الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **Master Académique**

En : Génie de Mécanique

Spécialité : Génie des Matériaux

Par : GASMI Yasmine

THEME :

Valorisation mécanique et énergétique des déchets verts et application aux matériaux de construction

Présenté et soutenu publiquement, le 04/07/2025, devant le jury composé de :

DIHA Abdallah	MCA	Université Larbi Tébessi-Tébessa -	Président
LAOUADI Bouzid	MCB	Université Larbi Tébessi-Tébessa -	Examinateur
KHELIFA Hocine	MCB	Université Larbi Tébessi-Tébessa -	Rapporteur

Promotion : 2024/2025

Dédicace

Avant tout, je remercie ***ALLAH*** qui m'aide et me guide dans chaque étape de ma vie ;

J'offre ce travail à moi-même***JASMINE***, en hommage à ma persévérance et à ma patience tout au long de ce parcours.

Ce mémoire est dédié à ma chère mère, ***OGBA Dalila,*** source inépuisable d'amour, de patience et de prières silencieuses. Ta douceur, ta force et ta foi ont été pour moi un refuge et une lumière dans les moments difficiles. Merci pour tout ce que tu es.

À mon père, ***GASMI Abderahmenne***, modèle de courage et de sagesse, merci pour ton soutien constant et tes conseils précieux.

À mon frère ***Mohamed***, dont le soutien malgré la distance ne m'a jamais quitté.

À mon petit frère ***Faiz***, source de joie et d'inspiration quotidienne.

Que ce mémoire soit le reflet sincère de votre présence constante dans ma vie et de tout ce que vous représentez pour moi.

Merci d'avoir toujours cru en moi, même quand j'en doutais.

Remerciements

C’est avec un immense plaisir que je consacre ces quelques lignes pour exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation et à l’aboutissement de ce travail.

Avant tout, je remercie sincèrement **Allah** Tout-Puissant, qui m’a permis de mener à bien ce mémoire et m’a guidé sur le chemin du savoir.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance la plus profonde à **Dr. KHELIFA Hocine**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique de la Faculté des Sciences et Technologies de l’Université de Tébessa, pour son encadrement bienveillant, son soutien constant, sa disponibilité ainsi que ses précieux conseils tout au long de ce travail.

Mes vifs remerciements vont également à **Dr DIHA Abdallah, et LAOUADI Bouzid**Maitres de conférences au sein de notre département, a, pour l’honneur qu’ils m’ont fait en acceptant d’évaluer ce mémoire.

Je remercie chaleureusement l’ensemble de mes enseignants pour la qualité de leur enseignement et leur engagement tout au long de mes études, qui m’ont permis d’acquérir une formation solide et enrichissante.

J’exprime aussi ma gratitude à toute l’équipe du laboratoire des essais physico-mécaniques de la cimenterie **ELMALABIOD**, en particulier à **M. TOUMI Abdelhalim**, pour leur accueil, leur disponibilité et leur collaboration précieuse.

Enfin, je tiens à remercier tous mes collègues étudiants en **Génie des matériaux,** pour leur camaraderie, leur esprit d’entraide et les moments de partage qui ont enrichi mon parcours universitaire.

Que chacun trouve ici l’expression de ma plus sincère reconnaissance.

ملخص

في إطار الانتقال نحو مواد أكثر استدامة وصديقة للبيئة، وخاصة في مجال مواد البناء، يهتم هذا العمل بتثمين الألياف النباتية من خلال دمجها في ملاط إسمنتي بيولوجي. الهدف الرئيسي هو مقارنة الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة المدعمة بنوعين من الألياف الطبيعية (السيزال والخيش) بتلك المعززة بألياف صناعية (الزجاج)، من أجل تقييم إمكانية استبدال الألياف الزجاجية بالألياف النباتية في التطبيقات غير الإنشائية.

تم في البداية إخضاع الألياف النباتية لمعالجات كيميائية قلوية بواسطة محلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) وفقًا لنسب تركيز ومدة نقع وطول ألياف مختلفة، وذلك ضمن بروتوكول تجريبي محدد. تم إعداد المواد المركبة باستخدام خطة تجريبية من نوع(L27) TAGUCHI ، والتي تسمح بتقليل عدد التجارب مع ضمان موثوقية النتائج. أجريت اختبارات ميكانيكية للانحناء والضغط، وتم تحليل النتائج باستخدام طريقةANOVA(نسبة الإشارة إلى الضوضاء).

أظهرت النتائج أن ألياف الزجاج توفر أفضل أداء في اختبار الانحناء، بينما أظهرت ألياف الخيش مقاومة ممتازة في اختبار الضغط تحت ظروف معينة. الألياف النباتية المعالجة بنسبة 1% منNaOH ، وبطول 20 مم، ومدة نقع 8 ساعات، أظهرت سلوكًا ميكانيكيًا جيدًا قريبًا من سلوك الألياف الزجاجية. يبرز هذا العمل الإمكانات الحقيقية للألياف النباتية كحل بديل، بيئي واقتصادي، وملائم بشكل خاص للمناطق الحارة وشبه القاحلة.

الكلمات المفتاحية :مواد البناء، الألياف النباتية، الملاط البيولوجي، المعالجة الكيميائية، الاختبارات الميكانيكية، المنهجية الإحصائيةTAGUCHI.

Résumé

Dans le cadre de la transition vers des matériaux dits verte et plus précisément des matériaux de construction plus durables et respectueux de l'environnement, nous nous s'intéresse dans ce travail à la valorisation des fibres végétales à travers leur intégration dans des bio-mortiers à matrice cimentaire. L'objectif principal est de comparer les performances mécaniques de bio-composites renforcés par deux types de fibres naturelles (sisal et jute) à celles obtenues avec une fibre synthétique de référence (verre), dans le but d'évaluer le potentiel de le substituer avec des fibres végétales dans des applications non structurelles.

Initialement, les fibres ont été soumises à des traitements chimiques alcalins au NaOH selon différents pourcentages, temps d'immersion et longueurs selon un protocole expérimental bien déterminé. L'élaboration des bio-composites à base de fibres végétales s'effectuées selon un plan d'expérience de type Taguchi (L27), permettant de réduire le nombre d'essais tout en assurant la performance des résultats. Des essais mécaniques de flexion et de compression ont été réalisés, ou les résultats obtenus sont analysées par la méthode ANOVA (rapport Signal/Bruit).

Les résultats obtenus montrent que la fibre de verre offre les meilleures performances en flexion, tandis que la fibre de jute présente une excellente résistance en compression dans certaines conditions. Les fibres végétales traitées à 1 % de NaOH, avec une longueur de 20 mm et un temps d'immersion de 8 h, ont montré un comportement mécanique très satisfaisant, proche de celui de la fibre de verre. Ce travail met ainsi en évidence le potentiel réel des fibres végétales comme solution alternative, écologique et économique, particulièrement adaptée aux régions chaudes et semi-arides.

Mots Clés : Matériaux de construction, Fibres végétales, Bio-mortier, Traitement chimique, Essais mécanique, Méthode statistique de TAGUCHI.

Abstract

In the context of the transition toward so-called green materials—particularly more sustainable and environmentally friendly construction materials—this work focuses on the valorization of plant fibers through their integration into cement-based bio-mortars. The main objective is to compare the mechanical performance of bio-composites reinforced with two types of natural fibers (sisal and jute) with that of a reference synthetic fiber (glass), in order to evaluate the potential of replacing it with plant fibers in non-structural applications.

Initially, the fibers were subjected to alkaline chemical treatments with NaOH at varying concentrations, immersion times, and fiber lengths, according to a well-defined experimental protocol. The bio-composites based on natural fibers were developed using a Taguchi experimental design (L27), which reduces the number of trials while ensuring result reliability. Mechanical flexural and compressive tests were carried out, and the results were analyzed using the ANOVA method (Signal-to-Noise ratio).

The results show that glass fiber provides the best flexural performance, while jute fiber exhibits excellent compressive strength under specific conditions. Plant fibers treated with 1% NaOH, a length of 20 mm, and an immersion time of 8 hours demonstrated very satisfactory mechanical behavior, close to that of glass fiber. This study highlights the real potential of plant fibers as an alternative, eco-friendly, and cost-effective solution, particularly suitable for hot and semi-arid regions.

Keywords: Construction materials, Plant fibers, Bio-mortar, Chemical treatment, Mechanical testing, Taguchi statistical method.

Table des matières

Dédicace

Remerciements…….. **I**

ملخص ……..…... **ii**

Résumé…… **iii**

Abstract……..... **iv**

Table des matières……..…….. **v**

Liste des figures…… **iv**

Liste des tableaux…….…….... **Vi**

Introduction générale…….. **1**

Chapitre I : Etat de l'art : les fibres végétales et les biomatériaux de construction

Introduction…….…….. **3**

I.1. Impact des matériaux sur l'environnement…….. **3**

I.2 Contribution des matériaux de construction…… **5**

I.3. Matériaux à base de fibres végétales : une bonne réponse au développement durable……. **7**

I.3.1. Le rôle des fibres…….…… **8**

I.3.2 Présentation des fibres……..... **8**

I.3.3 Fibres végétales…….……... **9**

I. 3.4 Classification des Fibres Végétales …….. **9**

I. 3.5 Structure et composition des fibres végétales……..... **10**

I.3.6 Morphologie de la fibre végétale…….…… **10**

I.3.7 Composition chimique…….…… **11**

I.3.7.a- Cellulose…….…..... **11**

I.3.7.b- L'hémicellulose…….…….. **12**

I.3.7.c- La lignine…….……..….. **12**

I.3.7.d- La Pectine……..……. **13**

I.3.7.e-Les extractibles……. **13**

I. 3.8 Propriétés des fibres végétales……..…….. **14**

- Propriétés mécaniques……..... **14**
- Propriétés physiques…… **16**

(a). Dimension des fibres (diamètre et longueur)…….. **16**

(b). Taux de reprise des fibres végétales……. **17**

(c). La densité……..…… **17**

- Propriétés thermiques……..…… **18**

I. 3.9 Traitement chimique des fibres végétales…….……. **19**

- Traitement alcalin……..……... **19**
- Traitement au silane…….……... **20**
- Acétylation……..…… **21**

I. 3.10 Avantages et points de faiblesse des fibres végétales……..… **21**

I. 3.11 Processus d'extraction des fibres végétales….……. **22**

I. 3.12 L'utilisation des fibres végétales ……..…… **24**

Conclusion…….. **28**

Chapitre II : Matériaux, plan d'expérience et procédures expérimentales

Introduction…….. **29**

II.1 Présentation des fibres …… **29**

II.2 Matériels et Méthodes expérimentales ……..... **31**

II.2.1 Préparation des fibres…….……..... **31**

II.2.2 Planification du protocole expérimentale par la méthode de TAGUCHI.… **32**

II.2.3 Traitement chimique des fibres…… **34**

II.2.4 Élaboration des bio-mortiers à matrice cimentaire renforcés par fibres végétales et synthétiques…….……..... **35**

II.2.4.a- Malaxage et moulage des éprouvettes…….. **37**

II.2.4.b- Démoulage des éprouvettes…….. **40**

II.2.5 Appareils expérimentaux complémentaires…….. **41**

II.2.5.a- Table à chocs……... **41**

II.2.5.b- Chambre climatique ……... **42**

II.3 Machines d'essais mécaniques……. **43**

II.3.1 Essai de compression ……..... **43**

II.3.2 Essai de flexion 3-Points…… **43**

Conclusion…… **45**

CHAPITRE III : Analyse des résultats et optimisation des propriétés mécaniques des bio-composites Mortier/fibres

Introduction…….. **46**

III.1 Résultats des tests mécaniques……..…….……..... **47**

III.2 Analyse des résultats par la méthode de Taguchi…….. **49**
III.2 Essai de flexion 3 points……..……... **49**
III.2.1 Analyse des effets principaux des facteurs d'élaboration……. **49**
III.2.1.A- Influence du type de la fibre…… **49**
III.2.1.B- Pourcentage de fibre…… **51**
III.2.1.C- Longueur de la fibre……. **51**
III.2.1.D- Pourcentage de NaOH (traitement chimique) ……. **52**
III.2.1.E- Temps d'immersion dans la solution de NaOH……..... **52**
III.2.2 Calcule les rapports Signal/Bruit (S/N) ……..... **53**
III.2.3 S/N moyens par facteur…… **54**
III.2.3.A- Type de fibre……..... **54**
III.2.3.B- % de fibre……. **55**
III.2.3.C- Longueur de fibre……. **55**
III.2.3.D- % NaOH……... **56**
III.2.3.E. Temps d'immersion……... **56**
III.2.4 Classement des facteurs selon leur influence (effet Δ) …… **59**
III.2.5 Expérience de confirmation…….. **61**
III.3 Essai de compression…….…… **63**
III.3.1 Calcul des moyennes……... **63**
III.3.2 Calcul des rapports Signal/Bruit (pour un critère "plus grand est mieux") **64**
III.3.3 Moyennes des rapports S/N par niveau de chaque facteur……. **65**
III.3.4 Graphiques d'influence S/N…….…. **66**
III.3.5 Expérience de confirmation……..... **69**
Conclusion……...……...…… **71**
Conclusion générale…….. **72**
Perspectives de recherche……..... **74**
Références bibliographiques…… **75**
ANNEXE…….. **79**
I.1 Définition de Taguchi…… **79**
I.2 Principe de base…….. **79**
I.3 Comment fonctionne le plan d'expérimentation de Taguchi……..… **80**
II. Construction du plan d'expérience (DOE) type Taguchi L27…….…… **81**
1. Création du plan Taguchi…… **82**

2. Sélection de la matrice **82**

3. Définition des facteurs..... **83** **83**

4. Génération du tableau d'expériences……..

Liste des figures

Figure I.1 Les émissions mondiales de CO_2 pour différents secteurs……..... **4**

Figure I.2 Emissions de gaz à effet de serre par unité de surface de mur extérieure……..... **5**

Figure I.3 Phases d'analyse de cycle de vie des bâtiments…… **6**

Figure I.4 Energie grise des matériaux utilisés dans le bâtiment……. **6**

Figure I.5 Cycle de vie d'un éco-matériau……. **7**

Figure I.6 Le cycle de vie d'un produit…….. **7**

Figure I.7 Classification des fibres selon leurs origines……..... **8**

Figure I.8 Schéma de la structure d'une fibre végétale……. **10**

Figure I.9 Variation du diamètre le long de la fibre de lin……..……. **11**

Figure I.10 Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton…….. **11**

Figure I.11 Organisation des régions cristallines et amorphes d'une micro fibre de la cellulose…… **11**

Figure I.12 Molécule de l'hémicellulose…….……... **12**

Figure I.13 Formule chimique de la lignine…… **13**

Figure I.14 Structure d'une chaine d'acide uronique…… **13**

Figure I.15 Effet du traitement chimique sur les propriétés mécaniques des fibres de palmier dattier……... **19**

Figure I.16 Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales…… **23**

Figure I.17 Utilisation des fibres naturelles avec des bio composites……. **25**

Figure I.18 Des pièces renforcées par des fibres végétales (Flax/polypropylène)

Liste des figures

	Mercedes Benz A-Class……	**26**
Figure I.19	Réalisation des pièces renforcées par des fibres végétales……	**26**
Figure I.20	Ponts piétonniers à base de bio résine et de fibres naturelles……	**27**
Figure I.21	Panneau de construction biosourcés……	**27**
Figure II.1	a) Fibre de jute, b) Fibre de sisal et c) Fibre de verre…….	**30**
Figure II.2	Les différentes longueurs utilises pour les 3 types de fibres a) fibre de verre, b) fibre de jute et c) fibre de sisal……	**32**
Figure II.3	a) Traitements chimiques alcalin des fibres par NaOH b) trempées dans de l'eau……..…..	**35**
Figure II.4	Différents composants du mortier……	**36**
Figure II.5	Malaxeur pour le mélange ciment, sable, eau et former la pâte……	**38**
Figure II.6	Exposition des échantillons a des chocs……...	**38**
Figure II.7	Echantillonsaplatis……..…….	**39**
Figure II.8	Echantillons conserves dans une armoire humide……	**39**
Figure II.9	Démoulage des éprouvettes, suivi de leur numérotation……	**40**
Figure II.10	Immersion des échantillons dans l'eau…….	**40**
Figure II.11	Appareil de table a chocs……..	**41**
Figure II.12	Chambre climatique……..	**42**
Figure II.13	Machine d'essai de compression…….....	**43**
Figure II.14	Machine d'essai de flexion……	**44**
Figure II.15	Graphes d'influence des moyennes S/N pour chaque facteur……	**57**
Figure II.16	Graphes d'influence des moyennes S/N pour chaque facteur……	**67**

Liste des tableaux

Tableau I.1	Composition chimique des fibres végétales……	**14**
Tableau I.2	Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles…….……	**15**
Tableau I.3	Propriétés de finesse de quelques fibres végétales……..…….	**16**
Tableau I.4	Taux de reprise de différentes fibres végétales……..…..	**17**
Tableau I.5	Propriétés physiques de différentes fibres végétales……..	**18**
Tableau II.1	Facteurs et niveaux utilises dans la conception d'un plan d'expérience Taguchi……..	**33**
Tableau II.2	Plan d'expérience orthogonal de Taguchi…….....	**34**
Tableau II.3	Les résultats en masse des quantités des fibres jute, sisal et verre…	**37**
Tableau III.1	Tableau des résultats obtenus lors des essais mécaniques…….……..	**47**
Tableau III.2	Moyennes des résistances a la flexion selon le type de fibre……	**50**
Tableau III.3	Moyenne de la flexion pour chaque pourcentage……	**51**
Tableau III.4	Moyenne de la flexion pour chaque longueur……	**51**
Tableau III.5	Moyenne de la flexion pour chaque concentration……	**52**
Tableau III.6	Moyenne de la flexion pour chaque temps d'immersion……	**52**

Liste des tableaux

Tableau III.7	Rapports Signal/Bruit (S/N)……	**54**
Tableau III.8	S/N moyen pour chaque type de fibre…….	**55**
Tableau III.9	S/N moyen pour chaque % de fibre……	**55**
TableauIII.10	S/N moyen pour chaque longueur de fibre……	**56**
Tableau III.11	S/N moyen pour chaque % de NaOH…….	**56**
Tableau III.12	S/N moyen pour chaque temps d'immersion……	**57**
Tableau III.13	Niveaux de paramètres qui maximisent la résistance à la flexion…..	**59**
Tableau III.14	Classement des facteurs selon leur influence sur la performance (basé sur l'effet Δ des moyennes S/N)……..	**60**
Tableau III.15	Résultats de l'analyse statique des facteurs étudiés par la méthode de Taguchi……	**60**
Tableau III.16	Les moyennes de chaque facteur……	**62**
Tableau III.17	Les moyennes de compression pour chaque paramètre……	**63**
Tableau III.18	Analyse des rapports Signal/Bruit (S/N) pour chaque essai……	**64**
Tableau III.19	Moyennes des rapports S/N par niveau de chaque facteur……	**65**
Tableau III.20	Combinaison optimale selon l'analyse Taguchi……	**68**
Tableau III.21	Facteurs les plus influents à partir de l'effetΔ (delta)……...…….	**68**
Tableau 22	Comment fonctionne un plan Taguchi……	**79**

Introduction générale

Face aux enjeux environnementaux croissants liés au changement climatique, au gaspillage des ressources naturelles et à l'empreinte carbone élevée des matériaux conventionnels, le secteur de la construction est aujourd'hui appelé à repenser ses pratiques. En effet, la production de matériaux tels que le ciment, l'acier ou le béton est énergivore et génère d'importantes émissions de gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone (CO_2). Dans ce contexte, la recherche s'oriente de plus en plus vers des matériaux durables, renouvelables, et à faible impact environnemental.

Le renforcement des matériaux de construction par des fibres végétales constitue une solution écologique et durable face aux enjeux environnementaux précités. Ces fibres, telles que le chanvre, le lin, le sisal, le jute ou la paille, offrent de bonnes propriétés mécaniques tout en étant légères et biodégradables. Intégrées dans des matrices comme le béton ou les composites, elles améliorent la résistance à la traction, la flexibilité et la durabilité des matériaux. En plus de réduire l'empreinte carbone du secteur du bâtiment, cette approche valorise les ressources locales et soutient le développement de filières agricoles durables.[1]

Le présent travail s'inscrit dans cette dynamique, en explorant les possibilités d'incorporation de fibres végétales telles que le sisal et le jute dans une matrice cimentaire, en comparaison avec une fibre synthétique de référence : la fibre de verre. L'objectif principal est d'évaluer les performances mécaniques de ces bio-composites à travers des essais de flexion et de compression, et d'identifier les conditions optimales de traitement et de formulation.

Pour ce faire, l'élaboration des bio-mortiers renforcés de fibres végétales précitées dépend de plusieurs paramètres clés influençant leurs performances mécaniques et durables. Cinq paramètres principaux sont souvent étudiés : le type de fibre utilisée (Sisal, Jute, Verre.), le pourcentage de fibres incorporées dans le mortier (1,3 et 5), la longueur des fibres (5,10 et 20), la concentration en NaOH de la solution alcaline (1,3 et 5) utilisée pour le traitement des fibres, et le temps d'immersion dans cette solution (2,4 et 8). Ces facteurs agissent ensemble pour optimiser l'adhérence fibre-matrice, améliorer la résistance du matériau et limiter la dégradation des fibres. Afin de réduire le nombre d'expériences nécessaires tout en identifiant les combinaisons optimales de ces paramètres, la méthode de Taguchi est souvent utilisée. Cette approche statistique permet de planifier les essais de manière structurée, en testant

efficacement plusieurs variables à la fois, tout en minimisant le coût, le temps et les ressources nécessaires à l'expérimentation. [2]

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente un état de l'art sur les fibres végétales et les biomatériaux de construction. Il s'intéresse à leur origine, leurs propriétés, leurs avantages et limites, ainsi qu'à leur intégration dans le domaine du bâtiment. Des travaux de recherches sur cette approche soient soigneusement présentés et discutés.

Le deuxième chapitre est dédié à l'approche expérimentale, il s'intéresse aux matériaux utilisés, à la description des plans d'expériences et aux procédures expérimentales mises en œuvre. Il détaille le traitement des fibres, l'élaboration des bio-composites, et les méthodes d'essais mécaniques appliquées.

Enfin, le troisième chapitre présente une analyse statistique approfondie des résultats expérimentaux à l'aide de la méthode de Taguchi. Il permet d'identifier les facteurs les plus influents sur le comportement mécanique des bio-composites élaborés, et propose une comparaison entre les fibres naturelles et la fibre de verre, en vue de déterminer le potentiel de substitution.

CHAPITRE I :

Etat de l’art : les fibres végétales et les biomatériaux de construction

Introduction

Le secteur de la construction, acteur central du développement socio-économique, fait aujourd'hui face à de nouveaux enjeux liés à l'environnement et à la durabilité. La fabrication et l'utilisation des matériaux conventionnels tels que le ciment, l'acier ou les granulats entraînent une forte consommation d'énergie, un épuisement progressif des ressources naturelles, ainsi que d'importantes émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, la recherche de matériaux de substitution, plus durables et respectueux de l'environnement, s'impose comme une priorité à l'échelle mondiale.

Parmi les solutions explorées, les matériaux biosourcés issus de ressources renouvelables suscitent un intérêt croissant. En particulier, les fibres végétales apparaissent comme des renforts prometteurs pour les matériaux de construction, en raison de leur disponibilité, de leur légèreté, de leur faible coût et de leur impact environnemental réduit.

Ce premier chapitre pose les bases de notre étude en introduisant l'univers des fibres végétales et leur potentiel dans le domaine de construction. Nous y définirons les principales familles de fibres d'origine végétale, en précisant leur composition chimique et leur structure, éléments déterminants de leurs performances mécaniques. Une analyse comparative mettra en évidence leurs avantages et limites en tant que matériaux de renforcement. Enfin, ce chapitre contextualisera l'étude en présentant les fibres les plus disponibles localement, ouvrant la voie à une évaluation expérimentale approfondie de leurs propriétés et de leur potentiel d'intégration dans les matériaux de construction.

I.1. Impact des matériaux sur l'environnement

Le secteur delà construction et des travaux publics joue un rôle majeur dans le développement économique, mais il est également l'un des plus grands contributeurs à la dégradation de l'environnement. La production de matériaux de construction traditionnels, tels que le béton, l'acier et les plastiques, engendre une consommation massive d'énergie, une exploitation intensive des ressources non renouvelables et d'importantes émissions de gaz à effet de serre. De plus, la plupart de ces matériaux sont peu recyclables ou présentent un cycle de vie fortement polluant, aggravant leur impact écologique global. Le changement climatique est l'un des défis les plus complexes de notre jeune siècle. Aucun pays n'est à l'abri de ses effets, et aucun ne peut, à lui seul, faire face aux décisions politiques controversées, aux profondes

transformations technologiques et aux autres enjeux indissociables, lourds de conséquences à l'échelle de la planète [1].

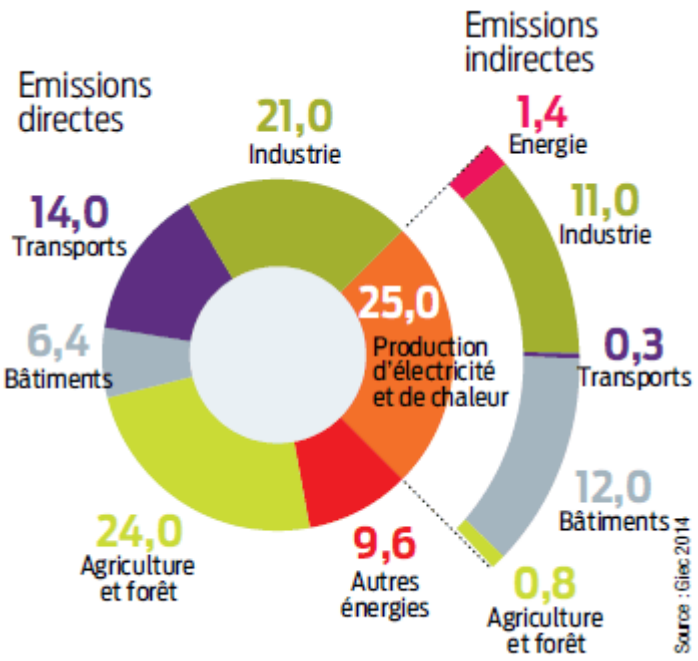


Figure I. 1 : Les émissions mondiales de CO_2 pour différents secteurs. [1]

Afin de limiter les effets du réchauffement climatique, il est donc nécessaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre, notamment le CO_2. La figure 1.1 montre que la principale source d'émission de CO_2 est liée à la production et à la consommation d'énergie. Le secteur du bâtiment, quant à lui, est le plus grand consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques : il représente 43 % de la consommation d'énergie finale totale et génère à lui seul 24,3 % des émissions nationales de CO_2. [1]

En Algérie, la production de matériaux de construction, ainsi que l'installation d'équipements de chauffage et de climatisation dans les structures industrielles et les bâtiments, sont devenues de grandes consommatrices d'énergie et représentent un coût élevé. Par exemple, la consommation énergétique du secteur du bâtiment a été estimée à plus de 40 % de la consommation globale d'énergie, selon l'APRUE (Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie). [2]

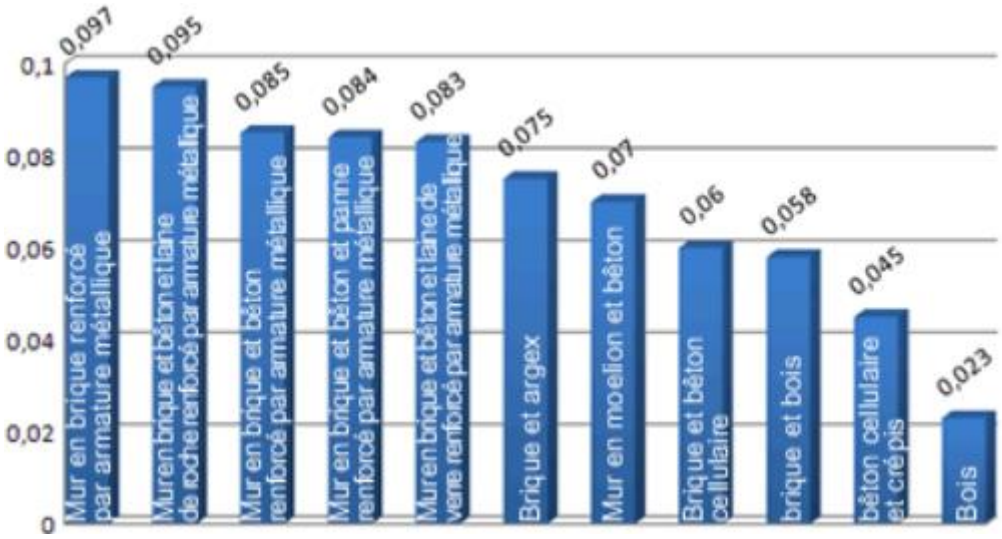


Figure I.2 : Emissions de gaz à effet de serre par unité de surface de mur extérieure [4]

Dans ce contexte, plusieurs solutions ont été envisagées pour limiter les effets du réchauffement climatique liés aux émissions de gaz à effet de serre, en particulier le CO_2. Parmi elles, la réduction progressive de l'utilisation des énergies fossiles, responsables majeures de ces émissions, figure en première ligne. Cette transition s'accompagne d'un passage vers un modèle économique bas carbone, fondé sur l'utilisation accrue des énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique, et le recours à des matériaux écologiques, notamment dans le secteur du bâtiment. Ces mesures visent à diminuer l'empreinte environnementale tout en assurant un développement plus durable. [3]

I.2 Contribution des matériaux de construction

Concernant la partie des matériaux de construction, l'analyse de cycle de vie (ACV) des bâtiments s'appuient généralement sur des déclarations environnementales pour les matériaux de construction. Les principaux matériaux utilisés dans la construction sont l'acier, le bois, le verre, mais c'est le béton qui est le matériau le plus utilisé. Ce matériau est difficile à remplacer dans la construction en raison de sa résistance à la compression qui est associée à un coût raisonnable. Cependant, l'empreinte écologique est le point noir de béton car sa fabrication est basée sur un matériau peu écologique, le ciment. Pour faire une tonne de ciment, environ 400 kg de CO2 peuvent être émis dans l'atmosphère. [5]



Figure I.3 : Phases d'analyse de cycle de vie des bâtiments [5]

Les émissions de CO_2 par unité de surface de mur extérieur pour différents types de matériaux sont illustrées dans la figure 1.3. L'analyse des résultats met en évidence que les matériaux issus de ressources végétales présentent les taux d'émission les plus faibles, comparés aux matériaux conventionnels tels que le béton, l'acier ou la brique cuite. Cette performance environnementale favorable s'explique par le cycle de vie des végétaux : au cours de leur croissance, les plantes absorbent activement le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère à travers le processus de photosynthèse, contribuant ainsi à la réduction du gaz à effet de serre le plus préoccupant. Toutefois, cette capacité de séquestration diminue avec le vieillissement de la plante, notamment lorsque l'arbre atteint sa maturité. En valorisant ces ressources végétales, non seulement on réduit les émissions liées à la production de matériaux, mais on prolonge également les bénéfices environnementaux de leur cycle de croissance, ce qui en fait une solution durable dans le secteur du bâtiment. [5]

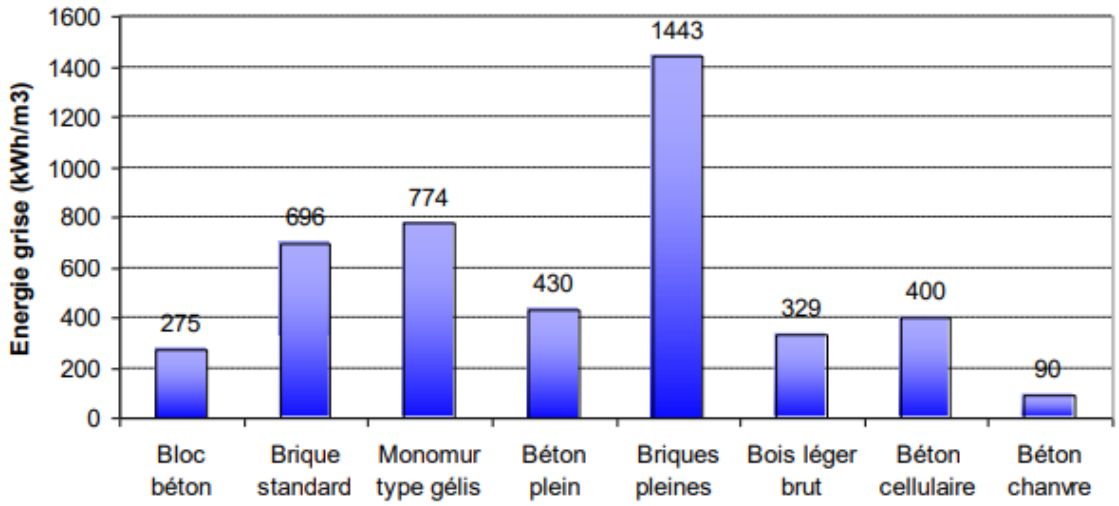


Figure I. 4 : Energie grise des matériaux utilisés dans le bâtiment [4]

Le matériau de construction a-t-il un impact sur la santé des occupants ? Diverses études ont montré que la qualité de l'air intérieur peut être altérée par des substances nocives émises par certains matériaux de construction. En revanche, les éco-matériaux sont généralement plus sains et durables, n'ayant pas d'effet néfaste sur la santé des habitants tout au long de leur durée de vie. [4]

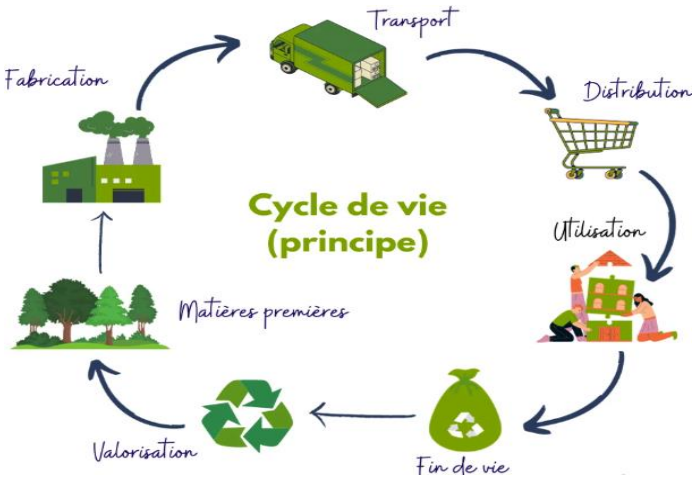


Figure I.5 : Cycle de vie d'un éco-matériau [5].

I.3 Matériaux à base de fibres végétales : une bonne réponse au développement durable

Face à ces préoccupations environnementales, le choix de matériaux appropriés constitue un levier essentiel pour limiter l'impact environnemental et garantir un environnement intérieur sain et confortable. Ce choix repose sur plusieurs critères, notamment l'aspect économique (du point de vue énergétique et financier), l'esthétique, ainsi que l'impact environnemental. Tous ces éléments sont pris en compte dans l'analyse du cycle de vie du matériau, qui englobe l'ensemble des étapes allant de l'extraction des matières premières jusqu'à la démolition de l'ouvrage (Figure I.5). Il s'agit d'adopter une vision globale et responsable, en privilégiant des matériaux respectueux de l'environnement et issus de ressources locales. Dans cette optique, l'utilisation de matériaux à base de fibres végétales (tels que le chanvre, la paille, le lin, le bois, etc.), qui sont renouvelables, recyclables et durables, représente une réponse pertinente. Elle permet de préserver la santé humaine, de satisfaire les besoins de confort et de bien-être, tout en réduisant les impacts écologiques. [1]

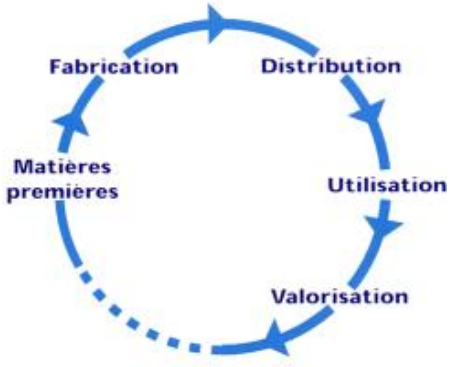


Figure I. 6 : Le cycle de vie d'un produit. [4]

I.3.1. Le rôle des fibres

Le rôle principal du renfort dans les matériaux composites est d'améliorer certaines propriétés physiques telles que le comportement thermique, la résistance à la température, au feu, à l'abrasion, ainsi que les propriétés électriques. Il contribue également à renforcer les propriétés mécaniques comme la rigidité, la résistance à la rupture, la dureté, etc. Les renforts recherchés doivent présenter des caractéristiques mécaniques élevées, une faible masse volumique, une bonne compatibilité avec les résines, une mise en œuvre facile, ainsi qu'un coût réduit. Les fibres utilisées peuvent être courtes (discontinues) ou longues (continues), et se présenter sous différentes formes : linéique, surfacique ou multi directionnelle. [6]

I.3.2 Présentation des fibres

Les fibres utilisables pour le renforcement des polymères peuvent être synthétiques ou naturelles. Sous le terme « fibres naturelles » se trouvent des fibres organiques, d'origine végétale et animale, et des fibres minérales. [7]

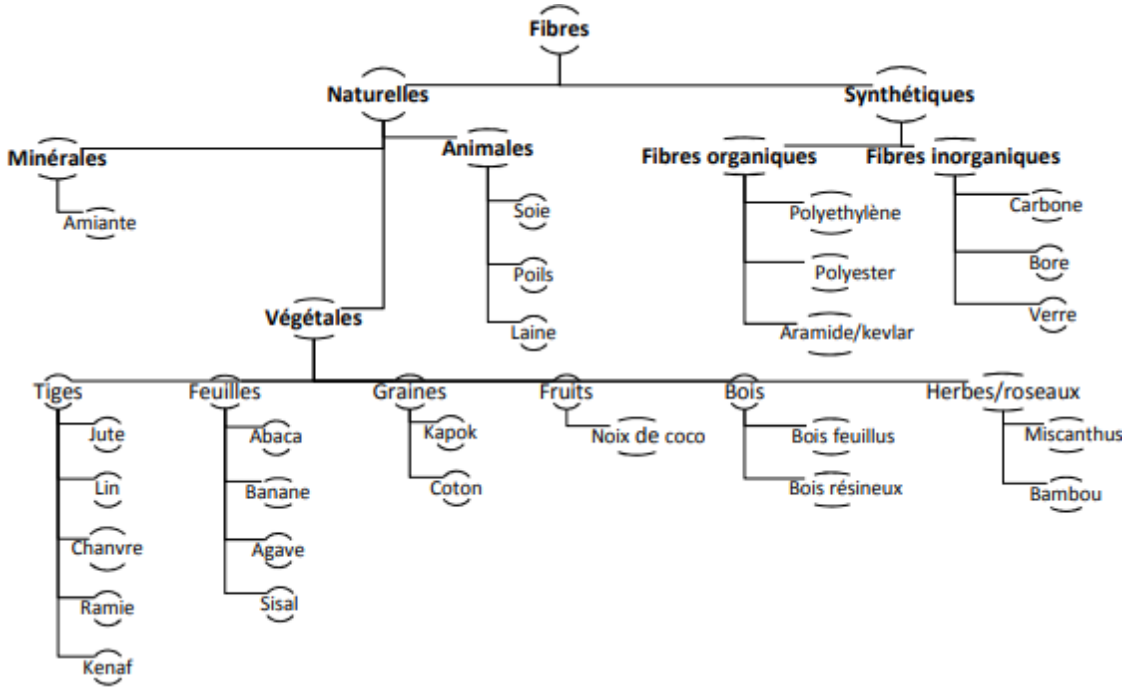


Figure I. 7 : Classification des fibres selon leurs origines [7]

La grande famille des fibres naturelles peut être subdivisée en trois sous familles :

⇒ Les fibres d'origine animale (protéiques) qui se subdivise en :

- Laine (mouton, chèvre, lapin, lama, vigogne)
- Soie (ver à soie)
- Poils (alpaga, cachemire, chameau, mohair) [3]

⇒ Les fibres d'origine minérale (silicatées) ;

- Tourbe, verre, amiante, basalte, carbone, métaux) [3]

⇒ Les fibres d'origine végétale (cellulosiques) dont nous détaillerons les sources plus loin dans ce paragraphe. [3]

I.3. 3 Fibres végétales

Les fibres végétales sont utilisées depuis des millénaires à travers le monde. Elles proviennent de diverses ressources naturelles pouvant servir de renforts dans les matériaux composites. Ces fibres peuvent être extraites des feuilles (comme le sisal), de l'enveloppe des fruits (comme la noix de coco), des graines (coton, kapok), des tiges (lin, chanvre, jute) ou encore du bois de tronc. Cette grande diversité rend les fibres végétales particulièrement attractives pour l'industrie automobile, qui cherche à sécuriser ses approvisionnements en matières premières. Par ailleurs, l'intérêt croissant pour ces fibres dans ce secteur s'explique par leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques, parfois comparables à celles des fibres de verre. [7]

I. 3.4 Classification des Fibres Végétales :

- Les fibres de feuilles :

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides [5].

- Les fibres de bois : Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments [5].

- Les fibres de surface : 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 [5].

- Les fibres de tige : 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 sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur [5]

I. 3.5 Structure et composition des fibres végétales :

Les fibres végétales naturelles peuvent être décrites comme des composites ou les fibres de cellulose jouent le rôle de renfort dans une matrice composée principalement d'hémicellulose et de lignine (figure I.8). Les fibres végétales, quelle que soient leur origine, arbres ou plantes annuelles, ont toutes la même structure de base. Les fibres de coton et de bois sont constituées de deux parois : primaire et secondaire, la seconde étant elle-même constituée de trois couches que l'on nomme S1, S2 et S3. La paroi primaire, qui apparait en premier lors de la croissance de la plante, est constituée d'une faible quantité de cellulose (8-15%) dans un arrangement désordonné des microfibrilles. La paroi secondaire contient une plus grande part de cellulose disposée de manière plus organisée. Les fibrilles sont orientées suivant un angle, appelé angle micro fibrillaire, par rapport à l'axe longitudinal de la fibre. [5]

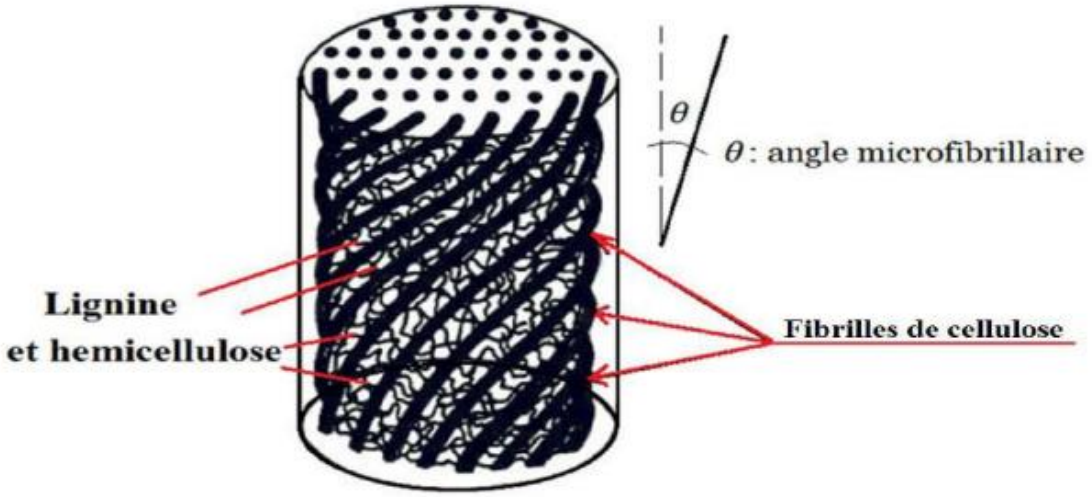


Figure I. 8 : Schéma de la structure d'une fibre végétale [5].

I. 3.6 Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale. La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire qui découle de celle de la porosité des fibrilles. [8]

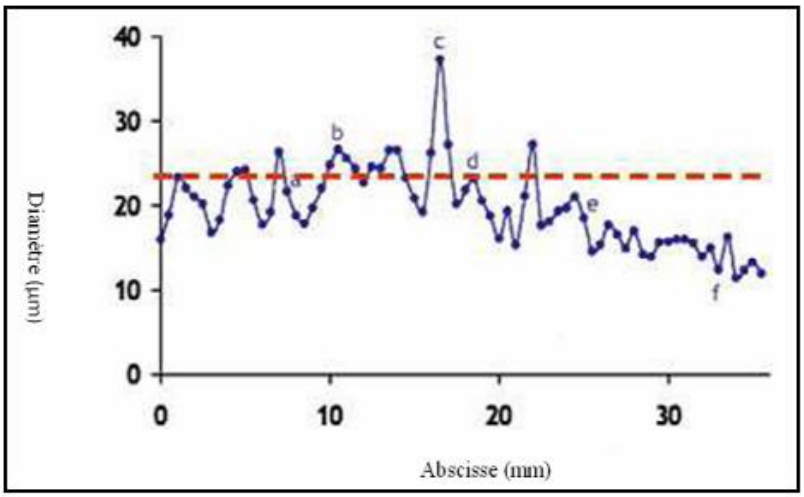


Figure I. 9 : Variation du diamètre le long de la fibre de lin [8].

La morphologie des fibres végétales peut constituer une donnée importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice. La Figure I. 10 présente à titre d'exemple la structure torsadée d'une fibre de coton. D'autres fibres ont des morphologies, encore plus tourmentées. La géométrie des fibres végétales est donc un problème important et difficilement surmontable pour ce qui concerne la micromécanique des composites renforcée par de telles fibres [8].

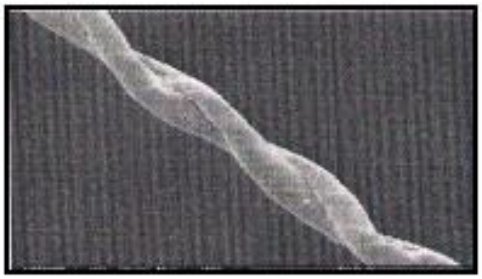


Figure I. 10 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton [8].

I. 3.7 Composition chimique

(**a**). Cellulose

La cellulose est le constituant principal de la masse végétale d'un grand nombre des matériaux végétaux. D'un point de vue chimique, la cellulose est un polymère linéaire, se compose seulement des unités de glucose ($C_6H_{11}O_5$) répétés, reliés entre elles par des liaisons hydrogène (Figure I.11). La cellulose contient des zones cristallines ordonnées et des zones amorphes désordonnées. Elle est fortement hydrophile (qui absorbe de l'eau) à cause de

la présence de groupement hydroxyle (OH), résistant aux oxydants. Elle donne à la fibre sa rigidité [9].

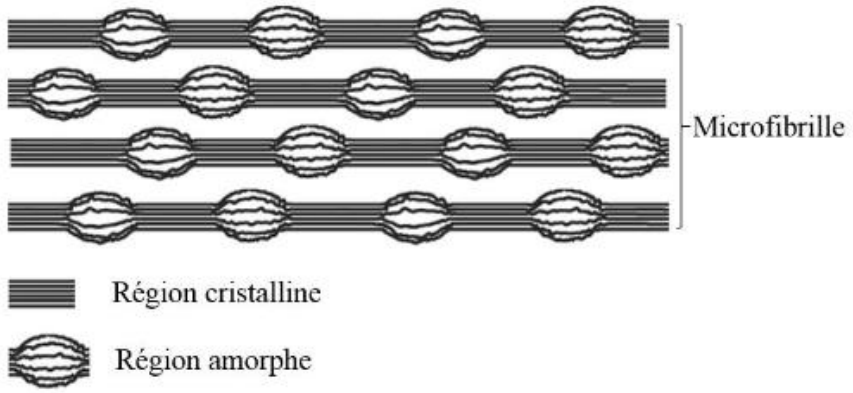


Figure I. 11 : organisation des régions cristallines et amorphes d'une micro fibre de la cellulose [10].

(**b**). Hémicellulose

Les hémicelluloses sont des polymères solubles dans l'eau. Elles sont amorphes, de masse moléculaire plus faible que celle de la cellulose. Ils contiennent plusieurs unités de sucre (xylose, arabinose, galactose, glucose, …) et plusieurs branchements différents (figure I.12). C'est le constituent responsable de l'élasticité des fibres [9].

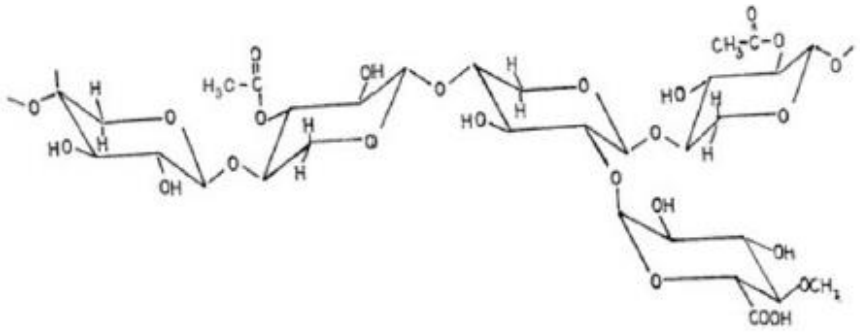


Figure I. 12 : Molécule de l'hémicellulose [9].

(**c**). Lignine

La lignine est un polymère hydrocarbure complexe, elle se compose de trois types d'alcools (Figure I.13). C'est l'élément qui donne la rigidité aux plantes, elle est totalement amorphe, hydrophobe (insoluble dans l'eau ou n'a pas la capacité de créer des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau) [8].

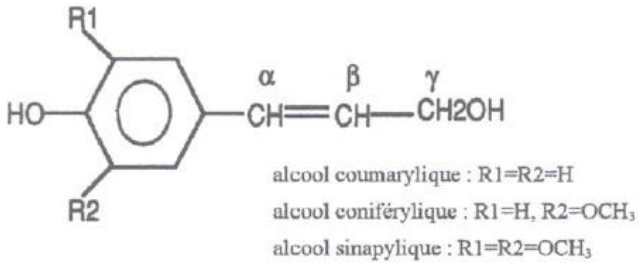


Figure I. 13 : Formule chimique de la lignine [9].

(**d**). Pectine

La pectine est un polymère acide, composée d'une chaîne d'acide uronique (l'acide uronique est obtenu par oxydation du dernier carbone de sucre). Elle fournit la flexibilité à la plante (figure I.14) [9].

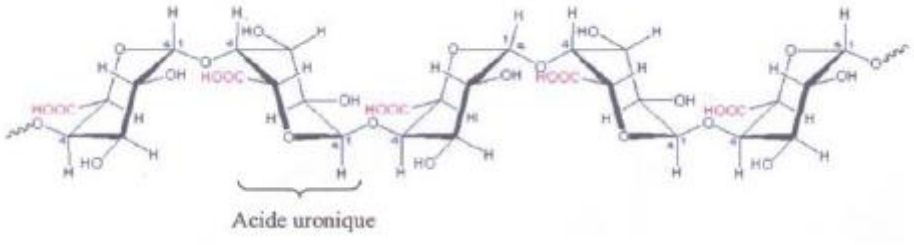


Figure I.14 : Structure d'une chaîne d'acide uronique [9].

(**e**). Les extractibles

Ils comprennent plusieurs substances chimiques différentes comme les graisses, qui sont insolubles dans l'eau et dans divers acides, elles peuvent être extraites par une solution organique. En effet, les polymères des parois cellulaires des matériaux naturels ont beaucoup de groupes hydroxyles responsables de l'absorption d'eau. Cependant, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine absorbent l'humidité à différents degrés car le contenu en hydroxyles pour chaque polymère est différent, ainsi qu'ils sont responsables des propriétés mécaniques des matériaux [9].

Tableau I.1 Composition chimique des fibres végétales [9].

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

I. 3.8Propriétés des fibres végétales

- **Propriétés mécaniques**

De par leur composition physique et chimique, les fibres naturelles présentent des propriétés mécaniques très variables conférant ainsi à chaque type de fibre une utilisation bien spécifique. Cette propriété varie significativement en fonction de :

- La morphologie des fibres
- De leur composition chimique
- De leur cristallinité
- Du degré de polymérisation de la cellulose.
- La méthode d'extraction des fibres.

De nombreuses études ont signalé une grande variabilité des propriétés mécaniques des fibres issues de la même espèce. Ce phénomène peut être lié à la variation naturelle et aux facteurs techniques (procédé d'extraction, méthode de mesure, etc.) [10].

Supian et al [11] ont caractérisé les propriétés mécaniques du composite hybride palmier dattier/bambou, cette caractérisation est analysée par divers tests mécaniques tels que des tests de traction, de flexion à basse vitesse. Les valeurs de la résistance à la traction, de la résistance à la flexion et de celle pour le composite hybride palmier dattier/bambou ont été

enregistrées à 39.16 MPa, 61.10 MPa et 12.70 MPa, respectivement. Les travaux effectués par khelifa et al [12] ont pour objectifs de valoriser les fibres de palmier (FP) comme élément de renforcement dans les matériaux de construction, les résultats obtenus montrent que l'incorporation de fibres de mesh (leaf) de palmier dattier dans le mortier améliore ses propriétés mécaniques, avec une augmentation de 27,5 % de la contrainte de flexion et de 18,9 % du module de flexion. La contrainte et le module de compression augmentent respectivement de 46,6 % et 36,3 %. La fonction objective permet d'optimiser ces propriétés, montrant des gains d'environ 50 % et 20 % pour la contrainte de flexion et le module par rapport au mortier de référence.

Karina et al. [13] ont étudié les propriétés des composites en polypropylène recyclé renforcés par la lignine de paille de riz. Les résultats ont montré que la résistance à la traction diminuait avec l'augmentation de la teneur en lignine, en raison de la faible compatibilité de la lignine et de la formation de fissures causées par son agglomération.

Placet et Al [14] ont tracé la courbe de contrainte-déformation en réalisant des essais de traction sur des fibres élémentaires de chanvre. Les fibres n'ont pas été traitées mais seulement rouies à 30°C pendant 72 h pour faciliter la séparation des fibres.

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles. [15]

Fibre	**Densité (g/cm^3)**	**Allongement(%)**	**Résistance à la traction (Mpa)**	**Module de Young (Gpa)**
Coton	1.5-1.6	7.0 - 8.0	287–597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5 - 1.8	393–773	26.5
Lin	1.5	2.7 - 3.2	345–1035	27.6
Chanvre	–	1.6	690	–
Ramie	–	3.6-3.8	400–938	61.4-128
Sisal	1.5	2.0 - 2.5	511–635	6.4-22.0
Coco	1.2	30.0	175	4.0-6.0
Verre E	2.5	2.5	2000–3500	70.0
Verre S	2.5	2.8	4570	86.0
Aramide	1.4	3.3 - 3.7	3000–3150	63.0-67.0
Carbone	1.4	1.4 - 1.8	4000	230.0-240.0

- **Propriétés physiques**

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. [16]

(a). Dimension des fibres (diamètre et longueur)

La finesse présente un paramètre très important dans la caractérisation des fibres végétales. Ce paramètre est défini généralement par un facteur de forme (L/d) qui est présenté par le rapport entre les longueurs des fibres (en mm) et leurs diamètres (en µm). Ceci permet de comparer les différentes fibres végétales et de définir ainsi leurs champs d'application. En effet, un facteur de forme faible indique une résistance assez importante, ce qui oriente l'utilisation de ces fibres dans le renforcement des matériaux composites, par exemple. Par contre, un rapport (L/d) assez élevé oriente l'utilisation des fibres vers le domaine textile, par exemple. Le tableau 2 présente la longueur et le diamètre des quelques fibres végétales. [10]

Baley et al [17], a indiqué que lorsque la taille du lumen (la cavité interne d'une fibre ou d'un tube) augmente, la section transversale réelle de la fibre diminue, ce qui conduit à une sous-estimation du module de Young.

Tableau I.3: Propriétés de finesse de quelques fibres végétales. [18]

Fibres naturelles	Longueur (mm)		Diamètre (µm)		
	Moyenne	Intervalle	Moyenne	Intervalle	Ratio L/d ($\times 10^3$)
Sisal	3	1-8	20	8-41	≈ 0,15
Jute	2	2-5	20	10-25	≈ 0,1
Kenaf	5	2-6	21	14-33	≈ 0,24
Ramie	120	60-250	50	11-80	≈ 2,4
Chanvre	25	5-55	25	10-51	≈ 1
Lin	33	9-70	19	5-38	≈ 1,74
Alfa	1,2	0,2-3,3	13	6-32	≈ 0,09
Abaca	6	2-12	24	16-32	≈ 0,25
Coton	35	-	19	-	≈ 1,84

(b). Taux de reprise des fibres végétales

La teneur en humidité et le taux de reprise sont deux paramètres qui renseignent sur la quantité d'eau, que peut contenir ou reprendre la fibre dans des conditions climatiques bien

définies. De ce fait, on peut définir le taux de reprise comme étant la quantité d'eau absorbée par 100 grammes de matière sèche dans des conditions climatiques bien déterminées. La teneur en humidité est définie comme étant la quantité d'humidité contenue dans 100grammes de matière humide dans les mêmes conditions climatiques. [10]

Baley et al [19], ont fait une étude sur l'impact de l'eau absorbée sur la contrainte de rupture des fibres de lin, en séchant les fibres sous une température de 1050C pendant 14h. Ils ont trouvé que les caractéristiques mécaniques (E et σR) diminuent. En outres, après le séchage les fibres ne reprennent pas leurs propriétés initiales du fait de la formation des défauts à l'intérieur. [19]

Tableau I.4: Taux de reprise de différentes fibres végétales. [10]

Fibres	Taux de reprise (%)
Leafiran	9,5-10,5
Alfa	8,84
Coton mercerisé	8-12
Chanvre	8
Jute	12

(c). La densité

La densité des fibres végétales est une caractéristique très importante puisqu'elle se répercute sur le poids des produits réalisés à partir de ces fibres. Par exemple, les fibres de verre ayant une densité de 2,56 donnent des produits lourds alors que ceux fabriqués à base de fibres de polyéthylène de densité 0,92 seront largement plus légers. Cette propriété est particulièrement importante pour les applications techniques comme les composites ou les géotextiles. [10]

Tableau I.5: Propriétés physiques de différentes fibres végétales. [3]

Nature des fibres	Diamètre (µm)	Longueur (mm)	Facteur de forme (L/D)	Angle microfibrillaire (degrés)	Densité (kg/m^3)	Reprise de L'humidité (%)
Abaca	17,0-21,4	4,6-5,2	257	-	1500	14,00
Banane	-	2-3,8	-	11-12	1300-1350	-
Bambou	10-40	2,7	-	-	1500	-
Coco	16,2-19,5	0,9-1,2	64	39-49	1250	13,00
Coton	11,5-17,0	20-64	2752	20630	1550	8,50
Lin	17,8-21,6	27,4-36,1	1258	5	1400-1500	12,00
Chanvre	17,0-22,8	8,3-14,1	549	6,2	1400-1500	12,00
Jute	15,9-20,7	1,9-3,2	157	8,1	1300-1500	17,00
Kénaf	17,7-21,9	2,0-2,7	119	-	1220-1400	17,00
Ananas	20-80	-	-	6-14	1520-1560	-
Ramie	28,1-35,0	60-250	4639	-	1550	8,50
Sisal	18,3-23,7	1,8-3,1	115	10-22	1300-1500	14,00

- **Propriétés thermiques**

L'étude du comportement thermique des fibres lignocellulosiques est une étape très importante dans la caractérisation du fait qu'elle nous renseigne sur la composition d'un matériau. En effet, la pyrolyse des différentes substances s'effectue pour des températures variables. Du point de vue thermique, la majorité des fibres végétales perdent leur rigidité dès 160 °C et on voit la lignine se dégrader aux alentours de 200 °C. Il a été observé que certains effets irréversibles peuvent apparaître, tels qu'une augmentation de la dégradation due à l'oxydation et une modification de la viscosité. Par ailleurs, la destruction de l'ordre cristallin ne se produit généralement qu'à des températures supérieures à 320 °C, sous l'effet de l'agitation thermique des molécules. [10]

Baley et al [20], ont effectué des analyses ATG sur du lin à une température de 105°C pendant 14h. Ensuite, un second chauffage isotherme à 150°C pour 5h afin d'estimer la quantité exacte d'eau. Ils ont clairement montré que le séchage des fibres (14 h à 105°C) Etat de l'art 33 entraîne une perte importante de résistance (44% en moyenne) et une déformation de rupture (39%), ainsi qu'une modification de la pente du diagramme contrainte-déformation. Par contre les essais de traction longitudinale sur des composites unidirectionnels renforcés

par des fibres de lin séchées et montrent que le séchage n'affecte pas la rigidité axiale mais provoque une forte baisse 36% de la résistance du composite, de manière similaire à la baisse de la résistance des fibres.

I. 3.9 Traitement chimique des fibres végétales

Les caractéristiques hydrophiles des fibres naturelles et les caractéristiques hydrophobes de la matrice (polymère, organique ou autre) sont les principaux problèmes fondamentaux liés à l'utilisation de fibres naturelles comme renforcement des composites. Cependant, en utilisant un traitement chimique sur les fibres naturelles permet de réduire ses caractéristiques hydrophiles des fibres. [21]

Claire et al [22] ont étudié l'impact de différents traitements chimiques (NaOH, eau saturée en chaux et une solution de polyéthylène) sur des fibres de chanvre, et ont trouvé que le traitement par la soude augmente l'indice de cristallinité des fibres, diminue le temps de prise et augmente la rigidité expérimentale des composites. Le traitement par EDTA, qui augmente également la contrainte à la rupture des composites, et les deux autres traitements ont peu d'influence sur les propriétés mécaniques. Bahloul et al [23] ont procédé à un traitement par la soude NaOH des fibres d'alfa à des pourcentages différents (20%-25%) pendant 48H, et ont trouvé que les résultats finaux sont meilleurs par rapport aux mélanges avec des fibres non traitées.

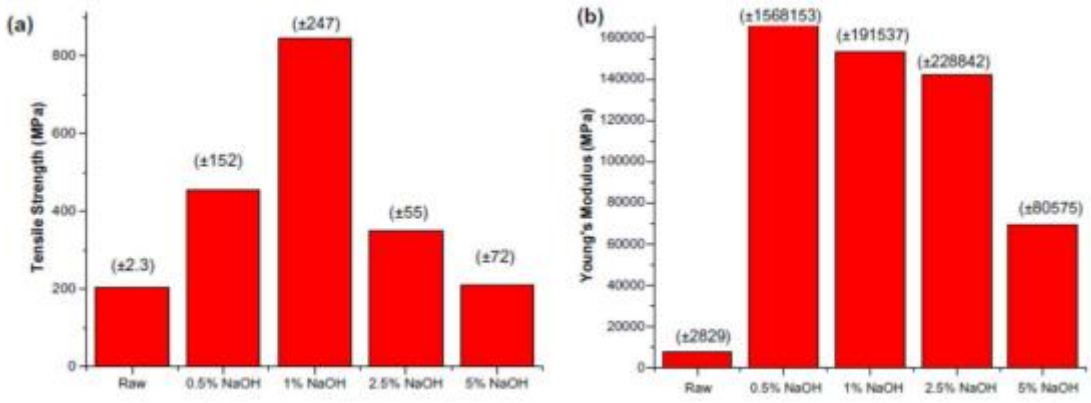


Figure I.15 : Effet du traitement chimique sur les propriétés mécaniques des fibres de palmier dattier. [2]

- **Traitement alcalin**

Le traitement alcalin est l'un des traitements chimiques les plus courants des fibres végétales, est un procédé chimique essentiel dans la modification des fibres végétales. Il consiste à

traiter les fibres avec des solutions alcalines, principalement à base de soude caustique (NaOH), pour éliminer des substances indésirables telles que la lignine, la pectine et d'autres impuretés. Lors du traitement alcalin, notamment avec de la soude caustique (NaOH), la structure moléculaire des fibres est modifiée. Cela conduit à une augmentation de la cellulose amorphe au détriment de la cellulose cristalline. Ce changement dans la structure des fibres améliore leurs propriétés, comme leur capacité d'absorption et leur résistance. Le traitement alcalin entraîne également la disparition des liaisons hydrogène dans la structure du réseau cellulosique, ce qui permet à la fibre de devenir plus souple et plus réceptive aux teintures. Cette altération de la structure augmente également la réactivité chimique des fibres. [24]

La réaction chimique simplifiée peut être écrite comme suit :

$$\text{Fiber-OH} + \text{NaOH} \rightarrow \text{Fiber-O}^{-}\text{Na}^{+} + \text{H}_2\text{O} \quad [24]$$

Roy et al. [25] ont appliqué le traitement alcalin à des fibres de jute en utilisant des solutions de différentes concentrations et pendant différents temps à température ambiante. Les fibres ont été immergées dans la solution alcaline, puis lavées et séchées. Ce traitement a éliminé progressivement les hémicelluloses et la lignine. Selon les auteurs, le traitement alcalin brise les liaisons hydrogène entre les groupes hydroxyles (-OH) de la cellulose, les hémicelluloses et la lignine et conduit à la défibrillation c.à.d. la décomposition du faisceau de fibres en fibres plus petites. La teneur en humidité des fibres de jute a diminué avec l'augmentation de la concentration de la solution alcaline et de la durée du traitement. La teneur en humidité de la fibre de jute non traitée était de 15,51 %. Elle a atteint 4,08 % lorsque les fibres de jute ont été traitées avec 1% de solution alcaline pendant 48 h. Dans ce dernier cas, l'angle de contact à l'eau des fibres traitées a augmenté de 63,9˚ à 96,2˚. Ainsi, ces fibres sont devenues plus hydrophobes et plus compatibles avec une matrice. La rugosité de surface de la fibre de jute a augmenté avec la concentration de la solution alcaline et la durée du traitement. Ceci est dû à l'élimination des impuretés de surface, des matériaux non cellulosiques, des substances inorganiques et de cires. Le diamètre des fibres a été réduit de 39%. Les propriétés mécaniques ont été améliorées. Le traitement alcalin a augmenté la résistance à la traction des fibres de 82% et l'allongement à la rupture de 45%.

- **Traitement au silane**

Le silane est un composé chimique de formule SiH4. Les silanes sont utilisés comme des agents de couplage pour améliorer l'adhérence entre les fibres et la matrice polymère. Les agents de couplage silane peuvent réduire le nombre de groupe hydroxyle de la cellulose dans l'interface fibre / matrice. [26]

- **Acétylation**

L'acétylation est une technique d'estérification des fibres naturelles. Les fibres sont acétylées avec l'acide acétique ou l'anhydride acétique en présence ou non d'un catalyseur acide pour greffer des groupements acétyles sur la cellulose (Figure I.23). Le groupement acétyle (CH3CO) remplace le groupement hydroxyle (OH) hydrophile de la fibre. Ainsi, la nature hydrophile de la fibre diminue. [27]

I. 3.10 Avantages et points de faiblesse des fibres végétales

Avantages :

- Les fibres végétales sont des ressources renouvelables, biodégradables et moins onéreuses pour ce qui est de leur production, en comparant avec celle des fibres de verre par exemple. Elles ont de bonnes propriétés thermiques et acoustiques. [28]
- La masse volumique moins élevée leur confère des propriétés mécaniques spécifiques élevées, flexion, ténacité aux chocs, contrôle de la fissuration, etc. (celles-ci sont dépendantes de l'origine des fibres). [28]
- Les fibres libériennes (en tige) possèdent généralement des meilleures propriétés (module de Young longitudinal entre 25 à 100 GPa). Les fibres des feuilles se situent entre 6 et 42 GPa, et des graines entre 3 et 13 GPa. [28]
- Leur grande disponibilité, combinée à leur processus de production simple, font que les fibres végétales sont potentiellement adaptées à des constructions peu coûteuses et écologiques [29]
- En ce qui concerne sa résistance à la rupture, on peut constater que le renforcement des matrices de ciment avec ce type de fibres apporte des améliorations au matériau, ainsi qu'une augmentation de l'énergie absorbée qui justifierait son utilisation pour des éléments nécessitant une résistance aux chocs [29].
- Dans certains cas, on utilise des fibres naturelles rejetées des processus de production industriels et semi-industriels. Elles génèrent également une utilisation de ressources renouvelables et locales, élargissant le champ d'application des activités agricoles. Leurs applications sont variées et vont de l'industrie aérospatiale,

de l'ameublement et de l'automobile aux géotextiles biodégradables et aux matériaux de construction. [28]

- Les fibres stimulent le lien entre la science, la technologie et le design dans le développement de produits ayant des avantages socio-économiques, en promouvant une culture de design durable. [28]

Points de faiblesse :

- La température de mise en forme de ces matériaux est limitée, une température trop élevée pourrait endommager les fibres. [28]
- Les fibres sont hydrophiles et peuvent donc absorber de l'eau en grande quantité. Cela peut donc causer un gonflement des parois cellulaires et l'humidité peut créer des moisissures. Une autre conséquence est la mauvaise compatibilité entre les fibres et la matrice cimentaire. Cela provoque une forte absorption d'humidité entraînant des changements dimensionnels dans les fibres à base de lignocellulose. [28]
- La dispersion des propriétés en termes de rigidité ou de résistance mécanique, principalement causée par la difficulté à estimer de manière exacte les dimensions de la section transversale car elle varie sur toute sa longueur. [28]
- L'origine naturelle de fibres fait que leurs propriétés sont assez variables. La variété de la plante, la densité de la plantation, la qualité de la terre, le climat, l'exposition au soleil, la fertilisation, …. [28]
- L'influence de l'apport en eau durant la croissance influence les propriétés mécaniques des fibres. Par exemple, les fibres de lin cultivées en France peuvent avoir un module d'Young longitudinal qui varie entre 43,9 et 61,1 GPa, avec des valeurs de résistance et d'allongement à la rupture moyennes de 945 +/- 200 MPa et 2,07 +/- 0,45 % respectivement. Malgré cette dispersion, les fibres de lin possèdent des propriétés mécaniques spécifiques similaires voire supérieures à celles des fibres de verre, grâce à leur faible masse volumique. [28]

I. 3.11 Processus d'extraction des fibres végétales

Parmi les sources de fibres végétales il y a peu de travaux effectués sur ceux du palmier dattier. Pour notre cas il est nécessaire de citer les méthodes d'extraction des différentes fibres végétales comme le Bambou et l'Alfa pour mieux comprendre les techniques d'extraction.

Ces procédés de séparation des fibres généralement utilisés de nos jours sont schématisés dans le diagramme de la figure I.16 [9].

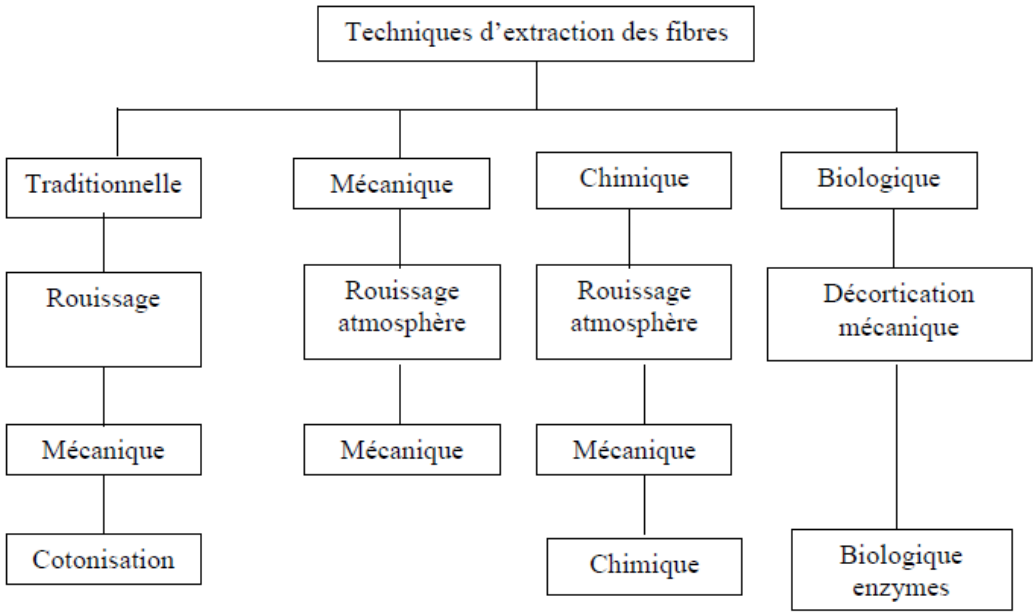


Figure I. 16 : Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales [9].

- La décortication :

La décortication consiste à séparer mécaniquement à l'aide des machines spécifiques les fibres de tige ou de feuille en brisant ces dernières de telle sorte que seulement les fibres restent. La décortication est souvent utilisée pour l'extraction des fibres de banane, de sisal, de lin et de jute [9].

- La séparation par les bactéries et l'humidité :

Dans cette technique la récolte est soumise aux bactéries et l'humidité pour faciliter la séparation des faisceaux de fibres de tiges ou de feuilles par la décomposition des tiges et des feuilles. Elle est généralement utilisée pour le coco, l'ananas et aussi le jute et le lin [9].

- Processus d'égrenage (vibration) :

Ce processus est utilisé pour les fibres de grain comme le coton.

- Processus de défibrage :

Ce procédé est utilisé pour les fibres de bois. La première étape consiste à couper et scier le tronc d'arbre à des copeaux ou morceaux de bois, puis le processus de base est mécanique (broyeur) et thermique (passage à une température de 110 à 160 °C). Cette cuisson permet d'affaiblir les liaisons entre les fibres avant le passage au défibreur, le défibrage peut se faire par un système à disques. Suivant le réglage des machines, on peut avoir des fibres plus ou moins grandes suivant l'usage [9].

- La méthode manuelle :

Tout d'abord, les zones contenant les nœuds et une très fine couche d'exoderme des fibres de bambou sont enlevés. Le reste est épluché pour avoir des morceaux de 0,5 à 1,5 mm d'épaisseur et 10 mm de largeur. Les morceaux sont conservés dans l'eau pendant trois jours afin de les ramollir. Ensuite, ils sont battus en douceur afin de détacher les fibres. Les amas de fibres résultant sont séparés à l'aide d'un couteau aiguisé et peigné. Ce processus est répété jusqu'à ce que les fibres soient le plus possible isolées les unes des autres [9].

- Méthode par laminage ou pressage

Les fibres de bambou sont découpées en morceaux qui sont ensuite écrasés sous presse ou par laminage ou encore par combinaison des deux traitements. Ceci est effectué plusieurs fois de suite jusqu'à ce que les fibres soient le plus possible séparées [9].

- Explosion à la vapeur

Les fibres de bambou sont divisées en plusieurs morceaux de longueur environ 1m qui sont mis dans une enceinte en présence de vapeur surchauffée à 175°C. La pression de vapeur est d'environ 0,7 à 0,8 MPa. Au bout d'une heure, la pression est ramenée très rapidement à la pression atmosphérique. Des micro-explosions se produisent alors dans les cellules les plus fragiles du bambou. Ce cycle est répété une dizaine de fois (8 à 11 fois). Après le procédé d'explosion à la vapeur, les lamelles de la fibre de bambou explosées sont lavées à grande vitesse de jet d'eau de façon à finir de séparer les faisceaux de fibres qui comprennent plus de cent mono filaments [9].

I. 3.12L'utilisation des fibres végétales

De nos jours, l'utilisation des ressources renouvelables dans les matériaux composites devient de plus en plus fréquente. Autrement dit, ces fibres constituent une alternative aux fibres synthétiques en raison de leur recyclabilité. Néanmoins leurs propriétés doivent être encore améliorées. Les fibres naturelles telles que le lin, le chanvre, le sisal, le jute et le palmier ont certains avantages technico-économiques et écologiques par rapport aux fibres synthétiques. La combinaison intéressante de leurs propriétés mécaniques et physiques ainsi que leur caractère respectueux de l'environnement ont suscité un intérêt dans un certain nombre de secteurs industriels, notamment l'industrie automobile. Tout d'abord, l'utilisation des fibres végétales comme renfort dans les matériaux composites a pour but de : valoriser les ressources locales dans les pays industrialisés ou peu industrialisés et d'ouvrir ainsi de

nouveau débouchés aux produits agricoles, développer des matériaux et des technologies tenant compte de l'impact sur l'environnement.

La figure I.17 représente l'utilisation des fibres naturelles avec des bio composites dans différentes domaines [9].

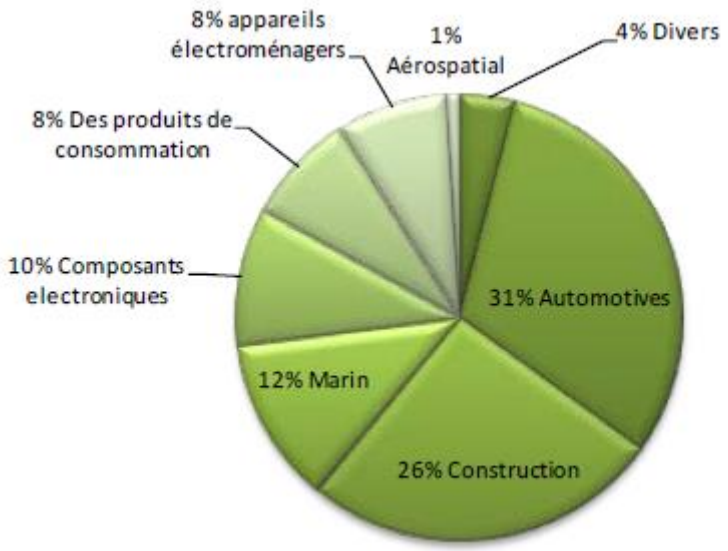


Figure I.17: Utilisation des fibres naturelles avec des bio composites [9].

Les composites à base de fibres végétales trouvent de plus en plus des applications industrielles et leurs utilisations augmentent de jour en jour. Les principales raisons sont la disponibilité d'un grand éventail de fibres végétales, le respect de l'environnement et la recyclabilité quand ils sont combinés avec des polymères adéquats. L'incorporation des fibres végétales à savoir le lin, le chanvre, le jute, la ramie, le sisal, le kenaf, le coco, l'abaca et d'autres fibres, dans des matériaux thermoplastiques ou thermodurcissables en remplacement des fibres de verre est un concept qui commence à être industrialisé et commercialisé. Les composites renforcés par des fibres végétales trouvent des applications dans la fabrication des habitacles (figure I.18) de plusieurs marques de voitures, de petits bateaux et kayaks, et même dans la boiserie et les constructions en génie civil ou bien dans des structures secondaires (figure I.19) dans des applications qui répondent au souci de la préservation de l'environnement [9].



Figure I.18 : Des pièces renforcées par des fibres végétales (Flax/polypropylène) Mercedes Benz A-Class. [9]



Figure I. 19 : Réalisation des pièces renforcées par des fibres végétales [9].

Les fibres végétales trouvent aujourd'hui leur place dans la construction grâce à leurs propriétés mécaniques et écologiques. Des techniques traditionnelles comme la bauge, mélange de terre et de fibres, sont modernisées. La fibre de lin, très résistante, est utilisée dans le projet européen *Smart Circular Bridge* pour construire des ponts piétonniers à base de bio résine et de fibres naturelles. Ces structures légères et durables sont testées en conditions

réelles, confirmant le potentiel des fibres végétales comme alternative aux matériaux conventionnels. **[30]**



Figure I. 20 : ponts piétonniers à base de bio résine et de fibres naturelles. [30]

Les panneaux de construction biosourcés, préfabriqués en béton de chanvre et ossature bois, offrent d'excellentes performances en durabilité (plus de 100 ans), isolation thermique, acoustique et confort en toutes saisons grâce à un déphasage supérieur à 12h. Leur fabrication éco-conçue, en circuit court et à faible empreinte carbone, permet une réduction de CO2 de plus de 95 % par rapport au béton classique. Ce type de construction divise aussi par cinq la consommation énergétique d'une maison de 100 m² en parpaing. [31]



Figure I. 21 : Panneau de construction biosourcés. [31]

Conclusion

À l'instar de tous les matériaux naturels, les fibres végétales présentent une grande variabilité de leurs propriétés mécaniques et physiques. Cette variabilité est étroitement liée à leur composition chimique et structurelle, elle-même influencée par le type de fibre et les conditions de croissance. Principal constituant des fibres végétales, la cellulose diffère selon l'origine de la fibre. Ces fibres sont particulièrement sensibles à l'humidité, ce qui les rend fortement dépendantes des conditions environnementales. En général, une teneur élevée en humidité entraîne une diminution de leurs performances mécaniques.

Dans les matériaux composites, les propriétés mécaniques dépendent essentiellement de la qualité de l'adhérence entre la matrice et les fibres. Bien que plusieurs études aient démontré que certaines fibres végétales peuvent présenter des caractéristiques mécaniques comparables à celles des fibres de verre, les performances des composites qui en sont issus restent, en général, inférieures. C'est pourquoi de nombreuses recherches se sont concentrées sur l'amélioration de ces performances, notamment par le biais de traitements physiques ou chimiques appliqués aux fibres.

Chapitre II

Matériaux, plan d’expérience et procédures expérimentales

Introduction

L'élaboration de matériaux innovants et durables dans le secteur de la construction est devenue une priorité face aux enjeux environnementaux actuels. Dans ce contexte, les bio-composites à matrice cimentaire renforcés par des fibres naturelles représentent une alternative prometteuse aux matériaux conventionnels, en intégrant des ressources renouvelables et en valorisant les déchets agricoles.

Ce chapitre est consacré à la description détaillée de la démarche expérimentale adoptée pour la mise en œuvre et la caractérisation de bio-composites (Bio-mortiers) cimentaires renforcés par des fibres végétales telles que le sisal, le jute ou encore le verre. L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances mécaniques de ces matériaux, dans le but de les adapter à des usages non structurels dans le domaine de la construction, notamment dans les zones arides et semi-arides du sud algérien.

Dans un premier temps, les matériaux utilisés sont présentés, en précisant leurs caractéristiques principales et leur origine. Par la suite, les différentes étapes de préparation des échantillons sont détaillées : formulation des mélanges, traitement des fibres, malaxage, moulage, conservation et démoulage. Un plan d'expérience de type Taguchi L27 a été appliqué afin d'optimiser les essais en réduisant le nombre de combinaisons expérimentales tout en tenant compte de plusieurs facteurs d'influence tels que le type de fibre, sa longueur, le taux d'incorporation, la concentration de la solution alcaline et le temps de traitement chimique.

Ensuite, les dispositifs expérimentaux utilisés pour la réalisation des essais mécaniques sont présentés. Il s'agit principalement d'essais de compression et de flexion 3-points, conformes aux normes en vigueur, permettant d'évaluer la résistance des bio-composites étudiés. Cette approche expérimentale vise ainsi à identifier les paramètres les plus influents sur le comportement mécanique des mortiers renforcés de fibres, afin de proposer des formulations optimales et économiquement viables, susceptibles d'être mises en œuvre dans un cadre de construction écologique et locale.

II.1 Présentation des fibres

Dans notre recherche, le matériau de base utilisé pour le renforcement des composites cimentaires est constitué de deux types de fibres végétales : la fibre de jute, de sisal et ceux

comparées à la fibre synthétique de verre, qui sont représentées respectivement dans la Figure II.1a, II.1b et II.1d.

La **fibre de jute** est une fibre naturelle extraite de la plante du même nom, appartenant à la famille des Malvacées. Elle est largement cultivée dans les régions tropicales humides, principalement en Asie. Cette fibre est appréciée pour sa biodégradabilité, sa résistance mécanique et sa disponibilité abondante. Elle est utilisée dans divers domaines, notamment la fabrication de sacs, de tissus grossiers, de cordes, ainsi que dans l'industrie des matériaux composites.

La **fibre de sisal**, quant à elle, est issue des feuilles de l'**Agave sisalana**, une plante tropicale appartenant à la famille des Agavacées. Elle est caractérisée par sa grande résistance à la traction, sa rigidité et sa durabilité. Le sisal est principalement cultivé en Afrique et en Amérique latine. Il est traditionnellement utilisé dans la fabrication de cordes, de tapis, de filets, et aujourd'hui, il trouve sa place dans le domaine des bio composites grâce à ses propriétés mécaniques intéressantes.

Enfin, la **fibre de verre** est une fibre synthétique obtenue à partir de verre fondu transformé en filaments très fins. Elle se distingue par sa haute résistance mécanique, sa stabilité dimensionnelle et sa résistance à la corrosion. Utilisée depuis longtemps dans les matériaux composites, elle permet d'améliorer les performances mécaniques et la durabilité des matrices cimentaires, en particulier lorsqu'elle est combinée à des fibres naturelles.



-a- **-b-** **-c-**

Figure II.1: a) Fibre de jute, b) Fibre de sisal et c) Fibre de verre

II.2 Matériels et Méthodes expérimentales

II.2.1Préparation des fibres

Dans ce travail, nous cherchons à élaborer des bio-mortiers constitués d'une matrice cimentaire renforcée par différents pourcentages de fibres, dans le but d'améliorer la résistance mécanique et la durabilité des matériaux obtenus. Le choix s'est porté sur deux types de fibres végétales, la fibre de jute et la fibre de sisal, ainsi qu'une fibre synthétique, la fibre de verre, sélectionnées pour leurs propriétés mécaniques intéressantes et leur disponibilité, ainsi que leur cout raisonnable.

Avant leur utilisation, les fibres naturelles (jute et sisal) ont subi un traitement chimique à base d'hydroxyde de sodium (NaOH), afin d'améliorer leur adhérence à la matrice cimentaire en éliminant leurs tendances à l'absorption de l'eau (hydrophilité). Ce traitement a été réalisé avec trois concentrations différentes de NaOH (1 %, 3 % et 5 %) et pour trois durées d'immersion dans la solution (2 heures, 4 heures et 8 heures). Ce procédé permet d'éliminer les impuretés, la lignine et l'hémicellulose (responsable à l'hydrophilité), tout en augmentant la rugosité de la surface des fibres.

Après le traitement, les fibres ont été soigneusement lavées à l'eau distillée pour éliminer les résidus alcalins et neutralisé le ph de la structure, puis séchées à l'air libre. Enfin, les fibres ont été découpées en différentes longueurs : 5 mm, 10 mm et 20 mm (Figure II.2), dans le but d'étudier l'effet de la longueur des fibres sur les propriétés mécaniques des bio-composites élaborés.

Dans le cas de la fibre de verre, la réalisation d'un traitement chimique s'effectués dans le but de suivre les mêmes étapes que pour les autres types de fibres, aucune amélioration significative de ses propriétés n'a été observée. Ce traitement a donc été effectué principalement pour garantir l'homogénéité du protocole expérimental, et non-pour modifier les caractéristiques de la fibre elle-même, qui reste naturellement stable et performante.



Figure II.2: Différentes longueurs utilisées (5, 10 et 20 mm) pour les 3 types de fibres a) fibre de verre, b) fibre de jute et c) fibre de sisal

II.2.2 Planification du protocole expérimentale par la méthode de TAGUCHI

La méthode statistique de Taguchi, conçue pour optimiser les plans d'expériences, est largement utilisée dans divers domaines industriels. Elle vise principalement à réduire les variations autour de la valeur cible (la réponse), tout en identifiant les facteurs ayant un impact significatif sur cette dernière. L'intérêt principal de cette méthode réside dans sa capacité à obtenir des résultats fiables avec un nombre réduit d'expérimentations, ce qui permet un gain considérable en temps et en ressources [31,32].

Dans le cadre de notre étude, nous avons adopté cette approche afin de planifier les essais mécaniques (flexion et compression) des bio-mortiers à matrice cimentaire renforcée par des fibres. Pour ce faire, nous avons sélectionnés Cinque facteurs expérimentaux :

- Le type de fibres (jute, sisal et verre)
- Le pourcentage de renforcement en fibres (1 %, 2 % et 5 %),
- La longueur des fibres (5 mm, 10 mm et 20 mm),
- Le pourcentage de solution NaOH utilisée pour le traitement alcalin (1 %, 3 % et 5 %),
- Et enfin, le temps d'immersion dans la solution (2 h, 4 h et 8 h).

Ces paramètres et leurs différents niveaux sont présentés dans le Tableau II.1. Grâce à la méthode de Taguchi, nous avons pu élaborer un plan d'expérience (L27) permettant de déterminer l'influence de chaque facteur sur les propriétés mécaniques des bio-mortiers tout en minimisant le nombre total d'essais.

Tableau II.1: Facteurs et leurs niveaux utilisés dans la conception d'un plan d'expérience Taguchi.

Facteur	**Symboles**	**Niveau 1**	**Niveau 2**	**Niveau 3**
Type de fibre	(A)	Sisal	Jute	Verre
Fibre (%)	(B)	1	3	5
Longueur (mm)	(C)	5	10	20
% de NaOH	(D)	1	3	5
Temps d'immersion	(E)	2	4	8

La méthode de Taguchi a été utilisée à l'aide du logiciel Minitab 17. Dans notre étude, nous avons pris en compte cinq facteurs précités, chacun à trois niveaux. Pratiquement, 3^5= 243 nombres d'expériences qui peut être réalisé pour arriver aux résultats souhaités. Avec la planification de TAGUCHI, elle conduit à la construction d'un plan d'expérience complet L27 (27 expériences), présenté dans le Tableau II.2.

Autrement dit, toutes les 27 combinaisons possibles de ces facteurs ont été réalisées afin d'assurer une analyse complète et fiable de leurs effets sur les propriétés mécaniques des bio-mortiers. Les résultats expérimentaux ont ensuite été analysés à l'aide du rapport signal/bruit (S/B), permettant d'évaluer l'impact de chaque paramètre et d'identifier les niveaux optimaux pour obtenir les meilleures performances mécaniques.

Tableau II.2: Plan d'expérience orthogonal de Taguchi (L27).

Run	Type de fibre A	% de fibre B	Longueur De fibre (mm) C	% de NaOH D	Temps Immersion (h) E
Contrôle	0	0	0	0	0
1	Sisal	1	5	1	2
2	Sisal	1	5	1	4
3	Sisal	1	5	1	8
4	Sisal	3	10	3	2
5	Sisal	3	10	3	4
6	Sisal	3	10	3	8
7	Sisal	5	20	5	2
8	Sisal	5	20	5	4
9	Sisal	5	20	5	8
10	Jute	1	10	5	2
11	Jute	1	10	5	4
12	Jute	1	10	5	8
13	Jute	3	20	1	2
14	Jute	3	20	1	4
15	Jute	3	20	1	8
16	Jute	5	5	3	2
17	Jute	5	5	3	4
18	Jute	5	5	3	8
19	Verre	1	5	1	2
20	Verre	1	5	1	4
21	Verre	1	5	1	8
22	Verre	3	10	3	2
23	Verre	3	10	3	4
24	Verre	3	10	3	8
25	Verre	5	20	5	2
26	Verre	5	20	5	4
27	Verre	5	20	5	8

II.2.3 Traitement chimique des fibres

L'une des principales difficultés rencontrées lors de l'utilisation de fibres naturelles dans les bio-mortiers réside dans l'incompatibilité entre la nature hydrophile des fibres et la nature hydrophobe de la matrice cimentaire. Pour remédier à ce problème, un traitement alcalin à base de NaOH (hydroxyde de sodium) est couramment utilisé. Ce traitement vise à réduire l'affinité des fibres avec l'eau, à éliminer les impuretés superficielles, et à améliorer l'adhésion entre les fibres et la matrice en rendant leur surface plus rugueuse.

Dans le cadre de ce travail, les faisceaux de fibres de jute, sisal, et verre ont été soumis à un traitement chimique identique afin d'unifier la procédure expérimentale. Les fibres ont été immergées dans des solutions de NaOH à trois concentrations différentes (1 %, 3 %, 5 %) pendant des durées variables de 2 h, 4 h et 8 h, à température et pression ambiantes.



Figure II.3: a) Traitements chimiques alcalin des fibres par NaOH b) trempées dans de l'eau distillée

Après cette étape, les fibres ont été soigneusement rincées à l'eau pour éliminer l'excès de soude. Ensuite, elles ont été trempées dans de l'eau distillée pendant 15 minutes pour stabiliser leur pH. Enfin, les fibres ont été séchées à l'air libre avant d'être utilisées dans les formulations des bio-composites.

II.2.4 Élaboration des bio-mortiers à matrice cimentaire renforcés par fibres végétales et synthétiques

Dans le cadre de la mise en valeur des fibres végétales et synthétiques disponibles localement ou commercialement, des bio-composites à matrice cimentaire ont été élaborés en incorporant des fibres de sisal, jute et verre. Ces matériaux sont destinés à des usages non structurels, en particulier dans les régions arides et semi-arides du sud algérien, où les solutions de construction nécessitent des matériaux à la fois durables, économiques et adaptés aux conditions climatiques sévères.

Les échantillons ont été préparés conformément à la norme européenne NF EN 196-1 [33], avec les proportions suivantes pour chaque mélange :

- Sable sec normalisé : 1350 g
- Ciment Portland composé (CEM II/B-M (S-L) 32,5 N): 450 g
- Eau : 225 g

Le mélange a été réalisé selon un protocole normalisé (Figure II.4), puis coulé dans des moules prismatiques (4x4x16 mm^3) pour l'essai de flexion 3-points et cubique (5x5x5 mm^3) pour l'essai de compression.



Figure II.4: Différents composants du mortier.

La variation de la longueur des fibres utilisées pour le renforcement influence directement sur leur masse (en grammes) introduite dans les bio-composites. Pour déterminer la quantité de fibres à ajouter, on utilise la relation de proportionnalité suivante.

Le volume du moule utilisé pour l'essai de flexion 3-points est de (4 × 4 × 16) cm^3, soit 256 cm^3 (ou 0,000256 m^3). Conformément à la norme EN 196-1 [30], ce volume correspond à une masse totale de mortier de 510 g.

Ainsi, on établit la règle de trois suivantes pour déterminer la masse de fibres correspondant à chaque pourcentage d'ajout :

- 510 g de mortier représentent 100 %
- Donc, 1 % correspond à :

  $(1 \times 510) / 100 = 5{,}1$ g

Les masses des fibres à ajouter pour chaque pourcentage (1 %, 2 %, etc.) sont ensuite calculées à partir de cette base.

Le tableau suivant (II.3) présente les masses correspondantes des fibres (jute, sisal ou verre) en fonction du pourcentage de renforcement utilisé.

Tableau II.3: les résultats en masse des quantités des fibres jute, sisal et du verre.

% des fibres	Quantité massique (g)
1 %	5.1
3 %	15.3
5 %	25.5

La préparation des échantillons ainsi que la réalisation des essais expérimentaux ont été menées en collaboration avec le laboratoire des essais physiques et mécaniques situé au sein de la cimenterie d'El Malabiod à Tébessa, selon un protocole bien défini.

a- Malaxage et moulage des éprouvettes

- Une fois le malaxeur prêt à fonctionner, nous versons l'eau dans la cuve, puis ajoutons progressivement le ciment.
- Nous lançons ensuite le malaxeur à basse vitesse pendant une minute. Au cours des 30 dernières secondes, nous incorporons le sable dans le mélange.
- Puis, nous passons à une vitesse de malaxage élevée, que nous maintenons pendant deux minutes (Figure II.5).
- Ensuite, nous arrêtons brièvement le malaxeur afin de racler soigneusement les parois et le fond de la cuve, pour garantir un mélange homogène.
- Nous reprenons enfin le malaxage pendant deux minutes supplémentaires à grande vitesse.

- Une fois le mélange prêt, nous procédons au moulage des éprouvettes, en utilisant un appareil à chocs pour assurer un compactage uniforme et éviter la formation de vides.
- Disposer le mortier fibré sur une plaque non réactive au ciment et absorbante.
- Former une galette approximatives rectangulaire partagée en trios (03) fractions sensiblement égales (Figure II.6).



Figure II.5: Malaxeur pour le mélange ciment, sable, eau et former la pâte.

- Nous installons le moule sur la table à chocs, puis introduisons une première couche de mortier fibré dans chacun des compartiments.



Figure II.6: Exposition des échantillons à des chocs.

- Ensuite, nous mettons la table en marche pour effectuer 60 chocs, assurant ainsi un bon compactage de la première couche.
- Nous répétons cette opération pour déposer la seconde couche du mortier dans chaque compartiment.
- Une fois le remplissage terminé, nous retirons le moule de la machine, puis nous enlevons l'excès de mortier à l'aide d'une règle métallique, que nous faisons glisser avec un mouvement de va-et-vient (en scie) le long des éprouvettes pour obtenir une surface bien plane.

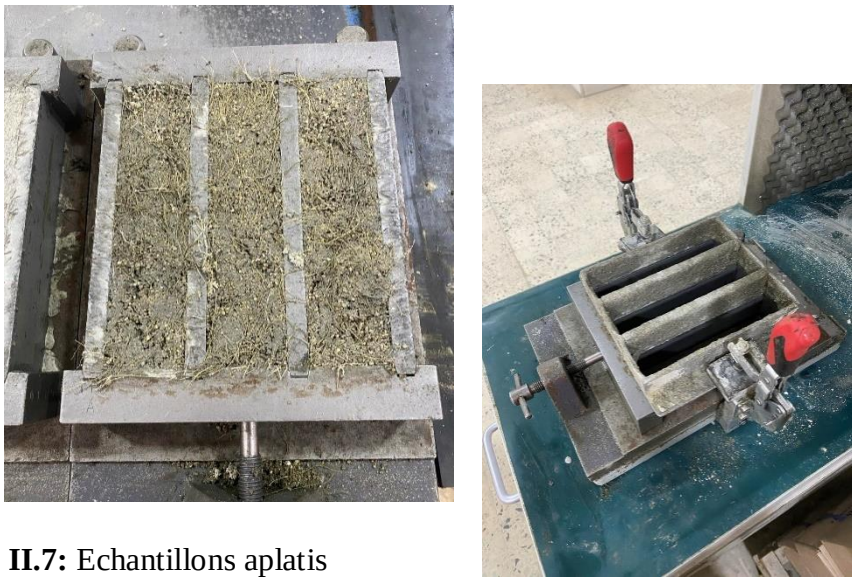


Figure II.7: Echantillons aplatis

- Le moule remplie de mortier fibré est conservé dans une armoire humide (98%) et à une température de 20°C ± 2 (Figure II.8).



Figure II.8: Echantillons conservés dans une armoire humide.

b- Démoulage des éprouvettes

- Après 24 heures de conservation, nous procédons au démoulage des éprouvettes avec précaution, afin d'éviter toute fissuration ou altération de leur forme. Cette étape se fait soigneusement pour garantir l'intégrité des échantillons avant leur mise en cure.
- Nous identifions les éprouvettes à l'aide d'un code d'échantillon, de l'origine des fibres, et d'autres informations pertinentes, en évitant la face destinée à la compression.



Figure II.9: Démoulage des éprouvettes, suivi de leur numérotation.

- Ensuite, nous les immergeons dans de l'eau maintenue à une température constante de 20 °C ± 1, et ce, jusqu'au moment des essais, soit après 28 jours (Figure II.10).



Figure II.10: Immersion des échantillons dans l'eau

- L'âge des éprouvettes est comptabilisé à partir du moment du malaxage jusqu'au début des essais.

II.2.5 Appareils expérimentaux complémentaires

Dans le cadre de l'élaboration des bio-mortiers renforcés par des fibres végétales, plusieurs équipements auxiliaires ont été utilisés afin d'assurer un travail maîtrisé, conforme aux normes, et réalisé dans des délais appropriés. Ces appareils sont disponibles au sein du laboratoire des essais physiques et mécaniques de la cimenterie.

a- Table à chocs

La table à chocs permet de compacter et d'homogénéiser le mélange contenu dans les moules à l'aide d'une série de secousses. En général, chaque moule reçoit environ soixante chocs pour garantir une bonne répartition du mortier (Figure II.11). Le tableau ci-après présente les caractéristiques techniques de cet appareil.

Données techniques de la table à chocs

Code : X1Y11AC
Marque : TONI-TECHNIK
Model / Type : 6135
N°Série : 247
Lieu : Labo essais physiques et mécaniques
Date de mise en service : 2000 Superviseur : SCMR



Figure II.11: Appareil de table a chocs.

b- Chambre climatique

Il s'agit d'une armoire humide maintenant un taux d'humidité de 98 % et une température stable de 20 °C ± 2, offrant ainsi des conditions idéales pour la conservation des moules fraîchement préparés. Ces derniers sont placés à l'intérieur, sans empilement, pendant 24 heures. Durant cette période, les échantillons commencent à se solidifier par rétrécissement. Une fois ce délai écoulé, ils sont démoulés et immergés dans l'eau jusqu'à la date des essais, prévue après 28 jours de cure (Figure II.12). Les caractéristiques techniques principales de cet appareil sont présentées ci-dessous.

Données techniques de la chambre climatique.

Code : X1Y09CHN1
Marque : BINDER
Model / Type : KBF 720
N°serie : 06-06466
Dimensions : 100cm×60cm×117cm
Option : Avec ventilation
Etendue de mesure : 180 C°
Température désirée : 20 C°
Humidité désirée : 90 % HR
Lieu : Labo essais physiques et mécaniques
Date de mise en service : 2000 Superviseur : SCMR



Figure II.12: une chambre climatique.

II.3 Machines d'essais mécaniques

II.3.1 Essai de compression

L'essai de compression constitue l'un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux de construction à base de ciment (mortier, béton, béton armée, ... etc.). Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées suivant la norme ASTM C109 / C109M [34]. Cet essai consiste à appliquer une charge sur un échantillon posé sur une surface rigide. Cette contrainte entraîne l'écrasement progressif de l'éprouvette, tandis que les contraintes et les déformations sont enregistrées tout au long du test.

Les essais de compression des échantillons en bio-mortiers ont été réalisés à température et a pression de l'ambiante, sur une machine de compression/flexion universel de marque TONI-TECHNIK (Figure II.13), avec une vitesse de 2 mm/min.



Figure II.13: Machine d'essai de compression

II.3.2 Essai de flexion 3-Points

La même machine de marque TONI-TECHNIK (Figure II.14) a été utilisée pour des essais statiques de flexion 3-points effectué sur les bio-mortiers, élaborés et renforcés de fibre de sisal, jute et verre selon la norme ASTM C348-14 [35]. Les tests, effectués dans les mêmes conditions avec une vitesse de déplacement de de 50N/s ± 10 N/s jusqu'à la rupture, de 22 °C de température et une humidité relative moyenne de 25%



Figure II.14: Machine d'essai de flexion.

- **Caractéristiques techniques de la machine d'essais compression et flexion**

Code : X1Y01AKN1

Marque : TONI-TECHNIK

Model / Type : 1544

N°serie : 127

Constructeur afficheur : TONI-TECHNIK

Type afficheur : TONITROL

N°serie afficheur : 0510 / 936 / 07

Etendue de mesure : 10 KN

Résolution : 0,001 KN

Lieu : Labo essais physiques et mécaniques

Date de mise en service : 2007

Superviseur : SCMR

Conclusion

Dans le cadre de cette étude, l'élaboration de bio-composites cimentaires renforcés par des fibres naturelles (sisal, jute, verre) a permis de mettre en évidence l'importance de plusieurs paramètres d'élaboration sur les performances mécaniques des matériaux. L'utilisation de la méthode de Taguchi avec un plan d'expérience de type L27 a permis d'optimiser les essais tout en réduisant le nombre d'expériences nécessaires.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact significatif du type de fibre, de son taux d'incorporation, de sa longueur, du traitement chimique (via NaOH) ainsi que du temps d'immersion, sur la résistance en compression et en flexion des bio-mortiers. Ces bio-composites présentent un fort potentiel pour des applications non structurelles, notamment dans les zones arides et semi-arides, en raison de leur faible coût, leur légèreté et leur caractère écologique.

Ce travail ouvre ainsi la voie à de futures recherches sur la durabilité, le comportement à long terme et les performances thermiques et hydriques de ces matériaux innovants.

CHAPITRE III

Analyse des résultats et optimisation des propriétés mécaniques desbio-compositesMortier/fibres

Chapitre III :Analyse des résultats et optimisation des propriétés mécaniques des bio-composites Mortier/fibres

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux issus des essais mécaniques réalisés sur des échantillons de mortier renforcé par différents types de fibres. Les matériaux étudiés comprennent des fibres synthétiques (verre) et des fibres végétales (sisal et jute), toutes soumises à un plan expérimental bien déterminé allant du traitement alcalin au NaOH (selon différents pourcentages), durées d'immersion, longueurs et encore différentes proportions de fibres en volume.

Les performances mécaniques ont été évaluées à travers des essais de flexion 3-points et de compression, conformément aux normes en vigueur, afin de déterminer l'influence des paramètres de traitement et d'ajout des fibres sur le comportement du bio-mortiers élaborés. Pour une analyse statistique rigoureuse, les résultats ont été exploités à l'aide de la méthode Taguchi, en adoptant un plan d'expériences L27, permettant d'optimiser les facteurs influents avec un nombre réduit d'essais.

L'objectif final est d'identifier la fibre végétale la plus performante en termes de propriétés mécaniques, et d'évaluer dans quelle mesure elle peut se substituer aux fibres de verre dans le domaine des matériaux de construction, en particulier dans les conditions climatiques chaudes et sèches caractéristiques de certaines régions.

III.1Résultats des tests mécaniques

Avant de présenter les résultats expérimentaux, il convient de préciser que cette étude vise à évaluer l'influence de plusieurs facteurs sur les performances mécaniques des bio-mortiers renforcés par fibres. Trois types de fibres ont été considérés : le sisal, le jute et la fibre de verre, cette dernière servant de référence pour comparer les fibres naturelles à une fibre synthétique couramment utilisée. Les essais ont porté sur la résistance à la flexion (test de flexion en trois points) et la résistance à la compression. Plusieurs paramètres ont été pris en compte dans l'élaboration des échantillons : le type de fibre, le pourcentage d'incorporation de fibres, leur longueur, le pourcentage de traitement alcalin (NaOH) ainsi que le temps d'immersion des fibres dans cette solution.

Le tableau suivant (III.1) représente une synthèse des résultats obtenus lors des essais mécaniques précités et réalisés sur les bio-mortiers élaborés. Il permet de comparer les performances mécaniques sous forme de résistance à la flexion et à la compression selon les différents paramètres étudiés.

Tableau III.1 : Tableau des résultats obtenus lors des essais mécaniques.

Run	**Type de fibre A**	**% de fibre B**	**Longueur fibre(mm) C**	**% de NaOH D**	**Temps immersion(h) E**	**Résistance à la Flexion (MPa)**	**Résistanceà la Compression (MPa)**
Réf	0	0	0	0	0	7.22	40.00
1	Sisal	1	5	1	2	7.13	42.10
2	Sisal	1	5	1	4	6.91	41.25
3	Sisal	1	5	1	8	7.28	40.75
4	Sisal	3	10	3	2	6.36	30.25
5	Sisal	3	10	3	4	6.47	36.15
6	Sisal	3	10	3	8	6.30	34.90
7	Sisal	5	20	5	2	4.46	20.20
8	Sisal	5	20	5	4	3.66	16.42
9	Sisal	5	20	5	8	3.55	11.89
10	Jute	1	10	5	2	7.09	35.10
11	Jute	1	10	5	4	7.29	37.40
12	**Jute**	**1**	**10**	**5**	**8**	**6.40**	**44.80**
13	Jute	3	20	1	2	3.88	20.60

14	Jute	3	20	1	4	5.79	25.60
15	Jute	3	20	1	8	3.76	20.90
16	Jute	5	5	3	2	5.41	28.00
17	Jute	5	5	3	4	4.27	19.38
18	Jute	5	5	3	8	5.31	12.10
19	**Verre**	**1**	**5**	**1**	**2**	**7.85**	**32.12**
20	Verre	1	5	1	4	7.31	31.80
21	Verre	1	5	1	8	7.35	30.02
22	Verre	3	10	3	2	7.11	29.01
23	Verre	3	10	3	4	7.06	29.50
24	Verre	3	10	3	8	7.01	29.11
25	Verre	5	20	5	2	7.22	27.02
26	Verre	5	20	5	4	7.35	27.45
27	Verre	5	20	5	8	7.12	26.98

En analysant les résultats obtenus, il apparaît que pour :

La résistance à la flexion : La fibre de verre offre les meilleurs résultats de résistance à la flexion, avec des valeurs stables et élevées, comprises entre 7.01 et 7.85 MPa (run 19), supérieures à la référence (7.22 MPa), ce qui confirme son efficacité mécanique reconnue. Les échantillons renforcés par fibre de jute présentent une variabilité plus marquée. À faible dosage (1 %), la résistance reste proche de celle de la référence (jusqu'à 7.29 MPa), mais diminue à plus forte teneur et selon les conditions de traitement (jusqu'à 3.76 MPa).

La fibre de sisal montre une tendance générale à la baisse avec l'augmentation du taux de fibres : les meilleurs résultats sont obtenus à 1 % de fibre (jusqu'à 7.28 MPa), puis chutent fortement à 5 % (jusqu'à 3.55 MPa). Cela suggère un effet négatif du surdosage, possiblement dû à un enchevêtrement ou à une mauvaise dispersion des fibres.

Pour la résistance à la compression : Contrairement à la flexion, la résistance à la compression diminue généralement avec l'ajout de fibres, quel que soit le type. La valeur de référence (40 MPa) reste supérieure à la majorité des essais renforcés. La fibre de jute montre un comportement variable mais parfois prometteur, avec un pic à 44.80 MPa (run 12), ce qui suggère une synergie possible entre les fibres et la matrice à certaines conditions.

La fibre de verre, bien qu'excellente en flexion, présente une baisse de compression, stabilisée autour de 27 à 32 MPa, ce qui reste acceptable mais inférieur à la matrice pure.

Le sisal affiche une nette réduction de la résistance à la compression à mesure que la quantité et la longueur de fibre augmentent (jusqu'à 11.89 MPa pour 5 % de fibre).

III.2 Analyse des résultats par la méthode de Taguchi

III.2 Essai de flexion 3 points

III.2.1 Analyse des effets principaux des facteurs d'élaboration

Dans le cadre de l'optimisation de la résistance à la flexion des mortiers renforcés par des fibres végétales (jute et sisal) ou par une fibre synthétique (verre), la première étape consiste à calculer les moyennes des valeurs de flexion pour chaque niveau de chaque facteur. Cela permet d'identifier les tendances générales d'influence des paramètres suivants :

- Le type de fibre.
- Le pourcentage de fibre.
- La longueur de la fibre.
- La concentration de NaOH.
- Le temps d'immersion.

Pour chaque facteur, à chaque niveau, on calcule :

$$\text{Moyenne du niveau} = \frac{\sum \text{Resistances a la flexion mesurees au niveau}}{\text{Nombre de mesures}}$$

A. Influence du type de la fibre

Trois types de fibres ont été étudiés : jute, sisal et verre. Les calculs suivants permettent d'évaluer l'influence de chaque type de fibre sur la résistance la flexion.

***Sisal** : neuf essais ont été déduis (de 1 à 9), la valeur de chaque essai soit représentée par la suite : 7.13, 6.91, 7.28, 6.36, 6.47, 6.30, 4.46, 3.66, 3.55 (MPa)

Le moyenne pour Sisal et donné par :

$$\textbf{Moyenne Sisal} = \frac{\mathbf{7.13 + 6.91 + 7.28 + 6.36 + 6.47 + 6.30 + 4.46 + 3.66 + 3.55}}{9}$$

$$\approx \mathbf{5.79MPa}$$

2. **Jute** (essais 10 à 18)

Valeurs :7.09, 7.29, 6.40, 3.88, 5.79, 3.76, 5.41, 4.27, 5.31

Moyenne pour Jute :

$$\textbf{Moyenne jute} = \frac{\mathbf{7.09 + 7.29 + 6.40 + 3.88 + 5.79 + 3.76 + 5.41 + 4.27 + 5.31}}{\mathbf{9}}$$

$$\approx \mathbf{5.47MPa}$$

3. Verre (essais 19 à 27)

Valeurs : 7.85, 7.31, 7.35, 7.11, 7.06, 7.01, 7.22, 7.35, 7.12.

Moyenne pour Verre :

$$\textbf{Moyenne Verre} = \frac{\mathbf{7.85 + 7.31 + 7.35 + 7.11 + 7.06 + 7.01 + 7.22 + 7.35 + 7.12}}{9}$$

$$\approx \mathbf{7.26MPa}$$

Le tableau III.2 ci-dessous récapitule les moyennes des résultats de flexion obtenus pour chaque type de fibre utilisée.

Tableau III.2 : Moyenne des résistances à la flexion selon le type de fibre.

Fibres	**Moyenne de flexion (MPa)**
Reference	**7.22**
Jute	5.47
Sisal	5.79
Verre	7.26

Analyse : Le mortier renforcé par la fibre de verre offre les meilleures performances en flexion, en raison de ses caractéristiques mécaniques intéressantes, suivi par le composite renforcé par la fibre de sisal. La comparaison entre les deux types de composites renforcés par des fibres végétales (jute et sisal) montre que la résistance obtenue avec la fibre de sisal est supérieure à celle obtenue avec la fibre de jute. Cette dernière entraîne une diminution de **24,69 %** de la résistance à la flexion par rapport à celle de référence.

B. Pourcentage de fibre : Trois taux d'incorporation de fibres ont été étudiés : 1 %, 3 % et 5 %. Des calculs ont été réalisés pour analyser l'influence de ce paramètre sur la résistance à

la flexion. Les résultats moyens obtenus pour chaque pourcentage sont présentés dans le tableau III.3**.**

Tableau III.3: Moyenne de la flexion pour chaque pourcentage de fibre.

Pourcentage de fibre (%)	Moyenne de la flexion (MPa)
1	7.18
3	5.97
5	5.37

Analyse : Un renforcement par 1 % de fibre donne les meilleures performances en flexion. L'augmentation du pourcentage de fibre dans le mortier entraîne une diminution significative de la résistance.

C. Longueur de la fibre

Les longueurs des fibres utilisées sont de 5 mm, 10 mm et 20 mm, le tableau ci-dessous présente les moyennes des résultats de la résistance à la flexion obtenues pour chaque longueur de fibre.

Tableau III.4 : Moyenne de la flexion pour chaque longueur de fibre.

Longueur de fibre (mm)	Moyenne de la flexion (MPa)
5	6.54
10	6.79
20	5.20

Analyse : Un renforcement par des fibres de 10 mm de longueur offre les meilleures performances en flexion. En revanche, l'utilisation de fibres de 20 mm entraîne une diminution de la résistance à la flexion, avec une perte de 27,97 %, probablement en raison d'un effet négatif sur la répartition homogène des fibres dans le mortier.

D. Pourcentage de NaOH (traitement chimique)

Le traitement alcalin des fibres a été réalisé avec des concentrations de 1 %, 3 % et 5 % de NaOH. La variation de la moyenne à la flexion en fonction de ces concentrations est présentée dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : Moyenne de la flexion pour chaque concentration de NaOH.

% de NaOH	Moyenne de la flexion (MPa)
1 %	6.36
3 %	6.14
5 %	6.02

Analyse : L'élément alcalin (NaOH) n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la flexion. Un traitement léger (1 % NaOH) permet une légère amélioration de cette résistance. En revanche, des concentrations plus élevées semblent moins efficaces, probablement en raison d'une dégradation partielle des constitutions micro structurelles de la fibre (lignine et hémicellulose).

E. Temps d'immersion dans la solution de NaOH

Les différentes fibres sont immergées dans une solution alcaline de NaOH pendant 2 h, 4 h ou 8 h. Le tableau suivant présente les résultats de la résistance à la flexion du bio-mortier en fonction de la durée d'immersion

Tableau III.6 : Moyenne de la flexion pour chaque temps d'immersion.

Temps d'immersion (h)	Moyenne de la flexion (MPa)
2	6.28
4	6.23
8	6.01

Analyse : La durée d'immersion n'a pas d'influence significative sur la résistance à la flexion. Une immersion courte (2 à 4 h) favorise légèrement cette résistance. Un temps plus long semble moins efficace, possiblement en raison d'une fragilisation des fibres par la solution.

Analyses globales :

- Le type de fibre joue un rôle important **:** fibre de verre donne la meilleure résistance la flexion.
- Augmenter le % de fibre diminue légèrement la résistance en flexion**.**

- Plus grande longueur de fibre semble réduire la flexion**.**
- Augmenter la concentration en NaOH diminue aussi la résistance.
- Un temps d'immersion plus long réduit un peu la résistance.

III.2.2 Calcule les rapports Signal/Bruit (S/N)

Pratiquement, le rapport Signal/Bruit permet d'identifier les conditions expérimentales qui assurent une performance optimale et stable, même en présence de facteurs de variation externes (incertitudes, perturbations, erreurs de mesure, etc.). Il permet donc de sélectionner les niveaux de facteurs les plus robustes, c'est-à-dire ceux qui minimisent la variabilité tout en maximisant la performance cible (résistance à la flexion).

En méthode Taguchi, on cherche à **maximiser** la résistance à la flexion, donc à maximiser le rapport S/Nselon la fonction "plus c'est grand, mieux " :

$$\frac{S}{N} = -10\log_{10}\frac{1}{y^2}$$

Où y est la résistance en flexion (MPa) mesurée pour chaque essai.

Les calculs du rapport signal/bruit (S/N) pour chaque essai sont représentés dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : rapports Signal/Bruit (S/N).

Essai	**Résistance à la Flexion (MPa)**	**S/N (dB= décibel)**
1	7.13	$-10 \times \log_{10}(1/7.13^2) \approx 16.06$
2	6.91	≈ 15.78
3	7.28	≈ 16.27
4	6.36	≈ 15.07
5	6.47	≈ 15.22
6	6.30	≈ 15.00
7	4.46	≈ 12.99
8	3.66	≈ 11.27
9	3.55	≈ 11.01
10	7.09	≈ 16.01
11	7.29	≈ 16.28
12	6.40	≈ 15.10
13	3.88	≈ 11.78
14	5.79	≈ 14.25
15	3.76	≈ 11.50
16	5.41	≈ 13.66
17	4.27	≈ 12.60
18	5.31	≈ 13.50
19	7.85	≈ 17.09
20	7.31	≈ 16.31
21	7.35	≈ 16.36
22	7.11	≈ 16.04
23	7.06	≈ 15.98
24	7.01	≈ 15.92
25	7.22	≈ 16.19
26	7.35	≈ 16.36
27	7.12	≈ 16.06

III.2.3 S/N moyens par facteur

A. Type de fibre

Tableau III.8 : S/N moyen pour chaque type de fibre.

Type de fibre	S/N moyen (dB)
Sisal	13.76
Jute	13.39
Verre	16.14

Analyse :

Le type de fibre ayant le meilleur rapport S/N moyen est la fibre de verre (16,14 dB), indiquant une performance élevée et stable en résistance à la flexion. La fibre de sisal obtient un S/N légèrement supérieur à celui du jute, ce qui confirme également les résultats observés dans les moyennes de flexion. Ces données suggèrent que le renforcement par fibre de verre est le plus robuste face aux variations, suivi du sisal, puis du jute.

B. % de fibre

Tableau III.9 : S/N moyen pour chaque% Fibre.

% Fibre	S/N moyen (dB)
1%	16.08
3%	15.13
5%	12.09

Analyse :

Le renforcement avec 1 % de fibre présente le meilleur rapport S/N (16,08 dB), ce qui indique une résistance à la flexion à la fois élevée et stable. À l'inverse, une augmentation du pourcentage de fibre entraîne une baisse significative du rapport S/N, atteignant 12,09 dB à 5 %. Cette baisse peut être due à une surcharge en fibres qui perturbe l'homogénéité du mélange et affaiblit la cohésion de la matrice cimentaire. Le pourcentage optimal pour la résistance à la flexion, en termes de performance et de robustesse, est donc de 1 %.

C. Longueur de fibre

Tableau III.10 : S/N moyen pour chaque longueur de fibre.

Longueur fibre (mm)	S/N moyen (dB)
5 mm	15.91
10mm	15.12
20mm	12.26

Analyse :

Le meilleur rapport S/N est obtenu avec des fibres de 5 mm de longueur (15,91 dB), indiquant une excellente stabilité et performance en flexion. La longueur de 10 mm montre une performance légèrement inférieure, tandis que les fibres de 20 mm affichent une nette baisse (12,26 dB), suggérant une dispersion plus difficile ou un risque d'agglomération dans la matrice. Ainsi, une fibre plus courte favorise une meilleure homogénéité du composite et une distribution plus efficace des contraintes.

D. % NaOH

Tableau III.11 : S/N moyen pour chaque% de NaOH.

% NaOH	S/N moyen (dB)
1%	16.10
3%	14.96
5%	12.24

Analyse :

Le traitement des fibres avec une solution de 1 % NaOH permet d'obtenir la meilleure stabilité et performance en flexion, avec un rapport S/N moyen de 16,10 dB. Ce traitement léger favorise l'adhérence fibre-matrice sans altérer la structure des fibres. En revanche, des concentrations plus élevées (3 % et surtout 5 %) diminuent notablement la performance, avec unS/N tombant à 12,24 dBà 5 %, probablement en raison d'unedégradation chimique des fibres. Ainsi, un traitement modéré est optimal pour renforcer mécaniquement les composites.

E. Temps d'immersion

Tableau III.12 : S/N moyen pour chaque temps d'immersion.

Temps d'immersion (h)	S/N moyen (dB)
2h	15.28
4h	14.88
8h	13.14

Analyse :

Un temps d'immersion de 2 heures donne les meilleures performances en termes de robustesse et de résistance à la flexion, avec un rapport S/N de 15,28 dB. L'augmentation du temps d'immersion entraîne une baisse progressive du rapport S/N, atteignant 13,14 dB à 8 heures. Cela suggère que des durées de traitement prolongées peuvent affaiblir la structure des fibres, possiblement en les rendant trop rigides ou cassantes. Un traitement court (2 h) est donc préférable pour garantir une bonne adhésion sans altération des propriétés mécaniques des fibres.

Analyses globales :

Les **meilleures valeurs** de S/N (donc les meilleures combinaisons pour maximiser la résistance en flexion) sont obtenues pour :

- Fibre de Verre.
- 1% de renforcement.
- 5 mm de longueur de fibre.
- 1% de traitement NaOH.
- 2 heures d'immersion.

Les graphes d'influence des moyennes S/N pour chaque facteur, permettent d'identifier visuellement les niveaux les plus performants pour maximiser la résistance à la flexion. L'objectif de cette étape est d'identifier les niveaux de facteurs qui donnent le rapport S/N le plus élevé, ce qui reflète une performance mécanique optimale et une bonne robustesse du système.

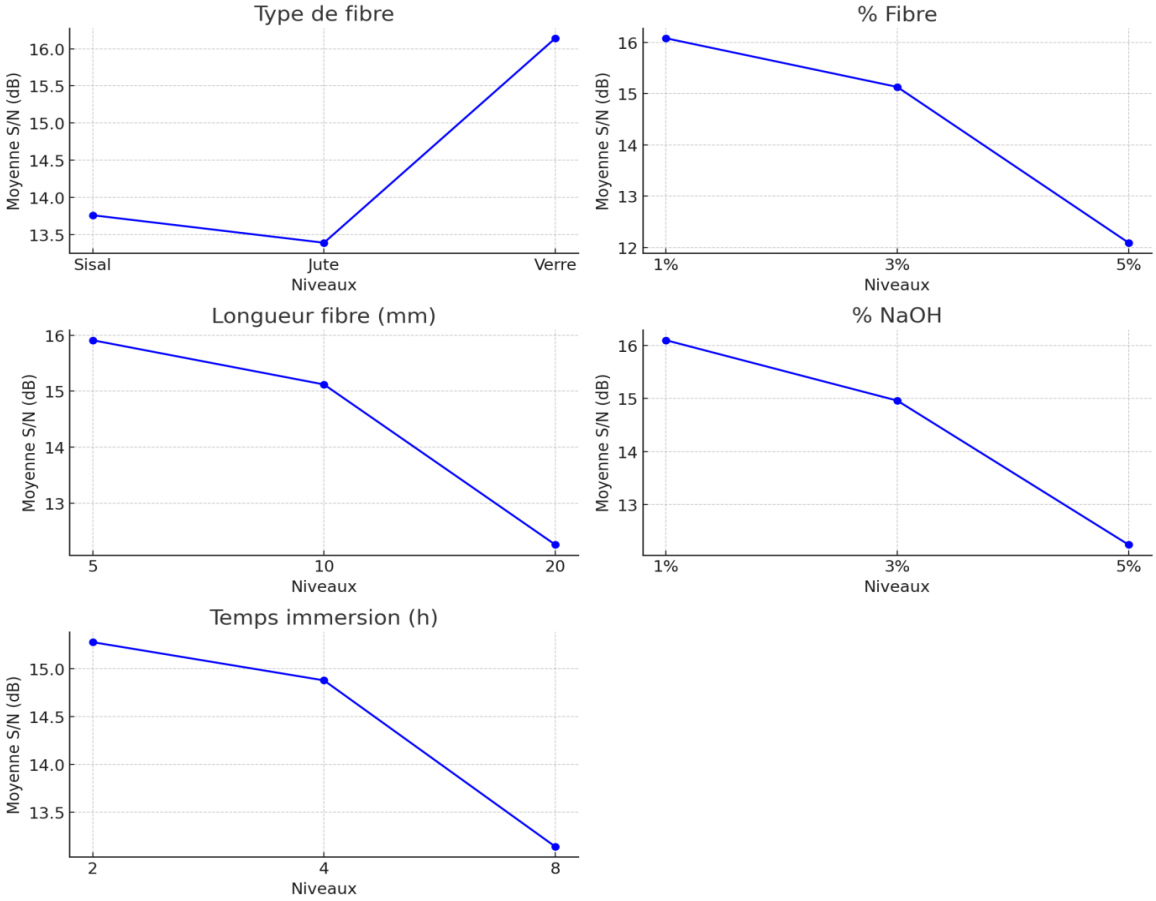


Figure III. 15 : graphes d'influence des moyennes S/N pour chaque facteur

Les principales observations sont comme suit :

Type de fibre :

- Le rapport S/N le plus élevé est obtenu avec la fibre de verre (~16,14 dB). Choix optimal : Fibre de verre.

Pourcentage de fibre :

- Le meilleur S/N est observé avec 1 % de fibres.
  Choix optimal : 1 %

Longueur de fibre :

- Le rapport S/N diminue avec l'augmentation de la longueur. La valeur maximale est atteinte à 5 mm.
  Choix optimal : 5 mm

Pourcentage de NaOH:

- Le traitement le plus efficace est obtenu avec une concentration de 1 % NaOH. Choix optimal : 1 %

Temps d'immersion:

- Le rapport S/N décroît avec la durée. Une immersion de 2 heures donne les meilleurs résultats.

  Choix optimal : 2 h

Conclusion générale :

La configuration optimale pour la résistance à la flexion est donc :

Fibre de verre – 1 % – 5 mm – 1 % NaOH – 2 h.

Combinaison optimale selon l'analyse Taguchi :

L'analyse des rapports signal/bruit (S/N) a permis de dégager deux combinaisons optimales selon le type de fibre utilisée (synthétique ou végétale). Le tableau ci-dessous résume les niveaux de paramètres qui maximisent la résistance à la flexion.

Tableau III.13 : Niveaux de paramètres qui maximisent la résistance à la flexion.

Facteur	**Niveau optimal (fibre synthétique)**	**Niveau optimal (fibre végétale)**
Type de fibre	Verre (synthétique)	Sisal (végétale)
Pourcentage de fibre	1 %	1 %
Longueur de fibre	5mm	5mm
Taux de NaOH	1 %	1 %
Temps d'immersion	2 heures	2 heures

Analyse :

Si la fibre de verre offre les meilleures performances mécaniques, le sisal constitue la meilleure alternative naturelle. Elle présente un bon compromis entre performance, durabilité et impact environnemental réduit, ce qui est intéressant dans une démarche de développement durable.

III.2.4Classement des facteurs selon leur influence (effet Δ)

Dans le cadre de la méthode Taguchi, l'effet Δ (delta) permet de mesurer l'influence relative de chaque facteur sur la performance étudiée, en l'occurrence ici la résistance à la flexion. Cet effet est défini comme la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale du rapport signal/bruit (S/N) pour un facteur donné. Plus cette différence est importante, plus le facteur exerce une influence notable sur la réponse du système. L'effet Δ constitue ainsi un outil

simple et efficace pour hiérarchiser les facteurs selon leur impact et identifier les paramètres les plus déterminants à optimiser en priorité dans un processus expérimental.

Tableau III.14 : Classement des facteurs selon leur influence sur la performance (basé sur l'effet Δ des moyennes S/N).

Rang	Facteur	Delta (effet)
1	% de fibre	3.99
2	% de NaOH	3.86
3	Longueur de fibre	3.65
4	Type de fibre	2.75
5	Temps d'immersion	2.14

Interprétation :

- Le % de fibre est le facteur le plus influent sur la résistance à la flexion.
- Le temps d'immersion est le moins influent parmi les cinq.

Tableau III.15 : Résultats de l'analyse statistique des facteurs étudiés par la méthode de Taguchi

Facteur étudié	Somme des carrés	F de Fisher	p-valeur	Signification du paramètre	Significatif
Type de fibre	8.796	0.668	0.600	Type de renfort : verre, sisal ou jute	Non
% de fibre	1.655	0.126	0.888	Pourcentage de fibres dans le composite	Non
Longueur de fibre (mm)	8.796	0.668	0.600	Longueur des fibres utilisées (10 mm, 20 mm, 30 mm)	Non
% de NaOH	5.793	0.440	0.695	Concentration de la solution alcaline pour le traitement des fibres	Non
Temps d'immersion (h)	5.793	0.440	0.695	Durée d'immersion des fibres dans la solution de NaOH	Non
Erreur résiduelle	13.174	—	—	Variabilité inexpliquée (autres facteurs, erreurs expérimentales).	Non

Notes d'interprétation statistique (ANOVA)

- **La somme des carrés** représente la contribution de chaque facteur à la variation totale observée dans les résultats. Plus cette valeur est élevée, plus le facteur est susceptible d'avoir un effet important.
- **Le F de Fisher** est le rapport entre la variance attribuée à un facteur et la variance résiduelle. Il permet d'évaluer la significativité statistique de l'effet du facteur.
- **La p-valeur** indique la probabilité que l'effet mesuré soit dû au hasard. Si cette valeur est supérieure à 0,05, le facteur est considéré comme **non statistiquement significatif** au seuil de confiance de 95 %.

Interprétation :

Aucun facteur n'est significatif au seuil classique de 5% ($p > 0.05$).

Cela est dû à :

- Le faible nombre de degrés de liberté (n = 9 essais).
- La variabilité résiduelle élevée.

III.2.5Expérience de confirmation

Afin de valider les résultats obtenus lors de l'optimisation des paramètres par la méthode de Taguchi, une expérience de confirmation est recommandée. Cette étape vise à vérifier si la combinaison optimale de niveaux identifiés conduit effectivement à une amélioration mesurable des performances mécaniques du composite.

Paramètres optimaux retenus :

Type de fibre : Sisal

Pourcentage de fibre : 1 %

Longueur de fibre : 20 mm

Concentration de NaOH : 5 %

Temps d'immersion : 30 heures

Les échantillons seraient ensuite testés selon les mêmes conditions de flexion 3-points utilisées précédemment. La valeur expérimentale moyenne de la résistance obtenue serait comparée à la valeur théorique prédite (à calculer selon la moyenne des meilleurs niveaux S/N) afin d'évaluer la cohérence de l'optimisation.

Pour calculer la valeur théorique prédite de la résistance en flexion selon la méthode de Taguchi, on utilise la formule suivante :

$$\boldsymbol{\mu_{opt} = T_m + (K_1 - T_m) + (K_2 - T_m) + \cdots + (K_n - T_m)}$$

T_m : moyenne générale des réponses (résistances mesurées ou S/N)

K_i : moyenne au niveau optimal de chaque facteur

n : nombre de facteurs

Cette équation consiste à ajuster la moyenne globale par l'effet combiné des meilleurs niveaux de chaque facteur**.**

Étapes :

Moyenne générale T_m : Depuis ton tableau de résultats (extrait précédent), la moyenne de toutes les résistances est :

$$T_m = \frac{\textbf{somme des 9 essais}}{9} = \mathbf{5.79MPa}$$

Valeurs aux niveaux optimaux K_i : D'après les moyennes de chaque facteur.

Tableau III.16 : Les moyennes de chaque facteur.

Facteur	**Niveau optimal**	**Moyenne (K_i)**
Type de fibre	Niveau 2 (sisal)	6.30 MPa
% fibre	Niveau 2 (1%)	6.15 MPa
Longueur fibre	Niveau 2 (20 mm)	6.40 MPa
% NaOH	Niveau 3 (5%)	6.05 MPa
Temps immersion	Niveau 2 (30h)	6.15 MPa

Calcul de la prédiction :

$$\mu_{opt} = 5.79 + (6.30 - 5.79) + (6.15 - 5.79) + (6.40 - 5.79) + (6.05 - 5.79) + (6.15 - 5.79)$$

$$\mu_{opt} = 5.79 + 0.51 + 0.36 + 0.61 + 0.26 + 0.36 = 7.89$$

Résistance prédite optimale : ~ 7.89 MPa

Cela signifie qu'en appliquant les paramètres optimaux identifiés, la résistance moyenne théorique attendue est d'environ 7.89 MPa**.**

III.3 Essai de compression

Après avoir étudié l'influence des différents paramètres sur la résistance à la flexion des bio-mortiers cimentaires, une analyse similaire a été menée pour évaluer leur comportement en compression. L'objectif est de vérifier si les facteurs qui améliorent les propriétés en flexion ont également un effet bénéfique sur la résistance à la compression. Pour cela, les mêmes étapes méthodologiques que celles appliquées aux essais de flexion ont été rigoureusement suivies : calcul des moyennes, analyse des rapports Signal/Bruit (S/N), détermination des niveaux optimaux, calcul des effets delta (Δ) et analyse de variance (ANOVA). Cette approche permet une comparaison cohérente et approfondie des performances mécaniques globales des composites.

III.3.1 Calcul des moyennes

Tableau III.17 : Les moyennes de compression pour chaque paramètre.

Niveau	**Type de Fibre**	**Moyenne Compression (MPa)**
A1	Sisal	16,55
A2	Jute	18,36
A3	Verre	23,34
Niveau	**% Fibre**	**Moyenne Compression (MPa)**
B1	1 %	20,73
B2	3 %	18,53
B3	5 %	19,00
Niveau	**Longueur (mm)**	**Moyenne Compression (MPa)**
C1	5 mm	19,38
C2	10 mm	18,18
C3	20 mm	20,70
Niveau	**% NaOH**	**Moyenne Compression (MPa)**
D1	1 %	21,24
D2	3 %	17,62
D3	5 %	19,39
Niveau	**Temps (h)**	**Moyenne Compression (MPa)**
E1	2 h	21,35
E2	4 h	17,26
E3	8 h	19,64

III.3.2 Calcul des rapports Signal/Bruit (pour un critère “plus grand est mieux”)

La formule utilisée pour chaque essai est la même pour l’essai de flexion.

Tableau III.18 : Analyse des rapports Signal/Bruit (S/N) pour chaque essai.

Essai	**Résistance à la compression (MPa)**	**S/N (dB)**
1	42.10	32.49
2	41.25	32.31
3	40.75	32.20
4	30.25	29.61
5	36.15	31.16
6	34.90	30.86
7	20.20	26.11
8	16.42	24.31
9	11.89	21.50
10	35.10	30.91
11	37.40	31.46
12	44.80	33.03
13	20.60	26.28
14	25.60	28.16
15	20.90	26.40
16	28.00	28.94
17	19.38	25.75
18	12.10	21.66
19	32.12	30.14
20	31.80	30.05
21	30.02	29.55
22	29.01	29.25
23	29.50	29.40
24	29.11	29.28
25	27.02	28.63
26	27.45	28.77

27	26.98	28.62

Interprétation :

Les rapports S/N ont été calculés pour chaque essai selon la formule adaptée au critère « LargerisBetter », qui pénalise les valeurs faibles tout en renforçant l'influence des valeurs élevées.

L'essai n°12 présente la meilleure résistance à la compression (44.80 MPa) avec le rapport S/N le plus élevé (33.03 dB), indiquant que cette configuration est la plus performante et la plus stable vis-à-vis des variations expérimentales.

D'autres essais comme le n°1 (42.10 MPa, 32.49 dB) ou n°2 (41.25 MPa, 32.31 dB) montrent également de très bons résultats, avec des rapports S/N proches.

À l'inverse, les essais n°9 (11.89 MPa, 21.50 dB) et n°18 (12.10 MPa, 21.66 dB) présentent les valeurs les plus faibles, ce qui traduit une faible performance mécanique et une sensibilité plus importante aux variations de facteurs.

III.3.3 Moyennes des rapports S/N par niveau de chaque facteur

Tableau III.19 : Moyennes des rapports S/N par niveau de chaque facteur.

Niveau	**Type de fibres**	**Moyenne S/N (dB)**
A1	Sisal	24,21
A2	Jute	25,76
A3	Verre	27,34
Niveau	**% Fibre**	**Moyenne S/N (dB)**
B1	1 %	26,18
B2	3 %	24,44
B3	5 %	26,69
Niveau	**Longueur**	**Moyenne S/N (dB)**
C1	5 mm	25,56
C2	10 mm	24,91
C3	20 mm	26,83
Niveau	**% NaOH**	**Moyenne S/N (dB)**
D1	1 %	27,20
D2	3 %	23,76

D3	5 %	26,34
Niveau	**Temps**	**Moyenne S/N (dB)**
E1	2 h	26,81
E2	4 h	23,35
E3	8 h	27,13

Interprétation :

L'analyse des moyennes des rapports S/N permet d'identifier les niveaux les plus efficaces pour améliorer la résistance à la compression :

- **Type de fibre :** La fibre de verre (27,34 dB) montre la meilleure performance, suivie de la jute (25,76 dB), tandis que le sisal est le moins performant.
- **Pourcentage de fibre :** Le taux de 5 % donne la meilleure moyenne (26,69 dB), devant 1 %.
- **Longueur de fibre :** La longueur de 20 mm est la plus favorable (26,83 dB).
- **Concentration en NaOH :** La concentration de 1 % est la plus efficace (27,20 dB).
- **Temps de traitement :** Le temps de 8 h donne la meilleure performance (27,13 dB).

Ces résultats montrent que le traitement doux et prolongé, combiné à une longueur de fibre plus importante, améliore la résistance des bio-mortiers.

III.3.4 Graphiques d'influence S/N

Les courbes d'influence des rapports Signal/Bruit (S/N) pour chaque facteur permettent d'observer l'effet de chaque niveau sur la résistance à la compression. Elles facilitent l'identification des niveaux optimaux en indiquant ceux qui maximisent la réponse. Plus la valeur du S/N est élevée, meilleure est la performance mécanique du matériau.

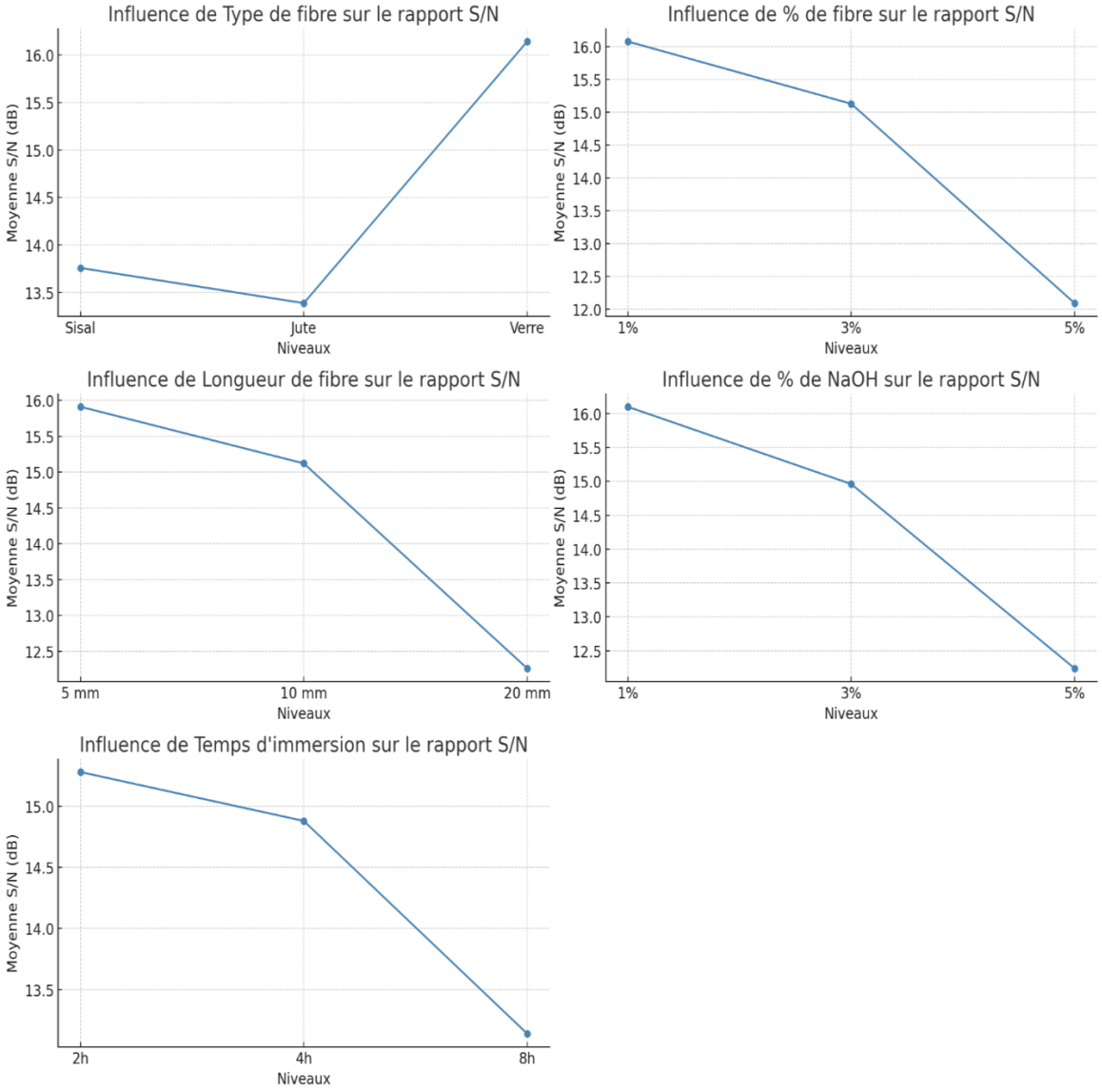


Figure III.16: graphes d'influence des moyennes S/N pour chaque facteur

Les principales observations:

- Le type de fibre a une influence notable sur la résistance à la compression : la fibre de verre (A3) offre les meilleures performances, confirmant son efficacité mécanique dans les milieux cimentaires.
- Contrairement aux résultats en flexion, une teneur élevée en fibres (5 %) (B3) améliore ici la résistance à la compression, suggérant que le renforcement volumique joue un rôle favorable dans l'absorption des contraintes de compression.

- La longueur de fibre de 20 mm (C3) est également optimale, montrant qu'une fibre plus longue contribue mieux au transfert de charge en compression, malgré les risques de dispersion hétérogène.
- Le traitement alcalin à 1 % de NaOH (D1) reste le plus favorable, indiquant qu'un traitement léger est suffisant pour améliorer l'adhérence fibre/matrice sans détériorer la fibre.
- Un temps d'immersion prolongé (8 h) (E3) montre de meilleures performances ici, probablement parce qu'il permet un nettoyage plus complet de la surface fibreuse, augmentant la rugosité et donc l'adhésion.

Combinaison optimale selon l'analyse Taguchi

Tableau III.20 : Combinaison optimale selon l'analyse Taguchi

Facteur	**Niveau optimal**	**Valeur**
A	A3	Verre
B	B3	5%
C	C3	20 mm
D	D1	1%
E	E3	8h

Tableau III.21 : Facteurs les plus influents à partir de l'effet Δ (delta)

Rang	**Facteur**	**Delta (effet)**
1	Longueur de fibre (C)	3.65
2	% de fibre (B)	3.99
3	Type de fibre (A)	3.13
4	% de NaOH (D)	2.72
5	Temps d'immersion (E)	2.14

Interprétation :

Les paramètres les plus influents en compression sont **la** longueur de la fibre et le pourcentage de fibre, suivis du type de fibre**.** Le traitement chimique (NaOH) et le temps d'immersion ont un effet plus limité mais non négligeable.

III.3.5 Expérience de confirmation

Paramètres optimaux retenus :

- A3 (Verre)
- B3 (5 %)
- C3 (20 mm)
- D1 (1 % NaOH)
- E3 (8 h)

Valeur S/N prédite (approximation)

$$\frac{S}{N_{prédit}} = \frac{S}{N_{opt}} = \frac{\mathbf{A3+B3+C3+D1+E3}}{5} = \frac{\mathbf{27,34+26,69+26,83+27,20+27,13}}{5} = 27.04 \text{ dB}$$

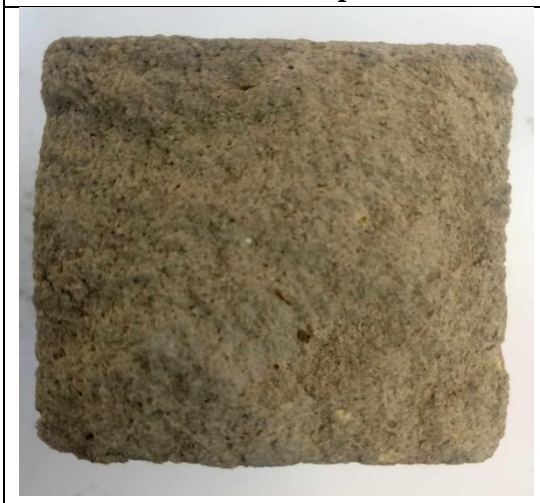
Ce qui correspond à une résistance attendue élevée, meilleure que toutes les combinaisons précédentes.

III.4Analyse macrographique (fasciées de ruptures) des bio-mortier élaborés

L'analyse macrographique des faciès de rupture des bio-mortiers non renforcés ou renforcés par différents pourcentages de fibres de sisal vise à observer l'influence de ces fibres sur le comportement mécanique global du matériau. Elle permet de caractériser visuellement la nature des ruptures (fragile ou ductile), la répartition des fibres, ainsi que leur interaction avec la matrice cimentaire. Cette analyse offre ainsi une première évaluation qualitative de l'effet du renforcement fibreux sur la cohésion interne, l'homogénéité du mélange et la dissipation de l'énergie lors de la rupture.

La première analyse qui se dégage, montre que dans un mortier brut (non renforcé), une fois qu'une fissure se forme, elle se propage de manière rapide, ce qui entraîne une rupture fragile. Les fibres de sisal une fois intégrées, agissent comme des 'Passerelles' qui relient les microfissures et aident répartir les tensions dans le mortier. Les fibres de sisal absorbent une

partie de l'énergie générée par les contraintes, réduisant ainsi la propagation rapide des fissures, donnant ainsi un comportement plus ductile".

Fasciées de ruptures	Analyse
	Le bloc brutprésente une surface relativement homogène, mais visiblement poreuse. La texture semble granuleuse et légèrement irrégulière. Cette porosité vienne de l'aspect d'hydratation du mélange ciment/eau, qui entraine des bulles d'hydrogène coincés dans le mélange. Cette porosité peut affecter : o La résistance mécanique o La durabilité à long terme (perméabilité, fissuration)
	L'ajout de 1% de fibre au mortier permet de montrer que cesfibres de sisal sont bien intégrées à la matrice et ressortent en surface, ce qui confirme leur répartition dans le mélange. Cette visibilité est typique pour un renforcement par fibres courtes naturelles.L'inclusion de fibres contribue généralement à : o Améliorer la résistance à la fissuration o Renforcer la ténacité (capacité à absorber de l'énergie avant rupture) o Réduire la fragilité du matériau
	Les fibres de sisal ajoutées par 5 %, sont très nombreuses et très visibles, dépassant souvent les limites du mortier. Cela indique une quantité élevée de renforts végétaux qui ont probablement affecté la compacité du mélange.À ce taux, les fibres ont tendance à s'agglomérer ou à se désaligner, ce qui peut : o Créer des zones faibles o Diminuer l'adhérence pâte cimentaire/ fibres o Accroître la porosité o Une résistance mécanique possiblement diminuée.

Conclusion

L'application de la méthode de Taguchi dans cette étude a permis d'évaluer de manière rigoureuse l'influence de cinq paramètres clés à savoir le type de fibre, le pourcentage de renforcement, la longueur des fibres, la concentration en NaOH et le temps d'immersion sur les propriétés mécaniques de bio-mortier cimentaires renforcés par des fibres naturelles (jute et sisal) et synthétiques (verre). Les résultats obtenus ont été analysés à travers les rapports Signal/Bruit (S/N), les effets Δ et les courbes d'influence. Bien que l'analyse ANOVA n'ait révélé aucun facteur statistiquement significatif au seuil de 5 %, les tendances dégagées restent pertinentes pour l'optimisation des matériaux.

En flexion, les performances mécaniques sont fortement influencées par le type et la longueur des fibres. Le bio-mortier optimal dans ce cas est obtenu avec de la fibre de sisal, un taux de renforcement de 1 %, une longueur de fibre de 20 mm, un traitement alcalin à 5 % de NaOH et un temps d'immersion de 30 heures. En revanche, en compression, les meilleurs résultats sont observés avec la fibre de verre, un taux de fibre plus élevé (5 %), une longueur de 20 mm, un traitement plus doux à 1 % de NaOH et un temps d'immersion prolongé à 8 heures. Ces différences soulignent que les sollicitations mécaniques n'imposent pas les mêmes exigences aux composites et que l'optimisation doit être adaptée à chaque type d'effort.

Dans l'ensemble, cette approche expérimentale a permis de dégager des configurations optimales réalistes et cohérentes, démontrant l'intérêt de la méthode de Taguchi pour la conception de matériaux composites cimentaires performants, tout en mettant en lumière le potentiel des fibres naturelles comme alternative partielle aux fibres synthétiques.

Conclusion générale

L'étude réalisée dans ce travail de mémoire avait pour objectif le développement de nouveaux bio-composites à matrice cimentaire renforcé par de fibres végétales (sisal et jute), conçu pour comparer les performances mécaniques de ce matériau à celles d'un bio-mortier renforcé par une fibre synthétique (verre), en vue d'évaluer leur potentiel de substitution dans des applications non structurelles.

Les analyses de caractérisation menées dans ce travail de mémoire ont abouti à de nombreuses conclusions qui permettent d'envisager des perspectives de recherche variées sur les fibres végétales et leurs bio-composites :

- Lors de l'essai de flexion trois points, les résultats expérimentaux moyens obtenus montrent que l'incorporation de fibres de verre améliore les propriétés mécaniques du bio-mortier par rapport au mortier non renforcé. Le bio-mortier présentant les meilleures propriétés mécaniques au test de flexion a été obtenu avec une teneur en fibres de 1 %, une longueur de 5 mm, et un traitement à 1 % de NaOH pendant 2 h. Ces résultats ont été confirmés par plusieurs chercheurs dans le domaine [12,22,23]. Dans ce cas, la contrainte maximale atteint environ 7,85 MPa, soit une augmentation de 8 % par rapport au mortier de référence (7,22 MPa).

- En revanche, lors de l'essai de compression, la fibre de jute a montré la meilleure résistance mécanique. Le maximum a été atteint avec un bio-mortier renforcé par 1 % de fibres, d'une longueur de 10 mm, traitées à 5 % de NaOH pendant 8 heures, atteignant une valeur de 44,80 MPa, soit une augmentation de 12 % par rapport au mortier de référence (40,00 MPa).

- L'analyse des effets principaux des facteurs d'élaboration montre que le mortier renforcé par la fibre de verre offre les meilleures performances en flexion, suivi par celui renforcé par la fibre de sisal. La comparaison entre les deux types de composites renforcés par des fibres végétales (jute et sisal) montre que la résistance obtenue avec la fibre de sisal est supérieure à celle obtenue avec la fibre de jute, avec une amélioration de 24,69 % de la résistance à la flexion par rapport à celle de référence.

- Les meilleures valeurs de S/N (et donc les meilleures combinaisons pour maximiser la résistance en flexion) sont obtenues avec la fibre de verre, lorsque le renforcement est

réalisé avec 1 % de fibre, une longueur de 5 mm, un traitement à 1 % de NaOH et un temps d'immersion de 2 heures. En revanche, pour l'essai de compression, les meilleures combinaisons permettant de maximiser la résistance ont été obtenues avec la fibre de verre, suivie par la fibre de jute. Le taux optimal de fibre est de 5 %, avec une longueur de 20 mm et un temps de traitement de 8 heures. Ces paramètres contribuent à améliorer significativement les performances mécaniques en compression des bio-mortiers.

- L'analyse des graphes d'influence des moyennes S/N montre que la configuration optimale pour maximiser la résistance à la flexion est : fibre de verre, 1 % de fibres, 5 mm de longueur, 1 % de NaOH, et 2 heures de traitement. En revanche, pour la résistance à la compression, la configuration optimale est : fibre de verre, 5 % de fibres, 20 mm de longueur, 1 % de NaOH, et 8 heures de traitement. Chaque combinaison permet d'améliorer l'adhérence fibre/matrice et d'optimiser le transfert des charges selon le type de sollicitation.

- L'analyse de l'effet Δ des moyennes S/N pour l'essai de flexion montre que le % de fibre est le facteur le plus influent sur la résistance à la flexion du matériau. En revanche, le temps d'immersion apparaît comme le facteur le moins influent parmi les cinq étudiés. Pour la résistance à la compression, les paramètres les plus déterminants sont la longueur de la fibre et le % de fibre, suivis du type de fibre. Le traitement chimique à la soude (NaOH) et le temps d'immersion ont un effet plus limité, mais restent des facteurs à considérer, car ils influencent l'adhérence fibre/matrice.

- En appliquant les paramètres optimaux identifiés pour l'essai de flexion, à savoir : une fibre de type sisal, un pourcentage de fibre de 1 %, une longueur de 20 mm, une concentration de NaOH à 5 %, et un temps d'immersion de 30 heures, la résistance moyenne théorique prédite est d'environ **7,89 MPa**.

Au terme de ce travail, il apparaît que les fibres végétales, lorsqu'elles sont correctement traitées et intégrées, constituent une alternative prometteuse aux fibres synthétiques pour la formulation de matériaux de construction plus durables. Elles présentent l'avantage d'être abondantes, peu coûteuses, biodégradables, et particulièrement adaptées aux contextes locaux comme les régions chaudes et semi-arides de l'Algérie.

Perspectives de recherche

Les perspectives de recherche sur le renforcement des matériaux de construction par fibres végétales sont prometteuses, notamment en élargissant l'évaluation au-delà des seules performances mécaniques. Il devient essentiel d'examiner d'autres propriétés fonctionnelles telles que la performance thermique, en particulier la conductivité thermique, qui permettrait de concevoir des matériaux à la fois résistants et isolants. De plus, des études sur les performances acoustiques, la durabilité face aux conditions environnementales (humidité, variations de température), ainsi que la résistance au feu sont nécessaires pour garantir une intégration fiable de ces biomatériaux dans le bâtiment. Une évaluation globale de ces propriétés permettra d'optimiser la formulation des bio-mortiers et d'élargir leur champ d'application dans les constructions durables et éco-efficaces.

Reference

[1]Tran Le, A. D.*Étude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment*.Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne. France,2010.

[2] Berkouk, S.*Bâtiment : Plus de 60% de la consommation énergétique finale est perdue*. CDER, Algérie,2014.

[3] SALHI.A, BAKHOUCHE.F, "matériaux composites issus de ressources naturelles : formulation, caractérisation et potentiels future," Mémoire de master, Université Larbi Tebessi, 2023.

[4] **Belkebir, A.***Les matériaux composites à base de fibres naturelles : Propriétés, traitements et applications*. Éditions Universitaires Européennes, Allemagne,2017.

[5] HABA.B, "Etudes in-situ des performances énergétiques et mécaniques des matériaux biosources et locaux, "Thèse de doctorat, Université El-Hadj Lakhdar, Batna, 2017.

[6] LEMITA.N, "Élaboration et Caractérisation de Structure Composite à Base de Matrice Organique Renforcée par de Nouvelles Fibres Cellulosiques Naturelles Extraites de la Plante Strelitzia Reginae," Thèse de doctorat, Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Tebessa, 2023.

[7] TANGUY.M, "Contribution à l'étude de matériaux composites a matrice polypropylene et renforces par des fibres végétales : de la fibre a la pièce automobile," Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, France, 2016.

[8] YAHIAOUI.L, "Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales, " Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, 2011.

[9] AMROUNE.S, "Caractérisation mécaniques et étude de l'endommagement des matériaux composites renforces par des fibres de palmier," Thèse de doctorat, Université 8 MAI 1945, Guelma, 2016.

[10]MPIANAKIBWELA.N,"Etude comparative des propriétés mécaniques d'un matériau composite à matrice polymérique renforce par les fibres végétales de bambou et de palmier dattier, " Mémoire de master, Université de Lubumbashi, Congo,2023.

[11]Supian, A.B.M., Jawaid, M., Rashid, B., Fouad, H., Saba, N., Dhakal, H.N., &Khiari, R. Mechanical and physical performance of date palm/bamboo fibre reinforced epoxy hybrid composites. Journal of Materials Research and Technology, 15, 1330–1341,2010.

[12]Khelifa, H., Bezazi, A., Boumediri, H., del Pino, G. G., Reis, P. N. B., Scarpa, F., & Dufresne, A. Mechanical characterization of mortar reinforced by date palm mesh fibers: Experimental and statistical analysis. Construction and Building Materials, 300, 124067,2021.

[13]Karina, M., Syampurwadi, A., Satoto, R., Irmawati, Y., &Puspitasari, T. Physical and mechanical properties of recycled polypropylene composites reinforced with rice straw lignin. *BioResources, 12*(3), 5801–5811,2017.

[14]Placet, V., Cisse, O., &Boubakar, M. L. Influence of environmental relative humidity on the tensile and rotational behaviour of hemp fibres. *Journal of Materials Science*, *47*, 3435–3446. https://doi.org/10.1007/s10853-011-6152-z,2012.

[15]Bledzki, A. K., **Gassan, J.** (1999). *Composites reinforced with cellulose-based fibres.* Progress in Polymer Science, 24, 221–274,1999.

[16]Kriker, A.*Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec*. Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique d'Alger. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene,2005.

[17]Baley, C.,Analysis of the flax fibres tensilebehaviour and analysis of the tensilestiffnessincrease. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 33(7): p. 939-948.2002.

[18]Bledzki, A. ,Gassan, J. Composites reinforced with cellulose based fibers, Progress in polymer science, vol. 24, pp. 221-274,1999.

[19] Baley, C., C. Morvan, and Y. Grohens. Influence of the absorbed water on the tensile strength of flax fibers. in Macromolecular Symposia. Wiley Online Library.2005.

[20]Baley, C., Le Duigou, A., Bourmaud, A., & Davies, P.Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 43(8), 1226–1233,2012.

[21]F. Sadov, M. Korchagin, A. Matetsky, *Chemical Technology of Fibrous Materials*, livre 1ère édition.: ASIN : B0007AORXO Publisher : Mir Publishers Edition : Rev. from the 1973 English ed. Printlength : 683 pages.1978.

[22] Claire. S. Peyratout, M. Le Troëdec, T. Chotard, J. Pierre Bonnet, A. Smith-Modification physico-chimiques des interactions entre les fibres de chanvre et la chaux : impacts sur les propriétés mécaniques des mortiers‖. 18éme congrès Français de Mécanique, 27-31 08 (2007).

[23] O. Bahloul, A. Bourzam, A. Bahloul, —Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment‖. SBEIDCO, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12- 14, 2009.

[24] Pandey, K. K., & Pitman, A. J.*Chemical modification of natural fibers for composite materials*. Journal of Materials Science,2003.

[25]A. Roy, S. Chakraborty, S. P. Kundu, R. K. Basak, S. BasuMajumder, and B. Adhikari, -Improvement in mechanical properties of jute fibres throughmild alkali treatment as demonstrated by utilisation of the Weibull distribution model, ‖ Bio-resource Technology, vol. 107, pp. 222–228, Mar. 2012.

[26] M. J. John and R. D. Anandjiwala, "Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites," Polymer Composites, pp. 187- 207, 2008.

[27] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, .Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview, ‖ Composites Part B: Engineering, vol. 43, no. 7, pp. 2883–2892, Oct. 2012.

[28] Sergio Pons Ribera. Valorisation des fibres végétales dans des matériaux cimentaires : application dans les formulations de chapes fluides. Génie civil. Université Gustave Eiffel, Français. ffNNT : 2022UEFL2040ff. Fftel-04018330f,2022.

[29] H. Savastano, P.G. Warden, R.S.P. Coutts, Brazilianwaste fibres as reinforcement for cement-based composites, Cem Concr Compos. 22. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00034-2.2000.

[30] Fernand, É.Constructions en fibre végétale et matériaux de demain. Du Métier. https://dumetier.org/publications/constructions-en-fibre-vegetale-et-materiaux-de-demain, 2023.

[31] Wood, É.*Béton de chanvre*. Batirama. https://www.batirama.com/article/49444-beton-de-chanvre-wall-upprefa-leve-25-millions-d-euros-pour-accelerer-la-decarbonation.html.2023, 2 novembre.

[32] EN 196-1 Methods of testing cement-part 1: Determination of stress, European committee for standarization, 2005.

[33]Li D, Ji D, Liu J, Lin Y. A Multi-Model EKF Integrated Navigation Algorithm for Deep Water AUV. International Journal of Advanced Robotic Systems;13. https://doi.org/10.5772/62076,2016.

[34]Babaki M, Yousefi M, Habibi Z, Mohammadi M. Process optimization for biodiesel production from waste cooking oil using multi-enzyme systems through response surface methodology.Renewable Energy 2017;105:465–72. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.086. of testing cement-part 1: Determination of stress, European committee for standarization, 2005.

[35] EN 196-1 Methods of testing cement-part 1: Determination of stress, European committee for standarization, 2005.

[36] ASTM C109 / C109M –Standard Test Method for Compessive strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. Or [50mm] Cube Specimens), https: //www.astm.org/Standards/C109.

[37] ASTM C348-14, Standard Test Method for Flexural Stress of Hydraulic- Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www. Astm.org

ANNEXE

I.1 Définition de Taguchi

Le plan d'expérimentation de Taguchi est une méthode statistique développée par le professeur GenichiTaguchi. Cette méthode a été conçue pour optimiser les processus industriels, en réduisant la variabilité des produits et en améliorant la qualité. L'objectif principal de cette approche est de déterminer rapidement et de manière efficace quels sont les facteurs qui influencent les propriétés du produit ou du processus, et surtout de comprendre comment ajuster ces facteurs pour obtenir les meilleurs résultats possibles.

Taguchi a mis l'accent sur l'idée que la qualité d'un produit n'est pas seulement une question de réduction des défauts, mais qu'il s'agit aussi de rendre les produits plus robustes face aux variations qui peuvent survenir au cours de la fabrication. Ces variations peuvent être dues à des facteurs externes ou internes, comme les changements de température, les différences dans les matériaux utilisés ou d'autres influences imprévues. L'idée est donc de concevoir un produit ou un processus qui fonctionne bien même lorsque ces variations se produisent.

La méthode de Taguchi repose sur une planification expérimentale très structurée, qui permet de tester plusieurs facteurs simultanément tout en réduisant le nombre d'expériences nécessaires. Cela est possible grâce à l'utilisation d'un design orthogonal. Ce design permet de tester les combinaisons de différents facteurs et niveaux de manière très efficace, ce qui signifie que l'on peut explorer une large gamme de variables sans avoir besoin de faire une multitude d'essais.

En utilisant ces plans d'expériences, on peut analyser l'effet de chaque facteur sur la performance du produit. Cela permet d'identifier les paramètres optimaux pour maximiser la qualité et minimiser la variabilité du produit final.

I.2 Principe de base

Le principe fondamental de la méthode de Taguchi est de concevoir des produits ou des processus robustes, c'est-à-dire capables de maintenir leurs performances malgré les variations externes ou internes (température, humidité, variations des matériaux, etc.). Pour

Taguchi, la qualité ne se résume pas à l'absence de défauts, mais à la stabilité des performances dans des conditions réelles.

Pour cela, il utilise des plans d'expériences orthogonaux. Ces tableaux permettent de tester plusieurs facteurs à la fois (comme la nature de la fibre, sa longueur ou son pourcentage), tout en réduisant le nombre total d'essais. Chaque combinaison testée fournit des informations utiles pour identifier les paramètres les plus influents et ainsi optimiser le processus de manière fiable et efficace.

I.3 Comment fonctionne le plan d'expérimentation de Taguchi

Dans un plan d'expérimentation de Taguchi, plusieurs facteurs (par exemple, la nature des fibres, leur pourcentage, leur longueur, etc.) sont choisis, et pour chaque facteur, on définit un certain nombre de niveaux (par exemple, faible, moyen, élevé). Le plan d'expérimentation L27 de Taguchi, par exemple, permet de tester 27 combinaisons possibles de ces facteurs avec trois facteurs et trois niveaux pour chaque facteur.

Chaque combinaison de facteurs et de niveaux représente une expérience. Ces expériences sont organisées de manière à ce que l'on puisse évaluer l'effet de chaque facteur, ainsi que les interactions entre les facteurs, sur les résultats (par exemple, la résistance à la flexion ou à la compression des composites).

L'une des analyses principales effectuées avec Taguchi est l'analyse Signal/Bruit (S/N). Cette analyse permet d'identifier quel facteur a le plus d'impact sur la performance du produit et comment minimiser les effets indésirables (bruit) tout en maximisant la performance (signal). Les résultats obtenus sont utilisés pour déterminer les paramètres optimaux qui devraient être utilisés pour obtenir la meilleure performance possible des composites.

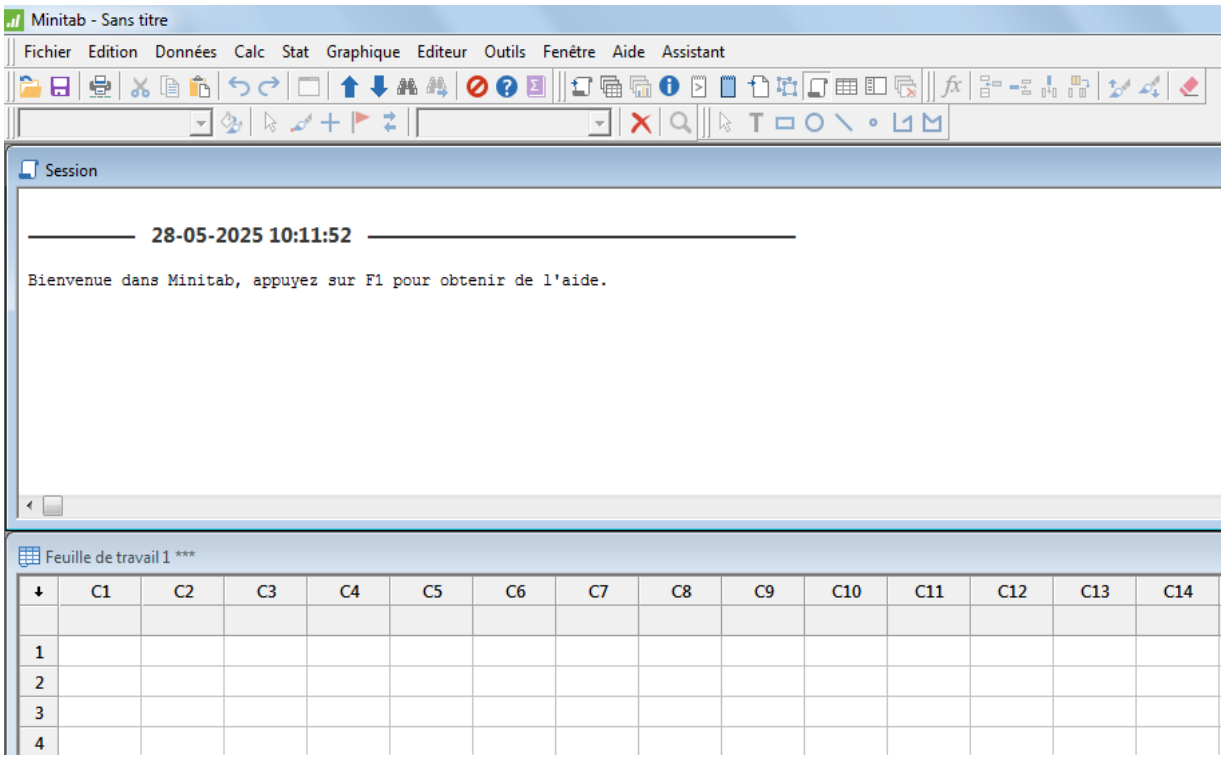
Tableau 22 : Comment fonctionne un plan Taguchi

Étape	Action
1	Identifier les facteurs (paramètres) qui influencent la performance
2	Choisir les niveaux pour chaque facteur (exemple : bas, moyen, haut)
3	Sélectionner un plan orthogonal adapté (tableaux L4L_4L4, L8L_8L8, L16L_{16}L16, etc.)
4	Réaliser les essais selon la matrice
5	Calculer les rapports Signal/Bruit (S/N) pour juger la qualité

II.Construction du plan d'expérience (DOE) type Taguchi L27

Afin d'optimiser les conditions expérimentales et d'évaluer l'influence de plusieurs facteurs sur la résistance des échantillons, un plan d'expérience de type Taguchi a été adopté. Le choix s'est porté sur une matrice L27 (3^13)**,** adaptée à l'étude de facteurs à trois niveaux**.**

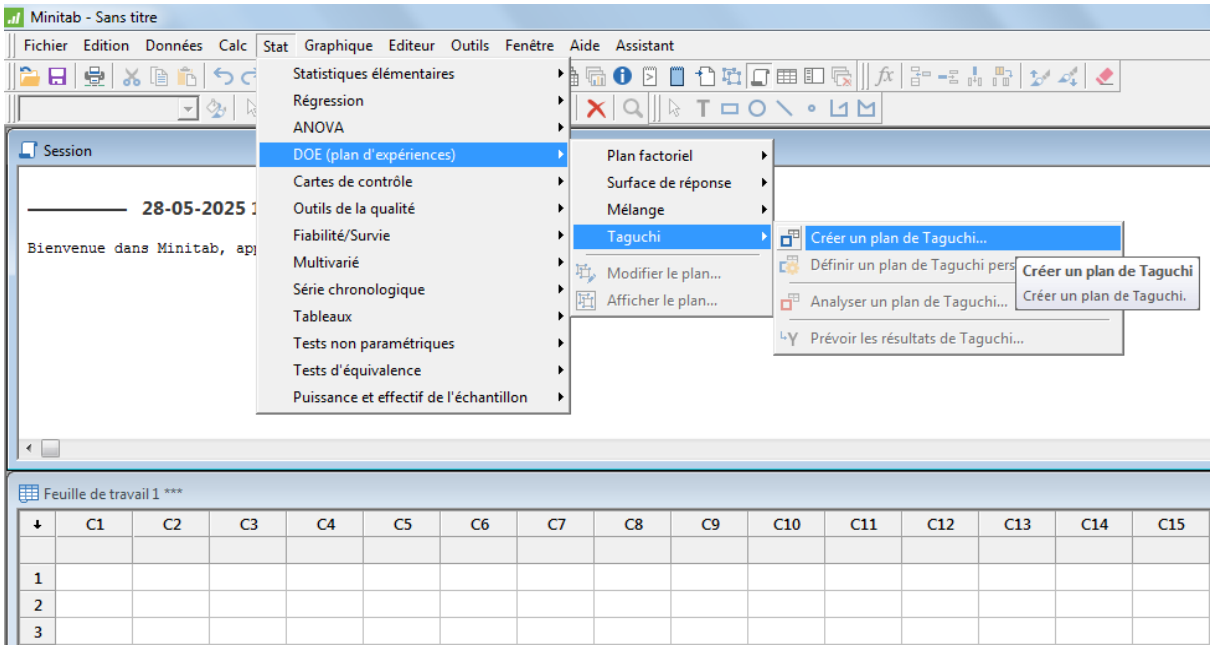
La construction du plan a été réalisée à l'aide du logiciel **Minitab 17**



Selon les étapes suivantes :

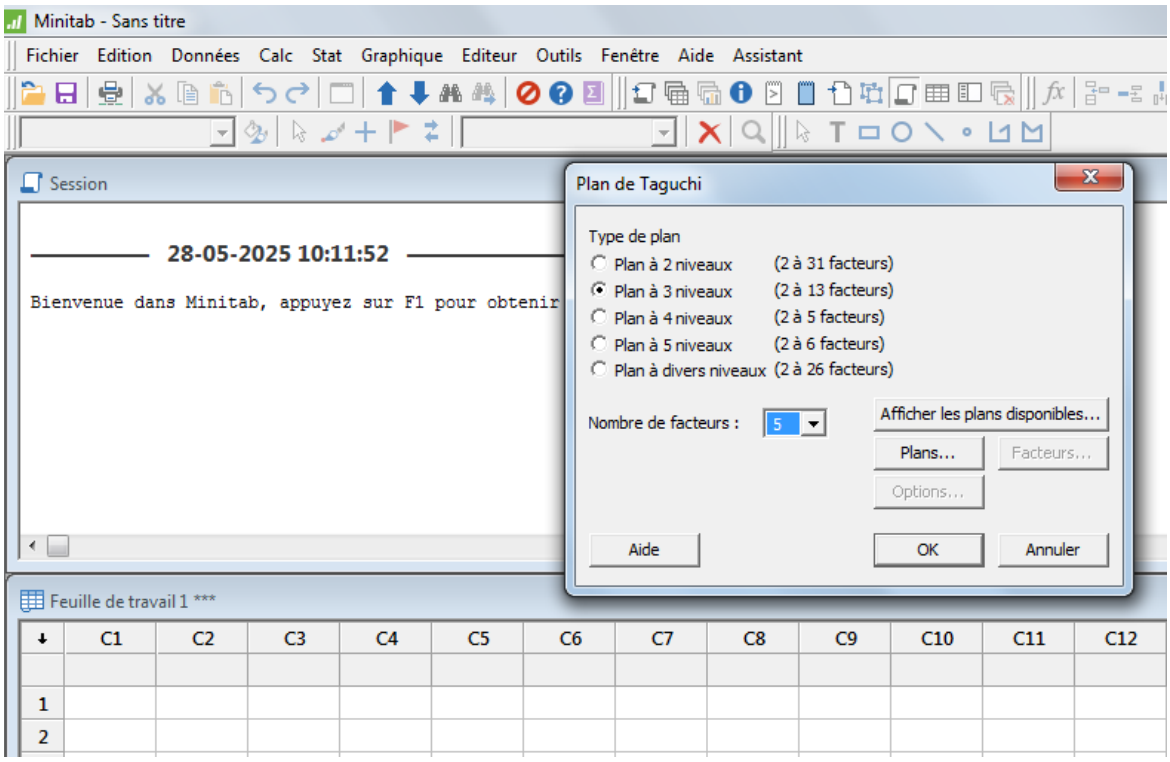
1. **Création du plan Taguchi**:

   Dans Minitab, la commande DOE (Designe of experiment) suivante a été utilisée:



2. **Sélection de la matrice** :

La matrice **L27** a été sélectionnée, permettant l'analyse de 5 facteurs, chacun à 3 niveaux. Toutefois, seuls les facteurs pertinents à l'étude (ex. : type de fibre, pourcentage de fibre, traitement chimique, etc.) ont été retenus.

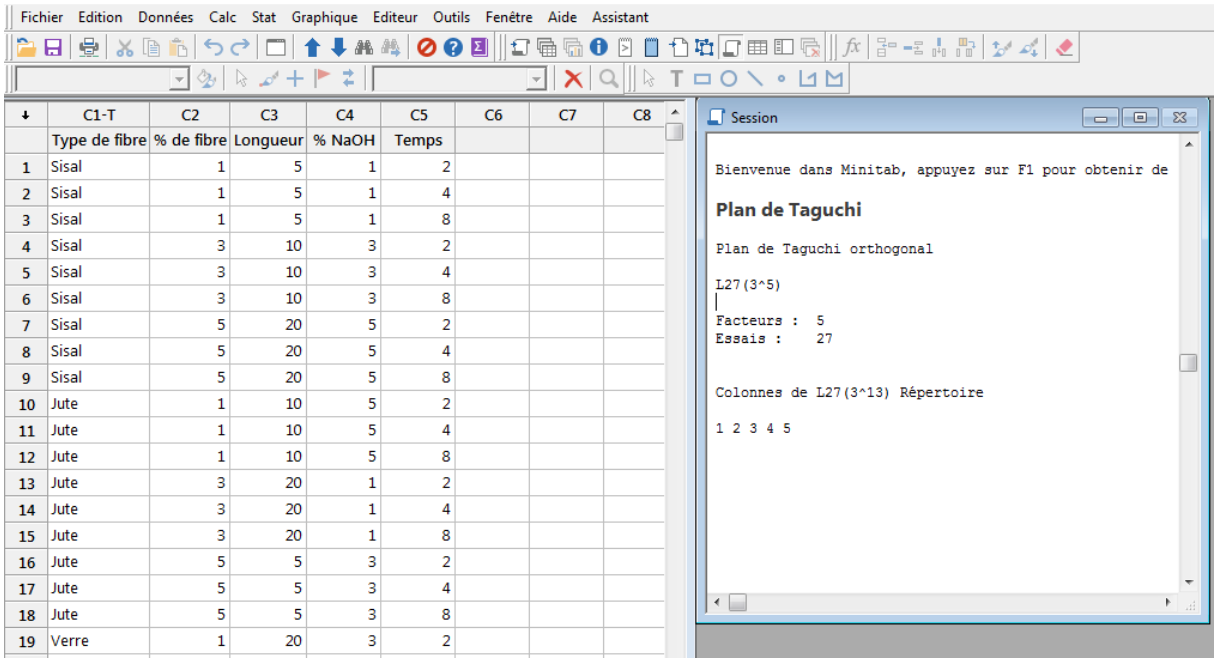


3. **Définition des facteurs** :

Les facteurs expérimentaux ont été définis avec leurs trois niveaux respectifs (ex. : faible, moyen, élevé). Le nom et les niveaux de chaque facteur ont été précisés dans l'interface.

4. **Génération du tableau d'expériences** :

Minitab a généré automatiquement les 27 combinaisons expérimentales. Les résultats de résistance à la flexion et à la compression ont ensuite été saisis dans les colonnes adjacentes.



	C1-T	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	Type de fibre	% de fibre	Longueur	% NaOH	Temps			
1	Sisal	1	5	1	2			
2	Sisal	1	5	1	4			
3	Sisal	1	5	1	8			
4	Sisal	3	10	3	2			
5	Sisal	3	10	3	4			
6	Sisal	3	10	3	8			
7	Sisal	5	20	5	2			
8	Sisal	5	20	5	4			
9	Sisal	5	20	5	8			
10	Jute	1	10	5	2			
11	Jute	1	10	5	4			
12	Jute	1	10	5	8			
13	Jute	3	20	1	2			
14	Jute	3	20	1	4			
15	Jute	3	20	1	8			
16	Jute	5	5	3	2			
17	Jute	5	5	3	4			
18	Jute	5	5	3	8			
19	Verre	1	20	3	2			

Ce plan a permis d'identifier les combinaisons de paramètres les plus robustes pour améliorer la performance mécanique des matériaux à base de fibres.