



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département d'Hydraulique et génie civil

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Matériaux en génie civil

Présenté par :

Ahmed Chemsas

Intitulé :

**Développement et analyse de nouveaux bio composites écologiques à
partir de matériaux résiduels :
Applications en construction durable.**

Soutenue le : 28/ 05 /2025

Devant le jury composé de :

Dr : Fouzi Masmoudi

Président

Dr : Tahar Zerig

Examineur

Dr : Tarek Djedid

Encadreur

Dr : Abdelhamid Khelifi

Co-Encadreur

2024-2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux, je commence par exprimer ma profonde gratitude envers Allah, le Très-Haut. Ensuite, à ma merveilleuse famille, je tiens à témoigner toute ma reconnaissance également adresser mes sincères remerciements à mon cher directeur de thèse, le **Dr. Tarek Djedid**, ainsi qu'à mon co-directeur, **Dr. Abdelhamid Khelifi**, pour leur acceptation et leur soutien indéfectible, tant sur le plan physique que moral, au cours de ces quatre derniers mois, dans les bons comme dans les moments difficiles. Je tiens à les remercier pour leur disponibilité malgré leurs nombreuses responsabilités, leurs conseils avisés, leur grande confiance en moi et leur appui constant à ce projet. À **M. Tarek Djedid et M. Abdelhamid Khelifi**, je dis sincèrement : « Merci pour tout ».

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers **M. Ferik Ali, Masmoudi Fouzi, Mani Mohammed, Miloudi Abdelmouniam, Logbi Abdelazziz, Kaab Med Zouhir, fethiza ali boubeker, Bedadi Laid, Zerig Tahar et Ben Amara Ibrahim**, pour avoir sacrifié leur temps afin de me fournir toutes les informations nécessaires tout au long de mes années universitaires. Grâce à eux, j'ai beaucoup appris, un grand merci à eux.

Mes remerciements s'étendent également à tous les ingénieurs et membres des laboratoires de l'Université Echahid Hamma Lakhdar, du laboratoire LTP SUD, ainsi que du laboratoire de l'Institut National Spécialisé dans la Formation Professionnelle Echahid El Amamra Bachir, y compris **M. Zeghdi Othman** et tous ceux qui ont contribué à ce travail.

Dédicaces

Au nom d'Allah, le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux,

Je commence par rendre grâce à Allah, qui m'a guidé et soutenu pour achever ce travail.

À mes chers parents, mon soutien et ma détermination, je dédie cet humble accomplissement, en reconnaissance de leur amour inconditionnel et de leurs immenses sacrifices.

À mes frères et sœurs, compagnons de mes joies et de mes peines, merci d'avoir été à mes côtés à chaque étape.

À mes précieux amis, qui ont été une source d'inspiration et de joie tout au long de ce parcours, je vous dédie ce travail avec gratitude.

À l'université des Echahid Hama Lakhdar, havre de savoir et de connaissance qui m'a accueilli, j'offre cette dédicace en témoignage de reconnaissance.

À tous ceux qui m'ont soutenu par une parole bienveillante ou une prière sincère, cet accomplissement vous appartient en partie.

Résumé

Face aux enjeux environnementaux et économiques actuels, tels que l'épuisement progressif des ressources naturelles, l'augmentation de leur coût et les impacts écologiques liés à leur exploitation, le secteur du bâtiment s'oriente vers l'intégration de matériaux alternatifs plus durables. Dans ce contexte, les fibres végétales issues de résidus agricoles représentent une solution prometteuse, notamment les fibres extraites du palmier *Washingtonia filifera* (WF), disponibles en grande quantité en Algérie, et reconnues pour leur faible densité et leurs propriétés mécaniques intéressantes.

Dans le cadre de cette recherche, des bio-mortiers ont été formulés à partir de trois types de sable : le sable de dunes (SD), le sable recyclé (SR) issu de résidus de construction, ainsi qu'un mélange des deux (SM), afin d'étudier l'influence de la nature du granulat sur les propriétés finales du mortier. Les fibres de *Washingtonia filifera* ont été ajoutées à des taux de 1 %, 1,5 % et 2 % en poids du ciment, sous deux états : non traitées et traitées par une solution alcaline de NaOH à des concentrations de 1,5 %, 2,5 % et 3,5 %, pour des durées d'immersion de 3 et 6 heures.

L'objectif de ce travail est d'analyser et d'optimiser l'effet combiné de ces paramètres (type de sable, pourcentage de fibres, concentration et durée de traitement) sur les performances des mortiers, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence l'impact significatif de ces variables sur les propriétés physiques (masse volumique, absorption, porosité), mécaniques (résistances à la flexion et à la compression).

L'analyse des résultats a permis d'identifier une formulation optimale combinant 1.5 % de fibres traitées par immersion dans une solution de NaOH à 3.5 % pendant 3 heures, avec l'utilisation d'un mélange équilibré de sable de dunes et de sable recyclé (SM) comme granulat. Cette combinaison a offert un bon compromis entre propriétés physiques et mécaniques, avec une amélioration significative de la résistance à la flexion et à la compression, tout en assurant une bonne maniabilité et une structure interne homogène.

Mots-clés : Déchets de *Washingtonia*, Résistance mécanique, Propriétés physiques, Sable de dune, Sable recyclé, les fibres végétales.

Abstract

In light of current environmental and economic challenges—such as the progressive depletion of natural resources, rising material costs, and the ecological impacts of their extraction—the construction sector is moving towards the integration of more sustainable alternative materials. In this context, plant fibers derived from agricultural residues offer a promising solution, particularly fibers extracted from the *Washingtonia filifera* palm (WF), which are abundant in Algeria and known for their low density and favorable mechanical properties.

This research focuses on the formulation of bio-mortars using three types of sand: dune sand (SD), recycled sand (SR) from construction waste, and a mixture of the two (SM), in order to study the influence of aggregate type on the final mortar properties. *Washingtonia filifera* fibers were added at rates of 1%, 1.5%, and 2% by cement weight, in two states: untreated and treated with a NaOH alkaline solution at concentrations of 1.5%, 2.5%, and 3.5%, with immersion durations of 3 and 6 hours.

The objective of this study is to analyze and optimize the combined effects of these parameters (sand type, fiber percentage, treatment concentration, and duration) on the performance of mortars in both fresh and hardened states. Experimental results highlighted the significant influence of these variables on physical properties (density, water absorption, porosity) and mechanical properties (flexural and compressive strengths).

Analysis of the results led to the identification of an optimal formulation combining 1.5% of fibers treated in a 3.5% NaOH solution for 3 hours, with the use of a balanced mix of dune and recycled sand (SM) as aggregate. This combination offered a good compromise between physical and mechanical properties, with significant improvements in flexural and compressive strength, while ensuring good workability and a homogeneous internal structure.

Keywords: *Washingtonia* waste, Mechanical strength, Physical properties, Dune sand, Recycled sand, Plant fibers.

الملخص

في مواجهة التحديات البيئية والاقتصادية الحالية، مثل الاستنفاد التدريجي للموارد الطبيعية، وزيادة تكلفتها والآثار البيئية المرتبطة باستغلالها، يتجه قطاع البناء نحو دمج مواد بديلة أكثر استدامة. في هذا السياق، تمثل الألياف النباتية من المخلفات الزراعية حلاً واعداً، لا سيما الألياف المستخرجة من نخيل واشنطنيا فيليفيرا (WF)، المتوفرة بكميات كبيرة في الجزائر، والمعروفة بكثافتها المنخفضة وخصائصها الميكانيكية المثيرة للاهتمام. كجزء من هذا البحث، تمت صياغة الملاط الحيوي من ثلاثة أنواع من الرمل: رمل الكتبان الرملية (SD)، والرمل المعاد تدويره (SR) من مخلفات البناء، بالإضافة إلى خليط من الاثنين (SM)، من أجل دراسة تأثير طبيعة الركام على الخصائص النهائية للملاط. تمت إضافة ألياف واشنطنيا فيليفيرا بمعدلات 1% و 1.5% و 2% بوزن الأسمنت، في حالتين: غير معالجة ومعالجة بمحلول قلوي من هيدروكسيد الصوديوم بتركيزات 1.5% و 2.5% و 3.5% لأوقات الغمر 3 و 6 ساعات. الهدف من هذا العمل هو تحليل وتحسين التأثير المشترك لهذه المعلمات (نوع الرمل، النسبة المئوية للألياف، التركيز ومدة العلاج) على أداء الملاط، سواء في الحالات الطازجة أو المتصلبة. أبرزت النتائج التجريبية التأثير الكبير لهذه المتغيرات على الخصائص الفيزيائية (الكثافة والامتصاص والمسامية) والميكانيكية (قوة الانحناء والضغط).

حدد تحليل النتائج تركيبة مثالية تجمع بين 1.5% من الألياف المعالجة بالغمر في محلول هيدروكسيد الصوديوم بنسبة 3.5% لمدة 3 ساعات، مع استخدام مزيج متوازن من رمل الكتبان الرملية والرمل المعاد تدويره (MS) كمجموعة. قدم هذا المزيج حلاً وسطاً جيداً بين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، مع تحسن كبير في قوة الانحناء والضغط، مع ضمان قابلية تشغيل جيدة وهيكل داخلي متجانس.

الكلمات المفتاحية: نفايات الواشنطنونيا، القوة الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية، رمل الكتبان الرملية، الرمل المعاد تدويره، الألياف النباتية.

Liste des Abréviations

SD : Sable de dune.

SR : Sable de recyclé.

SM : Sable mélange.

WF : fibres de Washingtonia filifera.

C : Ciment.

E : Eau.

NaOH : une solution d'hydroxyde de sodium

UPV : Ultrasonic Pulse Velocity (la vitesse d'impulsion ultrasonique).

Ab : Absorption d'eau.

RC : Résistance de compression.

Rf : Résistance de flexion.

EN : Norme Européenne.

NF P : Norme Françaises applicable au bâtiment et génie civil.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

LNHC : Laboratoire National Habitat Construction.

E/C : rapport eau sur ciment.

ρ : masse volumique apparente (Kg/m³).

Es : equivalent de sable.

MF : module de finesse.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	
Dédicaces	
Résume	I
Abstract.....	II
الملخص.....	III
Liste des Abréviations.....	IV
Table des matières.....	V
Listed des Figures.....	XI
Liste des Tableaux	XIV
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : Etude bibliographique

I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition des matériaux cimentaires.....	5
I.3 Ciment Portland.....	6
I.3.1. CEM I – Ciment Portland ordinaire.....	6
I.3.2. CEM II – Ciment Portland composé.....	6
I.3.3. CEM III – Ciment au laitier de haut fourneau.....	6
I.3.4. CEM IV – Ciment pouzzolanique.....	7
I.3.5. CEM V – Ciment composite (à composants multiples)	7
I.4 Sable de dune	7
I.4.1 Définition	7
I.4.2 Intérêt de sable de dune	9

TABLE DES MATIÈRES

I. 4.3. Utilisation générale du sable	9
I. 4.3.1. Utilisations dans le secteur du bâtiment et des travaux publics	9
I. 4.3.2. Utilisations industrielles	9
I. 4.3.3. Utilisations naturelles et économiques	10
I. 4.4. Caractéristiques des sables de dunes du Sahara Algérien	10
I. 4.4.1. Composition minéralogique	10
I. 4.4.2. Composition chimique	10
I. 4.4.3. Analyses minéralogiques	11
I. 4.5. Classification selon la granulométrie	12
I.5 Sable recyclés	12
I.5.1 Définition	12
I.5.2 Granulats de béton recyclés [14]	13
I.5.3 Absorption d'eau et la densité apparente des agrégats.....	14
I.5.4 Caractérisation expérimentale des granulats de béton recyclés.	15
I.5.4.1 Résistance à la compression et à la traction.....	15
I.5.4.2 Module d'élasticité.....	17
I.6 LES FIBRES.....	18
I.6.1 Définition.....	18
1.6.2 Les fibres naturelles.....	19
1.6.3 Structure chimique des fibres végétales.....	21

TABLE DES MATIÈRES

1.6.3.1. La cellulose.....	21
1.6.3.2. L'hémicellulose.....	21
1.6.3.3. La lignine.....	21
1.6.3.4. Les lipides.....	21
1.6.3.5. La pectine.....	22
1.6.3.6. Les protéines.....	22
1.6.3.7. Les sucres	22
I.6.4. Propriétés physiques, chimiques, et mécaniques des fibres végétales.....	22
1.6.5. Présence des fibres végétales en Algérie.....	24
1.6.5.1. Fibres d'alfa (Stipa tenacissima)	25
1.6.5.2. Fibres de palmier	25
1.6.5.3. Fibres de	25
1.6.5.4. Fibres de lin et de chanvre	25
1.6.5.5. Autres fibres	25
I.6.6. Techniques d'extraction des fibres végétales	25
I.6.6.1. Défibrage mécanique.....	25
I.6.6.2. Rouissage (Retting).....	25
I.6.6.3. Macération chimique ou enzymatique.....	26
I.6.6.4. Écorçage manuel (Peeling).....	26
I.6.6.5. Extraction thermique.....	26
I.6.6.6. Cardage.....	26
I.6.6.7. Séparation manuelle	26

TABLE DES MATIÈRES

1.6.7. Procédés de traitement des fibres végétales	26
1.6.8. Les fibres végétales des palmiers Washingtonia filifera	30
1.6.9 Bénéfices et désavantages des fibres végétales	31
1.6.9.1. Avantages	31
1.6.9.2 Inconvénients	32
1.7 CARACTERISTIQUES DES COMPOSITES CIMENTAIRES FIBRES.....	32
1.7.1. Le rôle des fibres comme renfort dans la construction.....	32
1.7.2. Influence de la présence de fibres sur les caractéristiques rhéologique.....	34
1.7.3. Influence des fibres sur les propriétés physiques et mécaniques des biocomposites.....	34
1.8. CONCLUSION.....	37

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1 Introduction.....	39
II.2 Matériaux utilisés.....	40
II.2.1. Ciment.....	40
II.2.2. Sable de dune	41
II.2.3 Sable recyclé.....	42
II.2.4 Fibre Washingtonia filifera.....	43
II.2.5 Eau de gâchage.....	44

TABLE DES MATIÈRES

II.3 Caractérisation des Matériaux utilisés.....	44
II.3.1 Analyse granulométrique.....	44
II.3.2 Masses volumiques et absorption d'eau.....	45
II.3.3 Equivalant de sable et module de finesse.....	45
II.3.4 Traitement de la fibre WFW.....	46
II.4 Méthodes d'essais.....	47
II.4.1 Formulation et fabrication des éprouvettes d'essai.....	47
II.4.2 Préparation des échantillons d'essai.....	50
II.5. Méthodologie expérimentale	52
II.5.1. Caractéristiques physico-mécaniques.....	52
II.5.1.1. A l'état frais.....	52
II.5.1.1.1 Essai d'étalement.....	52
II.5.1.1.2 Mesure de la masse volumique à l'état frais.....	53
II.5.1.2. A l'état durci.....	55
II.5.1.2.1 Essais d'auscultation dynamique (essai ultrasonique).....	55
II.5.1.2.3. Essai de flexion à trois point et déplacement flexionnel.....	56
II.5.1.2.4. Essai de compression.....	58
II.5.1.2.5. Essai de variation dimensionnel (Retrait/gonflement).....	59
II.5.2. Caractéristiques des indicateurs de durabilité.....	60

TABLE DES MATIÈRES

II.5.2.1. Porosité accessible à l'eau	60
II.5.2.2. Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	61
II.6 Conclusion.....	63
 CHAPITRE III : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS	
III.1 Introduction.....	65
III.2 Propriétés à l'état frais	65
III.2.1 Ouvrabilité.....	65
III.2.2 La masse volumique à l'état frais.....	66
III.3 Caractérisation des mortiers à l'état durci.....	68
III.3.1. Résistance à la compression.....	68
III.3.2 Résistance à la flexion trois points.....	70
III.3.3 Vitesse d'impulsion des ultrasons (UPV)	71
III.3.4 Retrait.....	73
III.4. Caractéristiques des indicateurs de durabilité.....	75
III.4. 1. Porosité accessible à l'eau.....	75
III.4.2. Absorption d'eau par capillarité.....	77
III.4.3. Absorption d'eau par immersion totale.....	80
III.5. Conclusion.....	81
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS.....	83
REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	86
ANNEXES	

Liste des Figures

Figure I-1: Les sables des dunes.....	7
Figure I-2 Configuration interne des granulats a) Naturel, b) Recyclé	13
Figure I-3 Analyse scanner 3D des granulats : a (Naturel), b (Recyclé).....	14
Figure I-4 Absorption d'eau à 24 heures, et densité apparente des agrégats....	15
Figure I-5 Résultats de la résistance à la compression.....	16
Figure I-6 Résultats de la résistance à la traction.....	17
Figure I-7 Résultats du module d'élasticité	18
Figure I-8 : Classement des divers genres de fibres végétales.....	20
Figure I-9 : a) <i>Washingtonia filifera</i> , b) Tronc du palmier <i>Washingtonia filifera</i> et c) Résidus du <i>Washingtonia filifera</i>	30
Figure I-10: Energie grise employés dans les matériaux du secteur de la construction.....	33
Figure I-11 : Applications novatrices des bio composites à base de fibres de bambou au sein de l'aéroport de Madrid-Barajas.....	35
Figure II-1 : Sable de dune.....	45
Figure II-2 : Sable recyclé.....	46
Figure II-3. Plante <i>Washingtonia filifera</i> avec la zone sélectionnée et la maille de déchets WF.....	47
Figure II-4. (a) Faisceau de fibres, , (b) Fibres traitées au NaOH. (c) Morceaux de fibres lavées à l'eau distillée.....	47

LISTE DES FIGURES

Figure II-5. Courbe granulométrique du sable utilisé (a) sable recyclé. (b) sable de dune.....	48
Figure II-6 : Mesure de la masse volumique des granulats, l'équivalent de sable et tamisage des granulats.....	49
Figure II-7. Hydroxyde de sodium NaOH.....	50
Figure II-8 : Les essais à l'état frais, (a) l'étalement, (b) la masse volumique..	54
Figure II-9 : Nivellement de la surface du mortier avec une truelle.....	55
Figure II-10 : Conservation des échantillons d'essai dans l'eau.....	55
Figure II-11. Mesure d'étalement a table de choc.....	57
Figure II-12. Mesure de la masse volumique de bio-mortier.....	58
Figure II-13 : Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique.....	59
Figure II-14 : Principe de l'essai de la flexion.....	61
Figure II-15 : Matériels utilisé et essai de traction par flexion trois points.....	61
Figure II-16 : Principe de l'essai de la compression.....	62
Figure II-17 : Matériels utilisé et essai de compression.....	63
Figure II-18 : Mesure du retrait par un rétractomètre numérique.....	63
Figure II-19 : Dispositif de mesure de la porosité accessible à l'eau, (a) Pesée de éprouvettes, (b) four pour séchage, (c) Pesée hydrostatique.....	65
Figure II-20 : Image du test d'absorption capillaire.....	66
Figure III-1 : Répartition des mortiers selon le type de sable, pour chaque taux de fibres, en fonction du temps d'immersion dans la solution de NaOH.....	70
Figure III-2 : La masse volumique des mortiers à l'état frais.....	72

LISTE DES FIGURES

Figure III-3 : Résistances en compression des mortiers après 28 jours de cure à l'eau.....	73
Figure III-4 : Résistances en compression des mortiers après 28 jours de cure à l'eau.....	75
Figure III-5 : Vitesse de propagation des ultrasons dans les bio-mortiers.....	76
Figure III-6 : Effet combiné du type de sable et du traitement alcalin des fibres de Washingtonia sur le retrait plastique du mortier.....	78
Figure III-7 : Effet combiné du type de sable et du traitement alcalin des fibres de Washingtonia sur Porosité accessible à l'eau des mortiers.....	79
La Figure III-8 Cinétique d'absorption d'eau par capillarité.....	81
Figure III-9 : Effet combiné du type de sable et du traitement alcalin des fibres de Washingtonia sur Absorption d'eau par immersion totale des mortiers.....	84

Liste des Tableaux

Tableau I-1 : Résultats de l'analyse chimique du sable de dune de la région de Laghouat (LNHC, Djelfa).....	11
Tableau I-2: Les propriétés mécaniques des diverses fibres végétales.....	23
Tableau I-3 : Structure chimique de diverses fibres végétales.....	24
Tableau II.1 Récapitulation des caractéristiques de ciment.....	44
Tableau II.2 Propriétés physiques des granulats utilisé.....	46
Tableau II.3 Les différents formulation des mortiers étudiées.....	53
Tableau II.4 Valeurs d'étalement NF EN 1015-6	57
Tableau II-5 Classification du béton sur la base de mesures des vitesses d'impulsions ultrasoniques.....	60

Introduction Générale

Au cours des dernières années, les préoccupations environnementales croissantes, l'augmentation du coût des ressources naturelles et leur raréfaction ont conduit de nombreux secteurs industriels, notamment celui de la construction, à s'orienter vers des matériaux plus durables et respectueux de l'environnement. Dans ce contexte, les bio-composites à base de matières premières renouvelables et de déchets naturels représentent une alternative prometteuse aux matériaux conventionnels.

Les bio-composites cimentaires renforcés par des fibres végétales ont suscité un intérêt particulier en raison de leur biodégradabilité, de leur faible coût et de leurs propriétés mécaniques améliorées. L'intégration de résidus agricoles, tels que les fibres extraites du palmier *Washingtonia filifera*, offre une voie innovante pour valoriser les déchets végétaux tout en améliorant les performances des matériaux de construction.

Dans cette étude, l'accent a été mis sur le développement d'un mortier cimentaire innovant, combinant des fibres de *Washingtonia filifera* traitées chimiquement à des sables locaux, à savoir le sable de dunes (SD), le sable recyclé (SR), et un mélange des deux (SM). Les fibres ont été prétraitées par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à différentes concentrations (1.5 %, 2.5 %, 3.5 %) et pour deux durées d'immersion (3 heures et 6 heures), dans le but d'améliorer leur interaction avec la matrice cimentaire.

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer l'effet de ces paramètres (type de sable, teneur en fibres, concentration en NaOH et durée d'immersion) sur les caractéristiques physiques, rhéologiques et mécaniques des bio-mortiers produits. À travers un programme expérimental complet, les performances des différentes formulations ont été comparées afin d'identifier les combinaisons les plus efficaces.

L'étude s'est structurée comme suit :

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique portant sur les matériaux composites à base de fibres naturelles, les méthodes de traitement chimique des fibres, ainsi que les caractéristiques des mortiers renforcés.
- Le deuxième chapitre est dédié aux matériaux utilisés, aux méthodes expérimentales adoptées et à la description des différents essais réalisés. Une

INTRODUCTION GENERALE

attention particulière y est portée à la caractérisation des fibres, aux conditions de traitement alcalin, ainsi qu'aux normes appliquées.

- Le troisième chapitre expose et discute en détail les résultats expérimentaux, notamment en ce qui concerne l'influence du type de sable et des fibres traitées sur la rhéologie à l'état frais, la densité, la porosité, l'absorption d'eau, la résistance à la compression et à la flexion.

Cette étude vise ainsi à démontrer la faisabilité technique et les avantages environnementaux de l'utilisation de fibres de *Washingtonia filifera* traitées chimiquement dans la formulation de mortiers cimentaires écologiques, en tenant compte de la disponibilité locale des matériaux et des exigences de durabilité.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

I.1 Introduction

Dans un contexte mondial marqué par des crises environnementales croissantes, la nécessité de repenser les modes de production et de consommation devient de plus en plus urgente, notamment dans le secteur du bâtiment, l'un des plus grands consommateurs de ressources naturelles et contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre. Alors que les zones urbaines continuent de s'étendre, les déchets issus des démolitions et des rénovations s'accumulent, accentuant la pression sur les ressources non renouvelables. Face à ces enjeux, il devient indispensable d'explorer des alternatives durables aux matériaux de construction traditionnels, en privilégiant le recyclage, la valorisation des déchets, et l'utilisation de ressources locales disponibles.

Dans cette optique, les gravats issus de la démolition représentent une source précieuse de granulats recyclés, pouvant être réintégrés dans de nouvelles formulations sans recourir à l'extraction intensive de matières premières. Parallèlement, les vastes étendues de sable désertique, longtemps négligées en raison des propriétés physiques particulières de ce sable (finesse, mauvaise granulométrie), offrent un potentiel sous-exploité qui peut être activé par des approches innovantes de combinaison et de traitement.

Du côté des ressources biosourcées, les fibres végétales se sont imposées comme des renforts naturels efficaces, capables d'améliorer les propriétés mécaniques, thermiques et environnementales des matériaux composites. Parmi ces fibres, celles issues de *Washingtonia filifera* — un palmier originaire des régions arides et semi-arides — présentent un intérêt particulier. Abondantes, renouvelables, légères et dotées de bonnes performances physiques, ces fibres constituent un renfort prometteur dans le développement de bio composites locaux et durables.

La combinaison de granulats recyclés, de sable du désert et de fibres de *Washingtonia filifera* ouvre ainsi la voie à la conception de nouveaux matériaux bio-composites, à la fois performants, économiquement viables et respectueux de l'environnement.

I.2 Définition des matériaux cimentaires

Les matériaux cimentaires constituent une catégorie fondamentale dans le domaine de la construction, caractérisée par leur aptitude à faire prise et à développer une résistance mécanique après hydratation. Le ciment, composant principal de cette famille, est obtenu par la mouture du clinker, lui-même issu de la cuisson d'un mélange de calcaire (80 %) et d'argile (20 %) à des températures comprises entre 1450 et 1550 °C.

Lorsqu'il est mis en contact avec l'eau, le ciment subit un processus d'hydratation qui conduit à la formation d'une pâte cohésive. Cette dernière assure l'agglomération des granulats (sable, gravier), permettant la production du béton ou du mortier. Outre le ciment Portland traditionnel, il existe divers types de ciments (composés, à faible teneur en alcalins, pouzzolaniques, à haut fourneau, blancs, etc.) adaptés à des usages spécifiques en fonction des contraintes techniques et environnementales.

Les matériaux cimentaires englobent également des adjuvants chimiques et additifs minéraux, intégrés aux formulations pour améliorer certaines propriétés du matériau fini telles que la maniabilité, la résistance à court et long terme, la durabilité, ou encore la résistance aux agressions physico-chimiques.

Parallèlement, les granulats représentent la fraction granulaire des mélanges cimentaires. Il s'agit de matériaux inertes d'origine minérale, classés selon leur dimension (du sable fin aux gravillons grossiers). Leur rôle est déterminant dans la résistance mécanique, la stabilité dimensionnelle et la performance globale du béton ou du mortier.

I.3 Ciment Portland

Le ciment Portland est l'un des liants hydrauliques les plus utilisés dans le domaine de la construction et des travaux publics. Il se distingue par sa capacité à réagir avec l'eau pour former des composés solides assurant l'adhésion et la cohésion, ce qui lui confère une propriété de durcissement hydraulique même dans des environnements humides ou submergés.

Ce ciment est obtenu par le broyage du clinker, lui-même produit par la cuisson à haute température (environ 1450°C) d'un mélange de matières calcaires (comme le calcaire) et d'argiles (comme l'argile ou le schiste), avec l'ajout de sulfate de calcium (généralement du gypse) pour réguler le temps de prise.

Selon la norme européenne **EN 197-1**, le ciment Portland est classé en cinq types principaux, différenciés par leurs proportions de clinker et d'ajouts minéraux, et utilisés selon les exigences de performance et les conditions d'application :

I.3.1. CEM I – Ciment Portland ordinaire

Contient une teneur élevée en clinker (entre 95 % et 100 %) avec une faible quantité de gypse. Il se caractérise par une résistance mécanique élevée et un durcissement rapide, et est utilisé dans la plupart des applications classiques du béton.

I.3.2. CEM II – Ciment Portland composé

Composé de 65 % à 94 % de clinker, le reste étant constitué d'ajouts minéraux tels que le laitier de haut fourneau (S), les cendres volantes (V ou W), la pouzzolane naturelle (P ou Q), le calcaire (L ou LL), ou une combinaison de ces ajouts. Ce type de ciment permet de réduire l'empreinte carbone et d'améliorer certaines propriétés chimiques et physiques du béton.

I.3.3. CEM III – Ciment au laitier de haut fourneau

Contient entre 5 % et 64 % de clinker, avec une proportion importante de laitier granulé refroidi rapidement. Il est utilisé dans les grands ouvrages et les environnements chimiques agressifs en raison de sa bonne résistance aux sulfates et de la faible chaleur dégagée lors du durcissement.

I.3.4. CEM IV – Ciment pouzzolanique

Composé de 45 % à 89 % de clinker, avec une proportion importante de matériaux pouzzolaniques (naturels ou industriels). Bien qu'il durcisse lentement au début, il atteint une résistance élevée à long terme, ce qui le rend adapté aux infrastructures et milieux humides.

I.3.5. CEM V – Ciment composite (à composants multiples)

Ce type combine différents ajouts comme le clinker (20 % à 64 %), le laitier, les cendres volantes ou la pouzzolane. Il est utilisé dans des applications spécifiques nécessitant des performances chimiques et environnementales avancées.

I.4 Sable de dune

I.4.1 Définition

Le sable est une roche sédimentaire constituée principalement de quartz, formée par la désagrégation des roches sous l'effet de divers agents naturels tels que le vent, les eaux courantes et le gel. Il s'agit d'une matière première naturelle, issue le plus souvent de la décomposition du granite par altération.

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable [1].



Figure I-1: Les sables des dunes

Le Sahara est constitué d'environ 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts, etc. Le Sahara, quant à lui, couvre environ le tiers du continent africain. Ces chiffres montrent bien l'intérêt que l'on doit apporter à la construction routière dans le Sahara, qui reste fort démunie en infrastructures, et aussi l'importance que l'on doit accorder au sable dans toute investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux. [2]

Selon la définition Altameemi ZA et al. [3], une dune de sable est une élévation formée par le dépôt éolien de sable meuble, pouvant avoir une taille allant d'un mètre à plusieurs kilomètres. Ces dunes peuvent se regrouper pour former des champs de dunes de sable ou se présenter sous la forme de crêtes isolées. On les trouve dans diverses régions et, en fonction de leur emplacement géographique, on les classe en "dunes intérieures ou continentales", "dunes côtières ou de bord de mer", "dunes de berges de rivière" et "dunes de bord de lac". Les dunes sont dynamiques, variant en longueur, hauteur et position selon la direction et l'intensité du vent. L'influence du vent sur le sol est significative, avec des particules de taille sableuse se rassemblant pour former des dunes de différentes formes et tailles [4].

Les dunes de sable, qui couvrent plus de 60 % de la superficie de l'Algérie, représentent une ressource abondante dans la région. Ces dernières années, l'intérêt pour l'utilisation de ce sable comme matériau de construction a considérablement augmenté, comme en témoignent plusieurs études récentes.

Dans une étude récente, Wenlong et ses collaborateurs [5] ont développé une méthode de formulation permettant de déterminer la proportion optimale des constituants d'un béton incorporant du sable de dune. Cette méthode repose sur une modélisation statistique et vise à optimiser la composition du béton en prenant en considération plusieurs paramètres expérimentaux, tels que le rapport eau/ciment, le rapport sable/gravier (S/G), le rapport sable de dune/agrégats fins, ainsi que la quantité de réducteur d'eau.

Dans le même contexte, Sang Jun Park et al. [6] ont étudié l'effet du sable de dune sur les propriétés du béton à l'état frais, mettant en évidence, dans une certaine mesure, son impact positif sur l'ouvrabilité.

I.4.2 Intérêt de sable de dune :

L'utilisation du sable de dune présente un double intérêt : à la fois économique et technique.

Sur le plan économique, l'exploitation du sable de dune constitue une solution rentable. Sa disponibilité abondante et quasi inépuisable dans de nombreuses régions, notamment sahariennes, permet de réduire considérablement les coûts de transport. De plus, son extraction ne nécessite que peu, voire aucun frais supplémentaires, et il peut être facilement incorporé aux autres matériaux directement sur le chantier [7].

Sur le plan technique, le sable de dune peut contribuer à la densification des matériaux, améliorant ainsi leurs propriétés géotechniques. Il agit notamment en augmentant le frottement interne et la portance des sols. Il est également utilisé pour réduire la plasticité des matériaux de base, ce qui améliore leur stabilité et leur performance globale [7].

I. 4.3. Utilisation générale du sable :

Le sable constitue l'une des matières premières fondamentales dans le secteur de la construction, et il représente également le composant principal dans l'industrie du verre. Grâce à son abondance naturelle et sa facilité d'extraction, il est largement utilisé dans divers domaines industriels et techniques.

I. 4.3.1. Utilisations dans le secteur du bâtiment et des travaux publics :

- Dans les infrastructures routières : le sable est utilisé comme matériau de remblai, de couche de base, et de couche de finition.
- Dans le bâtiment : il entre dans la composition du béton, du mortier, et est utilisé pour la fabrication des briques en ciment (parpaings).
- Dans la pose de pavés : il sert de support pour les voies secondaires, parkings et garages.

I. 4.3.2. Utilisations industrielles :

- Dans la fabrication de la céramique : il constitue un ingrédient essentiel.
- Comme abrasif : il est utilisé dans la fabrication du papier de verre pour ses propriétés abrasives.

- Dans le sablage industriel : le sable est projeté à haute pression pour nettoyer des surfaces (comme la pierre ou le métal brut) ou pour les polir.

I. 4.3.3. Utilisations naturelles et économiques :

- Dans les milieux naturels, le sable accumule des minéraux lourds alluvionnaires, permettant l'extraction de substances précieuses comme l'or, les diamants, la cassitérite, la magnétite ou l'ilménite.
- Dans le domaine touristique, le sable joue un rôle essentiel, notamment sur les plages et les dunes, où il contribue à la valorisation paysagère et à la protection du littoral contre l'érosion.

I. 4.4. Caractéristiques des sables de dunes du Sahara Algérien :

I. 4.4.1. Composition minéralogique :

Les sables sont essentiellement composés de quartz (silice), ce qui en fait leur constituant principal. À cela s'ajoutent de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite, présents à l'état de traces ou en quantités secondaires.

La clarté de la couleur du sable est directement corrélée à sa teneur en silice : plus celle-ci est élevée, plus le sable présente une teinte claire, tirant souvent vers le blanc ou le beige.

La classification des sables repose généralement sur la nature de leurs constituants dominants, ce qui permet de distinguer différents types : sable quartzeux, feldspathique, ferrugineux, micacé, calcaire ou coquillier, entre autres.

Cependant, dans l'usage courant, le terme « sable » fait presque toujours référence au sable quartzeux, en raison de sa prévalence dans la nature et de ses nombreuses applications industrielles et géotechniques.

I. 4.4.2. Composition chimique :

Le sable étudié présente une composition chimique simple, dominée par une teneur élevée en silice dépassant 95 %, accompagnée de faibles proportions de carbonate de calcium (entre 1 et 2 %), ainsi que de traces de divers oxydes. Cette composition confère au sable une couleur blanche légèrement jaunâtre tirant vers l'ocre. Il se dessèche rapidement et perd facilement sa cohésion en surface.

Dans ce cadre, l'auteur [1] a mené une étude intitulée "*Comportement hydromécanique des sols compactés : Application à la conception d'une barrière ouvragée*", dans laquelle deux matériaux principaux ont été utilisés : la bentonite et le sable de dune provenant de la région de Laghouat. L'analyse chimique du sable a été réalisée par le Laboratoire National de l'Hydraulique et de la Construction (LNHC) de Djelfa. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Élément chimique	Symbole	Unité	Teneur dans le sable de dune
Silice (résidu insoluble)	SiO ₂	%	95,87
Sulfates	SO ₃	%	0,91
Chlorures	Cl ⁻	%	0,36
Carbonate de calcium	CaCO ₃	%	2,50

Tableau I-1 : Résultats de l'analyse chimique du sable de dune de la région de Laghouat (LNHC, Djelfa) [8]

Ces résultats mettent en évidence la pureté du sable, caractérisée par sa richesse en silice, ce qui reflète la simplicité de sa composition chimique ainsi que ses propriétés physiques particulières.

I. 4.4.3. Analyses minéralogiques :

Les résultats de l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) du sable dunaire ont révélé la présence des éléments silicium (Si) et oxygène (O₂), ce qui confirme la présence du composé SiO₂ (silice) comme principal constituant. La proportion élevée d'atomes de silicium indique que la silice est le composant minéral dominant dans l'échantillon.

En outre, les résultats ont mis en évidence la présence de quantités minimales de composés calciques (calcium) et magnésiques (magnésium), apparents uniquement sous forme de traces par rapport à la silice. Ces données ont été clairement enregistrées dans le spectre obtenu lors de l'analyse. [8]

I. 4.5. Classification selon la granulométrie :

Dans ce type de classification, le critère principal est la taille des particules. La classe des sables varie en fonction du système de classification ou du domaine d'activité.

Tous les systèmes de classification admettent principalement cinq (5) sous-classes basées sur la taille des grains, qui sont :

- Sable très fin (diamètre des grains de 0,0625 à 0,125 mm).
- Sable fin (de 0,125 à 0,25 mm).
- Sable moyen (de 0,25 à 0,5 mm).
- Sable grossier (de 0,5 à 1 mm).
- Sable très grossier (de 1 à 2 mm).

I.5 Sable recyclés

I.5.1 Définition

Le sable recyclé est un matériau granulaire obtenu par le traitement mécanique des déchets de construction et de démolition, notamment le béton concassé, les briques et autres éléments inertes [9]. Ce type de sable représente une alternative viable au sable naturel, permettant de réduire l'extraction excessive de ressources naturelles tout en favorisant une gestion durable des déchets [10].

Son utilisation dans le secteur du bâtiment contribue significativement à la réduction de l'empreinte carbone liée à la production de béton, en diminuant les besoins en transport et en exploitation de carrières naturelles [11]. Plusieurs études ont démontré que le sable recyclé peut partiellement ou totalement remplacer le sable naturel dans les mélanges de béton, sans compromettre les performances mécaniques, à condition que des contrôles stricts de qualité soient appliqués [12].

La Figure I-2 présente la structure interne du sable naturel et du sable recyclé respectivement.

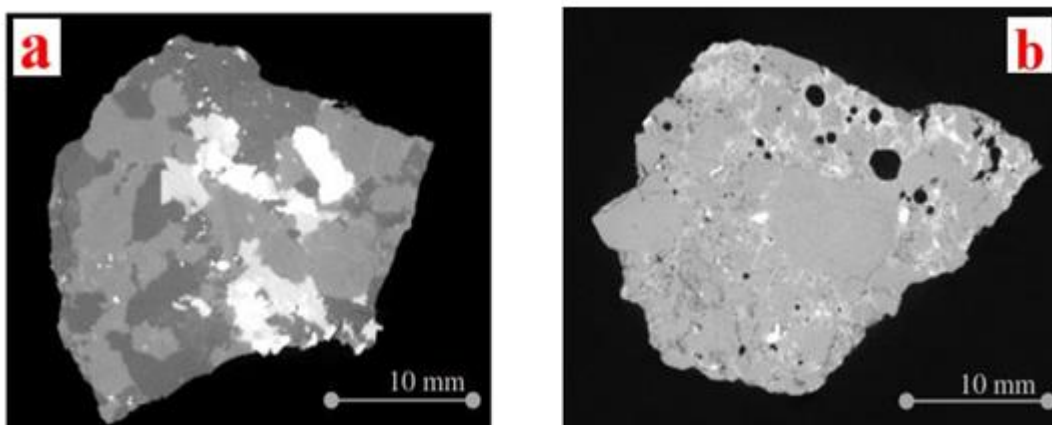


Figure I-2 Configuration interne des granulats a) Naturel, b) Recyclé [14].

Dans le contexte de développement de bio-composites écologiques, l'intégration du sable recyclé avec des liants biosourcés ou des fibres naturelles permet la conception de matériaux innovants, durables et à faible impact environnemental [13].

I.5.2 Granulats de béton recyclés [14]

Une technique de tomodensitométrie 3D sophistiquée a été employée pour caractériser la morphologie interne des agrégats. Les résultats obtenus sur les granulats naturels (Fig. I-2a et 3a) et recyclés (Fig. I-2b et 3b) sont présentés dans la Figure I-3. Les images du scanner 3D révèlent distinctement les différences de texture de surface ainsi que la morphologie interne des agrégats. Par ailleurs, les variations de densité interne sont illustrées par les différences de couleur dans la coupe transversale 2D, où les points les plus sombres représentent une faible densité, tandis que les points plus clairs indiquent des structures à haute densité.

La comparaison entre les figures I-3a et I-3b met en évidence les disparités de structure interne entre les granulats recyclés et les granulats naturels. En effet, les granulats recyclés présentent un pourcentage significativement plus élevé de points poreux et de microfissures, attribuables à la porosité de l'ancienne pâte de mortier qui demeure attachée aux anciens granulats naturels. De plus, le processus de production et de concassage des granulats recyclés (issus de déchets de démolition) peut également contribuer à une désintégration et une fracturation internes supplémentaires. Par conséquent, les granulats de béton recyclés peuvent présenter des propriétés substantiellement différentes de celles des granulats naturels, en fonction de la quantité de mortier résiduel attaché à l'intérieur des granulats recyclés.

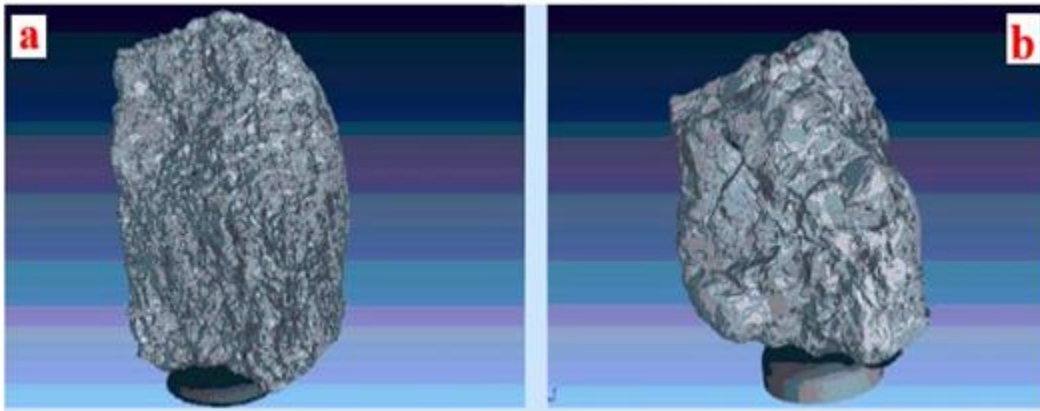


Figure I-3 Analyse scanner 3D des granulats : a (Naturel), b (Recyclé) [14].

Les fluctuations dans les propriétés physico-chimiques des granulats fins de béton recyclés (fRCA), ainsi que l'absence de normes définies pour évaluer leur qualité, constituent les principaux obstacles qui freinent actuellement l'utilisation du fRCA dans la fabrication de nouveaux bétons [15–17].

I.5.3 Absorption d'eau et la densité apparente des agrégats

Les premières expérimentations visant à évaluer l'efficacité du nettoyage autogène des particules de béton recyclé ont été réalisées à travers deux paramètres essentiels : la capacité d'absorption d'eau et la densité apparente, conformément à la norme NBR NM 53, généralement appliquée aux gros granulats (Brita 0 et Brita 1).

Les résultats obtenus montrent que prolonger la durée du nettoyage jusqu'à 15 minutes permet de réduire considérablement l'absorption d'eau, comme l'indique la Figure I-3a. En revanche, des durées plus courtes ont un effet nettement moins marqué. Ces observations soulignent le rôle central du mortier adhérent sur les propriétés des granulats recyclés, influençant non seulement leur porosité, mais aussi leur comportement à l'eau.

En chiffres, après nettoyage, l'absorption d'eau a chuté de 50 % pour Brita 0 et de 20 % pour Brita 1, confirmant ainsi l'efficacité de la méthode.

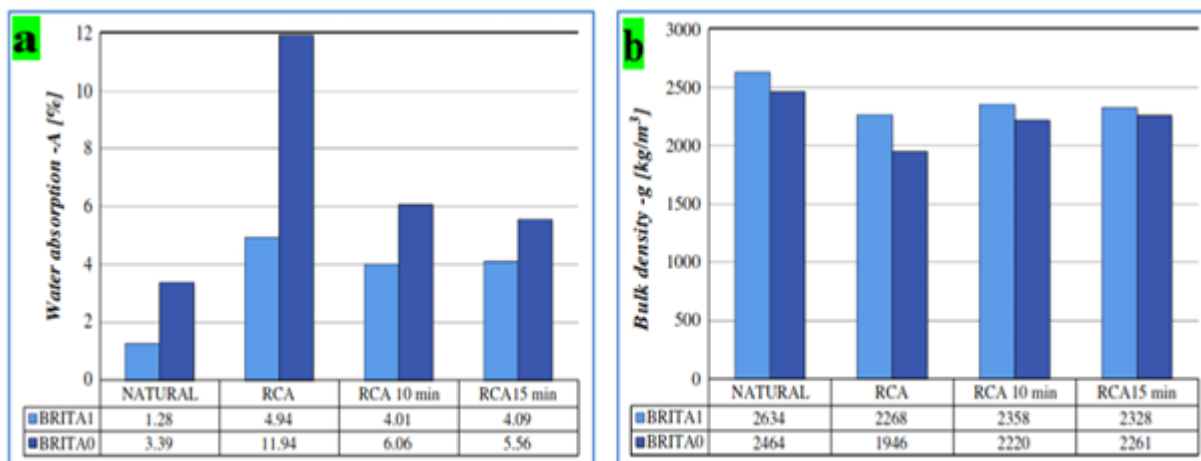


Figure I-4 Absorption d'eau à 24 heures, et densité apparente des agrégats [14]

Parallèlement, la Figure I-4b illustre également l'impact positif de ce processus sur la densité apparente, témoignant d'une transformation significative des granulats concassés en matériaux plus homogènes et de meilleure qualité.

Selon Naël-Redolfi (2016) [18], la maîtrise de l'absorption d'eau et le contrôle de la microstructure des granulats sont des éléments déterminants pour prédire le comportement rhéologique et mécanique des matériaux incorporant des granulats recyclés. Si la recherche se concentre principalement sur les applications impliquant des granulats grossiers recyclés, l'utilisation du sable recyclé demeure marginale.

Cela s'explique notamment par les difficultés techniques liées à la mesure précise de l'absorption d'eau du sable recyclé, qui est souvent constitué majoritairement de mortier broyé. Les normes actuelles, basées sur l'état "saturé surface sèche", sont peu adaptées à ces matériaux, en raison de la rugosité élevée de leur surface, qui complique l'évaluation visuelle de cet état [19].

I.5.4 Caractérisation expérimentale des granulats de béton recyclés

I.5.4.1 Résistance à la compression et à la traction

La résistance à la compression des échantillons de béton issus des trois formulations a été évaluée aux âges de 2, 7, 14, 28 et 60 jours, conformément à la norme NF EN 12390-4 [20], en utilisant des éprouvettes cylindriques de 100 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur, avec cinq essais réalisés pour chaque période de cure.

La Figure I-4 illustre l'évolution de la résistance à la compression au fil du temps. Les échantillons de référence (REF) ont présenté une résistance moyenne de 33 MPa à 28 jours, atteignant 37 MPa à 60 jours, grâce à la poursuite du processus d'hydratation.

En revanche, les échantillons contenant des granulats recyclés (RAC) ont affiché une baisse d'environ 20 % de la résistance, principalement due à une absorption d'eau plus élevée, qui entraîne une augmentation effective du rapport eau/ciment (E/C) – un effet déjà constaté sur l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques.

Cependant, l'effet bénéfique du nettoyage autogène est clairement mis en évidence dans les résultats des échantillons RAC CL, où la diminution de la résistance n'a été que de 8,9 %, mettant ainsi en valeur l'influence positive de cette technique dans l'amélioration de la qualité des granulats recyclés et la limitation de leur impact négatif sur les performances mécaniques du béton.

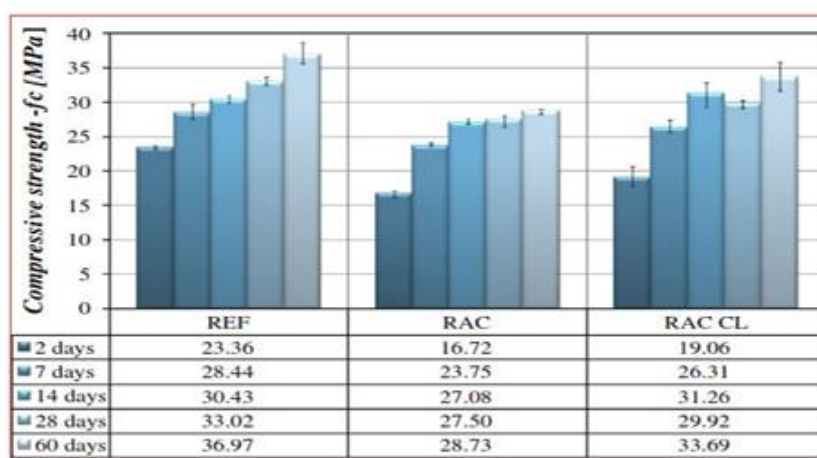


Figure I-5 Résultats de la résistance à la compression [14].

La résistance brésilienne à la traction ainsi que la résistance à la fissuration ont été mesurées sur des éprouvettes cylindriques après 28 jours de cure dans l'eau, avec trois échantillons testés par lot.

Les résultats obtenus mettent en évidence que l'utilisation de granulats recyclés non nettoyés entraîne une diminution notable d'environ 13 % de la résistance à la traction. En revanche, les granulats recyclés ayant subi un nettoyage autogène montrent non seulement des valeurs de résistance à la traction plus élevées, mais également une meilleure homogénéité des résultats, avec une dispersion réduite à moins de 4 %, comme illustré par les trois essais réalisés sur les échantillons RAC CL (voir Figure I-6).

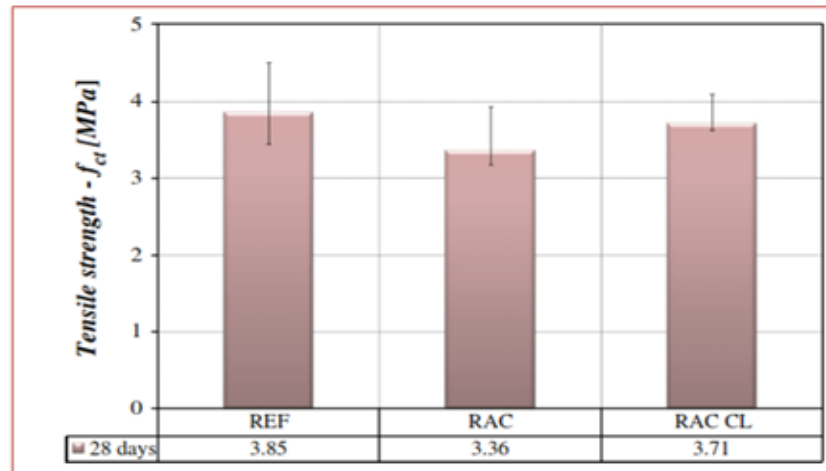


Figure I-6 Résultats de la résistance à la traction [14].

Les résultats relatifs à la résistance à la compression uniaxiale et à la résistance à la traction mettent en évidence l'impact favorable du nettoyage autogène sur les performances mécaniques des échantillons à base de granulats recyclés étudiés dans le cadre de ce programme expérimental (voir Figures I-5 et I-6) [14].

I.5.4.2 Module d'élasticité

D'après les travaux de Pepe M. et al. (2014), le module d'élasticité du béton a été déterminé conformément à la norme brésilienne NBR 8522, à l'aide d'éprouvettes cylindriques de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur, testées après 28 jours de cure dans l'eau, avec trois échantillons par lot.

Pour calculer le module d'élasticité, on a exploité les courbes charge-déplacement, en traçant une droite reliant deux points spécifiques de la branche ascendante de la courbe contrainte-déformation : l'un correspondant à une contrainte de 0,50 MPa, et l'autre à 30 % de la résistance maximale obtenue lors de l'essai de compression. En général, une corrélation positive est observée entre le module d'élasticité et la résistance à la compression du béton [21].



Figure I-7 Résultats du module d'élasticité [14].

Les résultats présentés dans la Figure I-7 montrent que l'incorporation de granulats recyclés, qu'ils aient été nettoyés ou non, n'a pas significativement influencé le module d'élasticité. En effet, des valeurs proches de 24 GPa ont été enregistrées pour tous les types de béton étudiés dans le cadre de cette expérimentation, quel que soit le lot.

I.6 LES FIBRES

I.6.1 Définition

Les fibres sont des composants longs et fins qui possèdent des propriétés mécaniques uniques, telles que la flexibilité et la résistance, et sont généralement beaucoup plus longues que larges. Elles peuvent être naturelles ou synthétiques, et leur composition chimique varie selon leur origine et leur application [22][23].

- **Fibres naturelles** : Elles proviennent de sources biologiques telles que les plantes (par exemple, lin, jute, coton), les animaux (comme la laine, la soie) ou même les minéraux (comme l'amiante). Ces fibres sont principalement composées de cellulose, hémicellulose et lignine dans le cas des fibres végétales [24].
- **Fibres synthétiques** : Elles sont fabriquées à partir de matériaux chimiques, tels que le nylon, le polyester ou le polypropylène, par des processus industriels qui transforment les matières premières en fils longs et fins [25].

Les fibres sont utilisées dans de nombreuses applications dans des secteurs variés, tels que l'industrie textile, le béton armé de fibres, les matériaux composites, et la construction durable. Elles améliorent les propriétés des matériaux en termes de flexibilité, résistance, résistance à l'usure et résistance à la traction, ce qui les rend particulièrement adaptées pour des produits nécessitant des propriétés mécaniques élevées [26][27].

1.6.2 Les fibres naturelles

Les fibres naturelles représentent des éléments fondamentaux issus des ressources renouvelables de la nature, largement intégrés dans notre quotidien. Utilisées depuis des millénaires, ces fibres, d'origine végétale, animale ou minérale, ont joué un rôle déterminant dans le développement des civilisations humaines [28].

Les fibres végétales, telles que le coton, le lin ou le chanvre, sont particulièrement reconnues pour leur durabilité, leur légèreté, et leur polyvalence, ce qui en fait des matériaux privilégiés dans la fabrication de textiles, de papiers, de matériaux composites ou encore de cordages. Issues principalement de la cellulose, composant principal des parois cellulaires des plantes, elles sont classées comme fibres cellulosiques [29].

À l'inverse, les fibres animales comme la soie, la laine et le cachemire se distinguent par leur douceur, leur résilience thermique et leur aspect luxueux. Leur composition est principalement protéique, ce qui justifie leur classification comme fibres protéiques [29].

Enfin, les fibres d'origine minérale, telles que l'amiante, se différencient par leur structure cristalline et leur composition inorganique, et sont regroupées sous la catégorie des fibres minérales [28].

La Figure I-8 illustre la classification générale des fibres naturelles. En ce qui concerne les fibres végétales en particulier, elles peuvent être extraites de différentes parties de la plante :

- des graines (ex. : coton),
- de la tige (ex. : chanvre, lin),
- des feuilles (ex. : sisal, abaca),
- ou encore des fruits (ex. : coco).

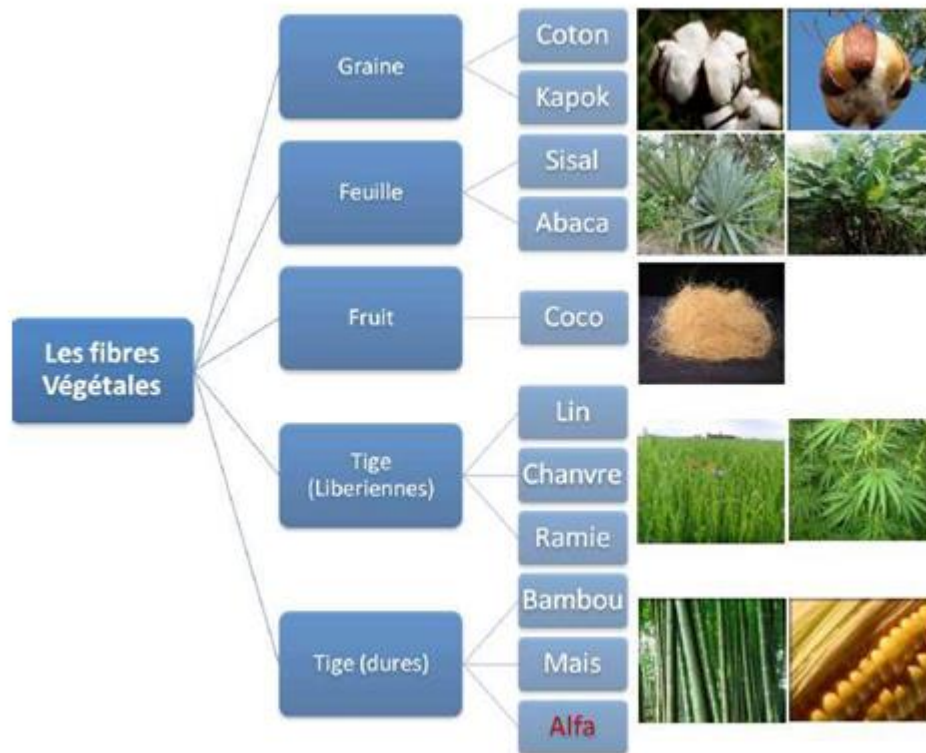


Figure I-8 : Classement des divers genres de fibres végétales [30].

Les fibres végétales se distinguent par leurs nombreux atouts écologiques. Issues de ressources renouvelables, elles sont biodégradables, recyclables et contribuent à une réduction significative de l'empreinte carbone. Ces caractéristiques en font des matériaux de choix dans une perspective de développement durable. Toutefois, les traitements chimiques ou thermiques qu'elles subissent peuvent altérer leur dégradation naturelle, affectant ainsi leur durabilité environnementale [31].

Les performances mécaniques et physiques des fibres naturelles varient en fonction de plusieurs paramètres, notamment leur origine botanique, leur structure interne, et les conditions de croissance des plantes. Par exemple, si la laine de mouton présente de très bonnes propriétés thermiques, sa résistance mécanique reste limitée [31].

La variabilité des propriétés des fibres est également influencée par les facteurs pédoclimatiques (type de sol, climat, précipitations, etc.) durant le cycle de croissance de la plante. Il est donc indispensable de prendre en compte ces paramètres pour mieux prédire la qualité et la constance des fibres obtenues [32].

De plus, le mode d'extraction doit être adapté à la localisation des fibres dans la plante (tige, feuille, graine ou fruit) ainsi qu'à l'application finale souhaitée. Une extraction optimisée permet de préserver l'intégrité structurale des fibres et d'en maximiser les performances fonctionnelles dans les domaines tels que la construction, les biocomposites ou l'isolation écologique [32].

1.6.3 Structure chimique des fibres végétales

La composition chimique des fibres végétales a une influence majeure sur leur durabilité, en particulier dans les environnements alcalins. Les fibres végétales sont composées de différents composants organiques et ligno-cellulosiques, les plus importants étant :

1.6.3.1. La cellulose

La cellulose est le principal composant des membranes cellulaires des plantes. Il s'agit d'un polysaccharide linéaire formé de chaînes de glucose liées par des liaisons glycosidiques. Ces liaisons forment des microfibrilles qui confèrent rigidité et résistance aux parois cellulaires.

1.6.3.2. L'hémicellulose

Les hémicelluloses sont des polysaccharides complexes qui, contrairement à la cellulose, sont plus ramifiées et composées de divers monomères sucrés tels que le glucose, le xylose et l'arabinose. Elles contribuent à la structure amorphe des parois cellulaires et jouent un rôle dans le lien des fibres végétales.

1.6.3.3. La lignine

La lignine est un polymère résistant et complexe qui assure la rigidité des parois cellulaires. Composée de monomères phénoliques, elle confère aux fibres végétales leur caractère fibreux et les rend plus résistantes aux microorganismes décomposeurs.

1.6.3.4. Les lipides

Les lipides présents dans les fibres végétales incluent des huiles, des graisses et d'autres composés lipidiques. Ces lipides contribuent à la résistance et à la flexibilité des fibres.

1.6.3.5. La pectine

La pectine est une substance complexe composée de polysaccharides contenant des acides galacturoniques. Elle possède des propriétés gélifiantes et est souvent présente dans les parties des plantes à texture gélatineuse, telles que les fruits.

1.6.3.6. Les protéines

Les protéines peuvent également être présentes dans les fibres végétales, bien que leur concentration varie. Elles jouent un rôle dans la structure et d'autres propriétés des fibres.

1.6.3.7. Les sucres

Les sucres sont des molécules sucrées présentes dans l'ensemble de la structure, souvent dispersées en petites unités sucrées.

Structure des fibres végétales

Les fibres végétales forment une structure fibreuse complexe, où la cellulose constitue le composant central, entouré d'autres éléments comme l'hémicellulose et la lignine, qui contribuent à la diversité des propriétés mécaniques et physiques des fibres. Ces composants forment la base des composites à base de fibres végétales, où les microfibrilles de cellulose sont liées entre elles par une matrice constituée principalement d'hémicellulose et de lignine. L'angle des microfibrilles (l'angle auquel les fibrilles de cellulose sont orientées) influence les propriétés des fibres. Le climat, l'âge et le processus de digestion influencent également la structure et la constitution chimique des fibres.

1.6.4. Propriétés physiques, chimiques, et mécaniques des fibres végétales

Les propriétés des fibres végétales naturelles dépendent essentiellement de leur composition chimique et structurelle. Parmi les facteurs déterminants, on retrouve la teneur en cellulose, la structure microscopique interne (comme l'orientation des microfibrilles), le profil en coupe transversale des fibres, ainsi que le degré de polymérisation des chaînes de cellulose.

Plus la teneur en cellulose est élevée, plus les fibres présentent une résistance mécanique et une rigidité accrue. Par ailleurs, lorsque l'angle d'orientation des microfibrilles (au sein de la paroi cellulaire) est faible, les fibres montrent une meilleure résistance à la traction. À l'inverse, une

faible proportion de cellulose combinée à un angle microfibrillaire élevé se traduit par des performances mécaniques moindres.

Ces caractéristiques varient d'une fibre à l'autre et influencent fortement leur aptitude à être utilisées comme renforts dans les matériaux composites biosourcés. Les tableaux I-2 et I-3 présentent, à ce titre, les valeurs typiques des propriétés mécaniques (telles que la résistance à la traction, le module d'élasticité) ainsi que la composition chimique de plusieurs types de fibres végétales couramment utilisées dans ce domaine [33].

Type de fibre	Densité (g/cm ³)	Longueur (mm)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Allongement (%)
Abaca	1.5	–	400–980	6.2–20	1.0–10
Alfa	0.89	–	35	22	5.8
Bagasse	1.25	10–300	222–290	17–27.1	1.1
Bambou	0.6–1.1	1.5–4	140–800	11–32	2.5–3.7
Banane	1.35	300–900	500	12	1.5–9
Coir	1.15–1.46	20–150	95–230	2.8–6	15–51.4
Coton	1.5–1.6	10–60	287–800	5.5–12.6	3–10
Ananas	1.4	35	87–1150	11.8–96	1.3–4.9
Lin	1.4–1.5	5–900	343–2000	27.6–103	1.2–3.3
Chanvre	1.4–1.5	5–55	270–900	23.5–90	1–3.5
Agave	1.2	–	430–570	10.1–16.3	3.7–5.9
Isora	1.2–1.3	–	500–600	–	5–6
Jute	1.3–1.49	1.5–120	320–800	8–78	1–1.8
Kénaf	1.4	–	223–930	14.5–53	1.5–2.7
Ortie	–	–	650	38	1.7
Palmier à huile	0.7–1.55	–	80–248	0.5–3.2	17–25
Ramie	1.0–1.55	900–1200	400–1000	24.5–128	1.2–4.0
Sisal	1.33–1.5	900	363–700	9.0–38	2.0–7.0

Tableau I-2 : Les propriétés mécaniques des diverses fibres végétales [33].

Type de fibre	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)	Cires (%)	Angle microfibrillaire (°)
Abaca	56–63	20–25	7–13	1	3	–
Alfa	45.4	38.5	14.9	–	2	–
Bagasse	32–55.2	16.8	19–25.3	–	–	–
Bambou	26–65	30	5–31	–	–	–
Banane	63–67.6	10–19	5	–	–	–
Coir	32–43.8	0.15–20	40–45	3–4	–	30–49
Coton	82.7–90	5.7	< 2	0–1	0.6	–
Ananas	70.7–73.6	9.9	7.5–11.1	–	–	–
Lin	62–72	18.6–20.6	2–5	2.3	1.5–1.7	5–10
Chanvre	68–74.4	15–22.4	3.7–10	0.9	0.8	2–6.2
Agave	60–77.6	4–28	8–13.1	–	0.5	–
Isora	74	–	23	–	1.09	–
Jute	59–71.5	13.6–20.4	11.8–13	0.2–0.4	0.5	8.0
Kénaf	31–72	20.3–21.5	8–19	3–5	–	–
Ortie	86	10	–	–	4	–
Palmier à huile	60–65	–	11–29	–	–	42–46
Ramie	68.6–85	13–16.7	0.5–0.7	1.9	0.3	7.5
Sisal	60–78	10.0–14.2	8.0–14	10.0	2.0	10–22

Tableau I-3 : Structure chimique de diverses fibres végétales [33].

1.6.5. Présence des fibres végétales en Algérie

La disponibilité des fibres végétales en Algérie est étroitement liée à plusieurs facteurs, notamment le climat, les caractéristiques géographiques et les pratiques agricoles. Le pays, situé au nord du Maghreb, dispose d'une diversité écologique remarquable allant des hauts plateaux et collines jusqu'aux zones sahariennes, ce qui favorise la présence d'une végétation variée incluant les pins, le coton, le lin, l'alfa, le liège, le palmier dattier et le doum.

Parmi les principales fibres végétales susceptibles d'être exploitées en Algérie, on peut citer :

1.6.5.1. Fibres d'alfa (*Stipa tenacissima*) : Plante typique des zones arides et semi-arides du bassin méditerranéen, l'alfa est particulièrement répandue en Algérie. Ses fibres sont traditionnellement utilisées dans la confection de cordages, tapis et objets artisanaux. Le pays compte près de 4 millions d'hectares consacrés à cette culture.

1.6.5.2. Fibres de palmier : L'Algérie dispose d'un important patrimoine de palmiers dattiers, estimé à dix millions d'arbres. Les fibres extraites des feuilles sont utilisées dans l'artisanat local, notamment pour fabriquer paniers, nattes et autres objets utilitaires.

1.6.5.3. Fibres de cactus : Certaines variétés de cactus présentes dans les régions sèches du pays fournissent des fibres employées localement pour la fabrication de produits artisanaux.

1.6.5.4. Fibres de lin et de chanvre : Bien que ces cultures soient moins fréquentes que dans d'autres régions, leur développement en Algérie est envisageable, ouvrant la voie à une production locale de fibres destinées à l'industrie textile ou à des applications composites.

1.6.5.5. Autres fibres locales : Selon la flore régionale, d'autres plantes sauvages ou cultivées peuvent également offrir des ressources fibreuses exploitables à l'échelle artisanale ou industrielle.

Il convient de noter que l'Algérie est le sixième producteur mondial de liège, avec une production annuelle estimée à environ 6 000 tonnes [34]. La distribution régionale de ces ressources naturelles varie selon les conditions pédoclimatiques et les techniques agricoles pratiquées.

Par ailleurs, les efforts de recherche et développement peuvent jouer un rôle déterminant dans la valorisation durable des fibres végétales locales, notamment à travers leur intégration dans des matériaux bio-composites ou dans des solutions innovantes en construction durable [35].

I.6.6. Techniques d'extraction des fibres végétales

L'extraction des fibres végétales est une étape essentielle dans la valorisation des plantes à fibres. Les méthodes employées varient en fonction de l'origine botanique des fibres, de leur emplacement dans la plante, ainsi que des propriétés recherchées (longueur, résistance, finesse). Voici les principales techniques couramment utilisées :

I.6.6.1. Défilage mécanique

Utilisée principalement pour le chanvre, le lin et le jute, cette méthode repose sur des opérations mécaniques telles que le battage, le broyage ou le peignage. Elle permet de détacher les fibres situées dans la tige des plantes par action physique à l'aide de machines spécialisées.

I.6.6.2. Rouissage (Retting)

Cette technique consiste à faire tremper les tiges dans l'eau, au sol ou dans des cours d'eau, pour décomposer les tissus pectiques qui lient les fibres au reste de la plante. Elle est fréquemment utilisée pour le lin, le chanvre et d'autres fibres libériennes.

I.6.6.3. Macération chimique ou enzymatique

Similaire au rouissage, la macération fait appel à des agents chimiques ou enzymatiques afin de ramollir les tissus entourant les fibres. Cette méthode est notamment utilisée pour des plantes comme la ramie, qui nécessite un traitement plus doux ou plus ciblé.

I.6.6.4. Écorçage manuel (Peeling)

Certaines fibres, comme celles du bambou, peuvent être extraites en retirant manuellement les couches externes de la tige pour accéder aux fibres internes. Ce procédé est simple mais demande beaucoup de main-d'œuvre.

I.6.6.5. Extraction thermique

Dans le cas de certaines fibres comme celles du cocotier (fibre de coco), l'utilisation de la chaleur est nécessaire pour séparer les fibres des composants lignocellulosiques de la plante.

I.6.6.6. Cardage

Le cardage intervient après l'extraction, notamment pour aligner les fibres mécaniquement. Cette opération améliore leur qualité en préparant les fibres pour les étapes suivantes (filature, fabrication de composites, etc.).

I.6.6.7. Séparation manuelle

Cette méthode traditionnelle est encore pratiquée, surtout pour les plantes à fibres courtes ou délicates. Elle consiste à extraire manuellement les fibres de la tige, assurant un meilleur contrôle de la qualité malgré une productivité plus faible [36] .

Le choix du procédé d'extraction dépend donc du type de plante, de l'usage prévu des fibres, et des caractéristiques recherchées. Grâce aux avancées techniques et à la recherche scientifique, ces procédés continuent de s'améliorer, offrant une meilleure efficacité et une préservation accrue des propriétés mécaniques des fibres.

1.6.7. Procédés de traitement des fibres végétales

Les fibres naturelles possèdent des groupes hydroxyle libres à leur surface, provenant principalement de l'hémicellulose et de la pectine, ce qui leur confère un caractère hydrophile

prononcé. De plus, la présence de substances cireuses et de pectine à l'état brut forme une couche protectrice qui masque les groupes fonctionnels réactifs, entravant ainsi l'adhésion entre les fibres et la matrice. Cette barrière altère le transfert des contraintes mécaniques dans les composites.

Principaux défis liés à l'utilisation des fibres naturelles dans les matrices cimentaires :

❖ **Absorption d'eau élevée :**

Les fibres végétales présentent une forte capacité d'absorption d'eau, ce qui peut compromettre la durabilité des composites. L'absorption d'humidité provoque un gonflement des fibres, entraînant la formation de microfissures et une fragilisation de la structure.

❖ **Dégradation biologique :**

Dans un environnement cimentaire, les fibres végétales subissent une dégradation partielle ou totale des composants amorphes (comme la pectine et l'hémicellulose), ce qui augmente la porosité autour des fibres et affaiblit l'adhésion fibre-matrice. Cette dégradation peut également perturber l'hydratation du ciment, conduisant à un durcissement moins efficace et à une cohésion réduite à long terme.

Traitement des fibres pour améliorer leurs performances

Pour surmonter ces défis, des traitements chimiques et physiques sont utilisés pour optimiser les propriétés des fibres. Les principales approches incluent :

❖ **Traitement hydrofuge (agents hydrophobes)**

Cette méthode vise à réduire l'absorption d'eau des fibres en les enduisant de produits chimiques formant une barrière contre l'humidité. Les avantages incluent :

- Réduction de l'absorption d'eau : améliorant la stabilité dimensionnelle et limitant la microfissuration.
- Amélioration de la durabilité : en minimisant les variations dimensionnelles et en réduisant la porosité de la zone de transition interfaciale.
- Optimisation des propriétés mécaniques : en maintenant la résistance des fibres et en assurant une meilleure adhésion à la matrice.

❖ Traitements chimiques pour renforcer l'adhésion fibre-matrice

Les traitements chimiques améliorent la surface des fibres par :

- Élimination de l'hémicellulose : réduisant l'hydrophilie et améliorant la stabilité en milieu humide.
- Libération des fibrilles de cellulose : améliorant la résistance à la traction et la flexibilité des fibres.
- Réduction de la teneur en lignine : augmentant la souplesse des fibres.
- Élimination des cires et huiles : rendant la surface plus rugueuse et propre, favorisant ainsi l'ancrage dans la matrice.

L'utilisation excessive de traitements alcalins, en particulier de soude concentrée (NaOH), entraîne une délignification et une détérioration des propriétés mécaniques des fibres, comme mentionné dans [37].

Le traitement des fibres végétales est une étape clé pour améliorer leurs performances dans les composites cimentaires. En réduisant l'absorption d'eau et en renforçant l'adhésion fibre-matrice, il est possible d'améliorer la durabilité et les propriétés mécaniques de ces matériaux. Toutefois, le choix des méthodes de traitement doit être judicieux pour éviter les effets néfastes sur la structure des fibres. Tableau I-3. Résultats des études sur les conséquences des traitements basiques sur les caractéristiques des fibres végétales.

Fibres	Traitements utilisés	Conclusions	Références
<i>Palmier dattier</i>	Traitement alcalin avec des solutions de 0,5 à 5 % de NaOH à 100°C durant 1 heure.	- 1 %, ce qui améliore la contrainte en la traction des fibres de 290 % comparé à la fibre non traitée. - Le traitement HCl réduit la contrainte de traction de 50% environ.	[38]

<i>Agave americana</i> L.	Acalinisation à 30°C pendant 1 heure avec des concentrations de 1 à 30 % de NaOH.	- Des concentrations de NaOH jusqu'à 2% accroissent l'indice de cristallinité de la fibre ; une réduction est observée au-delà de ce taux.	[39]
<i>Palmier dattier</i>	Traitement alcalin à l'aide de solutions de NaOH de 0 à 9 % durant 24 heures sous température ambiante.	6 % est le taux optimal, à partir duquel les fibres se détériorent. 6 % de NaOH permet d'obtenir une résistance maximale en traction.	[40]
<i>Balles de riz</i>	Traitement en milieu basique avec du NaOH à 4 % pendant 2 heures.	Élimination efficace de l'hémicellulose, réduite de 33 % à 12 % en poids. Augmentation de 47 % à 50 % du taux de cristallinité.	[41]
<i>Noix de Palmier à huile</i>	Alcalinisation avec 2 % de NaOH durant 30 minutes sous température ambiante.	Amélioration de la contrainte en traction passant de 52 à 64 MPa.	[42]
<i>Jute</i>	Alcalinisation avec des teneurs de 0,5 à 18% de NaOH à diverses températures et temps.	La contrainte en traction et l'allongement en rupture ont augmenté en fonction du traitement, jusqu'à atteindre des hausses de 50 % et 54 % pour une concentration de NaOH de 4 %.	[43]

I.6.8. Les fibres végétales des palmiers *Washingtonia filifera*

Les fibres végétales constituent une ressource naturelle diversifiée, parmi lesquelles celles extraites du palmier *Washingtonia filifera* sont largement utilisées comme déchets environnementaux (voir Figure I-8). De nombreuses études ont porté sur ces fibres, comme en témoignent leurs diverses applications [35, 44–45].

Le palmier-dattier est une plante à usages multiples, cultivée à la fois pour la consommation de ses fruits et pour sa remarquable capacité à s'adapter aux conditions climatiques arides et extrêmes. Ses dattes ainsi que ses différentes parties sont exploitées dans plusieurs domaines, notamment la construction, l'artisanat, la production d'énergie, ainsi que dans les applications thérapeutiques et cosmétiques.

La culture de ce palmier contribue également à la création d'un microclimat favorable au développement et à la préservation de diverses formes de vie végétale et animale, ce qui en fait un élément essentiel pour la stabilité et la durabilité des communautés vivant en zones désertiques.

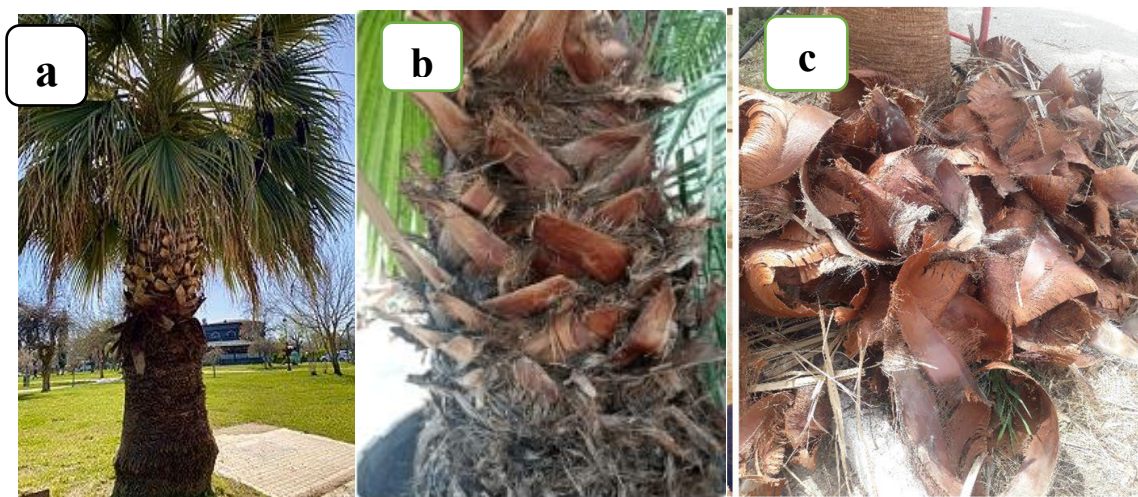


Figure I-9 : a) *Washingtonia filifera*, b) Tronc du palmiers *Washingtonia filifera* et c) Résidus du *Washingtonia filifera*.

1.6.9 Bénéfices et désavantages des fibres végétales

1.6.9.1. Avantages

Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées pour renforcer les matériaux composites en raison de leurs nombreuses propriétés environnementales et techniques. Les principaux avantages incluent :

- Durabilité environnementale
Les fibres végétales proviennent de ressources renouvelables et sont biodégradables. Leur production consomme moins d'énergie que celle des fibres synthétiques telles que la fibre de verre, ce qui en fait une alternative économique et écologique.
- Propriétés thermiques et acoustiques
Ces fibres possèdent de bonnes capacités d'isolation thermique et phonique, ce qui les rend intéressantes dans le domaine de la construction durable.
- Légèreté et flexibilité
Grâce à leur faible densité, les fibres végétales offrent d'excellentes propriétés spécifiques telles que l'absorption des chocs, la souplesse et la maîtrise de la fissuration. Ces propriétés varient selon l'origine et le type de fibre.
- Faible coût
En général, les fibres végétales sont plus économiques que certaines alternatives synthétiques, ce qui favorise leur utilisation dans les projets à budget limité.
- Disponibilité et simplicité de production
Les fibres végétales sont largement disponibles dans la nature et leur processus d'extraction et de traitement est relativement simple. Elles conviennent donc parfaitement aux applications de construction locales et durables.

L'intégration de ces fibres dans le développement de nouveaux matériaux favorise la synergie entre la technologie, la science et le design, contribuant ainsi à la création de produits innovants à fort impact socio-économique, tout en promouvant une approche fondée sur le développement durable [46].

1.6.9.2 Inconvénients

Malgré leurs nombreux atouts, l'utilisation des fibres végétales présente certaines limitations techniques qu'il convient de prendre en compte, notamment :

- Sensibilité à la température
Les fibres végétales possèdent une plage de température de traitement relativement étroite. Une exposition à des températures trop élevées peut entraîner leur dégradation et une perte de leurs performances mécaniques.
- Nature hydrophile
Les fibres végétales absorbent facilement l'humidité, ce qui entraîne un gonflement des parois cellulaires et crée un environnement propice à la formation de moisissures. De plus, cette caractéristique compromet la compatibilité avec la matrice cimentaire, causant une absorption excessive d'eau et des variations dimensionnelles, en particulier pour les fibres lignocellulosiques.

1.7 CARACTERISTIQUES DES COMPOSITES CIMENTAIRES FIBRES

1.7.1. Le rôle des fibres comme renfort dans la construction

La production des matériaux de construction, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur transformation, représente une source majeure d'impacts environnementaux négatifs. De plus, la fin de vie de ces matériaux, notamment lors de la démolition ou du démantèlement des structures, engendre une accumulation importante de déchets accompagnée d'émissions polluantes affectant l'air, l'eau et le sol.

Dans le but de réduire ces effets, une orientation scientifique croissante s'est développée en faveur de l'utilisation de matériaux de construction à base de fibres végétales, considérés comme des alternatives naturelles et durables. Ces matériaux se distinguent par leur abondance dans la nature, leur capacité à être recyclés, ainsi que leur biodégradabilité, sans générer d'impacts nocifs sur l'environnement. Ils contribuent également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, grâce à leur capacité à absorber le dioxyde de carbone au cours de leur cycle de vie.

Sur le plan sanitaire et fonctionnel, ces matériaux permettent de satisfaire les exigences de confort à l'intérieur des bâtiments, tout en préservant la santé humaine. Ils constituent ainsi une solution adaptée pour la mise en œuvre de milieux de vie durables et écologiques.

Dans ce contexte, la Figure I-10 illustre une comparaison de l'empreinte environnementale de divers matériaux de construction, en termes d'énergie grise. Les données montrent que le béton végétal à base de chanvre présente l'empreinte la plus faible, ce qui en fait une option prometteuse pour le secteur du bâtiment durable [34].

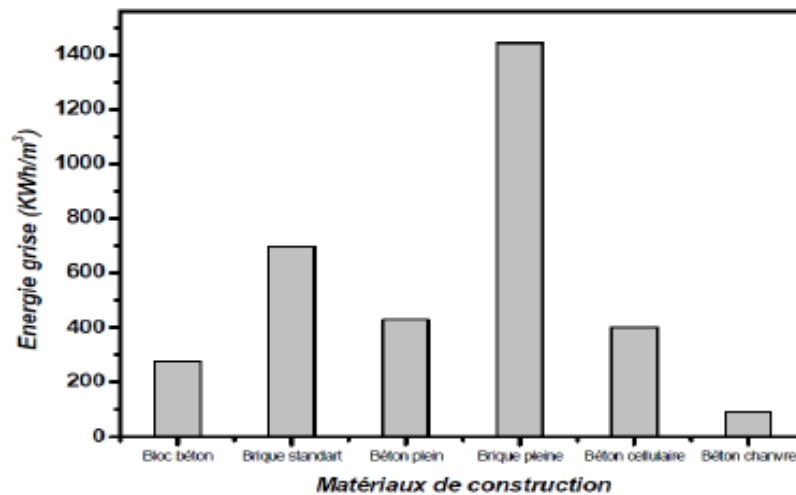


Figure I-10: Energie grise employés dans les matériaux du secteur de la construction [47]

Les fibres végétales, telles que le chanvre, le lin, le jute, le bois, la paille, les fibres de palmier dattier et le sisal, sont utilisées comme renforts dans les composites à base de ciment dans le secteur de la construction. Des études ont montré que ces fibres jouent un rôle crucial dans le renforcement des matériaux fragiles, en améliorant leur résistance à l'effondrement. Historiquement, elles ont été employées pour améliorer les mélanges traditionnels, augmentant ainsi leurs propriétés structurelles [48].

Les recherches récentes indiquent que l'intégration des fibres végétales dans le béton contribue de manière significative à améliorer la ductilité, augmentant ainsi l'efficacité du matériau après la formation de fissures [50].

De plus, la présence de fibres renforce la résistance du béton à différents types de charges, y compris les forces de cisaillement, de flexion, de fatigue et de torsion, permettant ainsi de maintenir la cohésion structurale du béton même après la fissuration. Cette approche suscite un intérêt croissant dans l'industrie, en raison des recherches approfondies menées sur le sujet [49].

L'efficacité de ce renforcement dépend de plusieurs facteurs, dont le type de fibres, leurs propriétés physiques et mécaniques, leur quantité dans le mélange et leur interaction avec la pâte de ciment.

En outre, les fibres contribuent à contrôler l'évolution des fissures dues au retrait, en favorisant la formation de fissures plus petites et mieux réparties, ce qui améliore la performance du béton à long terme [51].

1.7.2. Influence de la présence de fibres sur les caractéristiques rhéologiques

À l'instar des autres adjuvants, l'incorporation de fibres induit des modifications dans les propriétés des matériaux cimentaires au cours de la phase d'hydratation. Toutefois, ces aspects, ainsi que les méthodes de traitement associées, demeurent largement inexplorés, avec un nombre limité d'études disponibles dans ce domaine [52].

Lorsqu'elles sont utilisées en faibles proportions, les fibres n'affectent généralement pas l'ouvrabilité du béton, et leur répartition au sein du mélange reste homogène. Néanmoins, au-delà d'un seuil critique, les interactions entre les fibres deviennent plus marquées, ce qui peut entraîner la formation d'agrégats ou de touffes fibreuses [52].

Divers facteurs liés à la nature des fibres peuvent influencer l'ouvrabilité à l'état frais, notamment le taux d'incorporation, la longueur, la forme ainsi que la flexibilité des fibres [53]. Une étude rhéologique a mis en évidence que les fibres rigides augmentent la résistance à l'écoulement du béton frais, entravant ainsi sa fluidité [54].

Par ailleurs, les résultats de cette recherche ont démontré une corrélation significative entre l'orientation des fibres et la résistance à la flexion. En effet, une disposition alignée des fibres dans une direction donnée tend à réduire la contrainte de rupture, tout en favorisant l'apparition de fissures multiples sous l'effet d'une sollicitation en flexion [54].

1.7.3. Influence des fibres sur les propriétés physiques et mécaniques des biocomposites

Les biocomposites représentent une solution prometteuse dans le domaine de la construction durable. Ils sont généralement constitués d'une matrice (souvent à base de ciment ou de polymère) et de fibres naturelles de renforcement, dont la combinaison permet d'obtenir des performances mécaniques améliorées par rapport aux constituants pris isolément. Cette synergie structurelle confère aux matériaux des propriétés physiques et mécaniques élevées, telles qu'une bonne résistance en flexion, une légèreté remarquable et une excellente tenue aux hautes températures et aux vibrations [52].

Les performances de ces matériaux dépendent de plusieurs facteurs, notamment la morphologie des fibres (courtes ou longues), leur mode de distribution (aléatoire ou tissé), ainsi que leur nature (souple ou rigide). Les propriétés mécaniques et la structure fibreuse sont ainsi des critères déterminants pour leur classification [53].

Actuellement, l'usage des fibres naturelles comme substitut aux fibres synthétiques, telles que les fibres de verre ou l'amiante (reconnue comme substance cancérogène), connaît un essor significatif dans les pays industrialisés, notamment dans le secteur automobile pour la fabrication de pièces et accessoires légers et écologiques [53].

Bien que l'utilisation des fibres végétales dans les matériaux de construction remonte à des pratiques anciennes, leur intégration dans des matrices à base de ciment constitue une approche relativement récente. Cette démarche vise principalement à améliorer la résistance à la flexion des matériaux composites cimentaires et à limiter la propagation des fissures, permettant ainsi de produire des matériaux plus *ductiles* [54]. L'augmentation de la ductilité se traduit par une meilleure capacité à absorber les efforts sans rupture fragile.

En outre, l'ajout de fibres végétales améliore considérablement les propriétés d'isolation thermique et acoustique des matériaux, contribuant ainsi à la création de solutions écologiques multifonctionnelles répondant aux exigences de la construction durable.

La Figure I-11 illustre des exemples d'applications innovantes de bio-composites renforcés par des fibres de bambou, mettant en évidence leur potentiel dans divers domaines tels que les panneaux architecturaux, les matériaux isolants et l'aménagement intérieur [54].



Figure I-11 : Applications novatrices des bio composites à base de fibres de bambou au sein de l'aéroport de Madrid-Barajas [55].

L'ajout de fibres végétales à un composant minéral peut entraîner une réduction de l'ouvrabilité du mélange, un phénomène qui peut être compensé en ajustant le rapport eau/liant ou en utilisant des superplastifiants, comme le souligne [35]. Plusieurs études ont démontré que l'incorporation de fibres végétales ralentit la prise du matériau. Selon Fisher, ce retard est spécifiquement lié à la transformation des glucides solubles en acides sacchariniques, lesquels agissent comme des agents retardateurs de la prise [56]. Cette hypothèse est également soutenue par Reading, qui suggère que l'absorption du ciment pourrait être entravée par les oligosaccharides produits lors de la dégradation de l'hémicellulose dans un environnement basique [57].

Pour atténuer les effets de l'agglomération des fibres, certaines mesures peuvent être appliquées durant le processus de mélange. Par exemple, l'ajout progressif des fibres à la fin de l'opération de mélange, une fois que les autres composants ont été soigneusement incorporés, permet de réduire la formation de boulettes de fibres et d'améliorer l'homogénéité du mélange.

Bahloul et al. [58] se sont intéressés aux propriétés physiques et mécaniques des composites cimentaires renforcés par des fibres de cellulose extraites de la plante d'alfa. Leurs résultats ont montré que la résistance à la compression diminue progressivement avec l'augmentation de la teneur en fibres dans le mortier. Cette baisse est attribuée à l'augmentation du taux de vides dans la matrice cimentaire, induite par la présence des fibres, ce qui entraîne une réduction de la compacité et de la densité structurelle du matériau. De plus, une valeur de conductivité thermique λ proche de 0,8 W/m.°C a été enregistrée, ce qui s'approche des performances des matériaux isolants thermiques. De leur côté, Sedan et al. [56] ont étudié les interactions physico-chimiques entre les fibres de chanvre et la matrice cimentaire, ainsi que leur influence sur les performances mécaniques du mélange obtenu. Les résultats ont révélé une amélioration notable de la résistance à la flexion, variant de 4,9 MPa pour le béton classique à 6,8 MPa pour les composites contenant 16 % de fibres de chanvre.

Par ailleurs, une étude menée par Dawood et al. [59] a analysé l'effet de l'incorporation de fibres de palmier à huile de 3 cm de long, à des fractions volumiques variant entre 0,25 % et 1,0 % de la masse de ciment, sur les propriétés mécaniques du mortier. Après 90 jours de cure, les résultats ont mis en évidence une amélioration de 12 % de la résistance à la compression et de 21 % de la résistance à la flexion lorsque la teneur en fibres atteint 0,5 %. Au-delà de ce seuil, une légère diminution des performances mécaniques a été observée, expliquée par l'augmentation de la porosité due à une concentration plus élevée en fibres dans le mélange.

1.8. CONCLUSION

À la fin de cette étude bibliographique, l'accent a été mis sur l'importance du sable des dunes et du sable recyclé dans l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires. Le sable des dunes, grâce à ses excellentes propriétés mécaniques, constitue une alternative idéale aux granulats traditionnels dans les mortiers cimentaires, contribuant ainsi à réduire l'impact environnemental lié à l'extraction des matières premières. D'autre part, le sable recyclé représente une option durable qui permet de réduire les déchets, tout en minimisant la nécessité d'extraire des matériaux naturels, ce qui joue un rôle essentiel dans la durabilité de l'industrie de la construction.

De plus, le sable recyclé améliore les propriétés mécaniques du béton en termes de rigidité et de résistance, tout en contribuant également à l'isolation thermique. Lorsque ce sable est combiné avec des fibres végétales telles que les fibres d'alfa, le chanvre, les fibres de palmier à huile, ainsi que les fibres d'*Washingtonia filifera*, cela renforce les performances mécaniques des mortiers, notamment en résistance à la compression et à la flexion.

Les fibres d'*Washingtonia filifera*, caractérisées par leur haute résistance et flexibilité, constituent une addition efficace pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires. Ces fibres aident à augmenter la durabilité et la résistance aux fissures, tout en contribuant à améliorer l'isolation thermique et le comportement du matériau après fissuration.

Du point de vue de la durabilité, l'intégration des fibres végétales telles que les fibres d'*Washingtonia filifera* avec du sable des dunes et du sable recyclé représente une solution idéale, permettant d'obtenir des matériaux de construction plus performants tout en réduisant leur impact environnemental. Cette approche s'inscrit dans les tendances du bâtiment durable et contribue à la réduction de l'empreinte écologique des matériaux de construction.

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1 Introduction

L'utilisation rationnelle des matériaux récupérés dans le domaine de la construction nécessite une compréhension approfondie de leurs propriétés fondamentales, notamment leurs caractéristiques mécaniques, physiques, chimiques, afin de les adapter efficacement à de nouveaux usages. Dans ce contexte, ce travail vise à valoriser le sable de dunes, ressource abondante dans les régions désertiques, en tant que substitut partiel ou total aux sables alluviaux, dont les réserves s'amenuisent en raison de l'exploitation excessive.

Par ailleurs, cette étude s'attache à intégrer des granulats recyclés issus de la démolition de bétons usagés, dans une démarche visant à réduire la consommation de ressources naturelles et à limiter l'impact environnemental des déchets de construction. Elle prend également en considération l'utilisation de fibres végétales issues du *Washingtonia filifera* (WF), en vue d'améliorer les performances du mortier, notamment en matière de résistance mécanique et de cohésion structurelle.

Afin d'atteindre ces objectifs, un programme expérimental complet a été mis en place. Il repose sur la caractérisation des matériaux constituant le mortier : ciment, sable de dune, sable recyclé, eau de gâchage, et fibres végétales. Ces caractérisations englobent l'étude des propriétés physiques et mécaniques, dans le but de comprendre le comportement des matériaux lorsqu'ils sont combinés dans une matrice cimentaire.

Une série d'essais en laboratoire a également été menée pour évaluer les performances du mortier à l'état frais (ouvrabilité, masse volumique) et à l'état durci (résistance à la compression, rigidité), dans l'objectif d'aboutir à une formulation équilibrée alliant performance technique et durabilité environnementale.

Grâce à cette approche scientifique rigoureuse, il devient possible de mieux appréhender les interactions entre les différents constituants du mortier bio-composite et leur influence sur son comportement global, constituant ainsi une base solide pour le développement de matériaux de construction innovants, efficaces et écologiquement responsables.

II.2 Matériaux utilisés

Afin de confectionner les échantillons de l'éco-mortier, nous avons utilisé du ciment, des granulats (constitués de sable de dunes et de sable recyclé), de l'eau de gâchage, ainsi que des fibres végétales de *Washingtonia filifera*. Les propriétés de ces échantillons sont présentées dans la suite du chapitre.

II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment de type CEM I 42.5N-SR3LH, produit provenant de l'usine « SPA BISKRIA CIMENT » à Biskra Algérie (Voir l'annexe). Il est principalement composé de clinker ($\geq 95\%$) et est conforme à la norme ASTM C150 [60]. Et la norme algérienne NA 442-2013 [61]. Ce type de ciment est destiné aux ouvrages de bâtiment et de génie civil nécessitant des résistances mécaniques élevées à court terme. En effet, il présente une résistance à la compression de 18 MPa à 2 jours et de 54 MPa à 28 jours. Les caractéristiques physico-mécaniques et la composition chimique du ciment sont présentées dans le Tableau II.1, conformément aux résultats fournis et validés par le laboratoire du fabricant.

Catégorie	Propriété	Valeur
Analyses chimiques (%)	Perte au feu	< 3
	Teneur en sulfates (SO ₃)	2.2 – 2.6
	Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	< 3.5
	Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	< 0.04
	Résidu insoluble	≤ 0.75
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	C3S	60
	C3A	< 3
	C4AF + 2 C3A	< 20

Propriétés physiques	Consistance normale (%)	26.5
	Expansion à chaud (mm)	< 1
Temps de prise (min)	Début de prise	180
	Fin de prise	320
Résistance à la compression	2 jours (MPa)	18
	28 jours (MPa)	54

Tableau II.1 Récapitulation des caractéristiques de ciment.

II.2.2. Sable de dune

Le sable utilisé dans cette étude est un sable de dune roulé (SD) à teinte dorée, présentant une granulométrie comprise entre 0,063 mm et 1,25 mm. Il est extrait de la région d'Oued Souf, plus précisément de la commune de Bayadha, située dans la wilaya d'El-Oued (Algérie), comme illustré dans la Figure II-1. Les principales caractéristiques physiques de ce sable sont présentées dans le Tableau II-2.



Figure II-1 : Sable de dune

II.2.3 Sable recyclé

Le second sable utilisé est un sable recyclé (SR), issu du béton démoli, et se distingue par sa forme angulaire. De couleur grise, il a été utilisé comme agrégat de correction dans toutes les formulations, avec une granulométrie comprise entre 0,063 mm et 5 mm. Ce sable a été obtenu à partir d'éprouvettes de béton préalablement écrasées, fournies par le laboratoire NIZO LAP situé dans la wilaya d'El Oued. L'opération de concassage a été réalisée à l'aide d'une toloneuse (ou meule industrielle), sous la supervision du technicien en soudure Jamel Laibidi, puis tamisée à l'aide d'un tamis de 5 mm, comme illustré dans la Figure II-2. Ses propriétés physiques sont présentées dans le Tableau II-2.



Figure II-2 : Sable recyclé

<u>Propriétés</u>	<u>Sable recyclé</u>	<u>Sable de dune</u>
<u>Masse volumique absolue (g/cm³)</u>	2.45	2.6
<u>Masse volumique apparente (g/cm³)</u>	1.46	1.55
<u>Absorption d'eau (%)</u>	0.4	1.2
<u>Module de finesse</u>	3.01	2.19
<u>Équivalent de sable visuel (%)</u>	86	98.82
<u>Équivalent de sable par piston (%)</u>	82	97
<u>Forme</u>	<u>angulaire</u>	Roulé

Table II.2 Propriétés physiques des granulats utilisé

II.2.4 Fibre *Washingtonia filifera*

La fibre végétale utilisée dans cette étude est issue du tronc de *Washingtonia filifera* (WFW), illustrée en Figure II-4, cultivée localement dans la wilaya d'El Oued (Algérie). Les WFW ont été prélevées manuellement du tronc des palmiers sous forme de mailles, séparées en fibres individuelles, puis soigneusement lavées à l'eau distillée pour éliminer les impuretés. Elles ont ensuite été coupées à une longueur de $15 \text{ à } 20 \pm 4 \text{ mm}$ (Figure II-5) et, après séchage à l'air ambiant, désignées sous l'appellation NFWF.

Afin d'améliorer leurs performances mécaniques et leur adhérence à la matrice, les fibres ont subi un traitement alcalin à l'hydroxyde de sodium (NaOH). Elles ont été immergées dans des solutions de NaOH aux concentrations de 1,5 %, 2,5 % et 3,5 %, pendant des durées de 3 h et 6 h. Puis, elles ont été soigneusement rincées à l'eau distillée afin d'éliminer les traces du solution d'hydroxyde de sodium. Les fibres ont ensuite été laissées sécher à l'air libre à température ambiante avant d'être stockées en vue de leur utilisation dans les mélanges.

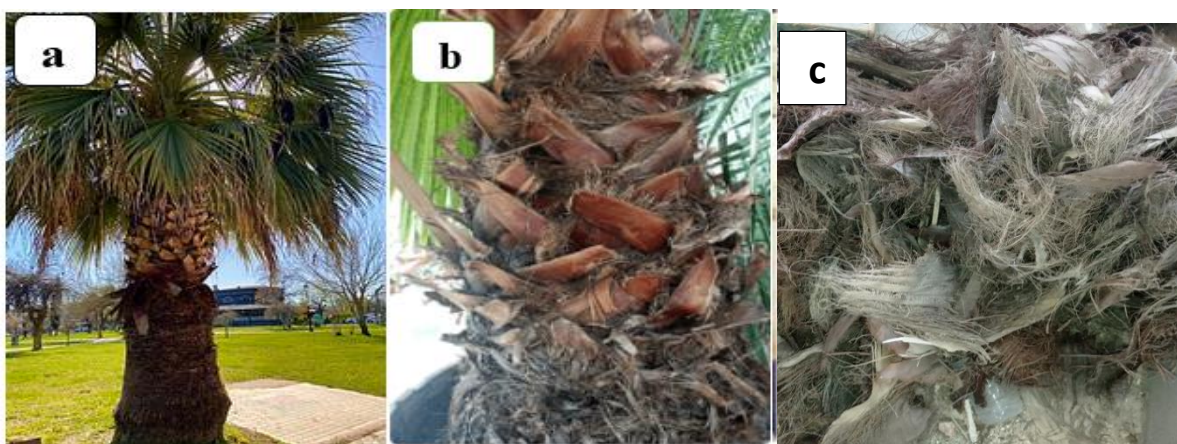


Figure II-3. Plante *Washingtonia filifera* avec la zone sélectionnée et la maille de déchets WF.



Figure II.4. (a) Faisceau de fibres, (b) Fibres traitées au NaOH. (c) Morceaux de fibres lavées à l'eau distillée

II.2.5 Eau de gâchage

L'eau de gâchage pour cette étude est l'eau du robinet du réseau d'eau algérien de la wilaya d'El Oued

II.3 Caractérisation des Matériaux utilisés

II.3.1 Analyse granulométrique

Le tamisage manuel à sec a été utilisé pour analyser la distribution granulométrique du sable de dune et du sable recyclé, conformément à la norme NF EN 933-2 [62]. Afin de faciliter la comparaison entre les deux types de sable, leurs courbes granulométriques ont été regroupées dans la Figure II-5.

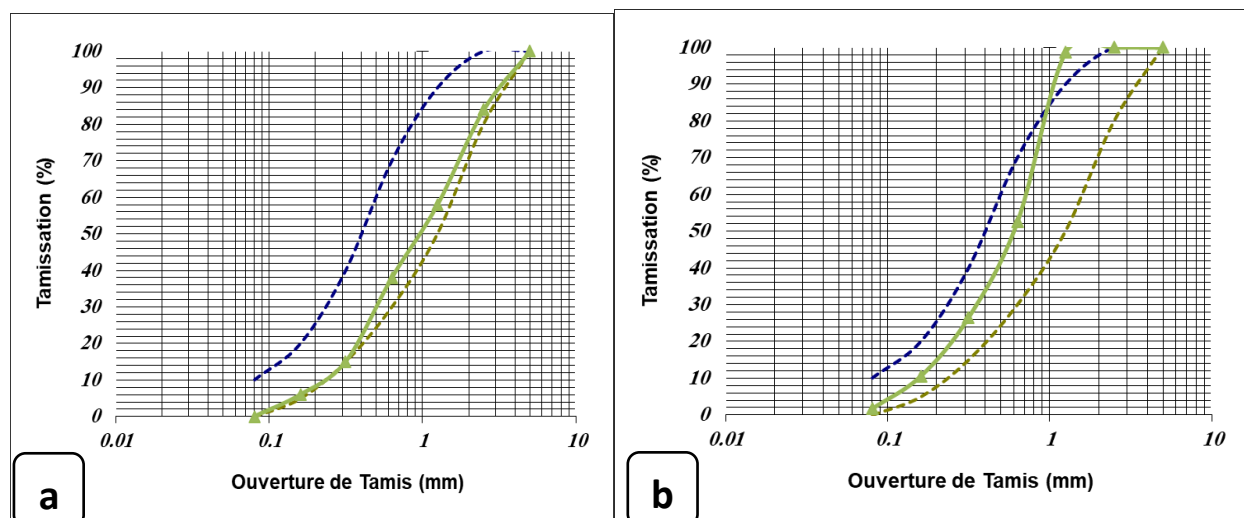


Figure II-5. Courbe granulométrique du sable utilisé (a) sable recyclé. (b) sable de dune.

II.3.2 Masses volumiques et absorption d'eau

Les masses volumiques absolues (ρ_{abs}) et apparentes (ρ_{app}) des granulats ont été déterminées conformément aux prescriptions des normes NF P18-555 [63] et NF EN 1097-6 [64], comme illustré à la Figure II-6.

Concernant la détermination de l'absorption d'eau du sable, la procédure adoptée peut différer selon les normes ou protocoles expérimentaux appliqués. Dans cette étude, un échantillon représentatif de sable a été soigneusement sélectionné, puis séché dans un four à 110 °C jusqu'à obtention d'un poids constant. Ce poids à l'état sec a été noté **P1**. Après refroidissement à température ambiante, l'échantillon a été tamisé pour garantir une granulométrie homogène, puis immergé complètement dans l'eau pendant 24 heures.

À l'issue de cette période, l'échantillon a été retiré avec précaution, en éliminant l'excès d'eau à sa surface sans perturber sa teneur interne en humidité, puis pesé immédiatement. Ce poids à l'état saturé a été noté **P2**. L'absorption d'eau a ensuite été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Absorption d'eau (\%)} = [(P2 - P1) / P1] \times 100$$

Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau II-2.

II.3.3 Equivalant de sable et module de finesse

Dans le but d'évaluer la qualité des granulats utilisés, l'essai de l'équivalent de sable (ES) a été réalisé sur les fractions granulaires 0/5 mm, conformément à la norme NF P 18-598 [65] (voir Figure II-6). Ce test permet d'apprécier la propreté du sable en quantifiant la proportion de particules fines, généralement d'origine argileuse, organique ou végétale, qui peuvent enrober la surface des grains.

En complément, un autre paramètre représentatif de la granulométrie des particules inférieures à 0,16 mm a été considéré : le module de finesse (Mf). Ce dernier donne une indication sur la répartition granulaire du sable, un Mf faible traduisant une teneur élevée en éléments fins. Le calcul du module de finesse a été effectué à l'aide de l'équation (1), conformément aux normes NF P 18-545, NF P 18-560 et NF EN 12620 [66].

$$Mf = \frac{1}{100} \sum Refus_{cumulé}(\%) \text{ des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\} \quad (1)$$



Figure II-6 : Mesure de la masse volumique des granulats, l'équivalent de sable et tamisage des granulats.

II.3.4 Traitement de la fibre WFW

Le traitement des fibres naturelles est essentiel pour améliorer la durabilité des matériaux composites ainsi que leurs propriétés hydrothermiques et mécaniques. Ces améliorations sont souvent attribuées à l'optimisation de la liaison entre la matrice et les fibres. Malgré l'existence de différentes méthodes de traitement des fibres naturelles, notre choix s'est porté exclusivement sur un traitement alcalin à l'hydroxyde de sodium (NaOH) pour les besoins de cette étude Figure II-7 Selon la composition chimique (Voir l'annexe). Le traitement alcalin des fibres est largement reconnu pour son efficacité à augmenter leur adhésion avec la matrice. En exposant les fibres à une solution alcaline, telle que NaOH, les groupes hydroxyles de la surface des fibres sont activés, favorisant ainsi l'adhésion et la pénétration de la matrice cimentaire. Ce processus permet non seulement de renforcer les interactions entre la matrice et les fibres, mais également de réduire la susceptibilité à l'humidité et aux attaques chimiques, améliorant ainsi la durabilité globale du composite. Bien que d'autres méthodes de traitement puissent être explorées, telles que le traitement thermique ou le traitement chimique, le traitement alcalin offre une approche efficace et économique pour améliorer les performances des fibres végétales dans les bio composites cimentaires [73].



Figure II-7. Hydroxyde de sodium NaOH.

Dans cette étude, des fibres *Washingtonia filifera* ont été incorporées aux mortiers à des taux de 1 %, 1,5 % et 2 % en poids de liant. Afin d'améliorer leurs propriétés d'adhérence avec la matrice cimentaire, ces fibres ont été soumises à un traitement alcalin à base d'hydroxyde de sodium (NaOH) selon trois concentrations différentes : 1,5 %, 2,5 % et 3,5 %. Les immersions ont été réalisées dans 2 litres de solution pour chaque condition, pendant des durées de 3 heures et 6 heures.

II.4 Méthodes d'essais

Après avoir effectué la caractérisation des matières premières, cette section se concentre sur les diverses techniques de mesure employées pour caractériser les éco-mortiers la fois à l'état frais et à l'état durci. Afin de sélectionner les compositions de mortier qui seront étudiées pour leurs caractéristiques physico-mécaniques et leur durabilité

II.4.1 Formulation et fabrication des éprouvettes d'essai

Une étude préliminaire a été menée sur un mélange de référence constitué de ciment ($C = 450$ g), de sable de dune (SD) et de sable recyclé (SR) utilisé à 100 %, afin d'obtenir une consistance plastique avec un étalement compris entre 140 et 200 mm. Après plusieurs essais, et en tenant compte de la masse volumique des solides dans les cas de remplacement, le rapport eau/ciment (E/C) a été fixé à 0,53 pour l'ensemble des formulations.

Dans cette phase de l'étude, un total de 24 formulations de bio-mortiers ont été préparées. Cela inclut trois échantillons de référence : l'un avec uniquement du sable de dune (SD), un second avec du sable recyclé (SR), et un troisième avec un mélange des deux sables (SM). À cela s'ajoutent

trois bio-mortiers contenant des fibres non traitées aux taux de 1 %, 1,5 % et 2 %. Enfin, 18 bio-mortiers ont été élaborés avec le sable mixte (SM) et des fibres traitées chimiquement à la soude (NaOH), selon trois concentrations différentes (1,5 %, 2,5 % et 3,5 %) et pour deux durées d'immersion (3 et 6 heures). Ces traitements visaient à améliorer l'adhérence des fibres à la matrice ainsi que les propriétés physico-mécaniques des bio-mortiers

	ORDRE	% de fibre	% de NaOH	Temps d'immersion (h)	sable de dune (g)	Sable recyclé (g)	Eau (g)	E/C %	Ciment (g)	WF (g)
Mortier de contrôle	SD	/	/	/	1350	/	238.5	0.53	450	/
	SR	/	/	/	/	1350	238.5	0.53	450	/
	SM	/	/	/	769.5	580.5	238.5	0.53	450	/
Bio-mortiers/WFW non traitée	1 WFN	1	/	/	769.5	580.5	238.5	0.53	445.5	4.5
	1.5 WFN	1.5	/	/	769.5	580.5	238.5	0.53	443.25	6.75
	2 WFN	2	/	/	769.5	580.5	238.5	0.53	441	9
Bio-mortiers/ WFW traitées	1 - 1.5 / 3	1	1.5	3	769.5	580.5	238.5	0.53	445.5	4.5
	1 - 1.5 / 6	1	1.5	6	769.5	580.5	238.5	0.53	445.5	4.5
	1 - 2.5 / 3	1	2.5	3	769.5	580.5	238.5	0.53	445.5	4.5
	1 - 2.5 / 6	1	2.5	6	769.5	580.5	238.5	0.53	445.5	4.5
	1 - 3.5 / 3	1	3.5	3	769.5	580.5	238.5	0.53	445.5	4.5
	1 - 3.5 / 6	1	3.5	6	769.5	580.5	238.5	0.53	445.5	4.5
	1.5 - 1.5 / 3	1.5	1.5	3	769.5	580.5	238.5	0.53	443.25	6.75
	1.5 - 1.5 / 6	1.5	1.5	6	769.5	580.5	238.5	0.53	443.25	6.75
	1.5 - 2.5 / 3	1.5	2.5	3	769.5	580.5	238.5	0.53	443.25	6.75
	1.5 - 2.5 / 6	1.5	2.5	6	769.5	580.5	238.5	0.53	443.25	6.75
	1.5 - 3.5 / 3	1.5	3.5	3	769.5	580.5	238.5	0.53	443.25	6.75
	1.5 - 3.5 / 6	1.5	3.5	6	769.5	580.5	238.5	0.53	443.25	6.75
	2 - 1.5 / 3	2	1.5	3	769.5	580.5	238.5	0.53	441	9
	2 - 1.5 / 6	2	1.5	6	769.5	580.5	238.5	0.53	441	9
	2 - 2.5 / 3	2	2.5	3	769.5	580.5	238.5	0.53	441	9
	2 - 2.5 / 6	2	2.5	6	769.5	580.5	238.5	0.53	441	9
	2 - 3.5 / 3	2	3.5	3	769.5	580.5	238.5	0.53	441	9
	2 - 3.5 / 6	2	3.5	6	769.5	580.5	238.5	0.53	441	9

Table II.3 Les différents formulation des mortiers étudiés.

II.4.2 Préparation des échantillons d'essai

Les expérimentations sont menées en utilisant des échantillons prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³.

Après avoir terminé le processus de malaxage pour chaque formulation, nous avons procédé immédiatement à la réalisation des essais de caractérisation à l'état frais, à savoir l'étalement et la masse volumique, comme illustré respectivement dans la Figure II-8 (a et b).

Une fois les moules remplis, l'excédent de mortier a été nivelé et la surface égalisée à l'aide d'une truelle (Figure II-9).

Les moules contenant le mortier frais ont ensuite été conservés à la température ambiante du laboratoire jusqu'au moment du démoulage, qui a été effectué après 24 heures. Les éprouvettes ainsi obtenues ont été conservées dans l'eau (Figure II-10) pendant une période de 28 jours.

Il est important de noter que pour chaque mélange de mortier, six éprouvettes ont été préparées : trois pour les essais physiques et trois pour les essais mécaniques.

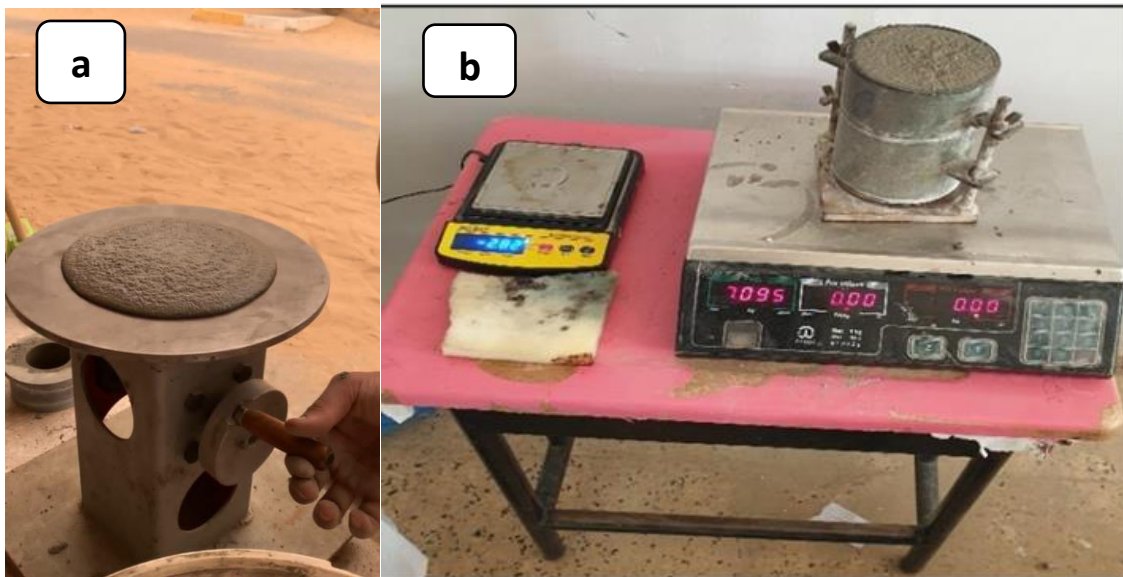


Figure II-8 : Les essais à l'état frais, (a) l'étalement, (b) la masse volumique.

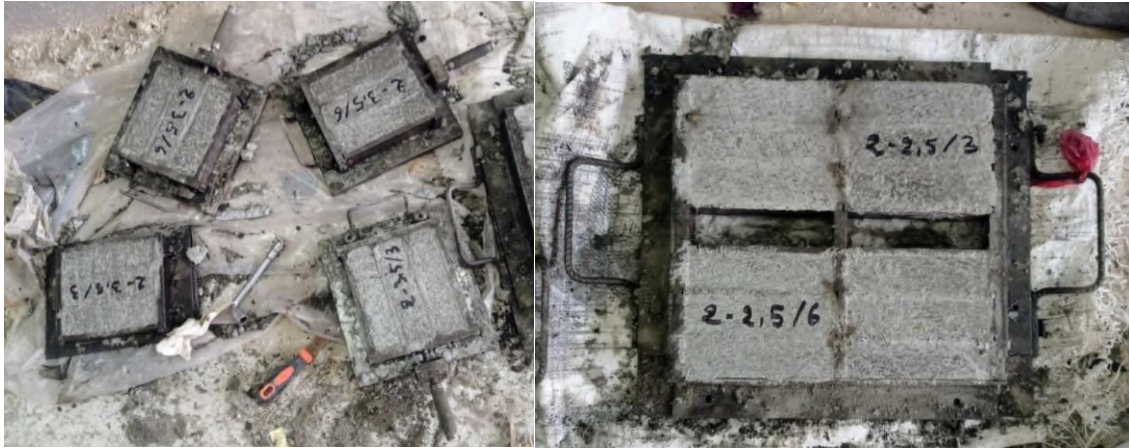


Figure II-9 : Nivellement de la surface du mortier avec une truelle.



Figure II-10 : Conservation des échantillons d'essai dans l'eau.

II.5. Méthodologie expérimentale

Techniques expérimentales La méthodologie expérimentale adoptée dans cette étude vise à évaluer les propriétés mécaniques, physiques ainsi que la durabilité des éco-mortiers, en utilisant le sable de dunes, le sable recyclé, ainsi qu'un mélange des deux comme constituants principaux. Ces formulations ont été renforcées par des pourcentages variables de fibres végétales, traitées ou non, en tant que substitution partielle du ciment. Les performances obtenues sont ensuite comparées à celles du mortier de référence, après un cure dans l'eau pendant 28 jours.

II.5.1. Caractéristiques physico-mécaniques

II.5.1.1. A l'état frais

II.5.1.1.1 Essai d'étalement

La mesure d'étalement a pour but de déterminer la consistance du mortier à l'état frais. Cet essai a été réalisé conformément à la norme NF EN 12350-5, en utilisant un petit cône tronqué aux dimensions suivantes : $D_0 = 100$ mm, $D_1 = 70$ mm, et hauteur = 60 mm.

Trois essais au minimum ont été réalisés pour chaque mélange, afin d'assurer la fiabilité des résultats. Le diamètre de l'étalement a été mesuré dans deux directions perpendiculaires (d_1 et d_2) sur la plaque de silicium. La valeur finale de l'étalement est obtenue en calculant la moyenne arithmétique de ces deux mesures, exprimée en millimètres.

Déroulement de l'essai :

- Le cône est rempli en deux couches successives, chacune compactée par 10 coups de pilon afin d'obtenir une bonne homogénéité du mélange dans le moule.
- L'excès de matériau est ensuite éliminé à l'aide d'une règle métallique.
- Le cône est ensuite soulevé doucement et verticalement.
- La table à secousses est immédiatement activée pour effectuer 15 chocs à raison d'un par seconde.

La Figure II-11 illustre les étapes de la procédure de mesure de l'étalement.



Figure II.11. Mesure d'étalement à table de choc.

Propriété de consistance	Valeurs d'étalement en mm
Mortier raide	< 140
Mortier plastique	Entre 140 et 200
Mortier fluide	> 200

Table II.4 Valeurs d'étalement NF EN 1015-6 [67].

II.5.1.1.2 Mesure de la masse volumique à l'état frais

La détermination de la masse volumique du mortier frais se réalise selon les étapes suivantes :

1. **Préparation de l'échantillon** : Un échantillon frais est prélevé et préparé conformément aux spécifications de l'essai, comme illustré dans la Figure II-12.
2. **Pesée de l'échantillon** : L'échantillon est pesé avec précision à l'aide d'une balance de laboratoire adaptée, et la masse est enregistrée.
3. **Mesure du volume** : Le volume du récipient utilisé pour contenir l'échantillon est mesuré.
4. **Calcul de la masse volumique** : La masse volumique ρ est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

ρ : la masse volumique, en kg/m³ ;

V : le volume du récipient, en m³.

m₁ : la masse du récipient vide, en kg

m₂ : la masse du récipient entièrement rempli serré à refus, en kg ;



Figure II-12. Mesure de la masse volumique de bio-mortier.

II.5.1.2. A l'état durci

II.5.1.2.1 Essais d'auscultation dynamique (essai ultrasonique)

L'essai ultrasonique est une méthode non destructive couramment utilisée pour évaluer les caractéristiques internes des matériaux cimentaires. Il repose sur la transmission d'une onde acoustique émise par un transducteur à travers le matériau, puis la réception de cette onde par un capteur placé à l'extrémité opposée. Le temps de transit de l'onde entre les deux extrémités est mesuré afin de calculer la vitesse de propagation ultrasonique.

Cet essai, réalisé selon la norme NF EN 12504-4 [71], est appliqué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, préalablement conservées dans l'eau pendant 28 jours. Avant la mesure, les éprouvettes sont séchées dans une étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

La vitesse de l'onde ultrasonique ainsi obtenue est directement liée à la compacité du matériau : une vitesse plus élevée indique généralement une plus grande densité, une meilleure homogénéité, et un module d'élasticité supérieur, traduisant une résistance mécanique plus élevée.

Les mesures sont effectuées à l'aide d'un appareil de marque "Controls", comme illustré dans la Figure II-13. Les critères d'interprétation des résultats sont détaillés dans le Tableau II-5, permettant une évaluation qualitative et comparative de la qualité interne des mortiers étudiés.



Figure II-13 : Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique

le calcul de la vitesse de propagation, selon l'expression suivante :

$$V = \frac{L}{T}$$

Avec : V: Vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau en (m/s).

L: Distance qui sépare l'émetteur du récepteur en (m).

T : Durée de transmission en (µsec).

Le Tableau II-5 présente une classification typique de la qualité du béton à l'aide de mesures de vitesse d'impulsion ultrasonore. Pour un mélange particulier, la relation dépend de l'âge du béton, des conditions de mûrissement et de la teneur en humidité locale.

UPV : m/s	> 4500	3500 - 4500	3000 - 3500	2000 - 3000	< 2000
Qualité du béton	Excellent	Bon	Douteux	Pauvre	Très pauvre

Tableau II-5 Classification du béton sur la base de mesures des vitesses d'impulsions ultrasoniques.

II.5.1.2.3. Essai de flexion à trois point et déplacement flexionnel

L'essai de flexion par trois points a été réalisé sur des éprouvettes prismatique (4x4x16) cm selon le norme NF EN 1015-11 [69], par une machine de modèle UTEST universelle d'une capacité 50 kN, la charge de rupture et le déplacement sont affichés avec une précision de 10-3 KN et 10-2 mm respectivement . Trois échantillons ont été soumis au test de chaque formulation. L'éprouvette est positionnée sur le bâti de la presse, avec une distance de 10 cm entre les deux points d'appui, puis elle est sollicitée jusqu'à atteindre la rupture. La résistance à la flexion est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$R_f = \frac{1,5.F_{f\ max}.L}{b^3}$$

Avec :

R_f : Contrainte de flexion du mortier en MPa ;

$F_{f\ max}$: la charge maximale appliquée au milieu du prisme à la rupture en Newtons ;

L : la distance entre les appuis en mm ($L=100\text{ mm}$) ;

b : Le coté de la section carrée de l'éprouvette en mm ($b=40\text{ mm}$).

Les Figures II-14 et II-15 ci-dessous illustrent les essais de résistance à la flexion effectués dans cette étude.

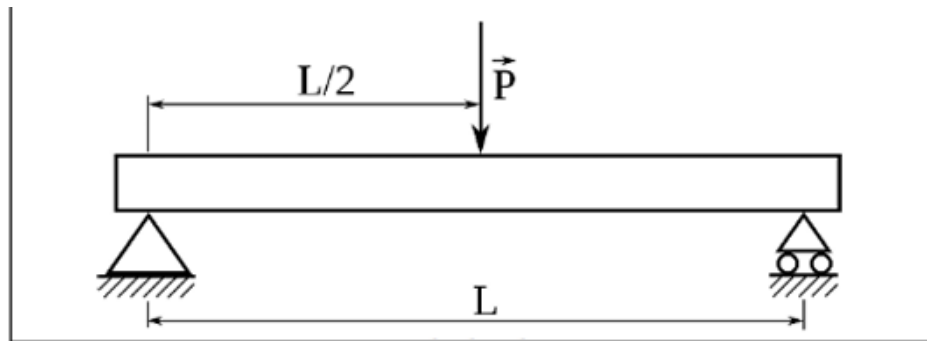


Figure II-14 : Principe de l'essai de la flexion



Figure II-15 : Matériels utilisé et essai de traction par flexion trois points.

II.5.1.2.4. Essai de compression

L'essai de compression a été réalisé directement sur les deux pièces obtenues après l'essai de flexion, à l'aide d'une presse d'une capacité de 2000 kN et à une vitesse de 0.5 MPa/s, conformément à la norme NF EN 12390-4 [70]. Les dimensions des éprouvettes cubiques utilisées pour la compression sont de (4x4x4) cm³. L'éprouvette est positionnée au centre du plateau de la presse, comme illustré dans la Figure II-16, avec une surface de contact de 16 cm² entre l'éprouvette et le plateau de compression.

La Figure II-17 présente les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après la rupture en flexion. La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée pendant l'essai. La résistance à la compression est calculée comme le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette, selon l'expression ci-dessous. La valeur retenue est la moyenne de trois mesures pour chaque composition.

$$R_c = \frac{F_{c \max}}{b \times h}$$

Avec : R_c : La contrainte de compression en (MPa)

$F_{c \max}$: Effort de compression maximal entraînant la rupture (N)

h et b : Hauteur et largeur de l'échantillon respectivement ($b=h=40$ mm)

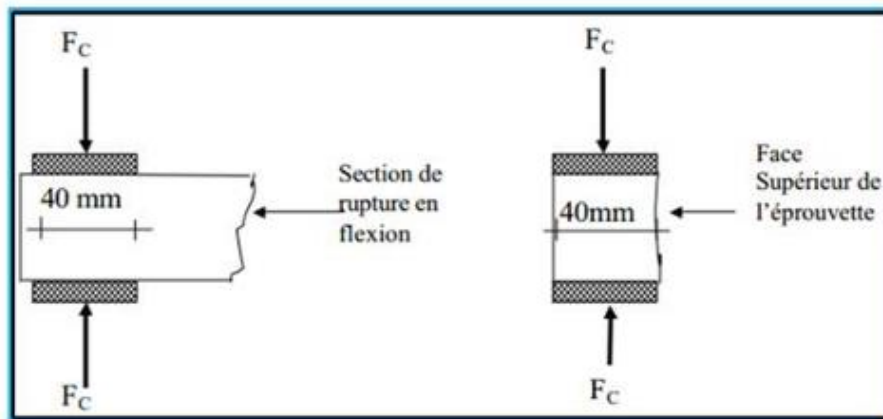


Figure II-16 : Principe de l'essai de la compression.



Figure II-17 : Dispositifs utilisés dans l'essai de la compression

II.5.1.2.5. Essai de variation dimensionnel (Retrait/gonflement)

Le retrait/gonflement est crucial, car il est souvent responsable de la formation de fissures pouvant compromettre la durabilité du béton et du mortier. Les déformations de la matrice peuvent résulter de processus physico-chimiques pendant l'hydratation ou du gradient hydrique entre le matériau et son environnement extérieur. Les variations dimensionnelles ont été mesurées à l'aide d'un rétractomètre électronique à affichage numérique très sensible, avec une précision de 0.001 mm (voir Figure II-18).



Figure II-18 : Mesure du retrait par un rétractomètre numérique

L'objectif de cet essai est de mesurer les variations dimensionnelles de retrait des éprouvettes durcies au fil du temps, Ces mesures ont été réalisées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, après 28 jours de durcissement à l'eau. Pour chaque formulation, les mesures ont été réalisées sur trois éprouvettes.

II.5.2. Caractéristiques des indicateurs de durabilité

Les propriétés de durabilité ont été examinées et évaluées en mesurant la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau par capillarité et par immersion totale.

II.5.2.1. Porosité accessible à l'eau

La porosité des mortiers est l'une des propriétés physiques couramment évaluées en raison de son impact sur des caractéristiques telles que la résistance et la durabilité, constituant un indicateur de la qualité du matériau et reflétant sa compacité. La mesure de la porosité accessible à l'eau a été réalisée conformément aux normes ASTM C642-13 [72] et NF EN 18-459. Les mesures par pesée hydrostatique ont été effectuées après la conservation des échantillons de dimensions $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$ dans l'eau à température ambiante pendant 28 jours. Cette mesure est obtenue en calculant la différence de masse entre un échantillon à l'état sec et le même échantillon à l'état saturé d'eau. La porosité est définie comme le rapport entre le volume vide (occupé par l'eau) et le volume apparent de l'échantillon. La méthode de pesée hydrostatique, illustrée dans la Figure II-12 (voir annexe 1), est la plus simple parmi toutes les méthodes permettant d'obtenir différents indicateurs de durabilité, avec une préférence pour la porosité à l'eau.

Le déroulement de l'essai effectuée est comme suite : En premier lieu, la pesée hydrostatique est réalisée en immergeant entièrement l'éprouvette dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique (avec une précision de 0,01 g) afin d'obtenir la masse M_{eau} de l'éprouvette immergée. Ensuite, après la pesée à l'eau, essuyer rapidement et superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans retirer l'eau des pores. Puis, peser immédiatement l'éprouvette à l'air avec une précision de 0,01 g, obtenant ainsi la masse M_{air} de l'échantillon imbibé. Pour une meilleure caractérisation du mortier, l'essai est réalisé sur trois échantillons. Finalement, on place l'éprouvette dans une étuve à une température de $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 72 heures. La masse obtenue à ce stade est notée M_{sec} . La formule suivante est alors utilisée pour calculer la porosité accessible à l'eau (P) :

$$P (\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$

P : la porosité accessible à l'eau

M_{air} : masse d'échantillon séchée en surface dans l'air après immersion , g.

M_{eau} : la masse d'échantillon immergée dans l'eau, g.

M_{sec} : masse d'échantillon séché au four, g.

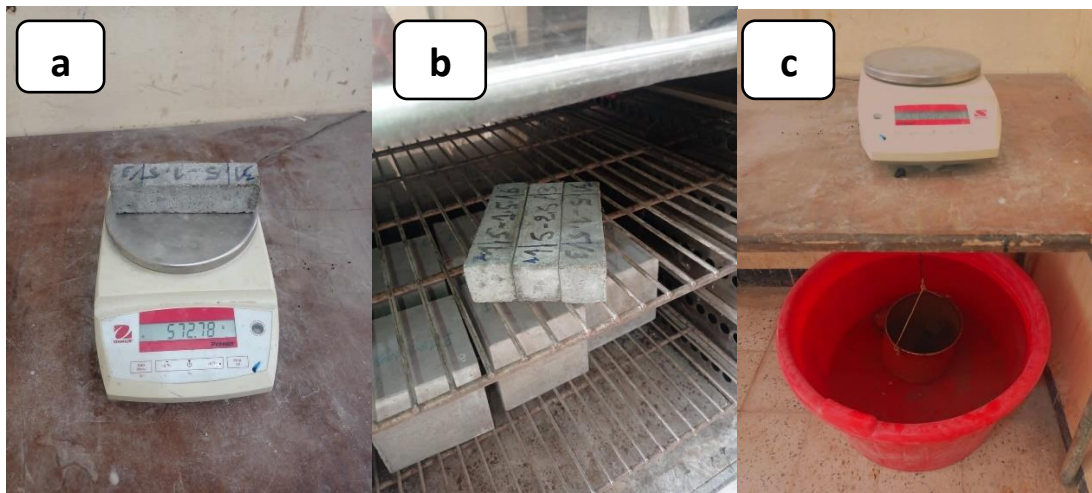


Figure II-19 : Dispositif de mesure de la porosité accessible à l'eau, (a) Pesée de éprouvettes, (b) four pour séchage, (c) Pesée hydrostatique.

II.5.2.2. Essai d'absorption d'eau par capillarité

Des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (Figure II-20) ont été utilisées pour l'ensemble des essais, notamment celui de l'absorption capillaire, réalisé conformément aux recommandations de l'Association Française de Génie Civil (AFGC).

La procédure expérimentale s'est déroulée comme suit :

- Séchage des éprouvettes dans un four à circulation d'air à 70°C , jusqu'à obtention d'une masse constante (variation $\leq 0,1 \%$ par jour), garantissant un état parfaitement sec.

- Imperméabilisation des faces latérales et supérieures des éprouvettes à l'aide de deux couches successives (papier aluminium puis film plastique), ne laissant exposée que la face inférieure à tester.
- Pesée de la masse sèche de chaque éprouvette, suivie de leur mise en contact avec une lame d'eau de 5 mm d'épaisseur, déposée dans une cuve.
- Mesure de la prise de masse à des intervalles de temps allant de 10 minutes jusqu'à 72 heures, afin de suivre l'évolution de l'absorption capillaire.
- Calcul de la sorptivité et de la quantité d'eau absorbée, fournissant des indicateurs de la porosité et de la durabilité des mortiers.



Figure II-20 : Image du test d'absorption capillaire.

Le coefficient d'absorption capillaire est déterminé, à chaque temps de prise de mesure (t), selon la formule suivante:

$$C_t = \frac{M_t - M_0}{A}$$

C_t : Valeur du coefficient d'absorption au temps t (g/cm²)

A : Surface de la section transversale de l'éprouvette 4*4 (cm²)

M₀ : Masse de l'éprouvette sèche avant immersion dans l'eau en (g)

M_t : Masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en (g).

II.6 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence les caractéristiques fondamentales des matières premières utilisées dans la préparation du mortier cimentaire, à savoir le sable de dune (SD), le sable recyclé (SR), ainsi que les fibres végétales extraites de la plante *Washingtonia* (WFW). Ces fibres ont été soumises à un traitement alcalin à l'aide de l'hydroxyde de sodium (NaOH) à différentes concentrations (1,5 %, 2,5 % et 3,5 %) et pour des durées d'immersion spécifiques (3 et 6 heures), dans le but d'améliorer leur structure physique et de renforcer leur interaction avec la matrice cimentaire. Le chapitre a également abordé l'effet du mélange du sable de dune avec le sable recyclé pour former un sable mixte (SM), une modification qui joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la granulométrie et de l'ouvrabilité, ce qui se répercute positivement sur la cohésion du mortier, son comportement rhéologique, ainsi que sur ses propriétés mécaniques et sa durabilité à long terme. Par ailleurs, l'intégration des fibres traitées contribue de manière significative au renforcement de la matrice, en améliorant la résistance mécanique et en limitant la fissuration, ce qui renforce globalement la performance du matériau composite.

CHAPITRE III :

.ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats issus d'un programme expérimental développé dans le cadre de cette recherche. L'étude s'est concentrée sur la formulation et la caractérisation de bio-mortiers élaborés à partir de sable de dune (SD), de sable recyclé (SR), ainsi que de leur mélange (SM), en tant qu'agrégats. En complément, des fibres végétales extraites de la *Washingtonia filifera* (WF) ont été introduites dans certaines formulations, avec ou sans traitement alcalin, afin d'évaluer leur influence sur les performances du matériau.

L'objectif principal de cette partie expérimentale est d'analyser le comportement des différents mélanges à l'état frais à travers l'étude de leur rhéologie, ainsi que d'évaluer leurs propriétés physiques, mécaniques et leur durabilité à l'état durci. Ces essais permettent de mieux comprendre les effets des types de sable et du renforcement par fibres naturelles sur les performances globales des mortiers éco-conçus.

III.2 Propriétés à l'état frais

III.2.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité du mortier est fortement influencée par la nature du sable utilisé et la présence de fibres végétales. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le sable de dunes (SD), en raison de sa granulométrie régulière et de sa faible porosité, favorise une bonne dispersion de l'eau dans la matrice, ce qui se traduit par une valeur d'étalement élevée (19,1 cm). Ce constat rejoint les conclusions de Siddique et al [74]. Qui ont démontré que des granulats bien classés améliorent la maniabilité des mortiers. À l'inverse, le sable recyclé (SR), plus poreux et irrégulier, réduit l'étalement en raison de sa forte capacité d'absorption d'eau, comme le rapportent Choi et al [75].

L'incorporation de fibres de *Washingtonia* non traitées engendre une réduction supplémentaire de l'ouvrabilité. Cela est cohérent avec les résultats de Zhang et al [76]. Qui ont montré que les fibres naturelles brutes absorbent l'eau de gâchage et augmentent la viscosité du mélange. Toutefois, le traitement alcalin (NaOH) des fibres améliore leur compatibilité avec la matrice cimentaire. Ardanuy et al [77]. Ont indiqué que l'élimination des composants amorphes tels que la lignine et l'hémicellulose via un traitement alcalin permet une meilleure dispersion des fibres et réduit leur tendance à l'agglomération, favorisant ainsi une fluidité accrue du mortier.

Dans cette étude, l'utilisation de fibres traitées à 3,5 % de NaOH pendant 6 heures a permis d'atteindre un étalement maximal de 17,5 cm. Ce résultat est conforme aux observations de Jawaïd & Abdul Khalil [78] qui soulignent que des fibres chimiquement modifiées dans des conditions contrôlées préservent l'ouvrabilité tout en renforçant les propriétés mécaniques.

En résumé, l'association d'un sable bien calibré et de fibres végétales traitées dans des conditions optimales constitue une stratégie efficace pour maintenir une ouvrabilité satisfaisante tout en bénéficiant des effets bénéfiques des fibres sur le comportement mécanique du mortier.

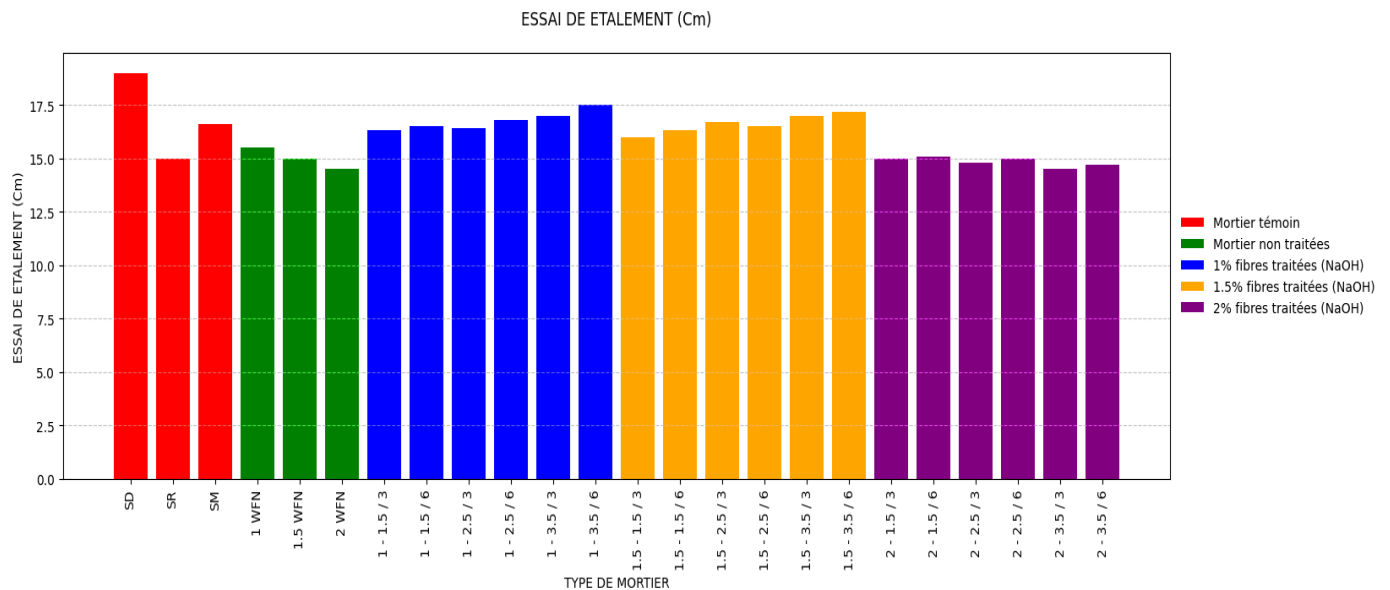


Figure III -1 : Répartition des mortiers selon le type de sable, pour chaque taux de fibres, en fonction du temps d'immersion dans la solution de NaOH.

III.2.2 La masse volumique à l'état frais

La masse volumique est une propriété physique importante qui influence directement la performance du mortier cimentaire, car elle reflète le degré de cohésion et la densité interne du matériau. L'effet sur la masse volumique commence par le type de sable utilisé dans la composition du mortier ; le sable naturel (sable de dunes) se caractérise par une granulométrie régulière et une densité élevée, ce qui réduit les vides et augmente la masse volumique. En revanche, le sable recyclé présente des grains hétérogènes et une densité plus faible, ce qui augmente les vides internes et réduit la masse volumique. Ainsi, l'utilisation d'un mélange des deux sables (SM) équilibre ces propriétés pour atteindre une masse volumique moyenne stable qui améliore la performance du mortier. Cette approche est soutenue par Medina et al [79], qui ont montré que le

recyclage partiel de sable combiné à du sable naturel améliore la densité des matériaux cimentaires sans compromettre leur compacité.

Concernant les fibres, il a été démontré que l'incorporation de fibres de *Washingtonia* traitées avec une solution d'hydroxyde de sodium contribue efficacement à améliorer les propriétés structurales du mortier. Le traitement chimique élimine les composants organiques tels que la lignine et l'hémicellulose, améliorant ainsi l'adhérence des fibres à la matrice cimentaire et réduisant les vides d'air. Ces effets ont été largement documentés dans les travaux de Li et al [80] et Jawaïd & Abdul Khalil [78] qui ont souligné l'importance de l'interface fibre-matrice dans les matériaux composites à base de fibres végétales.

La concentration de la solution et le temps d'immersion influencent l'efficacité de ce traitement, la concentration de 2,5 % et un temps d'immersion de 6 heures fournissant des conditions optimales pour une meilleure cohésion et densité. Cela correspond aux observations de Onuaguluchi & Banthia [81] qui ont conclu qu'un traitement alcalin modéré améliore la microstructure des mortiers fibrés tout en maintenant une densité homogène.

La proportion de fibres joue un rôle clé dans ce contexte ; une proportion de 1,5 % représente un équilibre adéquat entre l'amélioration des propriétés mécaniques et la préservation de la maniabilité et de l'homogénéité du mélange. Des proportions plus faibles peuvent ne pas fournir un soutien suffisant, tandis que des proportions plus élevées peuvent entraîner une agglomération des fibres, affectant la cohésion du mortier et réduisant la masse volumique, ce qui est conforme aux résultats rapportés par Savastano et al [82].

En résumé, la composition optimale du mortier cimentaire comprend un mélange de sable de dunes et de sable recyclé (SM), avec des fibres traitées à une solution d'hydroxyde de sodium à 2,5 %, un temps d'immersion de 6 heures, et une proportion de fibres de 1,5 %. Cette composition atteint la masse volumique la plus élevée, reflétant une meilleure cohésion interne et une réduction des vides, contribuant ainsi à améliorer la résistance et la rigidité du mortier, ce qui la rend adaptée aux applications exigeant des performances mécaniques élevées et une durabilité accrue.

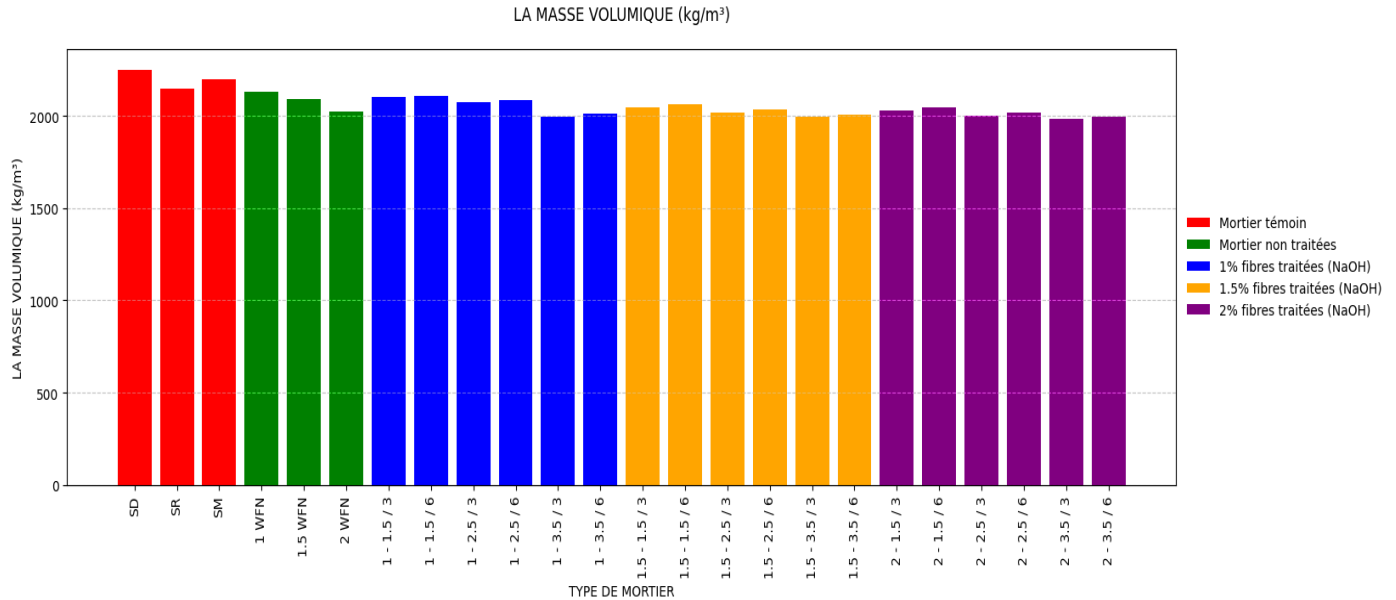


Figure III-2 : La masse volumique des mortiers à l'état frais,

III.3 Caractérisation des mortiers à l'état durci

III.3.1. Résistance à la compression

Les résultats de résistance à la compression, obtenus à partir d'échantillons de 40×40×40 mm préparés avec différentes formulations de mortier, sont présentés dans la Figure III-3. Le mélange de sable naturel et recyclé (SM) sans fibres a affiché la résistance maximale à la compression, soit 38,16 MPa, démontrant ainsi l'effet positif d'un bon choix granulométrique. Ce constat est en accord avec les travaux de Medina et al [79], qui ont montré que l'utilisation combinée de sable recyclé et naturel permet d'obtenir une distribution granulométrique plus dense, réduisant la porosité du mortier et améliorant sa résistance.

En comparaison, le mortier à base de sable de dune (SD) seul a montré une résistance plus faible de 28,05 MPa. L'ajout de fibres Washingtonia non traitées (WFN) à des proportions croissantes (1 %, 1,5 % et 2 %) a entraîné une diminution progressive de la résistance, soulignant l'impact négatif d'une faible adhérence des fibres non modifiées à la matrice cimentaire, ce qui est cohérent avec les observations de Bentur et Mindess [83], qui ont souligné que l'adhésion fibre-matrice est un facteur critique influençant l'efficacité des renforts fibreux.

En revanche, l'incorporation de fibres traitées chimiquement dans une solution de NaOH à différentes concentrations et durées d'immersion a permis une amélioration notable des propriétés

mécaniques. Notamment, la formulation contenant 1,5 % de fibres traitées à 3,5 % de NaOH pendant 3 heures a atteint une résistance de 35,98 MPa, représentant une amélioration significative de 28,2 % par rapport au mortier SD. Cette performance est attribuée à la meilleure interaction entre les fibres et la matrice cimentaire, grâce à l'élimination des composés organiques de surface lors du traitement, ce qui favorise la cohésion interne et réduit les vides. Ces résultats sont appuyés par les recherches de Li et al [80], qui ont montré que le traitement alcalin améliore la rugosité de surface et la réactivité des fibres naturelles, conduisant à un meilleur ancrage dans la matrice cimentaire.

Cependant, l'extension du temps d'immersion à 6 heures n'a pas systématiquement conduit à de meilleurs résultats, suggérant l'existence d'une durée optimale de traitement, comme le souligne également la revue de Jawaïd et Abdul Khalil [78], sur les fibres végétales. De plus, l'augmentation de la teneur en fibres au-delà de 1,5 % n'a pas apporté d'amélioration notable, et pourrait même altérer la densité et la résistance du mortier en raison de l'agglomération des fibres, un phénomène également rapporté par Onuaguluchi et Banthia [81], dans leurs travaux sur les composites cimentaires renforcés de fibres.

Ces résultats confirment que la combinaison d'une formulation granulométrique optimisée et d'un traitement chimique adéquat des fibres est essentielle pour le développement de bio-mortiers à haute performance mécanique.

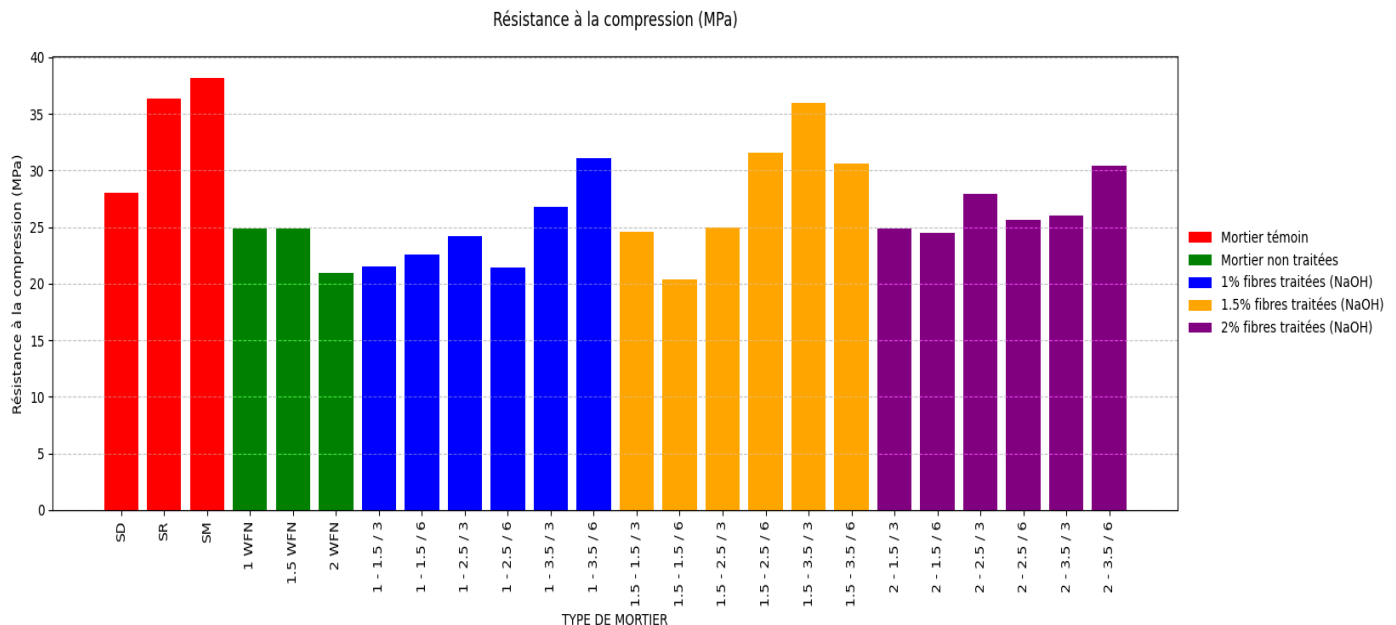


Figure III-3 : Résistances en compression des mortiers après 28 jours de cure à l'eau

III.3.2 Résistance à la flexion trois points

Les résultats expérimentaux de la résistance à la flexion, représentés dans la Figure III-4, révèlent des variations significatives en fonction de la nature du sable, de la présence de fibres végétales de *Washingtonia*, et des conditions de traitement chimique appliquées. Le mortier à base de sable de dunes (SD) présente la résistance la plus faible (1,91 MPa), traduisant une faible cohésion interne. L'utilisation du sable recyclé (SR) permet une légère amélioration, atteignant 2,71 MPa, mais sans changement significatif, en raison probablement de sa granulométrie irrégulière et de sa porosité plus élevée Onuaguluchi & Banthia [81].

Le mélange de sable naturel et recyclé (SM), montre un effet bénéfique plus marqué, avec une résistance de 3,03 MPa, soit une amélioration de 58,6 % par rapport au mortier SD. Cette amélioration peut être attribuée à une distribution granulométrique mieux équilibrée, réduisant les vides et améliorant la transmission des contraintes dans la matrice Fiore et al [84],

L'ajout de fibres de *Washingtonia* non traitées a entraîné une augmentation de la résistance à la flexion, avec 4,76 MPa pour 1 % de fibres, 5,19 MPa pour 1,5 %, et 5,26 MPa pour 2 %, indiquant que même sans traitement, les fibres jouent un rôle de renforcement modéré. Ce comportement peut s'expliquer par la capacité des fibres longues à limiter la propagation des microfissures, malgré leur adhérence limitée à la matrice Savastano et al [82].

L'effet le plus remarquable a été observé après traitement alcalin des fibres. Le traitement avec une solution de NaOH améliore considérablement l'interaction fibre-matrice, comme le montre la formulation contenant 1,5 % de fibres traitées à 3,5 % NaOH pendant 3 heures, qui atteint une résistance maximale de 6,93 MPa. Ce résultat représente une amélioration de 128 % par rapport au SM, et de 263 % par rapport au mortier de référence SD. Cette hausse s'explique par l'élimination de la lignine et de l'hémicellulose, permettant une meilleure adhérence des fibres à la matrice Ardanuy et al [85]. Cependant, une teneur plus élevée en fibres (2 %) ou un traitement prolongé (6 h) n'apporte pas nécessairement d'avantages supplémentaires. La dispersion devient plus difficile, et des agglomérations peuvent apparaître, réduisant la performance mécanique.

En résumé, l'optimisation conjointe de la granularité du sable et des conditions de traitement des fibres végétales permet de développer des bio-mortiers affichant une résistance à la flexion améliorée, tout en maintenant un comportement mécanique stable et homogène.

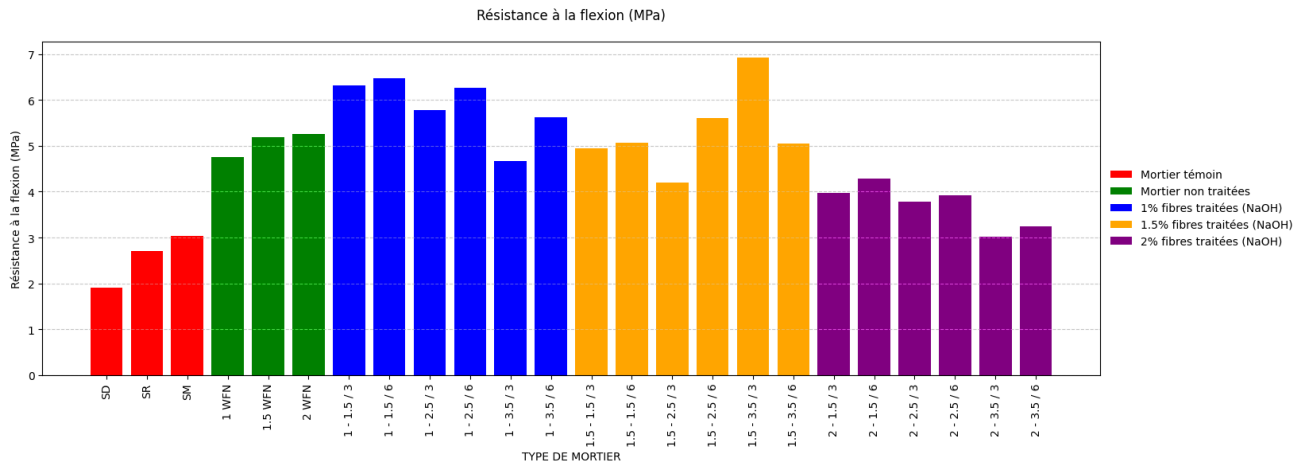


Figure III-4 : Résistances en compression des mortiers après 28 jours de cure à l'eau

III.3.3 Vitesse d'impulsion des ultrasons (UPV)

La Figure III-5 illustre les résultats des mesures de la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) réalisées sur les différentes formulations de mortiers. Les vitesses mesurées varient globalement entre 3270,60 m/s et 3501,52 m/s, traduisant une bonne cohésion interne et une densité apparente globalement satisfaisante de l'ensemble des éprouvettes. Ces résultats sont cohérents avec les valeurs attendues pour des mortiers bien compactés et présentant peu de défauts internes Neville [86].

Le mortier de référence contenant exclusivement du sable de dune (SD) présente la valeur UPV la plus élevée (3501,52 m/s), ce qui reflète une structure dense, avec peu de vides, favorisée par la finesse des particules du sable de dune, capables de bien combler les interstices Alhozaimy et al [87]. À l'inverse, l'utilisation du sable recyclé seul (SR) engendre une diminution notable de la vitesse (3283,23 m/s, soit une baisse de 6,23 % par rapport au SD), traduisant une structure plus poreuse et hétérogène, liée à la rugosité et à la forme irrégulière de ses grains Medina et al [88].

L'introduction d'un mélange équilibré entre sable de dune et sable recyclé (SM) permet d'améliorer la compacité par rapport au SR seul, atteignant une valeur UPV de 3394,93 m/s. Cette amélioration (+3,4 % par rapport au SR) est attribuée à l'effet de remplissage synergique entre les particules fines du SD et la texture granuleuse du SR, qui contribuent ensemble à réduire la porosité globale du mortier Le, Ludwig & Kühne [88].

L'incorporation de fibres de *Washingtonia* non traitées (WFN) entraîne des effets modérés sur la propagation des ondes. Les formulations contenant 1 %, 1.5 % et 2 % de fibres affichent des

vitesses variant entre 3295,05 m/s et 3366,08 m/s, soit une légère diminution par rapport au mortier SM. Cela s'explique par l'effet perturbateur des fibres sur la matrice, qui introduisent des interfaces supplémentaires et potentiellement des microvides, réduisant localement la densité Savastano et al [82].

En revanche, lorsque les fibres sont traitées au NaOH, on observe une amélioration significative de l'UPV dans plusieurs formulations. Par exemple, la formulation 1.5 – 2.5 / 3 (fibres traitées à 2,5 % NaOH pendant 3 h) atteint une valeur UPV de 3470,65 m/s, très proche de celle du mortier SD. La formulation 1.5 – 3.5 / 3 atteint 3494,71 m/s, représentant l'une des valeurs les plus élevées de l'étude. Ces résultats suggèrent que le traitement alcalin améliore l'adhérence fibre/matrice et réduit la quantité de microfissures internes, favorisant ainsi la transmission des ondes Ardanuy et al [77].

D'une manière générale, la combinaison entre un mélange équilibré de sable SD/SR à parts égales et des fibres traitées dans des conditions optimales (concentration et durée) permet de préserver ou même améliorer la compacité structurelle des mortiers. Ces vitesses UPV élevées sont également des indicateurs indirects fiables de la résistance mécanique, en particulier la résistance à la compression, comme démontré dans plusieurs études Onuaguluchi & Banthia [81] ; Zhang et al [90].

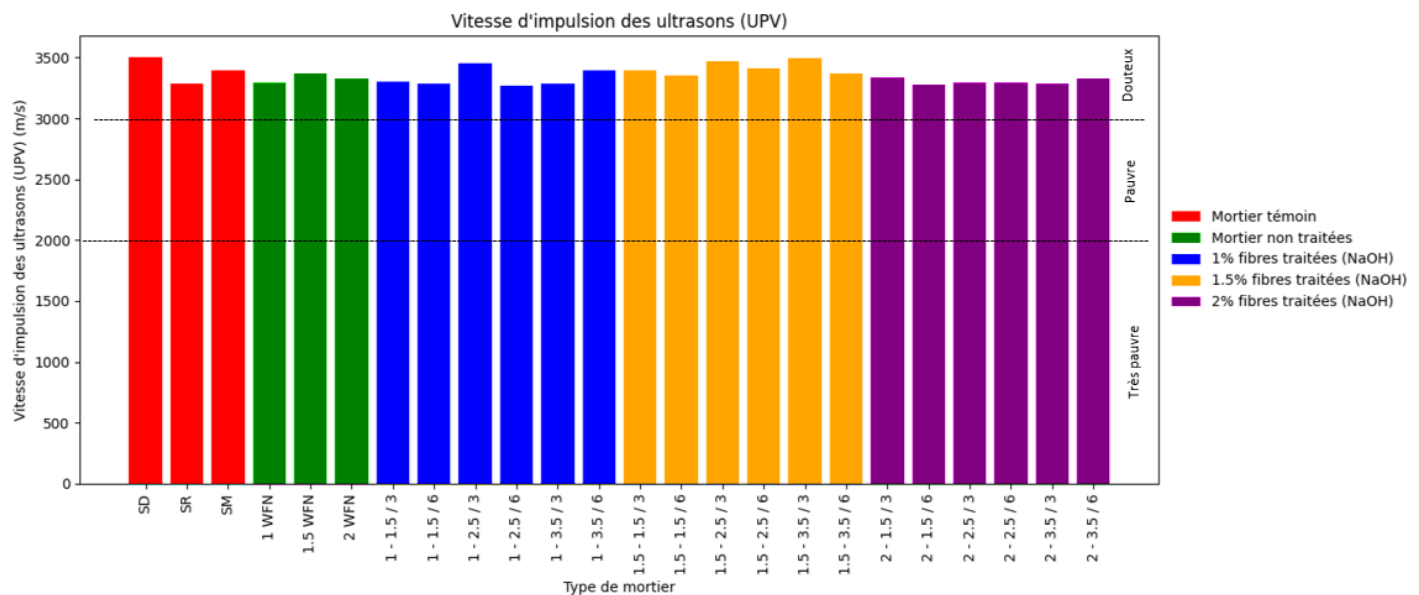


Figure III-5 : Vitesse de propagation des ultrasons dans les bio-mortiers

III.3.4 Retrait

La Figure III-6 présente les résultats du retrait plastique mesuré sur les différentes formulations de mortiers. Les valeurs observées varient largement, entre 416,67 μm et 2496,67 μm , traduisant des comportements très contrastés selon le type de sable utilisé et la présence ou non de fibres. Ce paramètre est essentiel, car un retrait plastique élevé peut engendrer la formation de microfissures en surface, affectant négativement la durabilité et l'intégrité des structures cimentaires Neville, [86].

Le mortier de référence à base de sable de dune (SD) présente un retrait plastique de 982,67 μm , valeur considérée comme base de comparaison. En revanche, l'utilisation exclusive de sable recyclé (SR) augmente significativement cette valeur à 2186,33 μm , soit une hausse de 122,5 %. Cette augmentation s'explique par la porosité plus importante et la capacité d'absorption d'eau élevée du SR, qui favorisent l'évaporation rapide de l'eau de gâchage, conduisant à une déformation plus marquée de la pâte cimentaire fraîche Medina et al, [88].

L'adoption d'un mélange équilibré de sable de dune et de sable recyclé (SM) permet de réduire considérablement ce phénomène, avec un retrait de 416,67 μm . Cette valeur représente une diminution de -57,6 % par rapport au SD, et de -80,9 % par rapport au SR. Cette amélioration est attribuée à l'effet de synergie entre la finesse du sable de dune et la texture granuleuse du sable recyclé, permettant une meilleure compacité de la matrice et une réduction des vides capillaires Le, Ludwig & Kühne, [88].

L'incorporation de fibres végétales de *Washingtonia* non traitées (WFN) engendre des effets contrastés. Par exemple, la formulation 1 WFN (1 % de fibres non traitées) affiche un retrait de 940,00 μm , soit une valeur légèrement inférieure à celle du SD. Toutefois, certaines formulations avec fibres non traitées dépassent les valeurs du mortier de référence, comme 1.5 WFN (2421,33 μm), ce qui reflète un effet négatif potentiel lié à la mauvaise adhésion fibre-matrice ou à l'introduction de microvides par les fibres mal réparties Savastano et al, [82].

En revanche, l'utilisation de fibres traitées à la soude (NaOH) permet d'améliorer sensiblement le comportement au retrait. Par exemple, la formulation 1.5 – 2.5 / 6 (fibres traitées à 2,5 % pendant 6 h) présente un retrait plastique de seulement 462,00 μm , soit -78,9 % par rapport au SR, et même -52,9 % par rapport au SD. De même, les formulations 1.5 – 2.5 / 3 (706,33 μm) et 1.5 – 3.5 / 3

(1697,67 μm) confirment l'effet bénéfique du traitement alcalin, qui améliore l'adhérence interfaciale et limite la concentration de vides internes Ardanuy et al, [77].

D'une manière générale, les résultats montrent que :

- Le sable recyclé seul tend à aggraver le retrait plastique en raison de sa porosité élevée.
- Le mélange sable de dune / sable recyclé (SM) offre une solution optimale pour réduire le retrait tout en valorisant les déchets.
- Les fibres végétales traitées, lorsqu'elles sont correctement dosées et préparées, contribuent à réduire significativement le retrait, en agissant comme un squelette tridimensionnel limitant la contraction de la pâte cimentaire fraîche.

Ces résultats sont en accord avec les observations faites dans d'autres études, qui mettent en évidence le rôle des fibres naturelles dans le contrôle de la fissuration plastique et l'amélioration de la durabilité des mortiers écologiques Onuaguluchi & Banthia, [81] ; Zhang et al, [90].

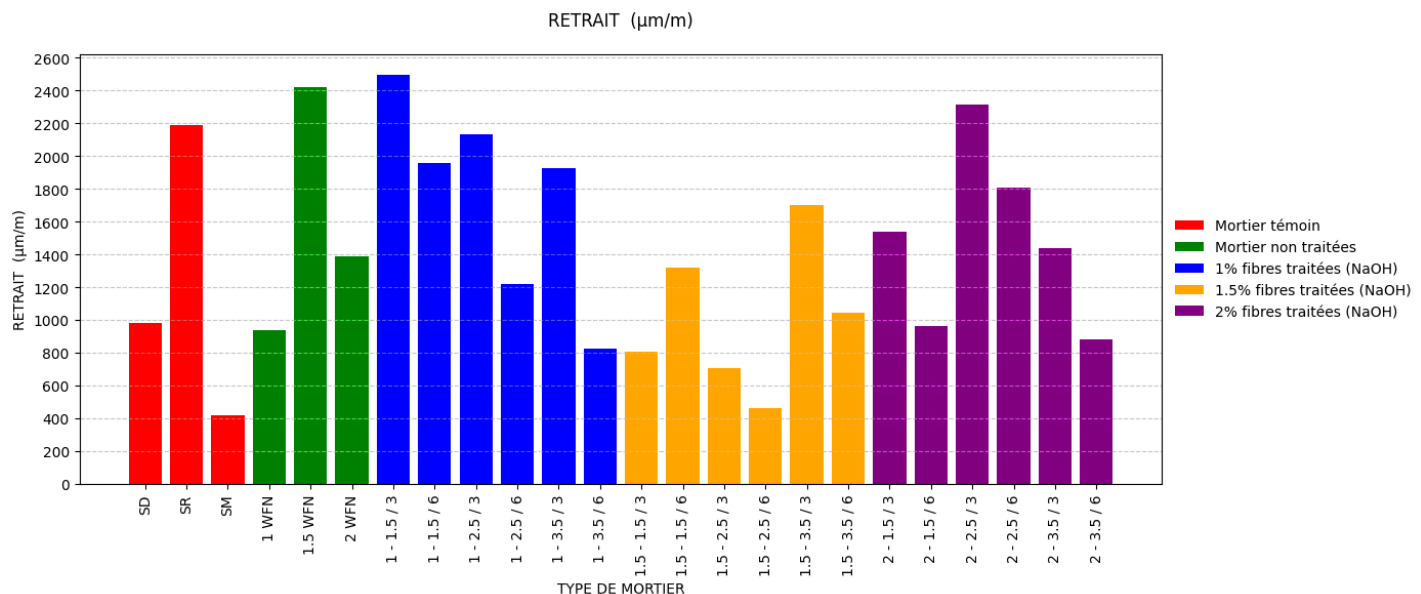


Figure III-6 : Effet combiné du type de sable et du traitement alcalin des fibres de Washingtonia sur le retrait plastique du mortier

III.4. Caractéristiques des indicateurs de durabilité

III.4. 1. Porosité accessible à l'eau

Les variations de la porosité accessible à l'eau des bio-mortiers durcis à 28 jours sont représentées dans la Figure III-7. Ces variations sont fonction de la teneur en fibres de Washingtonia (WFW), de la concentration de la solution de NaOH utilisée pour le traitement alcalin, ainsi que du temps d'immersion.

Dans les formulations contenant des fibres non traitées (WFN), on observe une augmentation progressive de la porosité avec l'augmentation du taux d'incorporation en fibres. Les formulations avec 1 %, 1,5 % et 2 % de WFN affichent respectivement une porosité de 17,88 %, 17,03 % et 18,65 %, contre 17,49 % pour le mortier de référence SM sans fibres. Cette hausse est principalement attribuée à la mauvaise interfaçage fibre-matrice, aux microvides créés par l'ajout de fibres, et à leur nature hydrophile qui favorise la formation de pores Savastano et al [82].

En revanche, l'utilisation de fibres traitées à la soude (NaOH) entraîne une réduction significative de la porosité par rapport aux formulations à base de fibres brutes. Par exemple, à 1 % de fibres, la porosité passe de 17,88 % (1 WFN) à 17,19 % (1 – 1.5 / 3), soit une réduction de 3,86 %. Cette réduction s'accroît avec l'augmentation de la concentration en NaOH et de la durée d'immersion : la formulation 1 – 3.5 / 3 présente une porosité de 18,70 %, inférieure à celle de la formulation brute équivalente (2 WFN à 18,65 %) malgré une teneur plus élevée en agent de traitement.

De manière générale, les formulations les plus performantes en termes de porosité sont celles incorporant des fibres traitées à 2,5 % et 3,5 % de NaOH pendant 3 à 6 heures. Les bio-mortiers 1.5 – 3.5 / 3 et 2 – 2.5 / 3 affichent respectivement des porosités de 16,95 % et 17,06 %, soit une baisse de plus de 10 % par rapport au témoin SM. Cette amélioration s'explique par la meilleure adhésion fibre-matrice obtenue grâce au traitement alcalin, qui élimine la lignine et la cire de surface, améliorant ainsi l'imprégnation de la matrice Ardanuy et al [77].

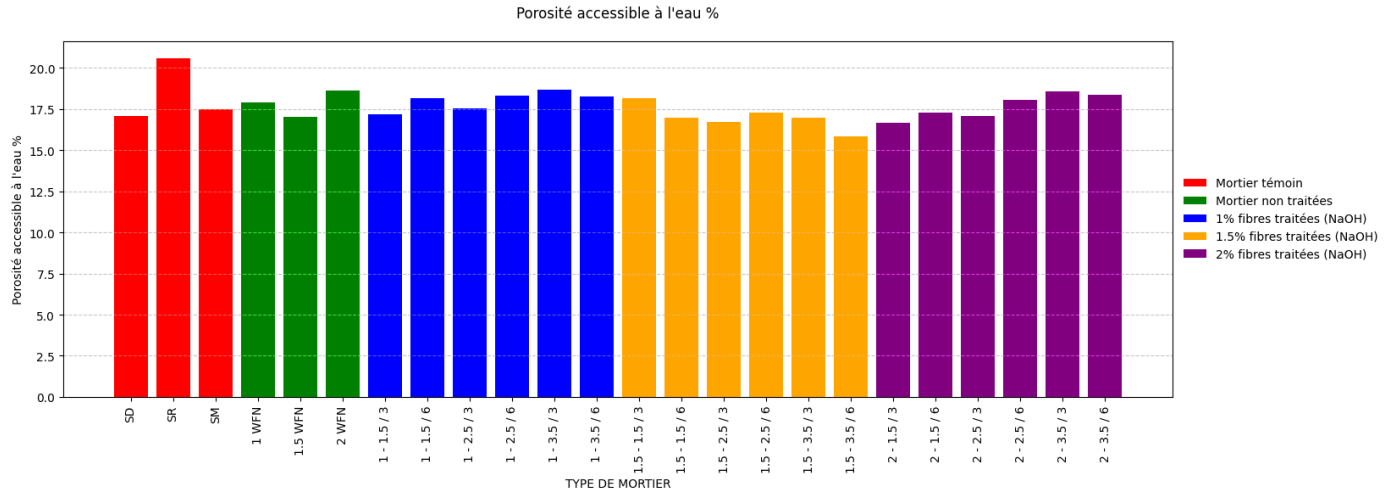


Figure III-7 : Effet combiné du type de sable et du traitement alcalin des fibres de Washingtonia sur Porosité accessible à l'eau des mortiers

L'ajout de 1 %, 1,5 % et 2 % de WFW traitées a ainsi entraîné une réduction moyenne de la porosité de 3,86 %, 8,89 % et jusqu'à 13,77 % respectivement, par rapport aux formulations non traitées de même teneur en fibres. Par ailleurs, certaines formulations traitées montrent une porosité plus faible que le mortier SM sans fibres, indiquant une réelle synergie entre le traitement des fibres et la matrice cimentaire.

En somme, la baisse de la porosité dans les bio-mortiers traités suggère une amélioration notable de la compacité interne. Toutefois, à des taux de fibres élevés (≥ 2 %), même traitées, la porosité tend à réaugmenter légèrement, probablement à cause de la difficulté d'assurer une bonne dispersion et compacité, conduisant à des défauts internes Onuaguluchi & Banthia [81]. Ces observations confirment que l'optimisation de la porosité dans les bio-mortiers dépend d'un équilibre entre la quantité de fibres, les conditions de traitement, et la formulation globale du mortier.

III.4.2. Absorption d'eau par capillarité

Les cinétiques d'absorption d'eau des bio-mortiers testés sont représentées dans les Figures III-8a à III-8d. La Figure III-8a montre les courbes des mortiers de base (SD, SR, SM) ainsi que ceux contenant 1%, 1.5% et 2% de fibres WFN brutes. Les Figures suivantes illustrent les performances des mortiers à base de fibres WFW traitées à différentes concentrations de NaOH et temps d'immersion.

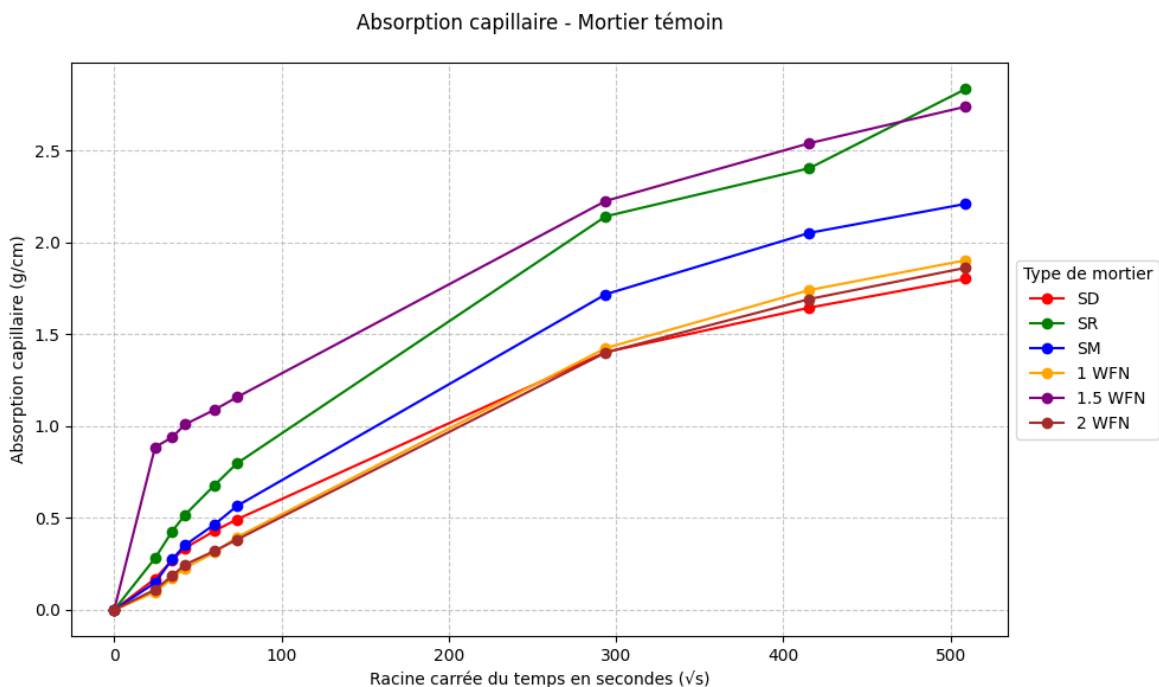
Pour tous les échantillons, deux phases distinctes d'absorption sont identifiables :

- Une phase initiale rapide (0–10 minutes), où plus de 50% de l'eau est absorbée. Par exemple, SR passe de 0 à 2.835 g/cm² en 5 minutes, contre 1.802 g/cm² pour SD.
- Une phase lente progressive au-delà de 30 minutes, liée à la saturation de la matrice Bentur & Mindess [83].

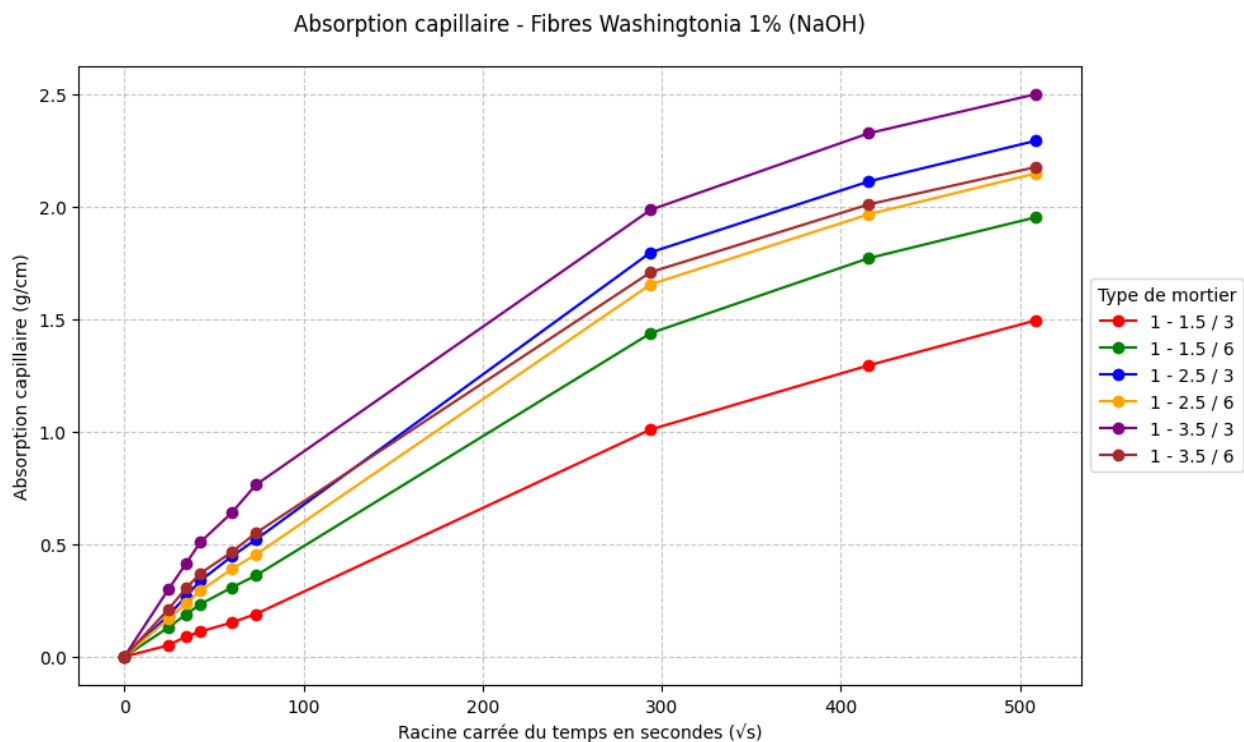
L'ajout de fibres brutes augmente nettement l'absorption. À 2%, le mortier WFN (2%) atteint 1.862 g/cm² à 1 min et 0.111 g/cm² à 1440 min, contre 1.802 et 0.170 g/cm² pour SD. Cela équivaut à une hausse d'environ 35% de l'absorption finale par rapport au mortier de référence. Cette augmentation est liée à la nature hydrophile des fibres végétales et à leur structure poreuse, qui favorisent la montée capillaire de l'eau Savastano et al [82] ; Nguyen et al [91].

En revanche, les fibres traitées montrent une amélioration significative. Par exemple:

- Le mortier 2 - 1.5 / 6 (2% fibres traitées à 1.5% NaOH pendant 6h) atteint 2.289 g/cm² à 1 min et 0.408 g/cm² à 1440 min.
- À concentration plus forte (3.5%), l'absorption chute davantage, avec 0.408 g/cm² au lieu de 0.514 g/cm² pour 2 - 2.5 / 3.

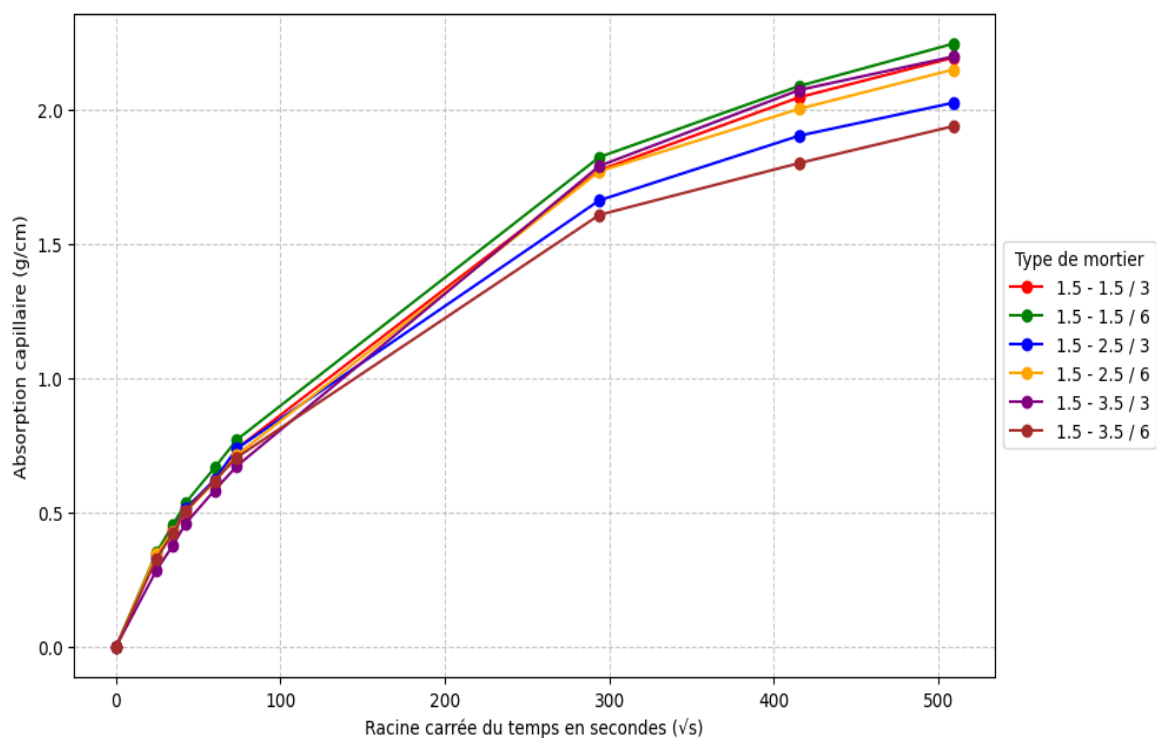


La Figure III-8a Cinétique d'absorption d'eau par capillarité. a) bio-mortier témoin.



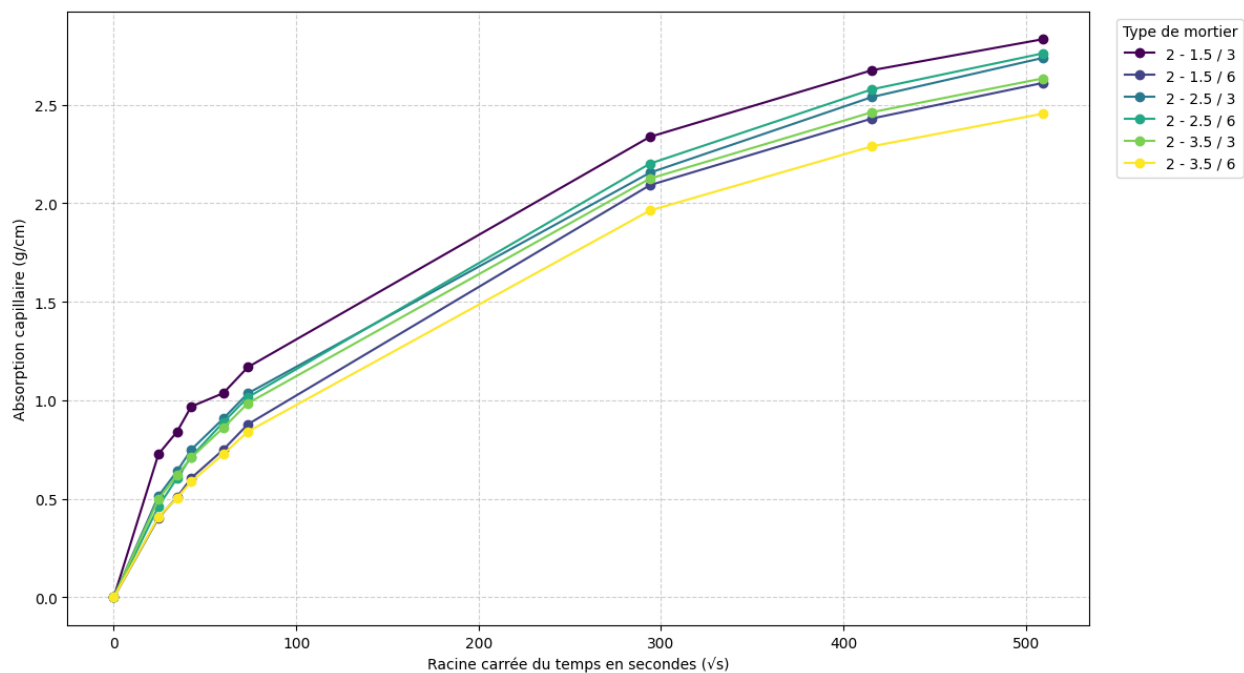
La Figure III-8b) bio-mortier de 1% WF traitées

Absorption capillaire - Fibres Washingtonia 1.5% (NaOH)



La Figure III-8c) bio-mortier de 1.5%WF traitées

Absorption capillaire - Fibres Washingtonia 2% (NaOH)



La Figure III-8d) bio-mortier de 2%WF traitées.

Ces résultats confirment que le traitement alcalin réduit l'hydrophilicité des fibres, en éliminant les substances cireuses et la lignine partielle, ce qui favorise une meilleure adhésion à la matrice et diminue l'absorption globale Mwaikambo & Ansell [92] ; Bilba & Arsène[93]. En réduisant la porosité des fibres, la circulation d'eau à l'interface est également limitée [91].

Parmi toutes les formulations, le bio-mortier avec 2% de fibres WFW traitées à 1.5% NaOH pendant 6 heures (2 - 1.5 / 6) a présenté la plus faible absorption finale (0.408 g/cm²).

Cette formulation offre un bon équilibre entre résistance à l'eau et propriétés mécaniques, grâce à une densification partielle des fibres par le traitement chimique [82] [92]. Elle peut ainsi être considérée comme la plus performante du point de vue de la durabilité hydrique.

III.4.3. Absorption d'eau par immersion totale

Le comportement d'absorption capillaire des bio-mortiers renforcés par des fibres de *Washingtonia filifera*, à l'état brut ou après traitement alcalin à différentes concentrations de NaOH et durées d'immersion, a été étudié.

Les résultats ont montré que le mortier témoin sans fibres (SD) a présenté une absorption finale de 7,90 %, tandis que l'utilisation de sable recyclé (SR) et de sable marin (SM) a conduit à des valeurs plus élevées, respectivement 9,90 % et 8,24 %, en raison de la porosité accrue de ces matériaux Bentur & Mindess [83].

L'incorporation de fibres brutes a également contribué à l'augmentation de l'absorption, avec des valeurs de 7,97 %, 7,51 % et 8,01 % pour des pourcentages de 1 %, 1,5 % et 2 % respectivement, ce qui est attribué à la nature hydrophile et à la structure poreuse des fibres végétales Savastano et al [82]. En revanche, le traitement alcalin a significativement amélioré le comportement à l'absorption. La formulation 1.5 - 3.5 / 6, par exemple, a enregistré la plus faible absorption finale avec 6,52 %, soit une réduction de 17 % par rapport au mortier témoin et de 34 % par rapport au SR. Ces résultats s'expliquent par l'élimination partielle des composants hydrophiles de surface tels que l'hémicellulose et la lignine, améliorant ainsi l'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire, tout en réduisant la porosité globale [91-92-93].

Ainsi, la formulation 1.5 - 3.5 / 6 se distingue comme étant la plus performante en termes de résistance à l'absorption d'eau, ce qui en fait une candidate idéale pour les applications de construction durable en milieux humides.

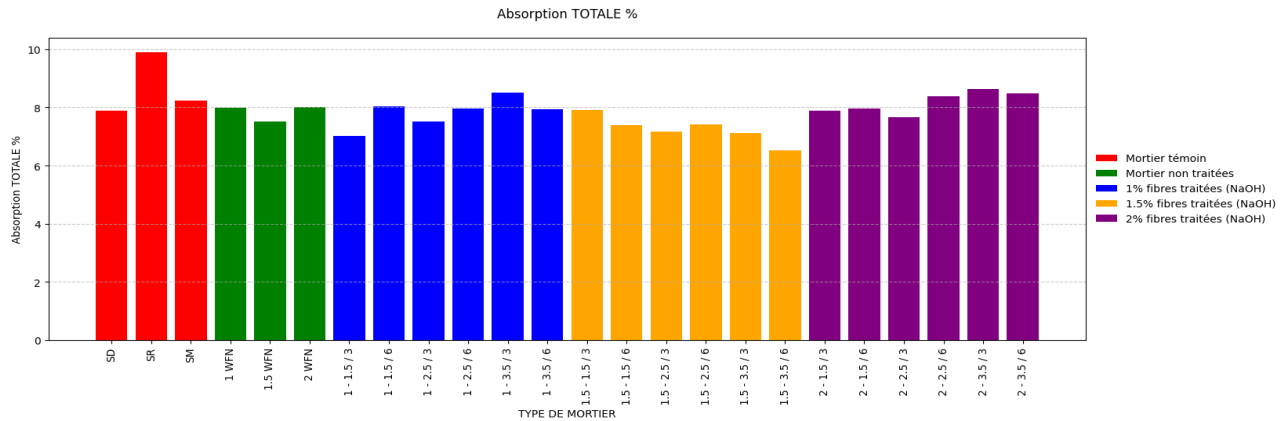


Figure III-9 : Effet combiné du type de sable et du traitement alcalin des fibres de Washingtonia sur Absorption d'eau par immersion totale des mortiers

III.5. Conclusion

Les travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de cette étude sur les bio-mortiers renforcés par des fibres végétales de *Washingtonia filifera* (WF) ont permis de tirer des conclusions significatives quant à leur potentiel pour la construction durable. L'incorporation de fibres végétales, qu'elles soient brutes ou traitées chimiquement, a révélé des impacts mesurables sur les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers.

Tout d'abord, le type de sable utilisé joue un rôle déterminant dans les performances du mortier. Le mélange équilibré de sable de dunes et de sable recyclé (SM) s'est avéré optimal, offrant une granulométrie bien calibrée qui améliore la compacité, réduit le retrait plastique (416,67 μm) et maximise les résistances mécaniques (38,16 MPa en compression sans fibres). En comparaison, le sable de dunes seul (SD) et le sable recyclé (SR) présentent des limites respectives en termes de résistance ou de porosité.

Concernant les fibres, l'ajout de WF non traitées améliore modérément la résistance à la flexion (jusqu'à 5,26 MPa à 2 %), mais réduit l'ouvrabilité et la résistance à la compression en raison d'une faible adhérence fibre-matrice. En revanche, le traitement alcalin des fibres à base de NaOH a permis d'optimiser leurs performances. Parmi les formulations testées, celle contenant 1,5 % de fibres traitées à 3,5 % NaOH pendant 3 heures s'est distinguée comme la plus performante, avec une résistance à la flexion exceptionnelle de 6,93 MPa (+128 % par rapport à SM), une résistance à la compression de 35,98 MPa (+28,2 % par rapport à SD), une faible porosité (16,95 %), et une

compacité élevée (UPV de 3494,71 m/s). Cette formulation offre un équilibre idéal entre maniabilité (proche de 17,5 cm), propriétés mécaniques et durabilité.

Cependant, pour des applications en milieux humides, la formulation avec 1,5 % de fibres traitées à 3,5 % NaOH pendant 6 heures se révèle plus adaptée, grâce à une absorption d'eau par immersion minimale (6,52 %), bien que ses résistances mécaniques soient légèrement inférieures. Par ailleurs, l'analyse des tests de propagation ultrasonique a montré une légère diminution de la vitesse des ondes avec des durées d'immersion prolongées (au-delà de 4 heures), suggérant un effet potentiellement négatif d'un traitement alcalin excessif sur la microstructure du mortier.

En outre, l'étude a mis en évidence que des concentrations de fibres supérieures à 1,5 % (comme 2 %) n'apportent pas d'améliorations significatives, en raison du risque d'agglomération, tandis qu'une concentration de 1 % est insuffisante pour maximiser les propriétés mécaniques.

En conclusion, cette étude a permis de mieux comprendre l'influence des fibres végétales WF et du traitement alcalin sur les propriétés des bio-mortiers. Les résultats obtenus soulignent le potentiel de ces matériaux pour le développement de solutions de construction écologiques, combinant performance mécanique, durabilité et valorisation des déchets. Ces avancées ouvrent des perspectives prometteuses pour l'optimisation des bio-mortiers dans des applications structurelles et environnementales, contribuant ainsi à une construction plus durable et respectueuse de l'environnement. Des investigations complémentaires, notamment sur les formulations à 2,5 % NaOH et les effets à long terme des traitements, pourraient consolider ces résultats et élargir leur applicabilité.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'étudier la formulation, le comportement mécanique, physique, rhéologique ainsi que la durabilité des bio-mortiers incorporant des fibres végétales issues de déchets de *Washingtonia filifera* (WF), en combinaison avec différents types de sables : **le sable de dune (SD), le sable recyclé (SR) et leur mélange (SM).**

La valorisation des fibres naturelles dans les matériaux cimentaires a déjà montré un potentiel prometteur dans plusieurs travaux antérieurs. Toutefois, des investigations plus approfondies sont nécessaires pour mieux comprendre l'influence des conditions de traitement des fibres, des types de sable et de leur interaction sur les propriétés globales des mortiers.

Ainsi, plusieurs volets expérimentaux ont été explorés dans cette étude :

1. **Étude de formulation** : Évaluation de différentes compositions de bio-mortiers en variant les proportions de sables (SD, SR, SM) et les taux d'incorporation des fibres de WFW (1 %, 1,5 %, 2 %), avec ou sans traitement alcalin (NaOH à 1,5 %, 2,5 % et 3,5 %, pour des durées de trempage de 3 et 6 heures), tout en maintenant une rhéologie similaire.
2. **Caractérisation mécanique** : Mesure des résistances à la compression et à la flexion des mortiers, afin d'analyser l'effet des fibres traitées et non traitées sur les performances mécaniques.
3. **Caractérisation physique et rhéologique** : Analyse des propriétés physiques (masse volumique, porosité, absorption capillaire) et des caractéristiques à l'état frais (étalement), afin de mieux cerner le comportement des mortiers en fonction des paramètres de formulation.
4. **Durabilité** : Une attention particulière a été portée à l'évaluation de la stabilité dimensionnelle et de l'absorption d'eau au fil du temps, en lien avec la nature des fibres et des sables utilisés.

En somme, cette recherche vise à mieux comprendre les interactions entre les fibres végétales de *Washingtonia filifera* (WF) et les différents types de sable dans des bio-mortiers, afin d'optimiser leur formulation et d'évaluer leur potentiel pour des applications durables dans le domaine de la construction. La formulation optimale identifiée combine 1,5 % de fibres traitées dans une solution de NaOH à 3,5 % pendant 3 heures, avec un granulats composé d'un mélange équilibré de sable de

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

dunes et de sable recyclé (SM). Cette combinaison a montré un bon équilibre entre maniabilité, compacité interne et résistance mécanique.

Dans le cadre de perspectives futures, il serait pertinent de mener des études complémentaires sur la durabilité de ces bio-mortiers en milieux agressifs, notamment ceux contenant différentes concentrations d'agents acides ou salins, afin d'évaluer leur comportement à long terme dans des environnements hostiles. De plus, l'impact de la longueur des fibres incorporées (3, 4 et 5 cm) mérite d'être exploré, afin d'ajuster davantage les performances mécaniques et physiques du matériau selon les exigences spécifiques des applications.

Enfin, une analyse microstructurale approfondie par microscopie électronique à balayage (MEB) et diffraction des rayons X (DRX) permettrait d'approfondir la compréhension des mécanismes d'interaction à l'interface matrice–fibre, et d'identifier les phases minérales formées au sein de la matrice, en lien avec les performances observées.

Références
bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Mohamed Habib BEN DHIA Docteur en mécanique appliquée à la construction (Université Pierre et Marie Curie Paris VI) Maître assistant École Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis.
2. Gilpin Robinson Jr R, Menzie DW, Hyun H. « Recycling of construction de brisas aggregate in the Mid-Atlantic Region»,
3. ZA. Altameemi, Al-taie AJ. Algerian Journal of Engineering and Sand Dunes Reviewing "Wind Effectand Dunes Classification". Alger Jo Eng Technol 2022;07:1–8.
4. MS.Al-Soud, Al-Shakarchi YJ. "Stabilization of Baiji sand dunes by petroleum residues". IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2020;870. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012081>.
5. W. Yan, Wu G, Dong Z. "Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model". Construction Building Materiles 2019;226:469–82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287>.
6. S. Park S, Lee E, Ko J, Yoo J, Kim Y. "Rheological properties of concrete using dune sand". Construction Building Materiles 2018;172:685–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.192>.
7. Mehdi C. « Les déchets de chantier et le recyclage des matériaux dans le secteur du bâtiment » thèse de fin de formation 2007.
8. LNHC de Djelfa
9. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. Construction and Building Materials, 65, 201–217.
10. Pacheco-Torgal, F., Tam, V. W. Y., Labrincha, J. A., & Ding, Y. (2013). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Woodhead Publishing.
11. Kurda, R., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2019). *Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash*. Cement and Concrete Composites, 95, 169–182.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

12. Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, 29(5), 397–401.
13. Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., & Alaejos, P. (2013). *Durability of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 40, 1054–1065.
14. Pepe M, Toledo Filho RD, Koenders EAB, Martinelli E. "Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete". Construction Building Materiles 2014;69:124–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.084>.
15. M. Nedeljković, Visser J, Nijland TG, Valcke S, Schlangen E. "Physical, chemical and mineralogical characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: A comparative study". Construction Building Materiles 2021;270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121475>.
16. de Andrade Salgado F, Silva F. de Andrade. "Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review". J Build Eng 2022;52:1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>.
17. Xie J, Chen W, Wang J, Fang C, Zhang B, Liu F. "Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer 28 concrete". Construction Building Materiles 2019;226:345–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.311>.
18. Naël-Redolfi J. "Absorption d' eau des granulats poreux : mesure et conséquences sur la formulation des mortiers et des bétons. PhD Thesis, Univ Paris-Est 2016.
19. NF EN 1097-6. "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats" Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. Nf En 1097-6 2014;33:56.
20. EN N 12390-4. Essais pour béton durci - Partie 4 : "résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai 2019".

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

21. Lydon FD, Balendran R V. "Some observations on elastic properties of plain concrete". Cement Concrete Resarche 1986;16:314–24. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90106-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90106-7).
22. Callister, W. D. (2007). Materials Science and Engineering: An Introduction (7th ed.). Wiley.
23. Van der Walt, M. (2004). "Natural Fiber Reinforced Concrete." Construction and Building Materials, 18(9), 621-630. Elsevier.
24. Jelsch, M., & Papadopoulou, M. (2016). "Sustainable Concrete Reinforced with Natural Fibers." Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 5(3), 132-142. Taylor & Francis.
25. ACI Committee 544 (2017). "Guide for the Use of High-Strength Fiber Reinforced Concrete." ACI 544R-10, American Concrete Institute.
26. Fleming, P. (2012). "Natural Fiber Composites: Sustainable Solutions for the Construction Industry." Building and Environment, 54, 131-138. Elsevier.
27. Jelsch, M. (2017). "Natural Fiber Reinforced Composites: Applications in Building and Construction." Journal of Building Materials, 45(4), 240-254.
28. A.K. Bledzki, J. Gassan, Composites reinforced with cellulose based fibres, Progress in Polymer Science. 24 (1999) 221–274. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).
29. C. Baley, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, Ed. Techniques Ingénieur, 2013.
30. M. Dallel, Evaluation du potentiel textile des fibres d’Alfa (Stipa Tenacissima L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil, (2012) Thèse de docteur, Université de Haute Alsace.
31. C. Baley, Contribution à l’étude de matériaux composites à matrice organique renforcés par des fibres de lin, (2003) Thèse Université de Bretagne Sud, Lorient, France.
32. R. V Da Silva, E.M.F. Aquino, L.P.S. Rodrigues, A.R.F. Barros, Development of a hybrid composite with synthetic and natural fibers, Matéria (Rio de Janeiro). 13 (2008) 154–161.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

33. D.B. Dittenber, H.V.S. GangaRao, Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 43 (2012) 1419–1429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>.
34. A. Abderraouf, Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles: valorisation des plantes locales, Thèse Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, Algérie., (2017).
35. A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M.M. Khenfer, M. Chabannet, Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate, *Cement and Concrete Composites*. 27 (2005) 554–564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.015>.
36. R. Ntenga, Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites, (2007).
37. M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, F. Cardona, Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview, *Composites Part B: Engineering*. 43 (2012) 2883–2892. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>.
38. A. Alawar, A.M. Hamed, K. Al-Kaabi, Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement, *Composites Part B: Engineering*. 40 (2009) 601–606. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.018>.
39. A. El Oudiani, Y. Chaabouni, S. Msahli, F. Sakli, Crystal transition from cellulose I to cellulose II in NaOH treated Agave americana L. fibre, *Carbohydrate Polymers*. 86 (2011) 1221–1229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.037>.
40. A. Shalwan, B.F. Yousif, Investigation on interfacial adhesion of date palm/epoxy using fragmentation technique, *Materials & Design*. 53 (2014) 928–937. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.083>.
41. N. Johar, I. Ahmad, A. Dufresne, Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk, *Industrial Crops and Products*. 37 (2012) 93–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.016>.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

42. M.A. Norul Izani, M.T. Paridah, U.M.K. Anwar, M.Y. Mohd Nor, P.S. H'ng, Effects of fiber treatment on morphology, tensile and thermogravimetric analysis of oil palm empty fruit bunches fibers, *Composites Part B: Engineering*. 45 (2013) 1251–1257.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.027>.
43. P. Saha, S. Manna, S.R. Chowdhury, R. Sen, D. Roy, B. Adhikari, Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment, *Bioresource Technology*. 101 (2010) 3182–3187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.010>.
44. N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, A. Boudenne, Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building, *Energy and Buildings*. 81 (2014) 98–104.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.032>.
45. O. Benaïmeche, A. Carpinteri, M. Mellas, C. Ronchei, D. Scorza, S. Vantadori, The influence of date palm mesh fibre reinforcement on flexural and fracture behaviour of a cement-based mortar, *Composites Part B: Engineering*. 152 (2018) 292–299.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.017>.
46. H. Khelifi, *Matériaux argileux stabilisés au ciment et renforcés de fibres végétales : formulation pour extrusion*, Lorient, 2012.
47. [A. Korjenic, J. Zach, J. Hroudová, The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions, *Energy and Buildings*. 116 (2016) 45–58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.037>.
48. R.D. Tolêdo Filho, K. Ghavami, G.L. England, K. Scrivener, Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability, *Cement and Concrete Composites*. 25 (2003) 185–196. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00018-5).
49. R. Jia, Q. Wang, P. Feng, A comprehensive overview of fibre-reinforced gypsum-based composites (FRGCs) in the construction field, *Composites Part B: Engineering*. 205 (2021) 108540. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108540>.
50. N.K. Krishna, M. Prasanth, R. Gowtham, S. Karthic, K.M. Mini, Enhancement of properties of concrete using natural fibers, *Materials Today: Proceedings*. 5 (2018) 23816–23823. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.173>.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

51. A. Elsaid, M. Dawood, R. Seracino, C. Bobko, Mechanical properties of kenaf fiberreinforced concrete, *Construction and Building Materials*. 25 (2011) 1991–2001.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.052>.
52. L. Martinie, P. Rossi, N. Roussel, Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction, *Cement and Concrete Research*. 40 (2010) 226–234.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.032>.
53. I.C. Mihai, A.D. Jefferson, A micromechanics based constitutive model for fibre reinforced cementitious composites, *International Journal of Solids and Structures*. 110–111 (2017) 152–169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.01.032>.
54. B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, S. Amziane, Flowability of fiberreinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, *Construction and Building Materials*. 24 (2010) 1664–1671.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.025>.
55. L.H.P. Silva, F.F.G. de Paiva, J.R. Tamashiro, M.P.B. de Almeida, V.P.K. de Maria, V.M.A. de Oliveira, A. Kinoshita, Bamboo as a Sustainable Building Material, in: *Bamboo and Sustainable Construction*, Springer, 2023: pp. 1–23.
56. D. Sedan, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite, (2007).
57. A. Govin, A. Peschard, R. Guyonnet, Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood, *Cement and Concrete Composites*. 28 (2006) 12–20.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002>.
58. O. Bahloul, A. Bourzam, A. Bahloul, Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l’alfa), in: *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, ENSET Oran, 2009.
59. E.T. Dawood, M. Ramli, Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers, *Construction and Building Materials*. 28 (2012) 193–200.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.057>.

REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES

60. ASTM C-150-97a n.d. <https://www.scribd.com/doc/312026435/ASTM-C-150-97-pdf> (accessed March 17, 2023).
61. 442-2013 N. CIMENT COMPOSITION, SPÉCIFICATIONS ET CRITÈRES DE CONFORMITÉ DES CEMENTS COURANTS. NORME Alger 2013.
62. 933-2 NE. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures 2020.
63. NF EN P18-555. Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables. 1990.
64. 1097-6 NE. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau 2014.
65. NF EN P18-598. Granulats Équivalent de sable analyse descripteurs. NORME Eur 1993:1–8.
66. 18-560 NE. Granulats Analyse granulométrique par tamisage analyse descripteurs modifications corrections 1990:1–9.
67. 1015-6 NE. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie6: détermination de la masse volumique apparente du mortier frais". Octobre 1999. Norme Française 1999.
68. 12390-7 EN. "Essai pour béton durci-Partie 7 : masse Volumique du béton " 2019.
69. 1015-11 NE. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci 2019.
70. EN N 12390-4. Essais pour béton durci - Partie 4 : résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai 2019.
71. N.E. 12504-4, "Essais pour béton dans les structures-Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son". Mai 2005., (n.d.)
72. ASTM C642-13 - Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concreten.d.<https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/ASTMC64213?gclid=CjwKCAj>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- woMSWBhAdEiwAVJ2ndpRBA3OaF26fpU9JXm0o_b4TDmQLNsAS-cqW8Ow44fMCzmNVWoDMiRoCle4QAvD_BwE(accessed July 15, 2022).
73. K. Abdelhamid, *Elaboration et caractérisation de nouveaux bio composites verts à base de déchets naturels : Applications en écoconstruction : Traitement de la fibre WFW*, Thèse Université du 08 Mai 1945 Guelma, Algérie., (2025).
 74. Siddique, R., & Khan, M. I. (2010). *Supplementary Cementing Materials*. Springer.
 75. Choi, Y. W., Moon, D. J., Chung, J. S., & Cho, S. K. (2014). Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 776–781.
 76. Zhang, Y., Geng, Y., & Liu, H. (2020). Effect of natural fiber on the fluidity and strength of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 235, 117458.
 77. Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, 79, 115–128.
 78. Jawaid, M., & Abdul Khalil, H. P. S. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1–18.
 79. Medina, G., Sánchez de Rojas, M. I., & Frías, M. (2017). *Reuse of construction and demolition waste for producing new construction material*. Springer.
 80. Li, Z., Wang, X., & Wang, L. (2006). Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites Part A*, 37(3), 497–505.
 81. Onuaguluchi, O. & Banthia, N. (2017). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96–108.
 82. Savastano, H., Agopyan, V., & John, V. M. (2003). Alternative materials for rural housing in developing countries: use of vegetable fibres and cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 25(6), 585–592.
 83. Bentur, A. & Mindess, S. (2007). *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Press.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

84. Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., & Valenza, A. (2015). A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 74, 74–94.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.034>
85. Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2012). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, 79, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.103>
86. Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education.
87. Alhozaimy, A., Soroushian, P., & Mirza, F. (2012). Mechanical properties of concrete incorporating rubber tire particles. *Cement and Concrete Composites*, 24(3), 363–369.
88. Medina, C., de Brito, J., & Agrela, F. (2017). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on the properties of structural concrete. *Construction and Building Materials*, 105, 591–603.
89. Le, D. H., Ludwig, H. M., & Kühne, H. C. (2020). Enhancing recycled concrete aggregates through optimized blending techniques. *Journal of Building Engineering*, 30, 101268.
90. Zhang, P., Li, Q., & Wang, K. (2021). Prediction of mechanical properties of concrete using UPV and machine learning. *Construction and Building Materials*, 270, 121430.
91. Nguyen, T., Picandet, V., Amziane, S., & Baley, C. (2010). Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14(5), 545–560.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693230>.
92. Mwaikambo, L. Y., & Ansell, M. P. (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, 84(12), 2222–2234. <https://doi.org/10.1002/app.10460>.
93. Bilba, K., & Arsène, M. A. (2008). Silane treatment of hemp fibres for reinforcement of cementitious composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(9), 1488–1495. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.05.003>.

ANNEXES

Table I-1: Composition chimique du NaOH utilisé dans cette recherche

Composition	Valeur mg/Kg
Chlorure Cl^-	≤ 20
Phosphate PO_4^{3-}	≤ 10
Silicate SiO_2	≤ 100
Sulfate SO_4^{2-}	≤ 30
Al	≤ 10
As	≤ 2
Ca	≤ 10
Fe	≤ 10
Hg	≤ 1
K	≤ 1000
Pb	≤ 0.5

FIGURER I-1. FICHE TECHNIQUE : CEM I 42.5N-SR3LH

SPA BISKRIA CIMENT

FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5N SR3 LH

RÉSISTANT AU SULFATE À FAIBLE CHALEUR D'HYDRATATION

CEM I 42.5N SR3 LH Un ciment gris à haute résistance aux environnements agressifs et à faible chaleur d'hydratation (LH - Low Heat), pour tous vos travaux dans les milieux à haute teneur en sulfates, Il convient également aux travaux de bétonnage massif et continu par temps chaud qui nécessite un Ciment dégageant moins de Chaleur.

CEM I 42.5N SR3 LH :
Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013).

DOMAINES D'APPLICATION

Un ciment pour tous vos travaux de constructions demandant de hautes résistances aux environnements agressifs, pour travaux à la mer, il est utilisé tout au long de l'année, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :

- Béton armé en milieux agressifs : eau de mer, eaux séléniteuses, pures ou industrielles.
- Ouvrage d'art massifs (ponts, barrages, murs de soutènement...).
- Béton routier : béton extrudé pour glissières de sécurité, de cunettes.
- Béton pour les stations d'épuration.
- Béton pour les milieux salés.

✓ APPLICATIONS RECOMMANDEES

- Stations et bassins d'épuration.
- Ouvrages agricoles.
- Environnement marin.
- Travaux de bétonnage massif des fondations
- Travaux en Milieu à forte concentration des chlorures et les sulfures.

🪣 FORMULATION CONSEILLÉE

	ciment	Sable (sec) 0/5	Gravillons 8/15mm 15/25mm	Eau (litres)
Dosage pour béton	50k X1	+ X7	+ X5 + X4	+ 25 L
	ciment	Sable Corseur 0/5mm	Sable (sec) 0-4mm	Eau (litres)
Mortier de briquetage	50k X1	+ X6	+ X9	+ 35 L
Mortier de finitions	50k X1	+ X9	+ X6	+ 35 L

🔍 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Remarque: un bidon = 10 litres

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	< 3
Teneur en sulfates (SO3)	2.2 - 2.6
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	< 3.5
Teneur en Chlorures (Cl)	< 0.04
Résidu insoluble	≤ 0.75
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C ₃ S	60
C ₂ A	< 3
C ₄ AF + 2 C ₃ A	< 20
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	26.5
Expansion à chaud (mm)	< 1
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	180
Fin de prise	320
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	18
28 jours (MPa)	54



Version : 01/2021

SPA BISKRIA CIMENT
Adresse : Djar Belahrache
Branis , Biskra Algerie

Tel : +213 (0) 560 753 424
Fax : +213 (0) 33 558 108
contact@biskriaciment-dz.com
www.biskriaciment-dz.com