistance à la compression et de résistance à la flexion ont été réalisés sur des échantillons de béton, et il a été constaté que l'ajout de fibres de sisal augmentait la résistance à la compression et à la flexion du béton. En effet, le béton renforcé par des fibres est plus résistant que le béton conventionnel, ce qui améliore sa résistance initiale.

III.2.2 Propriétés thermiques

Parcesepe, E. et al. [25] ont indiqué que l'utilisation croissante de fibres naturelles comme renfort dans les composites, en remplacement des fibres industrielles, est essentielle pour le développement durable de l'industrie de la construction. Cet article met en lumière l'utilisation du chanvre pour renforcer le mortier de chaux dans les enduits, en considérant à la fois les performances structurelles et thermiques. Selon les auteurs, les fibres naturelles présentent des avantages significatifs tels qu'un coût réduit, un impact environnemental moindre, leur biodégradabilité et leur caractère renouvelable. De plus, ces fibres peuvent offrir des performances mécaniques remarquables par rapport à leur poids, contribuant ainsi à améliorer l'isolation thermique des enduits, notamment avec les fibres de chanvre. Cependant, pour évaluer la durabilité des fibres naturelles et comprendre la relation entre leurs propriétés mécaniques et les paramètres thermiques des études expérimentales supplémentaires sont nécessaires. Ainsi propose un programme expérimental visant à étudier les propriétés mécaniques principales (résistance à la compression, résistance à la flexion) du mortier de chaux renforcé par des fibres de chanvre, soumis à diverses conditions environnementales et processus de vieillissement.

Majumder, A. et al. [26] ont exploré des solutions de rénovation durable en utilisant du mortier renforcé de fibres de jute pour atteindre un équilibre optimal entre les caractéristiques mécaniques et thermiques du composite étudié. Des fibres de jute brutes de divers pourcentages (0,5%, 1%, 1,5% et 2%) et longueurs (5 mm, 10 mm et 30 mm) ont été intégrées comme renfort dans le mortier composite. Les résultats révèlent que l'ajout progressif de fibres et l'augmentation de leur proportion entraînent une réduction des performances mécaniques (résistance à la compression et à la flexion), mais une amélioration linéaire de la capacité isolante par rapport aux échantillons sans fibres. Les fibres plus longues démontrent une meilleure adhérence et une plus grande capacité d'absorption d'énergie, mettant en avant les améliorations apportées par les fibres de jute aux propriétés des composites. Cependant, contrairement à l'isolation thermique, les fibres de 5 mm ont affiché une conductivité thermique inférieure à celles de 10 mm et 30 mm.

Majumder, A. et al. [10] ont aussi étudié le comportement thermique de divers matériaux recyclés ou à base de fibres naturelles pour l'isolation des bâtiments, ils ont constaté que le secteur du bâtiment est un contributeur majeur aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (environ 36%) et à la consommation mondiale d'énergie (40%). La majeure partie de cette consommation se situe pendant la phase opérationnelle des bâtiments, avec 10 à 20% utilisés dans leur fabrication, transport, construction, entretien et démolition. Pour atténuer cet impact environnemental, de nouveaux matériaux de construction thermo-isolants ont été développés en utilisant des matériaux naturels et des déchets/recyclés locaux. Les résultats ont démontré une amélioration potentielle des performances énergétiques et du confort environnemental. Pour les enduits et mortiers, les valeurs de conductivité thermique (à 20°C) étaient inférieures à 0,475 W/ (m.K) et inférieures à 0,162 W/ (m.K) pour les matériaux de construction à base de fibres naturelles, les matériaux de construction intégrant des matériaux recyclés étant les plus performants avec 0,107 W/ (m.K).

Constantin, G. et al. [27] se sont concentrés sur l'évaluation de la performance thermique d'un bâtiment utilisant du béton de chanvre comme isolation extérieure. Contrairement à la plupart des études existantes qui portaient sur des murs expérimentaux avec un vieillissement court, cette étude s'est focalisée sur un bâtiment existant en béton de chanvre occupé pendant 10 mois dans des conditions réelles. Des dispositifs expérimentaux ont été utilisés pour mesurer les conditions météorologiques extérieures, la température et l'humidité à l'intérieur du bâtiment, ainsi que le flux de chaleur à travers la façade sud. Les résultats indiquent que les conditions de température et d'humidité étaient acceptables à l'intérieur de l'appartement et ont

mis en évidence l'impact du comportement des résidents sur leur appartement. Une validation numérique a été réalisée pour le flux de chaleur à travers la façade et la température de l'air intérieur, montrant une bonne concordance entre les données expérimentales et les résultats numériques. Les résultats de cette étude illustrent les avantages du béton de chanvre en tant qu'isolant thermique dans les bâtiments.

III.2.3 Durabilité

Ahmad, J. et al. [28] ont signalé que la transition vers des pratiques plus durables dans le secteur de la construction a entraîné une augmentation de l'utilisation de ressources renouvelables, notamment des fibres naturelles biodégradables. Cet article résume les avancées de la recherche sur le béton renforcé de fibres de coco et examine leur impact sur les propriétés du béton. Les résultats montrent que les fibres de coco améliorent les performances mécaniques du béton en prévenant les fissures, de manière similaire aux fibres synthétiques, tout en réduisant sa fluidité. Elles renforcent particulièrement la résistance à la flexion (47%) par rapport à la résistance à la compression (12%). De plus, une amélioration de certaines propriétés de durabilité a été observée.

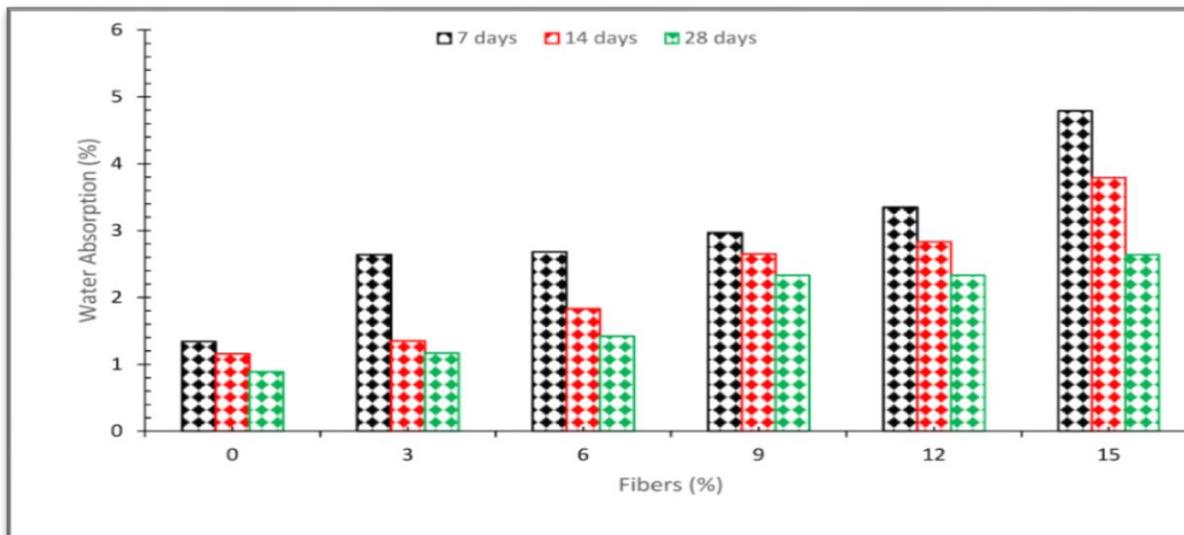


Figure III. 1 : Absorption d'eau [9].

La (**Figure III.1**) illustre l'absorption d'eau du béton avec différentes doses de fibres de coco. Avec l'ajout de fibres de coco, on peut noter que la quantité d'eau absorbée augmente. Une absorption d'eau plus élevée dans le béton peut conduire à une durabilité réduite, car l'eau peut contenir des substances nocives qui s'infiltrent dans le matériau, entraînant sa détérioration et une durabilité moindre. D'autre part, des résultats indiquent que des niveaux accrus de fibres de coco dans le béton peuvent réduire son absorption d'eau, ainsi que l'augmentation de la densité du béton a également un effet de réduction sur son absorption d'eau.

Abdalla, J.A. et al. [29] ont mis en évidence l'importance primordiale de la durabilité dans le secteur de la construction. Les auteurs rapportent que les fibres naturelles d'origine végétale s'avèrent être des composants efficaces dans les composites de béton de ciment. Ce document propose une synthèse concise de l'utilisation des fibres naturelles de chanvre, de kénaf et de bambou dans le béton à base de ciment. Les propriétés de fraîcheur, de durcissement et de durabilité du béton renforcé de fibres naturelles sont abordées de manière succincte. Leur résultat démontre que l'incorporation de fibres de chanvre améliore la résistance à la compression, à la traction, à la flexion et la ténacité du béton. Les fibres de bambou, quant à elles, peuvent être ajoutées à différentes concentrations dans le béton pour obtenir une ductilité spécifique. Dans l'ensemble, les fibres de bambou renforcent la résistance à la traction et à la torsion des échantillons de béton. Néanmoins, les études sur la durabilité du béton contenant ces fibres naturelles demeurent limitées dans la recherche, soulignant ainsi la nécessité de mener des études plus approfondies pour une utilisation efficace de ces matériaux.

Thanushan, K. et al. [30] ont évalué les effets de l'incorporation de fibres de coco sur la résistance post-pic des blocs de ciment en terre. Des blocs de ciment en terre renforcés par des fibres de coco de différentes proportions ont été soumis à des tests de compression axiale et de flexion pour analyser leur capacité de charge maximale, leur résistance résiduelle post-pic et leur ténacité. Les résultats ont montré que le renforcement par les fibres de coco améliorait significativement la résistance résiduelle, la ductilité et l'absorption d'énergie des blocs de terre-ciment. De plus, l'ajout de fibres de coco dans le mortier a permis de réduire la sensibilité aux attaques alcalines et acides, renforçant ainsi la durabilité du matériau. Une amélioration similaire de la durabilité a été observée face aux cycles de gel-dégel et de séchage humide.

Toledo Filho, R.D. et al. [31] ont mené une recherche expérimentale sur les performances de durabilité des stratifiés de mortier de fibres-ciment de sisal moulés par compression. Pour améliorer les performances du matériau, le ciment Portland a été remplacé par de l'argile calcinée (métakaolin et brique d'argile concassée de déchets calcinés) pour produire une matrice sans hydroxyde de calcium. Les composites développés ont été soumis à un vieillissement accéléré par des cycles de mouillage et de séchage pour étudier leur durabilité. Les résultats ont montré que la matrice sans hydroxyde de calcium a préservé la ténacité des fibres, même après 100 cycles de mouillage et de séchage, évitant ainsi la fragilisation des fibres et maintenant la résistance du matériau dans le temps.

Wei J. et Meyer C. [32] ont proposé une approche novatrice pour accroître la durabilité des fibres de sisal dans les composites de ciment en utilisant les cendres de balle de riz, un sous-produit des centrales électriques à biomasse. L'impact des cendres de balle de riz sur la dégradation des fibres a été évalué à la fois indirectement, en testant la résistance à la flexion des poutres composites sisal-fibres-ciment, et directement, en analysant les propriétés de traction uniaxiale, de décomposition thermique, d'indices de cristallinité et de microstructures des fibres après 30 cycles de mouillage et de séchage. En comparaison avec des cendres volantes et des mélanges de métakaolin et de nanoargile, les cendres de balle de riz ont montré des effets pouzzolaniques significatifs, améliorant la résistance à la traction ultime de 384 % et la fraction de cellulose des fibres de 45 %. L'hydratation du ciment et la dégradation des fibres de sisal ont été examinées, mettant en évidence l'influence de facteurs tels que le degré d'hydratation, la présence d'hydroxyde de calcium et l'alcalinité de la matrice cimentaire sur les processus d'attaque alcaline et de minéralisation des parois cellulaires des fibres. L'incorporation de cendres de balle de riz a considérablement amélioré la durabilité des composites en atténuant la dégradation des fibres, avec des résultats comparables voire supérieurs à ceux obtenus avec les cendres volantes et les mélanges de métakaolin et de nanoargile. Ces résultats soulignent l'efficacité des cendres de balle de riz dans la préservation de l'intégrité des fibres de sisal et mettent en lumière les relations entre ces différents paramètres.

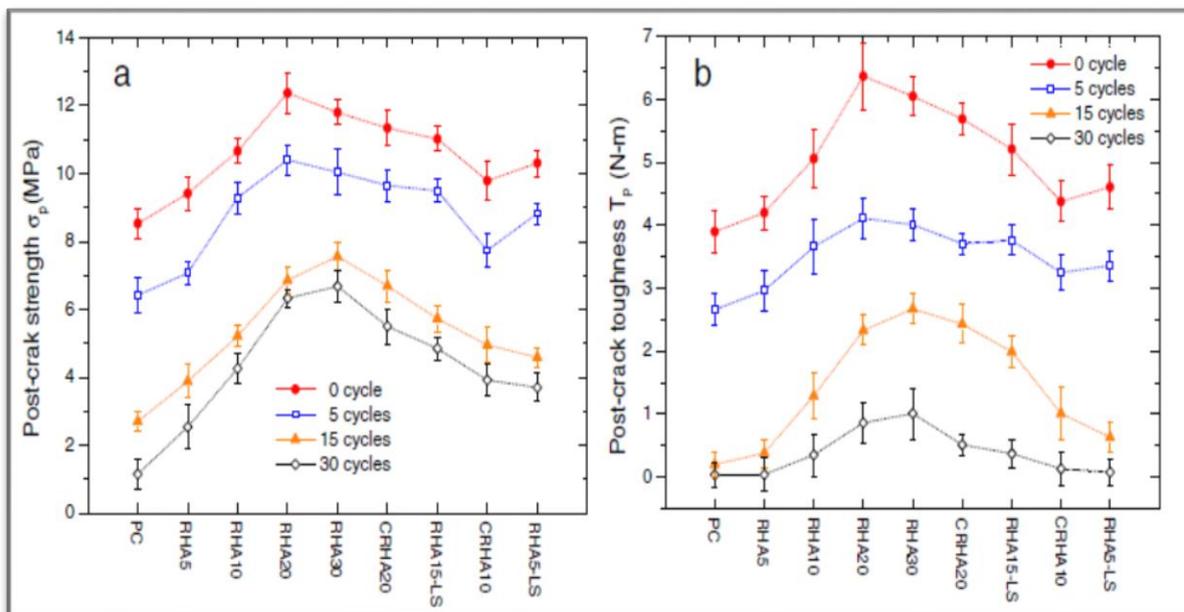


Figure III. 2 : Effet des cendres de balle de riz sur la durabilité des composites de ciment renforcés par des fibres de sisal, déterminée par la résistance après fissuration (a) et la ténacité (b).

Les résultats montrent que la substitution partielle de RHA au ciment non seulement les propriétés mécaniques initiales du mortier renforcé de fibres de sisal, mais de sisal, mais améliore également de manière significative la résistance à la flexion et la ténacité des composites après avoir été soumis à des cycles de mouillage et de séchage. cycles. La résistance à la flexion et la ténacité des échantillons de PC renforcés de fibres de sisal (sans remplacement) subissent la baisse la plus marquée avec l'augmentation du nombre de cycles (**Figure III.2**).

III.3 Impact du traitement des fibres sur le renforcement des mortiers

Plusieurs articles (**Tableau III.1**) ont été examinés afin d'analyser l'impact des fibres naturelles traitées sur le comportement mécanique et les caractéristiques physiques et thermiques des composites.

Tableau III. 1 : Impact des fibres naturelles traitées.

Auteurs	Type de fibre	Traitement	Type du mortier	Revue	Date	Réf
Chafei, Sawsen, et al.	lin	Acide citrique	Ciment	Journal des matériaux en génie civil	2024	[33]
AmsaluFode, Tsion, et al.	Sisal	les alcalis et la pouzzolane	Ciment	Journal of Natural Fibers	2024	[34]
<u>MA Gómez-Casero</u> , et al.	Taille d'olivier	- 10 % en poids de Na_2SiO_3 - 3 % en poids de CaCl_2 . - 5 % en poids de NaOH .	Ciment	Archives of Civil and Mechanical Engineering	2024	[35]
Jessica Zamboni Schiavon, et al.	Coco	5% l'acideoxalique	Ciment	Journal of materials Research and Technology	2024	[36]
Lahouioui,et al	Fibres de bois de palmier	par lixiviation alcoolique au traitement à la soude	Ciment	National Engineering School of Gabes	2023	[37]

Souza Castoldi, et al. Raylane	Sisal	Solutions alcaline	Ciment	RILEM Bookseries	2022	[38]
Motahareh, et al.	Lin	alcalis	Béton	Journal of Building Engineering	2022	[39]
SoukainaAjouguim	Halfa	-Alcalin. – hydrothermal -Enrobage par ciment sulfo- alumineux. ultrason et enzymatique.	Ciment	Science pour l'ingénieur Génie Civil	2022	[40]
Abirami R.	Sisal	Na ₂ CO ₃	Béton	Nature Environment and Pollution Technology	2022	[41]
HocineKhelifa, et al.	Maille de palmier	Na OH	Ciment	Construction and Building Materials	2021	[42]
Ismail Shah, et al.	Chanvre, coco, sisal	Na OH	Béton	<u>Journal of Natural Fibers</u>	2021	[43]
Messaouda Boumaaza, et al.	Jute, sisal, lin et	Concentrations de NaOH (1,5 %, 2 % et 4 %)	Platre	<u>Journal of Natural Fibers</u>	2020	[44]

Juradin, Sandraet al.	Chanvre	Na OH	Ciment	Construction and Building Materials	2020	[45]
Kareche, A.et al.	Palmier dattier	NaCL, Na OH	Béton	Waste and Biomass Valorization	2020	[46]
Yang, B. et al	Bamboo	Glycérol, à l'ester d'aluminate et au silane.	Ciment	Polymers	2020	[47]
Poletanovic, B. et al.	Chanvre	Na OH	Ciment	Construction and Building Materials	2020	[48]
Latifa Morjène et al.	Fibre de Bois	Na OH	Ciment	Académie des sciences-Institut De France-	2020	[49]
Silva et al.	Coconut	Latex naturel	Ciment	Materia-Rio de Janeiro	2018	[50]
Lima et al.	Sisal	1%NaOH	Ciment	Journal of Engineered Fibers and Fabrics	2017	[51]

III.3.1 Propriétés mécaniques

Amsalu Fode, T. et al. [52] ont examiné dans la revue, l'amélioration de la dégradation de la pouzzolane et de la fibre de sisal par les alcalis pour les mortiers cimentaires. Les auteurs rapportent que plusieurs chercheurs ont utilisé des techniques alcalines et pouzzolaniques pour traiter la fibre de sisal dans les matériaux composites à base de ciment car la fibre de sisal se dégrade en raison de l'humidité et de la minéralisation du ciment. Par conséquent L'analyse de diverses études a démontré que l'utilisation de 1 à 1,5 % de fibre de sisal traitée avec un matériau alcalin ou pouzzolanique diminue la facilité de manipulation tout en améliorant les propriétés mécaniques. De plus, plusieurs auteurs ont observé que le traitement de la fibre de sisal avec un matériau pouzzolanique entraîne en moyenne une augmentation de la résistance à la compression et à la traction des matériaux de cimentation de 21,75 % et 36,53 %, respectivement, tandis que le traitement alcalin entraîne des augmentations de 12,83 % et 14,92 %, respectivement, par rapport au mélange de référence (**Figure III.3**).

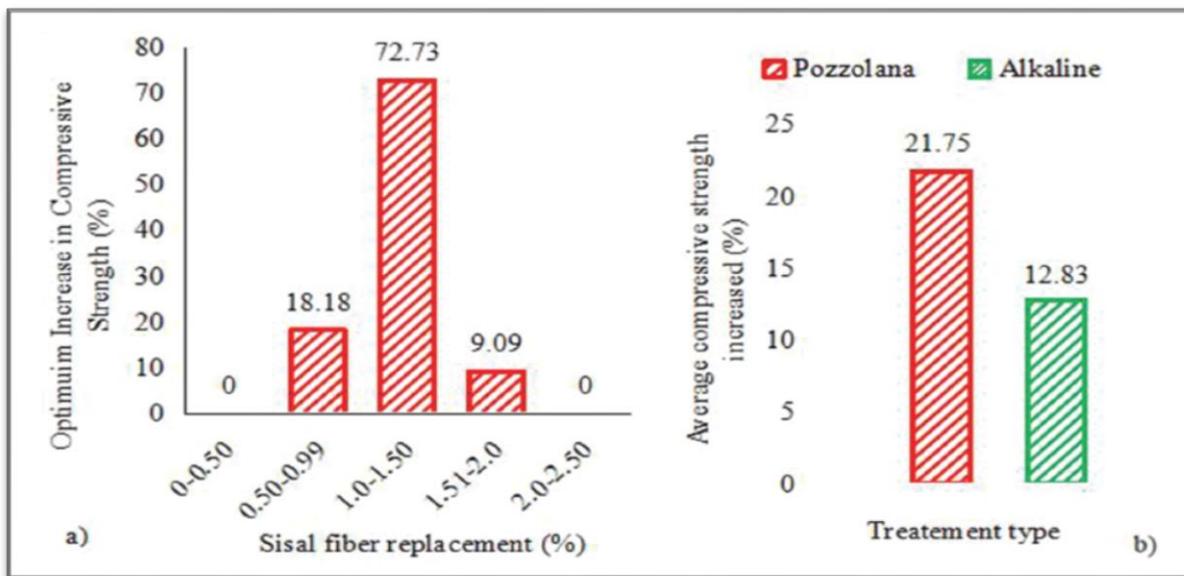


Figure III. 3 : (a) différentes doses de fibres de sisal qui donnent une résistance optimale à la compression et (b) amélioration moyenne de la résistance à la compression par des fibres de sisal traitées avec des matériaux pouzzolaniques et alcalins [33].

Bollino, F. et al. [53] ont examiné les composites renforcés de fibres naturelles, qui sont fabriqués à partir de fibres de chanvre traitées chimiquement avec des solutions alcalines de NaOH ou des solutions de (3-glycidioxypropyl) triméthoxysilane (GPTMS) de différentes concentrations. Ces composites ont été testés en traction et pour leur capacité à absorber de l'eau. Les résultats indiquent que les traitements contenant 5 % de NaOH et de silane sont les plus performants, diminuant l'absorption d'eau des composites de 7,74 % à 6,46 % et 5,58 %

respectivement à température ambiante, et de 9,67 % à 8,19 % et 8,13 % respectivement à 50 °C. Les tests mécaniques effectués avant et après le test d'adsorption d'humidité révèlent que l'absorption d'eau entraîne principalement une réduction de la rigidité, d'environ 50 % avec des traitements alcalins et environ 60 % avec des traitements au silane, mais de manière non significative.

Azevedo., A.R. et al. [54] ont étudié le potentiel d'utilisation de la fibre naturelle d'ananas (*Ananas comosus*), extraite de ses feuilles, comme matériau de renforcement dans les composites cimentaires. Les fibres obtenues par extraction de la couronne d'ananas ont été mélangées à différents pourcentages de la masse de ciment : 0, 2,5, 5, 7,5 et 10 %. Ensuite, elles ont été trempées dans une solution aqueuse de NaOH à 5 % de concentration volumique pendant 1 heure à température ambiante. Les paramètres suivants ont été mesurés : consistance, rétention d'eau, air incorporé, densité de masse à l'état durci, résistance mécanique, absorption d'eau par immersion et capillarité. L'influence du mode d'incorporation des fibres a également été examinée. Le traitement avec une solution de NaOH a entraîné une diminution de l'absorption d'eau par les fibres, améliorant ainsi le processus de durcissement des mortiers de pose et d'enduit grâce à une meilleure adhésion entre la matrice cimentaire et le renfort de fibres naturelles. En effet, l'ajout de fibres traitées jusqu'à 5% a permis de maintenir les propriétés d'ouvrabilité des mortiers tout en augmentant progressivement les propriétés de rétention d'eau (de 92,49 à 92,98%) et en réduisant la concentration de l'air incorporé (de 9,28 à 9,16%).

Schiavon, J. Z. et al. [36] ont examiné l'incorporation de fibres de coco traitées chimiquement dans des mortiers composés de ciment et de chaux, en ajoutant du coco (1 % et 2 % par rapport à la masse de ciment), et en les traitant avec de l'acide oxalique et du bicarbonate de sodium. La résistance à la traction a été maximale pour le mortier avec 2% de fibres ajoutées et traité à l'acide oxalique après 28 jours, atteignant 2,89 MPa, soit 21,9% supérieure à celle du matériau de référence (**Figure III.4**). Aussi, la résistance en compression a également été satisfaisante selon les normes brésiliennes et internationales, atteignant à 28 jours (8,50 MPa), 3,8 % supérieure à la référence, réduit le taux de carbonatation dans les mortiers à base de fibres de coco, impactant également la distribution des pores.

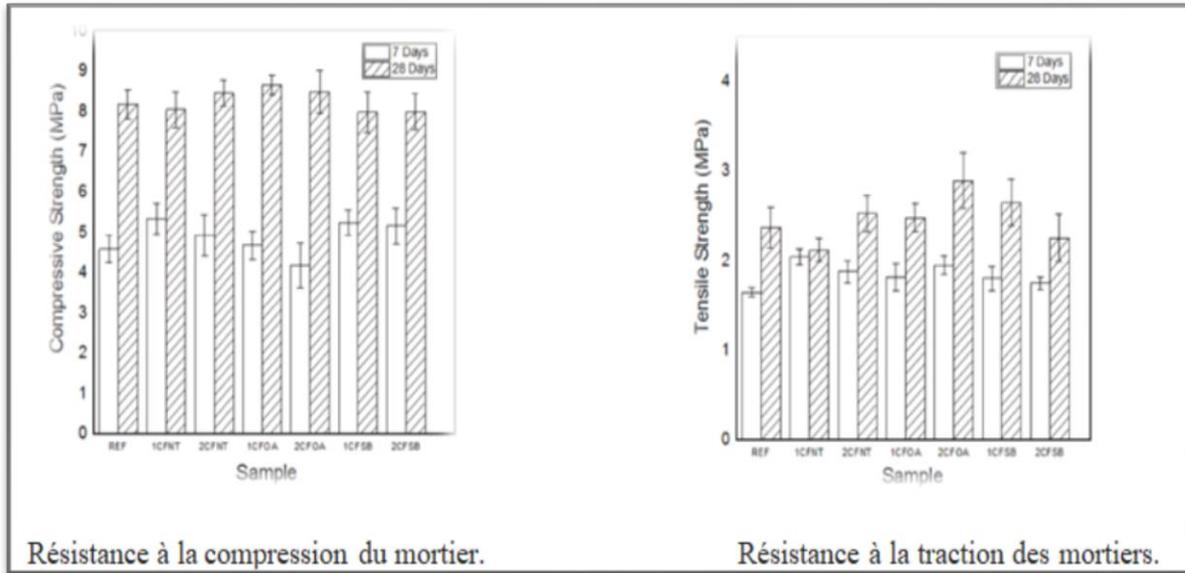


Figure III. 4 : Résistance en compression et en traction [17].

Les résultats obtenus permettent de conclure que le traitement chimique des fibres améliore leurs propriétés en vue d'une utilisation efficace dans les mortiers, offrant ainsi une alternative prometteuse pour la production de matériaux composites.

Rahimi, M. et al. [39] ont mené une étude sur l'utilisation de fibres naturelles dans les systèmes cimentaires pour créer un béton à haute performance à retrait autogène. Les auteurs ont mentionné que les fibres naturelles possèdent des caractéristiques attrayantes, telles que l'abondance et le caractère renouvelable, ainsi que des fonctionnalités bénéfiques pour le béton, comme la stabilité volumétrique et le contrôle des fissures. Les chercheurs ont étudié l'effet des fibres naturelles brutes et traitées à l'alcali sur le retrait autogène du béton à haute performance, ainsi que leurs propriétés fraîches et mécaniques. Leur résultat ont montré que l'utilisation de fibres traitées à l'alcali permet d'obtenir un mélange de béton à haute performance avec un retrait autogène réduit de 26 %, tout en conservant une meilleure fluidité, une résistance à la compression et une résistance à l'usure supérieures. En revanche, l'adjuvant réducteur de retrait a un effet négatif sur la fluidité du mélange et les performances mécaniques, bien qu'il réduise le retrait autogène après 7 jours. De même, l'utilisation de l'agrégat léger schiste expansé réduit le retrait autogène, mais n'a pas d'effet notable sur les performances mécaniques.

III.3.2 Propriétés thermiques

Lahouioui, M. et al. [37] ont étudié la faisabilité technique d'introduire des déchets de palmiers dans le ciment afin de créer un nouvel éco-composite léger et isolant thermique et acoustique. L'augmentation de la quantité de fibres dans les composites entraîne une réduction

de la conductivité thermique, de la diffusivité et de la densité. Le dégraissage des fibres améliore les propriétés mécaniques et rend les composites moins fragiles. Les matériaux utilisés dans le secteur du bâtiment doivent répondre à des exigences thermiques pour réduire la consommation d'énergie. Dans ce contexte, l'ajout de poudre de tige de palmier, un déchet isolant, peut être une bonne solution, bien que cela puisse dégrader les propriétés mécaniques du ciment. Une étude précédente a montré que le prétraitement des fibres peut améliorer les propriétés mécaniques des composites. Ainsi, l'objectif de cette étude était de comparer le prétraitement par lixiviation alcoolique au traitement à la soude. Des observations au microscope électronique à balayage ont été aussi effectuées (**Figure III.5**).

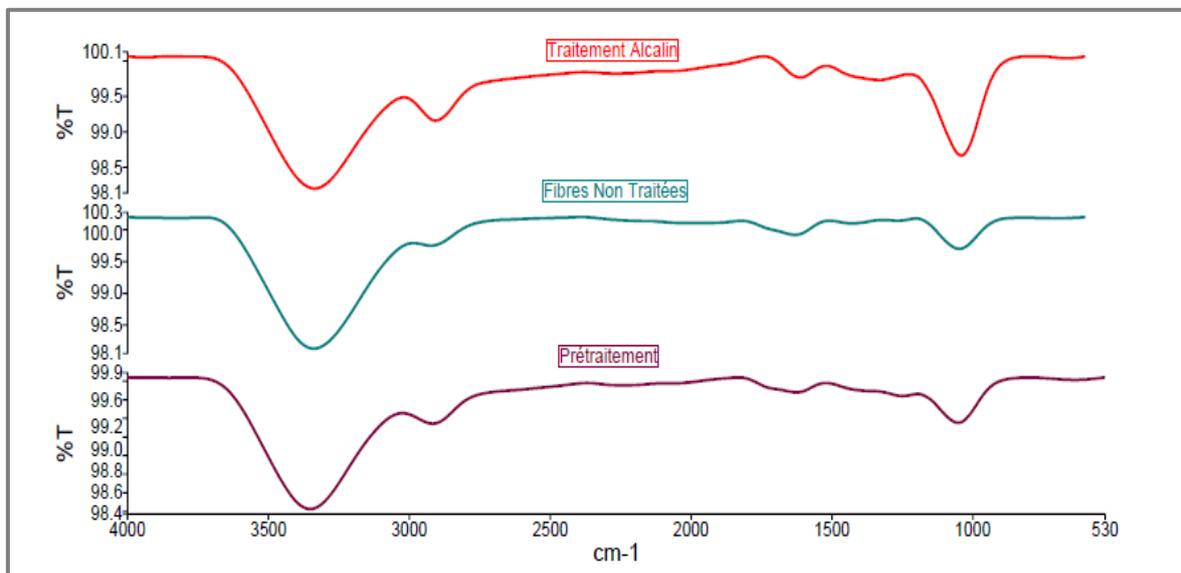


Figure III. 5:Spectre infrarouge en mode ATR des fibres non traitées, prétraitées et traitées[18]

Umurigirwa, BS. [55] a optimisé la performance énergétique des bâtiments en développant de nouvelles normes. Une solution prometteuse pour assurer le confort à l'intérieur des bâtiments est l'utilisation de matériaux écologiques tels que le béton de chanvre. Ses travaux se sont concentrés sur le développement et l'optimisation d'un agro-matériau à base de copeaux de chanvre et d'un liant d'amidon de blé. L'auteur a étudié le rapport massique entre l'amidon et le chanvre et son impact sur les propriétés mécaniques du matériau. Le coefficient d'absorption acoustique a également été mesuré afin de trouver la composition optimale. Un traitement de surface à base de NaOH et d'un agent de couplage est réalisé pour améliorer l'adhésion des fibres de chanvre au liant d'amidon. L'influence de ce traitement sur les fibres de chanvre est analysée à l'aide de différentes techniques de caractérisation. Enfin, les propriétés hygrothermiques du matériau avec et sans traitement des fibres sont également analysées.

III.3.3 Durabilité

Amjad, H. et al. [56] ont examiné l'utilisation combinée de fibres de sisal et de bactéries *Bacillus Subtilis* pour améliorer le béton. Les résultats ont montré que l'ajout de *Bacillus Subtilis* augmente la résistance à la compression (14%), à la traction (36.8%), à la flexion (30.9%) et au cisaillement (25.4%) du béton par rapport au béton de référence. Les fibres de sisal réduisent également le retrait linéaire du béton. En ce qui concerne la durabilité, la combinaison des fibres de sisal et *Bacillus Subtilis* offre une résistance accrue à l'absorption d'eau (18,3%), à la pénétration des ions chlorure (24%) et aux attaques acides (14,1%). Les auteurs ont conclu que l'utilisation combinée de *Bacillus Subtilis* et de fibres de sisal permet d'obtenir un béton plus résistant et durable. Cela a des implications intéressantes pour l'industrie de la construction.

De Klerk, M.D. et al. [57] ont mené une recherche sur la dégradation de la fibre de sisal dans une matrice cimentaire alcaline et les mesures prises pour contrer ce problème. Les chercheurs ont appliqué un traitement alcalin et une acétylation avec de l'hydroxyde de sodium et de l'acide acétique pour prévenir cette dégradation. Des essais ont été réalisés pour évaluer l'effet de ce traitement sur la résistance des fibres, leur interaction avec la matrice et déterminer leur longueur critique. Des tests de flexion ont été effectués pour évaluer la résistance du composite, ainsi que des tests de vieillissement en immergeant les échantillons dans différents environnements. Les résultats montrent que le traitement alcalin combiné à l'acétylation est le plus efficace pour améliorer la durabilité des fibres de sisal dans le béton. Cependant, une concentration élevée d'hydroxyde de sodium entraîne une réduction significative de la résistance. En conclusion, le traitement chimique améliore la durabilité des fibres de sisal dans le béton, malgré une légère diminution de la résistance.

Belkadi, A.A. [58] a scindé ses recherches en deux volets. La première partie examine l'influence de différents types de fibres (Chanvre, Chènevotte, Palmier dattier, Halfa, Diss et Polypropylène) sur les caractéristiques à court et long terme du béton auto plaçant. Sept mélanges de béton auto plaçant ont été testés pour évaluer leur résistance à la compression et à la flexion, leur retrait, leur fluage, leur comportement au feu et leur résistance aux attaques sulfuriques. La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'effet des fibres végétales (à l'exception de la chènevotte) traitées à l'hydroxyde de calcium sur les propriétés des mortiers à base de métakaolin. Les mortiers ont été évalués en termes de conductivité thermique, de

carbonatation, de résistance au gel-dégel et de comportement à haute température. Une analyse microstructurale a également été réalisée. Les résultats montrent que l'incorporation de fibres végétales dans les bétons auto plaçants permet d'obtenir des performances à l'état frais et durci comparables à celles d'un béton auto plaçant sans fibres. Cependant, un traitement préalable des fibres végétales est nécessaire pour améliorer leur durabilité.

Tolêdo Filho, R.D. et al. [59] ont étudié la durabilité des fibres de sisal et de coco exposées à des solutions alcalines d'hydroxyde de calcium et de sodium. Ils ont examiné également la durabilité et la microstructure des composites de mortier de ciment renforcés par ces fibres lorsqu'ils sont soumis à des conditions d'humidité, de séchage et de conditions atmosphériques. Les fibres exposées à une solution d'hydroxyde de calcium de pH 12 ont perdu leur flexibilité et leur résistance après 300 jours. Les composites fabriqués avec ces fibres ont montré une réduction significative de leur ténacité après six mois d'exposition aux intempéries ou à des cycles d'humidification et de séchage. Cette fragilisation des composites est principalement due à la minéralisation des fibres causée par la migration des produits d'hydratation, notamment l'hydroxyde de calcium, dans les fibres. De plus, l'étude a également examiné la possibilité d'une attaque biologique sur les fibres, en les exposant à l'eau du robinet pendant 420 jours.

Les résultats indiquent une réduction significative de la résistance du sisal et de la noix de coco conditionnée lorsque la solution d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est appliquée après 210 jours (**Figure III.6**). Après 300 jours, il a été constaté que 33,7 % et 58,7 % de la résistance initiale étaient maintenus pour le sisal et la noix de coco, respectivement. L'élasticité des fibres séchées à l'air a été restaurée et elles peuvent être facilement tirées avec les doigts. Lorsque le sisal et la noix de coco ont été immergés dans de l'hydroxyde de sodium ($\text{Na}(\text{OH})$), 72,7 % et 60,9 % de la résistance initiale ont été conservés après 420 jours. L'attaque alcaline plus importante par $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est attribuée à la cristallisation de la chaux dans les pores. La perte de résistance dans le temps s'explique moins par l'immersion des fibres dans l'eau du robinet. La résistance a diminué de $17 \pm 23\%$ après 420 jours dans l'eau, ce qui est attribué à l'effet microbiologique.

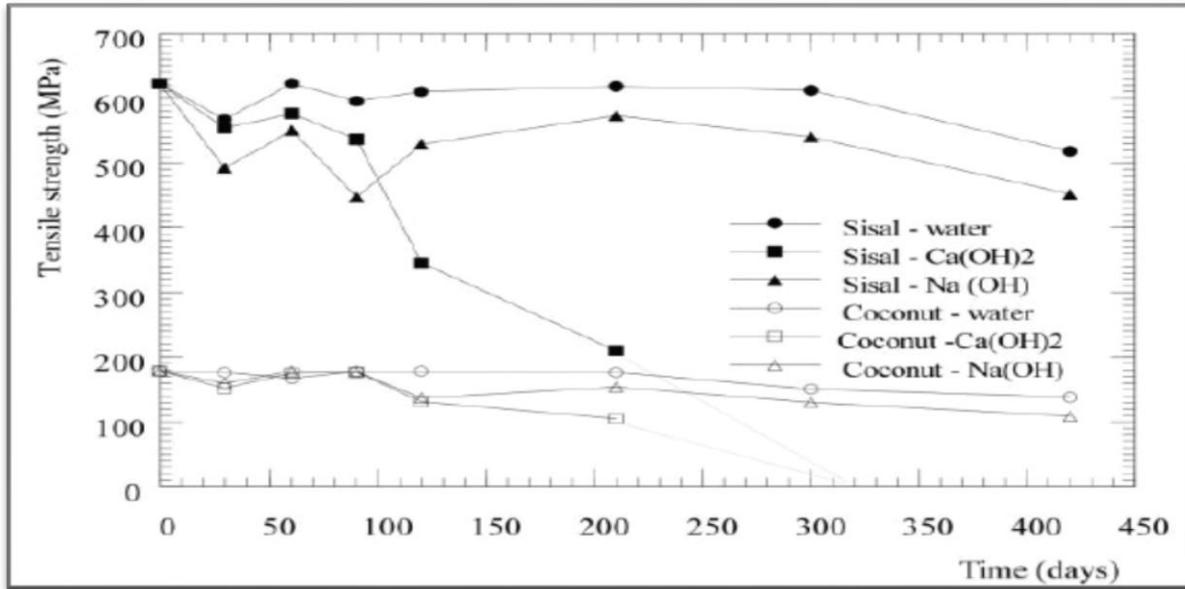


Figure III. 6 : Comportement des fibres de sisal et de noix de coco vieilles dans des solutions alcalines et dans l'eau du robinet.

III.4 Discussion

Grace à une approche systématique, Ce document présente une revue systématique de la littérature sur l'utilisation des fibres naturelles pour renforcer les matériaux de construction. Il met en évidence l'importance des fibres provenant des sources renouvelables et respectueuses de l'environnement, telles que le sisal, palmier, jute, chanvre et le coco ...etc. Les articles examinés mettent en avant l'intérêt croissant des professionnels du secteur pour l'utilisation de ces fibres naturelles comme renfort dans les mortiers. Des revues spécialisées telles que Construction and Building Materials et Composite Structures ont publié des études portant sur les performances mécaniques, physiques, thermiques et durables de ces matériaux renforcés par des fibres naturelles. Cette recherche contribue à mieux comprendre les avantages potentiels et les applications des fibres naturelles dans les matériaux de construction, offrant ainsi une alternative écologique et économique pour le renforcement des structures.

Cette étude a mis en évidence l'utilisation de fibres naturelles dans le renforcement des mortiers, et plus particulièrement sur leurs propriétés mécaniques, thermiques et de durabilité. Une analyse des différents types de mortiers tels que le ciment, le béton, le béton autoplaçant, la chaux, etc... a été réalisée afin d'évaluer l'effet de l'ajout de fibres naturelles en tant que renfort. L'objectif principal de cette étude est de repérer les différentes fibres naturelles les plus fréquemment employées, de saisir leur utilisation et d'évaluer leur efficacité en matière de renforcement des mortiers. Expliquer davantage le renforcement des mortiers de ciment et

des bétons classiques. La mise en place de fibres naturelles est analysée en tenant compte de leur aptitude à améliorer les caractéristiques mécaniques et la longévité de ces matériaux. En nous intéressant à la performance des fibres naturelles dans le renforcement des mortiers, nous avons tenté de déterminer les fibres les plus adaptées pour renforcer ces matériaux de construction, en prenant en considération leur durabilité et leur efficacité. Cette étude a mis en lumière le sisal comme la fibre la plus couramment étudiée, suivie par d'autres fibres telles que le chanvre, la cellulose, le palmier dattier, la noix de coco, le jute et le lin. Ces fibres ont été testées dans divers matériaux de construction tels que le béton, le ciment et le béton autoplçant. Les études récentes ont souligné que le prétraitement des fibres peut améliorer leurs performances, les rendant ainsi plus attrayantes pour l'industrie des matériaux de construction durables.

L'importance de la recherche sur le renforcement des mortiers cimentaires et du béton, a mis en évidence les nombreuses études récentes sur le sujet. L'augmentation de la quantité de fibres dans les composites entraîne une réduction de la conductivité thermique, de la diffusivité et de la densité. Le dégraissage des fibres améliore les propriétés mécaniques et rend les composites moins fragiles. Les matériaux utilisés dans le secteur du bâtiment doivent répondre à des exigences thermiques pour réduire la consommation d'énergie. Dans ce contexte, l'ajout de poudre de tige de palmier, un déchet isolant, peut être une bonne solution, bien que cela puisse dégrader les propriétés mécaniques du ciment. Plusieurs études ont montré que le prétraitement des fibres peut améliorer les propriétés mécaniques des composites.

Le renforcement des mortiers cimentaires et du béton est devenu un domaine d'étude important en raison de l'augmentation de la demande pour des matériaux plus durables et plus respectueux de l'environnement. Les recherches récentes se sont concentrées sur l'évaluation des propriétés mécaniques, physiques, thermiques et de durabilité des composites renforcés par des fibres naturelles. Ces recherches ont montré que l'incorporation de ces fibres dans les mortiers peut améliorer significativement les performances mécaniques et la durabilité des matériaux, tout en réduisant leur impact environnemental. Cependant, un point clé soulevé est que les fibres naturelles, en raison de leur nature hydrophile, peuvent se détériorer dans un environnement alcalin comme celui du ciment.

Les travaux de nombreux chercheurs sur l'incorporation de fibres naturelles dans le mortier ont révélé plusieurs effets notables sur les propriétés physiques du matériau.

III.4.1 Réduction de la densité du mortier

III.4.1.1 Introduction de fibres naturelles

Les fibres naturelles, telles que les fibres de coco, de sisal, de jute, etc., sont souvent moins denses que les granulats traditionnels utilisés dans le mortier. Lorsque ces fibres sont incorporées dans le mélange, elles remplacent une partie du volume occupé par des matériaux plus denses, ce qui entraîne une diminution globale de la densité du mortier.

III.4.1.2. Structure poreuse des fibres

Les fibres naturelles ont une structure cellulaire qui peut contenir des poches d'air et de l'eau, contribuant ainsi à une réduction de la densité globale du composite.

III.4.2 Amélioration de la porosité

III.4.2.1 Augmentation des espaces vides

L'incorporation de fibres naturelles crée des espaces vides ou des cavités dans le mortier. Ces espaces, situés autour des fibres, augmentent la porosité globale du matériau.

III.4.2.2 Distribution des fibres

La distribution irrégulière des fibres naturelles dans le mortier peut créer des chemins interconnectés de porosité. Ces chemins facilitent la formation de pores capillaires qui augmentent la porosité globale du mortier.

III.4.3 Augmentation de la capacité d'absorption d'eau :

III.4.3.1 Effet de la porosité accrue

Une porosité accrue signifie qu'il y a plus de cavités et de canaux dans le mortier. Ces espaces peuvent retenir l'eau, augmentant ainsi la capacité d'absorption du matériau.

III.4.3.2 Propriétés hydrophiles des fibres

Les fibres naturelles ont souvent des propriétés hydrophiles, ce qui signifie qu'elles peuvent attirer et retenir l'eau. Lorsque ces fibres absorbent l'eau, elles contribuent à la capacité d'absorption d'eau du mortier dans son ensemble.

III.4.4 Impact sur les performances du mortier

III.4.4.1 Durabilité

Une porosité accrue peut affecter la durabilité du mortier en exposant davantage le matériau aux cycles de gel-dégel et à l'attaque chimique. Cependant, certains traitements de surface ou adjuvants peuvent être utilisés pour limiter ces effets négatifs.

III.4.4.2 Propriétés mécaniques

La réduction de la densité et l'augmentation de la porosité peuvent entraîner une diminution de la résistance mécanique du mortier. Toutefois, la flexibilité et la ténacité peuvent être améliorées grâce à la présence des fibres, compensant partiellement la perte de résistance.

III.4.4.3 Isolation thermique et acoustique

Un mortier plus poreux peut offrir de meilleures performances d'isolation thermique et acoustique, car les poches d'air et la structure fibreuse peuvent réduire la conductivité thermique et absorber les ondes sonores.

Le traitement des fibres naturelles et leur incorporation dans le mortier modifient significativement les propriétés du matériau, en réduisant sa densité, en augmentant sa porosité, et en améliorant sa capacité d'absorption d'eau. Ces changements peuvent avoir des effets bénéfiques ou défavorables sur les performances du mortier, en fonction de l'application spécifique et des conditions environnementales. En effet, ces résultats indiquent que le traitement des fibres naturelles joue un rôle important pour optimiser les performances des mortiers renforcés. Il convient de noter que les chercheurs sont conscients du potentiel des mortiers renforcés de fibres naturelles traitées dans la production de nouveaux matériaux de construction.

En résumé, cette recherche vise à approfondir la compréhension de l'utilisation des fibres naturelles traitées et non traitées dans le renforcement des mortiers, en évaluant leur efficacité, leur méthode d'application et leur impact sur la durabilité des mortiers.

III.5 Eco-construction des mortiers renforcés par des fibres naturelles

L'écoconstruction, l'éco réhabilitation et l'écohabitat font tous référence à la notion de bâtiment durable. Un bâtiment durable vise à trouver un équilibre entre trois aspects essentiels :

III.5.1 La performance énergétique :

- Approche bioclimatique de la conception
- Utilisation de matériaux performants sur le plan énergétique
- Démarche "mégawatt" visant à réduire les besoins énergétiques.

III.5.2 La performance environnementale :

- Utilisation de matériaux à faible impact environnemental
- Recours aux énergies renouvelables
- Circuits courts d'approvisionnement
- Chantiers propres et gestion raisonnée de l'eau et des déchets

III.5.3 La performance sanitaire :

- Respect de la santé des travailleurs et du bien-être des occupants
- Qualité de l'air intérieur, confort thermique, visuel, acoustique, olfactif

Ces trois piliers - énergie, environnement, santé - constituent le "triangle d'or" de la maison écologique (**Figure III.7**). Ils visent à minimiser l'impact environnemental des bâtiments tout en améliorant la qualité de vie des occupants.

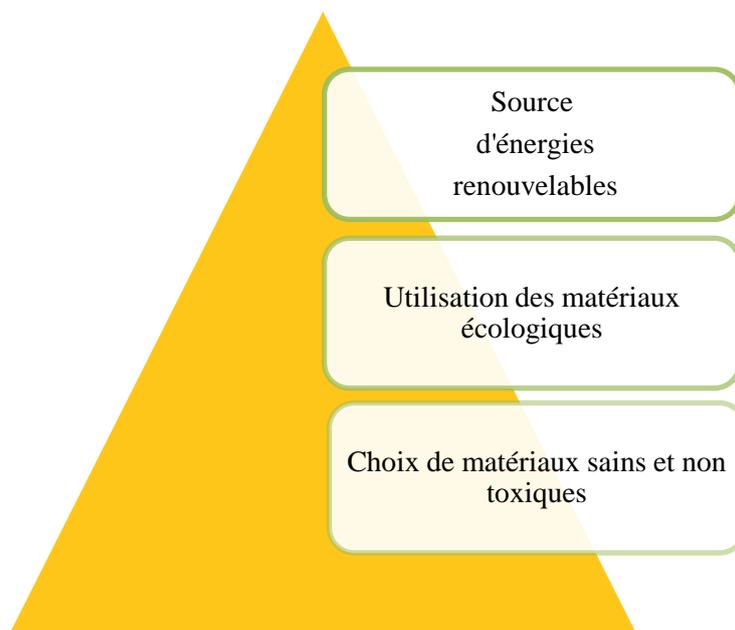


Figure III. 7 : Les trois aspects essentiels pour un bâtiment durable.

Dans le domaine du génie civil, l'enjeu principal est de réduire la consommation d'énergie des bâtiments. Cela passe par l'utilisation de matériaux de construction performants d'un point de vue thermique, tout en diminuant l'énergie nécessaire à leur fabrication et leur impact environnemental global. À cet égard, l'utilisation de fibres végétales apparaît comme une solution intéressante. En effet, on retrouve souvent beaucoup de matériaux biosources appelés aussi éco matériaux tels que le bois, le chanvre, la paille, la cellulose allient des performances techniques (isolation, régulation de l'humidité, etc.) et des qualités environnementales (faible énergie grise, stockage de carbone, etc.). Ils permettent ainsi de concilier les objectifs de réduction de la consommation énergétique et de diminution de l'impact environnemental des bâtiments.

Voici quelques exemples d'éco-matériaux qui respectent les aspects essentiels (**Figure III.8**) :

Le bois est un matériau écologique qui offre une isolation thermique et phonique efficace, réduisant les émissions de dioxyde de carbone, liées à la construction de maisons individuelles.

Le béton cellulaire est un matériau léger et résistant qui réduit les besoins en énergie pour la production et le transport.

Le chanvre est un matériau durable qui offre une isolation thermique et phonique efficace, tout en réduisant les émissions de dioxyde de carbone liées à la production.

La paille est un matériau naturel qui offre une isolation thermique et phonique efficace, tout en réduisant les émissions de dioxyde de carbone liées à la production.

Le liège est un matériau naturel qui offre une isolation thermique et phonique efficace, tout en réduisant les émissions de dioxyde de carbone liées à la production.

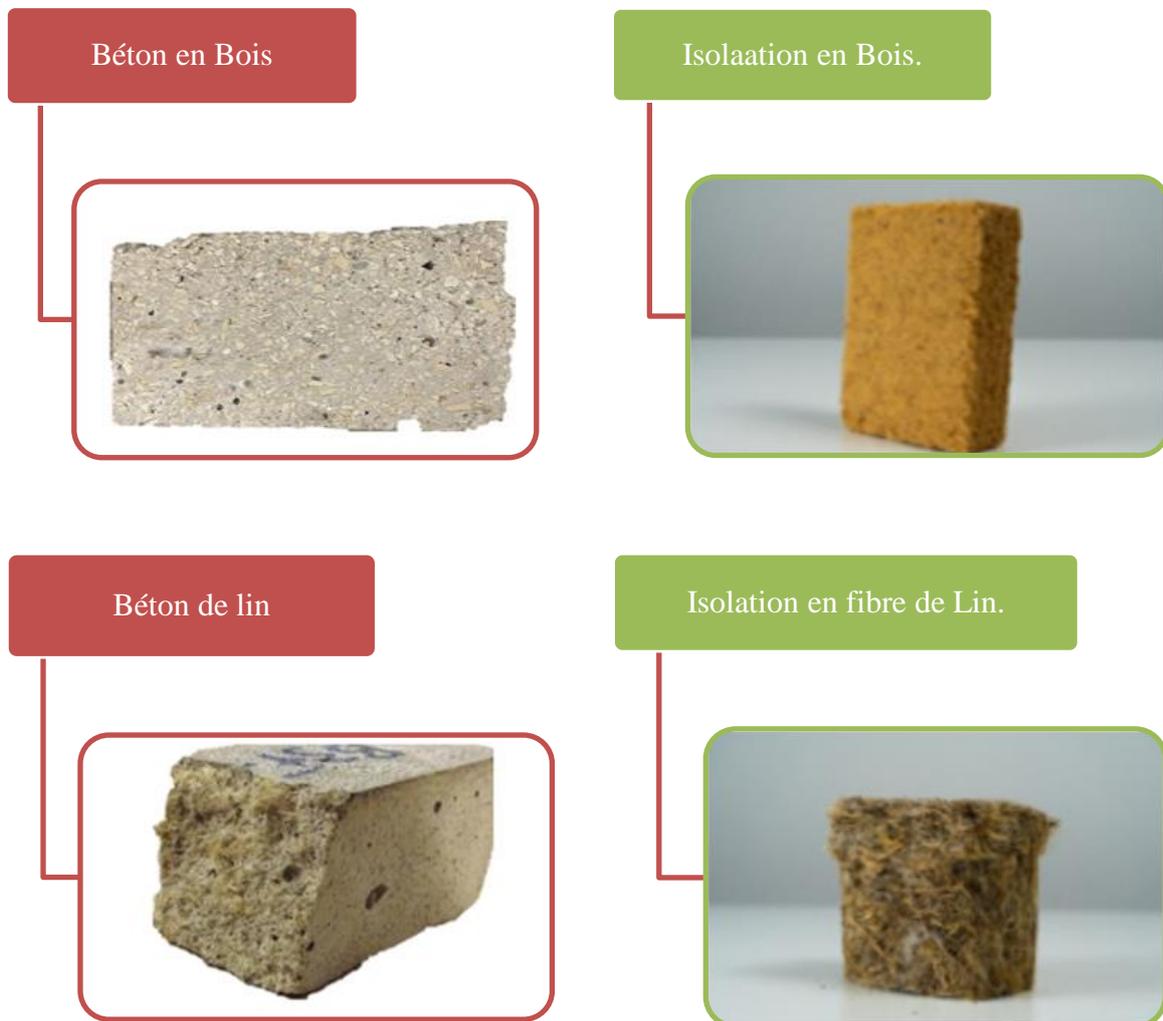
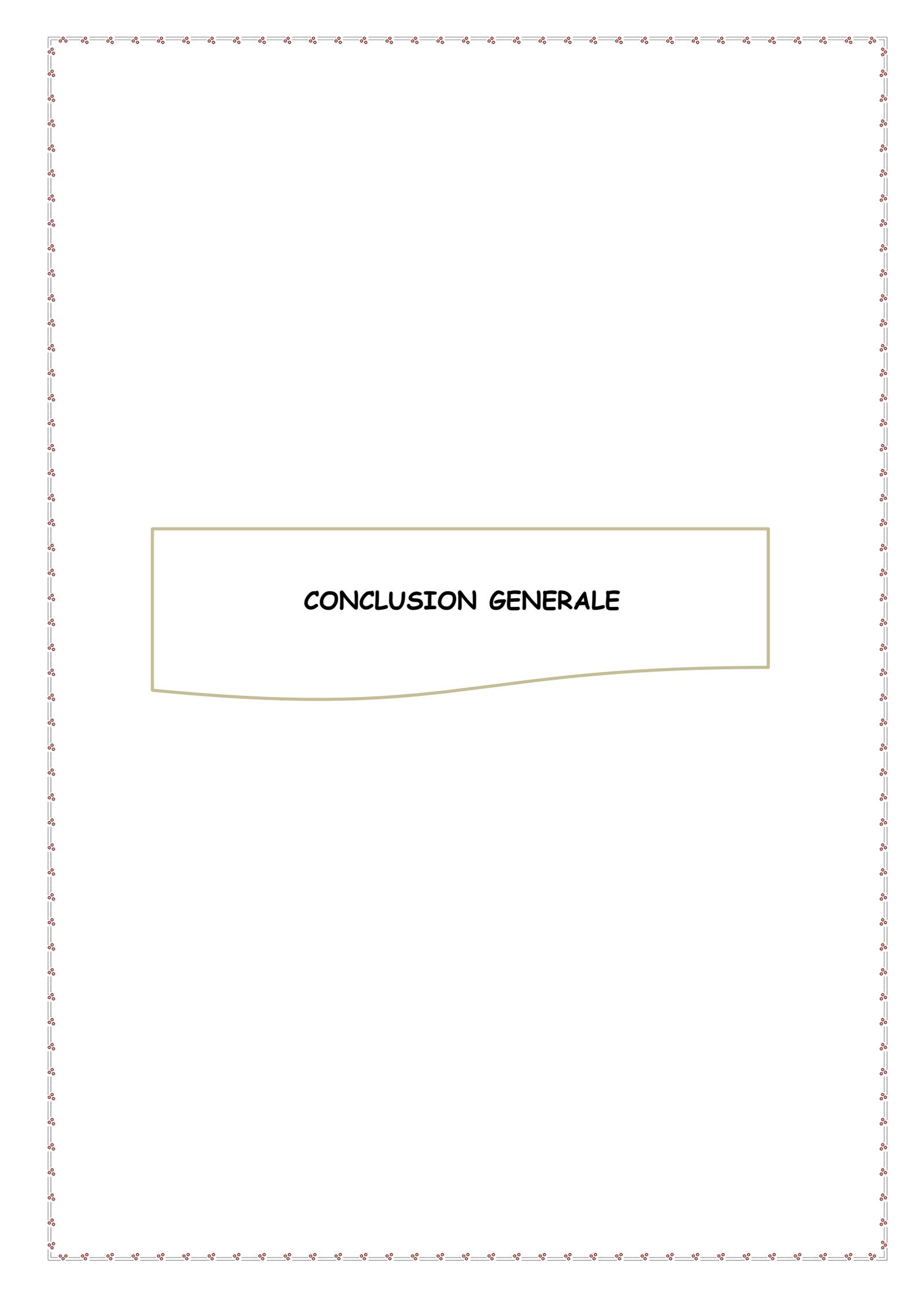


Figure III. 8 : Les matériaux respectueux de l'environnement.

Les concepts d'écoconstruction, d'éco réhabilitation et d'écohabitat sont liés à la notion de construction durable. Les matériaux respectueux de l'environnement, comme le bois, le béton, le chanvre, la paille, le liège, présentent des bénéfices écologiques pour diminuer l'impact environnemental des constructions tout en améliorant la qualité de vie des occupants.

Conclusion

Les chercheurs se concentrent de plus en plus sur l'étude des fibres naturelles afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité, en réponse aux impératifs environnementaux qui encouragent l'utilisation de matériaux durables et écologiques dans le domaine de la construction. Le renforcement des matrices cimentaires par des fibres végétales représente une voie prometteuse pour l'innovation. Cependant, en raison de leur sensibilité aux environnements alcalins, les fibres naturelles nécessitent un traitement préalable. Ce traitement vise à améliorer leurs caractéristiques, notamment en réduisant leur conductivité thermique pour améliorer leur capacité d'isolation thermique. De plus, l'ajout d'adjuvants a contribué à une meilleure maniabilité des mortiers. Dans le domaine du génie civil, l'utilisation de fibres végétales se révèle être une solution intéressante pour réduire la consommation énergétique des bâtiments, tout en réduisant l'impact environnemental global grâce à leurs performances techniques (isolation, régulation de l'humidité) et leurs qualités environnementales (faible empreinte carbone, stockage de carbone).



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'analyse approfondie de 297 publications dans la base de données SCOPUS a permis de dresser un état complet de la recherche sur le renforcement des mortiers par des fibres naturelles. Les cartes bibliométriques ont mis en lumière les tendances et les avancées technologiques dans ce domaine, en examinant l'interaction entre les auteurs, les mots-clés et l'évolution des publications depuis 1979 jusqu'en Avril 2024. Ces dernières années, la recherche sur le renforcement des mortiers a connu un essor marqué, avec un intérêt croissant pour les fibres végétales en raison de leur faible coût, leur densité, leur résistance et leur disponibilité mondiale, ainsi que de leurs bonnes propriétés mécaniques, physiques et thermiques. Les chercheurs se sont particulièrement concentrés sur l'étude approfondie de diverses fibres naturelles, mettant l'accent sur leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. Les préoccupations environnementales ont également stimulé la recherche de matériaux durables et écologiques pour la construction. Malgré la complexité de leur structure et de leur composition chimique, les fibres végétales offrent des nombreux avantages pour les applications composites, notamment grâce à leur structure creuse et poreuse qui leur confère de bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique. Cependant, leur sensibilité aux milieux alcalins des matrices cimentaires nécessite souvent un traitement préalable pour améliorer leur durabilité. En effet, le renforcement des mortiers par des fibres végétales traitées représente une voie prometteuse d'innovation, alliant performance, durabilité et respect de l'environnement. Les recherches actuelles visent à optimiser les procédés de traitement et d'incorporation de ces matériaux biosources pour maximiser leurs bénéfices dans la construction durable.

*

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Pepe, R. D. Toledo Filho, E. A. B. Koenders, and E. Martinelli, “Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 69, pp. 124–132, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.084>.
- [2] A. R. G. de Azevedo, M. T. Marvila, B. A. Tayeh, D. Cecchin, A. C. Pereira, and S. N. Monteiro, “Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars,” *J. Build. Eng.*, vol. 33, p. 101675, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101675>.
- [3] G. Ferrara, C. Caggegi, E. Martinelli, and A. Gabor, “Shear capacity of masonry walls externally strengthened using Flax-TRM composite systems: experimental tests and comparative assessment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 261, p. 120490, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120490>.
- [4] S. N. Monteiro, F. P. D. Lopes, A. S. Ferreira, and D. C. O. Nascimento, “Natural-fiber polymer-matrix composites: Cheaper, tougher, and environmentally friendly,” *JOM*, vol. 61, no. 1, pp. 17–22, 2009, doi: 10.1007/s11837-009-0004-z.
- [5] M. A. Aiello and F. Leuzzi, “Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 8, pp. 1696–1704, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.005>.
- [6] G. de Felice et al., “Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry,” *Mater. Struct.*, vol. 47, no. 12, pp. 2021–2037, 2014, doi: 10.1617/s11527-014-0360-1.
- [7] M. Leone et al., “Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 127, pp. 196–214, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.028>.
- [8] S. Mezazigh and D. Levacher, “Laterally loaded piles in sand: slope effect on P-Y reaction curves,” *Can. Geotech. J.*, vol. 35, no. 3, pp. 433–441, Jun. 1998, doi: 10.1139/t98-016.
- [9] A. R. G. de Azevedo et al., “Investigation of the Potential Use of Curauá Fiber for Reinforcing Mortars,” *Fibers*, vol. 8, no. 11, 2020, doi: 10.3390/fib8110069.
- [10] A. Majumder, L. Canale, C. C. Mastino, A. Pacitto, A. Frattolillo, and M. D. Isola, “Thermal Characterization of Recycled Materials for Building Insulation,” 2021.
- [11] G. Ramakrishna and S. Thirumalai, “Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: A comparative study,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, pp. 547–553, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006.

- [12] M. Stefanidou and I. Papayianni, "Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 6, pp. 2706–2710, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.12.015>.
- [13] A. Cazzani, M. Malagù, E. Turco, and F. Stochino, "Constitutive models for strongly curved beams in the frame of isogeometric analysis," *Math. Mech. Solids*, vol. 21, no. 2, pp. 182–209, Mar. 2015, doi: [10.1177/1081286515577043](https://doi.org/10.1177/1081286515577043).
- [14] M. Ardanuy, J. Claramunt, and R. D. Toledo Filho, "Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research," *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 115–128, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>.
- [15] A. Sellami and M. Merzoud, "Effet de différent volume des fibres végétales (Diss) sur le comportement physico-mécanique des composites cimentaires à base de diss," vol. d, pp. 1–3, 2018.
- [16] Y. Djebbloun, "Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, 2018, BISKRA."
- [17] A. SELLAMI, "Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss) : Caractérisation, Durabilité et Application au cas de la maçonnerie," Thèse Dr. Univ. baji mokhtar- annaba, p. 152, 2015.
- [18] A. Achour, "Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles : valorisation des plantes locales," p. 116, 2017.
- [19] M. Afrid, L. Bahi, and Z. Nemouchi, "ETUDE DU VIEILLISSEMENT DES DECHETS DE FIBRE DE JUTE," *École Natl. Polytech. d'Alger Département*, pp. 2012–2013, 2010.
- [20] Z. Belkheir, "Amélioration des propriétés mécaniques des composites à différentes matrices à base de fibres naturelles locales, Thèse de Doctorat, Université Larbi Tébessi, Tébessa, Algérie.," 2022.
- [21] L. Boudjemaa, Hayet, "Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables, Thèse de Doctorat Université d'Oran 2, Algérie.," 2016.
- [22] Z. Wu, X. Wang, and Z. Chen, "Experimental study on preparation and performance of the Corn Straw Fiber (CSF) reinforced EPS concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 89, p. 109378, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109378>.
- [23] K. P. Garikapati and P. Sadeghian, "Mechanical behavior of flax-lime concrete blocks made of waste flax shives and lime binder reinforced with jute fabric," *J. Build. Eng.*, vol. 29, p. 101187, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101187>.
- [24] K. V Sabarish, P. Paul, Bhuvaneshwari, and J. Jones, "An experimental investigation on properties of sisal fiber used in the concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 22, pp. 439–443, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.686>.

- [25] E. Parcesepe, R. F. De Masi, C. Lima, G. M. Mauro, M. R. Pecce, and G. Maddaloni, "Assessment of mechanical and thermal properties of hemp-lime mortar," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 4, pp. 1–24, 2021, doi: 10.3390/ma14040882.
- [26] A. Majumder, F. Stochino, A. Frattolillo, M. Valdes, F. Fraternali, and E. Martinelli, "Jute fiber mortar composites for integrated retrofitting," in *Fib Symposium ProceedingS*, 2022, pp. 613–620.
- [27] G. Costantine, C. Maalouf, T. Moussa, and G. Polidori, "Experimental and numerical investigations of thermal performance of a Hemp Lime external building insulation," *Build. Environ.*, vol. 131, pp. 140–153, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.037>.
- [28] J. Ahmad et al., "Mechanical and durability performance of coconut fiber reinforced concrete: a state-of-the-art review," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 10, p. 3601, 2022.
- [29] J. A. Abdalla, B. S. Thomas, and R. A. Hawileh, "Use of hemp, kenaf and bamboo natural fiber in cement-based concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 65, pp. 2070–2072, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.428>.
- [30] K. Thanushan, Y. Yogananth, P. Sangeeth, J. G. Coonghe, and N. Sathiparan, "Strength and Durability Characteristics of Coconut Fibre Reinforced Earth Cement Blocks," *J. Nat. Fibers*, vol. 18, no. 6, pp. 773–788, Jun. 2021, doi: 10.1080/15440478.2019.1652220.
- [31] R. D. Toledo Filho, F. de Andrade Silva, E. M. R. Fairbairn, and J. de Almeida Melo Filho, "Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 2409–2420, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012>.
- [32] J. Wei and C. Meyer, "Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber," *Cem. Concr. Res.*, vol. 81, pp. 94–111, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.12.001>.
- [33] C. Sawsen, F. D. Lorena, and J. Arash, "Enhancing Mechanical Behavior of Cement Composites through Citric Acid Treatment of Flax Fibers," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 36, no. 1, p. 4023486, Jan. 2024, doi: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15863.
- [34] T. A. Fode, Y. Abeid, C. Jande, T. Kivevele, T. A. Fode, and T. Kivevele, "A Review on Degradation Improvement of Sisal Fiber by Alkali and Pozzolana for Cement Composite Materials A Review on Degradation Improvement of Sisal Fiber by Alkali and Pozzolana for Cement Composite Materials ABSTRACT," *J. Nat. Fibers*, vol. 21, no. 1, 2024, doi: 10.1080/15440478.2024.2335327.
- [35] M. A. Gómez-Casero, P. J. Sánchez-Soto, E. Castro, and D. Eliche-Quesada, "Effect of olive-pruning fibres as reinforcements of alkali-activated cements based on electric arc furnace slag and biomass bottom ash," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 24, no. 2, p. 84,

2024, doi: 10.1007/s43452-024-00882-0.

- [36] J. Z. Schiavon, P. M. Borges, and J. J. de Oliveira Andrade, “Physical-mechanical properties and microstructure changes in mortars with chemically treated coir fibers,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 30, pp. 4030–4043, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.109>.
- [37] M. Lahouioui et al., “Etude des performances thermiques de matériaux à matrice cimentaire renforcés par des fibres de bois de palmier traitées To cite this version : HAL Id : hal-04312793 Etude des performances thermiques de matériaux à matrice cimentaire renforcés par des fibres de bois de palmier traitées,” 2023.
- [38] R. de Souza Castoldi, L. M. S. de Souza, and F. de A. Silva, “Effect of Alkali Treatment to Improve Fiber-Matrix Bonding and Mechanical Behavior of Sisal Fiber Reinforced Cementitious Composites,” in *Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations II*, Cham, 2022, pp. 51–60.
- [39] M. Rahimi, O. A. Hisseine, and A. Tagnit-Hamou, “Effectiveness of treated flax fibers in improving the early age behavior of high-performance concrete,” *J. Build. Eng.*, vol. 45, p. 103448, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2021.103448>.
- [40] S. Ajouguim, “Elaboration d’un matériau cimentaire à base de la plante d’Alfa d’origine marocaine, École doctorale Sciences, technologie et santé (Amiens), France.,” 2022.
- [41] “Effect of Surface Modification on the Characteristics of Sisal Fiber Reinforced Concrete Treated with Na_2CO_3 ,” p. 46488, 2024, doi: 10.46488/NEPT.2022.v21i01.034.
- [42] H. Khelifa et al., “Mechanical characterization of mortar reinforced by date palm mesh fibers: Experimental and statistical analysis,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 300, p. 124067, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124067>.
- [43] I. Shah, L. Jing, Z. M. Fei, Y. S. Yuan, M. U. Farooq, and N. Kanjana, “A Review on Chemical Modification by using Sodium Hydroxide (NaOH) to Investigate the Mechanical Properties of Sisal, Coir and Hemp Fiber Reinforced Concrete Composites,” *J. Nat. Fibers*, vol. 19, no. 13, pp. 5133–5151, Dec. 2022, doi: 10.1080/15440478.2021.1875359.
- [44] M. Boumaaza, A. Belaadi, and M. Bouchak, “The Effect of Alkaline Treatment on Mechanical Performance of Natural Fibers-reinforced Plaster: Optimization Using RSM,” *J. Nat. Fibers*, vol. 18, no. 12, pp. 2220–2240, Dec. 2021, doi: 10.1080/15440478.2020.1724236.
- [45] F. Juradin, S., Jozić, D., Netinger Grubeša, I., Pamuković, A., Čović, A., Mihanović, “Influence of Spanish Broom Fibre Treatment , Fibre Length , and Amount and Harvest Year on Reinforced Cement Mortar Quality,” *Build. 13* (8), art. no. 1910, p.

13081910, 2024, doi: 10.3390/buildings13081910.

- [46] A. Kareche, B. Agoudjil, B. Haba, and A. Boudenne, “Study on the Durability of New Construction Materials Based on Mortar Reinforced with Date Palm Fibers Wastes,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, no. 7, pp. 3801–3809, 2020, doi: 10.1007/s12649-019-00669-y.
- [47] Y. Ban et al., “Preparation and Performance of Cement Mortar Reinforced by Modified Bamboo Fibers,” pp. 1–14, 2020.
- [48] B. Poletanovic, I. Janotka, M. Janek, M. Bacuvcik, and I. Merta, “Influence of the NaOH-treated hemp fibres on the properties of fly-ash based alkali-activated mortars prior and after wet/dry cycles,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 309, p. 125072, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125072>.
- [49] L. Morjène, F. Aloulou, and M. Se, “Comptes Rendus Chimie,” *Académie des Sci. Fr.*, vol. Volume 23, 2021, doi: 10.5802/crchim.42.
- [50] E. Jose, M. Lidiane, F. Garcia, C. Fornari, F. Martínez, and M. Mitsuuchi, “A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites – Combined effect of natural latex / pozzolanic materials,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 12, no. February, pp. 44–51, 2017, doi: 10.1016/j.susmat.2017.04.003.
- [51] P. R. L. Lima, H. M. Santos, G. P. Camilloto, and R. S. Cruz, “Effect of Surface Biopolymeric Treatment on Sisal Fiber Properties and Fiber-Cement Bond,” *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 12, no. 2, p. 155892501701200200, Jun. 2017, doi: 10.1177/155892501701200207.
- [52] T. Amsalu Fode, Y. A. Chande Jande, T. Kivevele, and N. Rahbar, “A Review on Degradation Improvement of Sisal Fiber by Alkali and Pozzolana for Cement Composite Materials,” *J. Nat. Fibers*, vol. 21, no. 1, 2024, doi: 10.1080/15440478.2024.2335327.
- [53] F. Bollino, V. Giannella, E. Armentani, and R. Sepe, “Mechanical behavior of chemically-treated hemp fibers reinforced composites subjected to moisture absorption,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 22, pp. 762–775, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.152>.
- [54] A. R. Azevedo, M. T. Marvila, E. B. Zanelato, J. Alexandre, G. C. Xavier, and D. Cecchin, “Development of mortar for laying and coating with pineapple fiber,” *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.*, vol. 24, no. 3, pp. 187–193, 2020, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v24n3p187-193.
- [55] B. S. Umurigirwa, “Élaboration et caractérisation d’un agromatériau chanvre-amidon pour le Bâtiment,” *Ecole doctorale Sciences, technologies, santé (Reims, Marne)*, 2014. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2014REIMS017/document>
- [56] H. Amjad, R. A. Khushnood, and F. Ahmad, “Enhanced fracture and durability

resilience using bio-intriggered sisal fibers in concrete,” *J. Build. Eng.*, vol. 76, p. 107008, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107008>.

- [57] M. D. de Klerk, M. Kayondo, G. M. Moelich, W. I. de Villiers, R. Combrinck, and W. P. Boshoff, “Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, p. 117835, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117835>.
- [58] A. Belkadi Ahmed, “Contribution à l’étude de la durabilité et les performances des bétons autoplaçants (fibres végétales, milieu agressif, formulation, modélisation), Thèse de doctorat Université Biskra.” 2018.
- [59] R. D. Tolêdo Filho, K. Scrivener, G. L. England, and K. Ghavami, “Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 2, pp. 127–143, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6).