



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 :

1. Allal Maria
2. Zabi Fatma

Intitulé :

Analyse de la contribution des cendres d'écorces d'orange et des fibres de palmier dattier aux mortiers cimentaires écologiques

Soutenue le : 14/ 06 /2026

Devant le jury composé de :

Dr : Massmoudi Fouzi

Dr : Tioua Tahar

Dr : Djedid Tarek

Dr : Khelifi Abdelhamid

Président

Examineur

Encadreur

Co-Encadreur

Année académique : 2025/2026



Remerciements

Louange à Allah, louange abondante, bonne et bénie, pour Ses innombrables bienfaits et grâces à notre égard, et pour nous avoir accordé le succès dans l'accomplissement de ce travail académique. Nous implorons le Tout-Puissant qu'il soit une source de bénéfice pour quiconque y aura accès.

C'est avec une immense gratitude et une sincère reconnaissance que nous tenons à rendre hommage à toutes celles et ceux qui ont éclairé notre chemin, soutenu nos efforts et guidé notre réflexion tout au long de ce parcours.

*Nous adressons nos plus vifs remerciements et notre profonde reconnaissance à nos directeurs de mémoire, le **Dr. Djedid Tarek** et le **Dr. Khelifi Abdelhamid**, pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour leur disponibilité, leur soutien constant et leurs précieux conseils qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.*

Nous tenons également à exprimer notre sincère gratitude aux honorables membres du jury, pour avoir bien voulu consacrer leur temps à l'examen et à l'évaluation de ce travail, et pour l'enrichir de leurs remarques pertinentes et de leur expertise.

*Nos remerciements vont aussi à **M. Zeghdi Othman**, agent de laboratoire au **LTP SUD**, pour sa coopération, sa gentillesse et l'aide précieuse qu'il nous a apportée lors de la réalisation de la partie expérimentale de ce travail. Nous lui souhaitons plein succès dans la suite de son parcours.*

*Nous exprimons par ailleurs notre gratitude au Laboratoire d'Exploitation et de **Valorisation des Ressources Énergétiques Sahariennes (LEVRES)**, pour les facilités accordées, les informations mises à notre disposition et le soutien apporté, qui ont contribué à la bonne réalisation de ce travail. Nous leur souhaitons une continuité fructueuse dans leurs activités scientifiques et professionnelles.*

Enfin, nous remercions sincèrement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce travail .

Dédicaces

Louange à Allah, qui m'a accordé la force et la guidance nécessaires pour mener ce travail à son terme, et qui m'a aidé à surmonter les épreuves et les difficultés rencontrées tout au long de ce parcours.

Je dédie également ce travail à toutes les personnes qui m'ont tendu la main, offert un mot d'encouragement ou élevé une prière sincère en ma faveur, et qui ont contribué, de près ou de loin, directement ou indirectement, à l'aboutissement de ce mémoire. Je leur exprime ma plus sincère gratitude et ma profonde reconnaissance.

Enfin, je dédie cet accomplissement à moi-même, en hommage aux efforts fournis, à la patience dont j'ai fait preuve et à la détermination qui m'a animé tout au long de ces années d'étude. Je prie Allah que ce succès soit le point de départ d'un avenir prometteur, riche en réalisations et en succès durables.

Résumé

Cette étude expérimentale porte sur l'influence de la substitution partielle du ciment par des cendres d'écorces d'orange (OPA) à des taux de 2 %, 4 % et 6 %, combinée à l'incorporation de fibres de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) à des taux de 0,5 %, 1 % et 1,5 % et des longueurs de 10, 20 et 30 mm, sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers cimentaires après 28 jours de cure. Les résultats montrent que l'incorporation de l'OPA et des fibres végétales améliore les performances mécaniques du mortier, avec une résistance à la compression maximale de 51,5 MPa (OPA 6 %/Fr 0,5 %/30 mm) et une résistance à la flexion maximale de 7,98 MPa (OPA 4 %/Fr 1 %/30 mm). La formulation OPA 6 %/Fr 0,5 %/10 mm présente une porosité minimale de 8,69 %, traduisant une amélioration de la compacité de la matrice cimentaire liée à l'activité pouzzolanique de l'OPA. L'ensemble de ces résultats confirme la pertinence de l'utilisation des déchets organiques locaux comme substituts partiels du ciment dans le cadre du développement durable.

Abstract

Mots-clés : Mortier cimentaire, Cendres d'écorces d'orange (OPA), Fibres de palmier dattier, Activité pouzzolanique, Résistance à la compression, Porosité, Développement durable.

This experimental study investigates the effect of partial cement replacement with orange peel ash (OPA) at rates of 2%, 4%, and 6%, combined with the incorporation of date palm fibers (*Phoenix dactylifera* L.) at rates of 0.5%, 1%, and 1.5% and lengths of 10, 20, and 30 mm, on the physical and mechanical properties of cement-based mortars after 28 days of curing. The results show that the incorporation of OPA and plant fibers improves the mechanical performance of the mortar, with a maximum compressive strength of 51.5 MPa obtained for the formulation (OPA 6%/Fr 0.5%/30 mm), and a maximum flexural strength of 7.98 MPa achieved for the formulation (OPA 4%/Fr 1%/30 mm). The formulation (OPA 6%/Fr 0.5%/10 mm) exhibited the lowest porosity value of 8.69%, indicating an improvement in the compactness of the cementitious matrix due to the pozzolanic activity of OPA. These results confirm the relevance of using local organic waste as partial cement substitutes within the framework of sustainable development.

Keywords: Cement mortar, Orange peel ash (OPA), Date palm fibers, Pozzolan activity, Compressive strength, Porosity, Sustainable development.

المخلص

تتناول هذه الدراسة التجريبية تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت برماد قشور البرتقال بنسب 2% و 4% و 6%، مع دمج ألياف نخيل التمر بنسب 0.5% و 1% و 1.5% وبأطوال 10 و 20 و 30 mm ، على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للملاط الإسمنتية بعد 28 يومًا من المعالجة.

تُظهر النتائج أن دمج رماد قشور البرتقال والألياف النباتية يحسن الأداء الميكانيكي للملاط، حيث بلغت المقاومة القصوى للضغط 51.5 ميغاباسكال للخلطة (OPA 6%/Fr 0.5%/30 mm) ، بينما بلغت المقاومة القصوى للانحناء 7.98 ميغاباسكال للخلطة (OPA 4%/Fr 1%/30mm). كما أظهرت الخلطة (OPA 6%/Fr 0.5%/10mm) أقل قيمة للمسامية بلغت 8.69%، مما يدل على تحسن تراص المصفوفة الإسمنتية نتيجة النشاط البوزولاني لرماد قشور البرتقال.

وتؤكد هذه النتائج أهمية تثمين النفايات العضوية المحلية كبديل جزئية للإسمنت في إطار التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية : ملاط إسمنتي، رماد قشور البرتقال (OPA)، ألياف نخيل التمر، النشاط البوزولاني، مقاومة الضغط، المسامية، التنمية المستدامة.

Table des Matières

Remerciements.....	
Dédicaces.....	
Résumé	I
Abstract.....	I
المخلص.....	II
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : Etude bibliographique

I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur les déchets	3
I.2.1 Définition des déchets.....	3
I.2.2 Classification des déchets	4
I.2.2.1 Selon la réglementation algérienne	4
I.2.2.2 Selon la nature	5
I.2.2.3 Selon l'origine	7
I.2.2.4 Selon la nature des déchets de bâtiment.....	9
I.2.3 Les impacts environnementaux des déchets.....	11
I.2.3.1 L'impact sur la qualité de l'air	11
I.2.3.2 L'impact sur les sols	11
I.2.3.3 L'impact sur les ressources en eau.....	11
I.2.4 Gestion des déchets.....	12
I.2.4.1 Définition de la gestion des déchets.....	12
I.2.4.2 Les étapes de la gestion des déchets.....	12
I.2.4.3 Le traitement et la valorisation.....	12
I.2.4.4 Recyclage des déchets.....	14

I.3 Avantages et inconvénients du recyclage des déchets	16
I.3.1 Les avantages.....	17
I.3.2 Les inconvénients.....	17
I.4 Généralités sur les fibres	17
I.4.1 Types des fibres	18
I.4.2 Les fibres naturelles.....	18
I.4.3 Les fibres végétales.....	19
I.4.3.1 Définition.....	19
I.4.3.2 Structure chimique des fibres végétales.....	20
I.4.3.3 Propriétés physiques, chimiques et mécaniques	22
I.4.3.4 Présence des fibres végétales en Algérie	23
I.4.3.5 Les fibres du palmier dattier (Phoenix dactylifera L.).....	24
I.4.3.6 Avantages et inconvénients des fibres végétales	25
I.5 Caractéristiques des composites cimentaires fibrés.....	27
I.5.1 Rôle des fibres dans le renforcement du secteur de la construction.....	27
I.5.2 Influence des fibres sur les propriétés rhéologiques	28
I.6 Valorisation des déchets de fruits	28
I.6.1 Déchets organiques	28
I.6.2 Déchets de fruits	29
I.6.2.1 Propriétés des résidus de fruits.....	30
I.6.3 Types de déchets de fruits	31
I.7 Valorisation des écorces d'orange dans les matériaux de construction.....	31
I.7.1 Définition de l'orange et ses composants.....	32
I.7.2 Propriétés physico-chimiques des écorces d'orange.....	33
I.7.2.1 Propriétés physiques.....	33
I.7.2.2 Propriétés chimiques.....	34
I.7.3 Valorisation des écorces d'orange comme substitut partiel du ciment	35
I.7.4 Caractérisation des cendres obtenues après traitement thermique	36
I.8 Conclusion.....	37

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1 Introduction.....	39
II.2 Description des matériaux utilisés.....	39
II.2.1 Ciment	40
II.2.2 Eau de gâchage	41
II.2.3 Sable	41
II.2.4 Cendres d'écorces d'orange (OPA)	42
II.2.5 Fibres végétales	45
II.3 Caractérisation des matériaux utilisés	48
II.3.1 Caractérisation du sable — Propriétés physiques	48
II.3.1.1 Équivalent de sable	48
II.3.1.2 Analyse granulométrique et module de finesse	50
II.3.1.3 Masse volumique du sable.....	52
II.3.2 Caractérisation physiques des cendres d'écorces d'orange (OPA)	54
II.4 Méthodes d'essais.....	56
II.4.1 Formulation et fabrication des éprouvettes	56
II.4.2 Préparation des échantillons d'essai	57
II.5 Méthodologie expérimentale	58
II.5.1 Caractérisation à l'état frais.....	58
II.5.1.1 Essai d'étalement.....	58
II.5.1.2 Mesure de la masse volumique	59
II.5.2 Caractéristiques à l'état durci	59
II.5.2.1 Essais d'auscultation dynamique (UPV)	59
II.5.2.2 Porosité accessible à l'eau	60
II.5.2.3 Absorption d'eau par capillarité	61
II.5.2.4 Essai de flexion à trois points	62
II.5.2.5 Essai de compression.....	64
II.6 Conclusion	65

CHAPITRE III : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1 Introduction	67
III.2 Caractérisation des mortiers à l'état frais.....	67
III.2.1 Ouvrabilité.....	67

III.2.2 Masse volumique à l'état frais	68
III.3 Caractérisation des mortiers à l'état durci.....	69
III.3.1 Résistance à la compression	69
III.3.2 Résistance à la flexion trois points	71
III.3.3 Vitesse d'impulsion des ultrasons (UPV)	72
III.3.4 Porosité accessible à l'eau.....	73
III.3.5 Absorption d'eau par immersion totale.....	74
III.3.6 Absorption d'eau par capillarité.....	75
III.4 Conclusion.....	80

Liste des Figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Déchets ménagers et assimilés.	3
Figure II.1	Collecte des écorces d'orange.	39
Figure II.2	Étape de broyage des écorces d'orange séchées en poudre fine.	40
Figure II.3	Étapes de tamisage du poudre d'écorces d'orange à l'aide d'un tamis normalisé (80 μm).	40
Figure II.6	Le palmier dattier.	42
Figure II.7	Prélèvement des fibres de palmier dattier.	42
Figure II.8	Séparation des fibres de palmier dattier.	43
Figure II.9	Lavage des fibres à l'eau du robinet.	43
Figure II.10	Lavage des fibres à l'eau distillée.	44
Figure II.11	Longueurs des fibres de palmier utilisées.	44
Figure II.13	Courbe granulométrique du sable utilisé.	48
Figure II.14	Étapes de l'essai de la masse volumique apparente.	49
Figure II.15	Étapes de l'essai de la masse volumique absolue.	50
Figure II.16	Étapes de l'essai de la masse volumique apparente (OPA).	51
Figure III.1	Répartition des valeurs d'étalement des mortiers en fonction du taux de substitution en OPA et de la teneur en fibres végétales.	64
Figure III.2	La masse volumique des mortiers à l'état frais.	65
Figure III.3	Résistances en compression des mortiers après 28 jours de cure à l'eau.	66
Figure III.4	Résistances en flexion des mortiers après 28 jours de cure à l'eau.	68
Figure III.5	Vitesse d'impulsion des ultrasons (UPV) des différents mortiers.	69
Figure III.7	Effet de la substitution partielle du ciment par l'OPA et de l'ajout de fibres de palmier dattier sur la porosité accessible à l'eau des mortiers après 28 jours de cure.	70
Figure III.8	Résultats de l'absorption d'eau par immersion totale des différentes formulations après 28 jours de cure.	71
Figure III.9a	Cinétique d'absorption capillaire du mortier témoin.	72
Figure III.9b	Cinétique d'absorption capillaire — OPA 2% + Fibres de palmier dattier.	73
Figure III.9c	Cinétique d'absorption capillaire — OPA 4% + Fibres de palmier dattier.	74
Figure III.9d	Cinétique d'absorption capillaire — OPA 6% + Fibres de palmier dattier.	75

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Les propriétés mécaniques des diverses fibres végétales.	21
Tableau I.2	Structure chimique de diverses fibres végétales.	22
Tableau II.1	Caractéristiques techniques du ciment CEM I 42.5N SR3 LH.	39
Tableau II.2	Composition chimique du sable.	39
Tableau II.3	Résultats de l'essai d'équivalent de sable.	46
Tableau II.4	Résultats de l'essai d'analyse granulométrique.	48
Tableau II.5	Résultats de l'essai de la masse volumique apparente.	50
Tableau II.6	Résultats de l'essai de la masse volumique absolue.	51
Tableau II.7	Résultats de l'essai de la masse volumique apparente (OPA).	52
Tableau II.8	Les différentes formulations des mortiers étudiés.	53
Tableau II.9	Valeurs d'étalement NF EN 1015-6.	55
Tableau II.10	Classification du béton sur la base de mesures des vitesses d'impulsions ultrasoniques.	56

Introduction générale

Le secteur de la construction connaît, depuis plusieurs années, un intérêt croissant pour le développement de matériaux plus durables, capables d'assurer des performances mécaniques satisfaisantes tout en limitant leur impact sur l'environnement. La forte consommation de ciment, associée à l'épuisement progressif des ressources naturelles et aux émissions de gaz à effet de serre liées à sa fabrication, a conduit les chercheurs à s'orienter vers des solutions alternatives fondées sur la valorisation de ressources renouvelables et de sous-produits issus des activités agricoles et agroalimentaires.

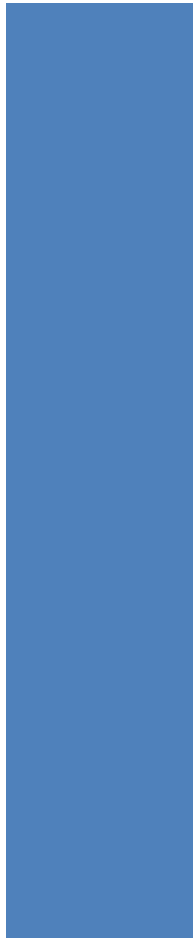
Dans cette perspective, la valorisation des déchets organiques constitue une approche prometteuse permettant à la fois de réduire les quantités de déchets générées et de développer des matériaux de construction plus respectueux de l'environnement. Parmi ces ressources, les cendres d'écorces d'orange et les fibres végétales issues du palmier dattier présentent un intérêt particulier en raison de leur disponibilité locale, de leur caractère renouvelable et de leur potentiel d'utilisation dans les matériaux cimentaires.

La présente étude porte sur l'utilisation des cendres d'écorces d'orange (OPA) comme substitut partiel du ciment à des taux de 2 %, 4 % et 6 %, ainsi que sur l'incorporation de fibres de palmier dattier à des dosages de 0,5 %, 1 % et 1,5 % et à des longueurs de 10, 20 et 30 mm. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de ces ajouts sur les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers cimentaires après 28 jours de cure humide. Cette démarche contribue également à la valorisation de ressources locales abondantes dans la région d'El Oued et s'inscrit dans une logique de développement durable et d'économie circulaire.

Afin d'atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier présente une synthèse bibliographique consacrée aux fibres végétales, aux résidus de fruits et à leur valorisation dans les matériaux de construction. Le deuxième décrit les matériaux utilisés, le programme expérimental ainsi que les méthodes d'essai adoptées. Enfin, le troisième chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus.

Chapitre 01

Etude bibliographies



I.1. Introduction

L'augmentation continue des quantités de déchets générés par les activités humaines constitue un défi environnemental majeur, ce qui a conduit à la recherche de solutions appropriées et durables pour leur valorisation. Parmi les solutions proposées, l'exploitation des résidus agricoles et des déchets issus de l'industrie agroalimentaire se distingue par leur abondance et leur fort potentiel de valorisation.

Dans ce contexte, les fibres végétales et les déchets de fruits représentent des ressources prometteuses dans le domaine de la construction. En effet, leurs propriétés physiques et mécaniques permettent leur incorporation dans les matériaux cimentaires afin d'améliorer certaines de leurs performances tout en contribuant à la valorisation des ressources naturelles renouvelables.

Ainsi, ce chapitre présente des notions générales sur les fibres végétales et les déchets de fruits, en mettant en évidence leurs caractéristiques ainsi que leurs possibilités de valorisation dans le domaine de la construction durable.

I.2. Généralités sur les déchets

I.2.1. Définition des déchets

Le terme « déchet » renvoie, dans son acception première, à la diminution que subit une chose dans son volume, sa valeur ou dans certaines de ses propriétés. Il est employé comme synonyme des résidus dont on se défait en raison de leur perte d'utilité ou de valeur marchande.

Sur le plan juridique, la loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux, inscrite dans le code de l'environnement français, définit le déchet comme « tout résidu issu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, tout matériau ou produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné par son détenteur ou dont celui-ci a l'intention de se défaire ».

Sur le plan conceptuel, le déchet désigne tout produit ou résidu résultant de processus métaboliques ou d'activités humaines, qu'elles soient de nature domestique, industrielle ou agricole, dès lors que son producteur initial se trouve dans l'impossibilité de lui conférer un nouvel usage ou une nouvelle affectation [1]

I.2.2 Classification des déchets

I.2.2.1 Selon la réglementation algérienne

La législation algérienne distingue quatre catégories principales de déchets, qui se présentent comme suit :

- **Déchets ménagers et assimilés :**

Relèvent de cette catégorie l'ensemble des résidus produits par les ménages, y compris les déchets issus des secteurs industriel, commercial, artisanal et autres activités connexes, dès lors qu'ils partagent avec les déchets ménagers les mêmes caractéristiques physiques et la même composition [2].



Figure I.1.Déchets ménagers et assimilés.

- **Déchets spéciaux**

Cette catégorie regroupe l'ensemble des résidus provenant des activités industrielles, agricoles, sanitaires, de services et autres, qui ne peuvent être soumis au même système de collecte, de transport et de traitement que les déchets ménagers et inertes, en raison des particularités de leur nature et de la composition de leurs constituants [2].

- **Déchets spéciaux dangereux**

Cette catégorie constitue une sous-classe des déchets spéciaux et se distingue par la présence de substances nocives susceptibles de porter atteinte à la santé publique et/ou à

l'environnement, que ce soit en raison de la nature de leurs composants ou des propriétés toxiques des matières qu'ils renferment [2].

- **Déchets inertes**

Cette catégorie englobe les résidus issus de l'exploitation des carrières et des mines, ainsi que des opérations de démolition, de construction et de rénovation. Ils se caractérisent par leur absence de toute transformation physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et par leur teneur nulle en substances dangereuses ou en éléments générateurs de nuisances susceptibles d'affecter la santé publique et/ou l'environnement [2].



Figure I.2. Déchets inertes.

I.2.2.2 Selon la nature

- **Déchets dangereux**

Les déchets dangereux constituent l'une des retombées les plus préoccupantes de l'activité industrielle, en raison de leur teneur en éléments toxiques et nocifs à des proportions variables, qui font d'eux une source de menace directe pour la santé humaine et la stabilité de l'écosystème. En raison de cette spécificité, leur prise en charge requiert le recours à des méthodes de traitement adaptées et spécialisées, en adéquation avec leur niveau de dangerosité et la nature de leurs constituants.

Un déchet relève de cette catégorie dès lors qu'il présente au moins l'une des propriétés suivantes : la capacité explosive, le pouvoir comburant, l'inflammabilité, l'effet irritant, la

nocivité sanitaire, la toxicité, le caractère cancérogène, la nature infectieuse, le pouvoir corrosif, ou la propriété mutagène [2].



Figure I.3 . Déchets dangereux [2].

- **Déchets non dangereux**

Les déchets non dangereux se définissent comme des résidus dépourvus de toute substance toxique, et qui ne recèlent aucune propriété susceptible d'en faire une source de danger pour la santé humaine ou pour l'environnement. Leurs origines sont multiples et concernent aussi bien les établissements industriels et commerciaux que les collectivités locales et les ménages.

Le traitement de ces déchets revêt une importance considérable, dans la mesure où il permet leur conversion en matières réemployables ou en matières premières secondaires, réduisant ainsi la pression exercée sur les ressources naturelles primaires et renforçant le principe de l'économie circulaire [2].



Figure I.4. Déchets non dangereux.

Principales typologies de déchets acceptés :

Déchets Industriels Banals (D.I.B), Ordures ménagères résiduelles (O.M.R.), Emballages valorisables en mélange ou pré-triés Bois A et Bois B, Déchets verts, Papiers, cartons, Verre, Déchets minéraux (sable, laitiers...)

- **Déchets inertes**

Les déchets inertes représentent ces résidus qui se distinguent par leur stabilité totale face aux transformations physiques, chimiques et biologiques, car ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne génèrent aucune réaction de cette nature. Ils sont également dépourvus de toute biodégradabilité et n'exercent, par nature, aucune influence négative sur les matières avoisinantes, ce qui les rend sans effet sur l'équilibre environnemental et la santé humaine [2].

- **Déchets ultimes**

Les déchets ultimes constituent le dernier maillon de la chaîne de gestion des déchets. Il s'agit de résidus ayant atteint la fin de leur cycle de valorisation, ne pouvant plus faire l'objet ni de recyclage ni de récupération énergétique. Entrent dans ce cadre tous les déchets, qu'ils soient issus ou non d'un traitement antérieur, devenus insusceptibles de traitement au regard des données techniques et économiques actuelles, que ce soit pour l'extraction de leur fraction valorisable ou pour l'atténuation de leur caractère polluant ou dangereux [2].

I.2.2.3 Selon l'origine

Ce critère classe les déchets en fonction de leur source de production et distingue les catégories suivantes :

- **Déchets ménagers et assimilés**

Relèvent de cette catégorie l'ensemble des résidus produits par les ménages, y compris les déchets issus des activités économiques, commerciales et artisanales, dès lors qu'ils partagent avec les déchets ménagers les mêmes caractéristiques physiques, la même nature et la même composition [2].



Figure I.5. Déchets ménagers et assimilés

- **Déchets des activités économiques**

Cette catégorie regroupe les résidus des entreprises dont la nature et la composition se rapprochent de celles des déchets ménagers. Le législateur a reconnu la possibilité de les assimiler à ces derniers, ce qui autorise leur soumission au même système de collecte et d'élimination que les déchets ménagers [2].

- **Déchets industriels**

Cette catégorie englobe l'ensemble des résidus générés par l'exercice des activités industrielles, agro-industrielles, artisanales et toutes activités de production similaires [2].

- **Déchets médicaux et pharmaceutiques**

Cette catégorie regroupe les résidus issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement sous toutes ses formes, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire. Elle comprend également les déchets produits par les hôpitaux publics, les cliniques privées, les centres de recherche scientifique, les laboratoires d'analyses et tous les établissements apparentés [2].



Figure I.6. Déchets médicaux et pharmaceutiques .

- **Déchets organiques**

Cette catégorie regroupe sous une même appellation plusieurs termes aux significations voisines, tels que les déchets biodégradables, compostables, les bio-déchets et les déchets fermentescibles. On entend par là tout résidu susceptible de subir une décomposition biologique naturelle en conditions aérobies ou anaérobies, parmi lesquels figurent les résidus verts, les boues de stations d'épuration, les déchets organiques de cuisine, les journaux et les fleurs coupées. Ces déchets se dégradent sous l'effet de l'activité microbologique des bactéries, des champignons et autres micro-organismes, ou par le biais de réactions chimiques telles que l'oxydation et la minéralisation, à condition qu'ils soient exempts de toute contamination [2].



Figure I.7 .Déchets organiques [6].

I.2.2.4. Selon nature des déchets de bâtiment

- **Déchets inertes (DI)**

Les déchets inertes sont des déchets minéraux non pollués, qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres matières de façon à porter atteinte à l'environnement ou à la santé humaine. Les déchets inertes issus du secteur du bâtiment comprennent les débris de : béton, briques, tuiles, céramiques, carrelages et matériaux à base de gypse [3].

- **Déchets industriels banals (DIB)**

Les déchets industriels banals ne relèvent ni de la catégorie des déchets inertes ni de celle des déchets dangereux. Ils sont produits par les entreprises et peuvent, dans certains cas, être

traités dans les mêmes installations que les ordures ménagères. Parmi les exemples les plus courants : les cartons, le verre, les déchets de cuisine et les emballages [3].

- **Déchets de chantier**

Les déchets de chantier regroupent l'ensemble des déchets issus des travaux de construction et de démolition. Ils se répartissent entre déblais non pollués, gravats minéraux, déchets incinérables et déchets mélangés.

Les gravats se divisent en quatre catégories : les matériaux bitumineux issus du fraisage ou de la démolition de revêtements bitumineux, les matériaux non bitumineux provenant du fraisage des couches de fondation, le béton de démolition issu de la destruction d'ouvrages en béton armé ou non armé, et les matériaux non triés constitués d'un mélange de béton, de briques et de pierre naturelle [3].

- **Déchets de démolition**

La démolition est la principale source de déchets du bâtiment, générant de grandes quantités de matériaux lourds et de grand format. Ces matériaux sont souvent mélangés, ce qui complique leur séparation lors du recyclage et réduit leur qualité, sans oublier les nuisances directes de bruit et de poussière.

La démolition conventionnelle s'effectue par deux méthodes:

L'expansion : par éclateurs et vérins hydrauliques et mortiers expansifs

L'explosion : par explosifs à charge détonante ou découpante

Le tri à la source lors de la démolition reste la meilleure solution, bien qu'il exige une organisation rigoureuse des travaux, une formation du personnel et une maîtrise des coûts [3].



Figure I.8. Déchets de démolition

I.2.3. Les impacts environnementaux des déchets

Les déchets industriels causent des dommages considérables à l'environnement lorsqu'ils font l'objet d'une gestion inadéquate, et ces dommages touchent trois milieux environnementaux fondamentaux : l'air, le sol et l'eau [4].

I.2.3.1. L'impact sur la qualité de l'air

Les sites d'enfouissement reçoivent des quantités importantes de déchets de nature variée. Lorsque les déchets organiques se mélangent à l'humidité, il se produit une génération de gaz méthane, qui compte parmi les gaz à effet de serre les plus nocifs et les plus contributeurs au phénomène du réchauffement climatique [4].

I.2.3.2. L'impact sur les sols

Bien que la pollution des sols suscite moins d'attention que celle de l'eau et de l'air, elle demeure un problème environnemental sérieux. Les études révèlent qu'environ 70 % des déchets produits sont enfouis dans le sous-sol, y compris les déchets nucléaires, ce qui entraîne à long terme une dégradation de la structure des sols et une contamination de leurs composantes naturelles [4].

I.2.3.3. L'impact sur les ressources en eau

Chaînes sources en eau subissent une pression environnementale croissante due aux déchets, puisque plus de six millions de tonnes de déchets divers sont rejetés chaque année dans les océans, causant des dommages graves aux organismes aquatiques et perturbant l'équilibre des

chaînes trophiques marines. Les déchets organiques réagissent avec les eaux de pluie en générant des pluies acides qui atteignent les rivières et les océans. La situation est aggravée par le déversement de rejets industriels, notamment les solvants et les substances chimiques dangereuses, dans les cours d'eau, sans traitement préalable ni contrôle suffisant [4].

I.2.4. Gestion des déchets

I.2.4.1. Définition de la gestion des déchets

La gestion des déchets désigne l'ensemble des opérations relatives à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, ainsi qu'au contrôle de ces opérations, conformément aux dispositions de la loi n° 01-19 du 12 décembre 2001, de manière à assurer la protection de la santé humaine et la préservation de l'environnement contre les effets nuisibles engendrés par les déchets de toute nature, La réduction à la source, la réutilisation, le recyclage, la valorisation et l'élimination doivent être privilégiés dans cet ordre dans le domaine de la gestion des déchets [5].

I.2.4.2. Les étapes de la gestion des déchets

- **La collecte**

La collecte des déchets constitue la première étape dans la chaîne de leur gestion, et elle est obligatoire quelle que soit la filière de traitement envisagée. Les communes assurent généralement cette mission sous deux formes :

La première est la collecte sélective, qui repose sur le tri et la séparation des déchets dans des récipients distincts selon leur nature. La seconde est la collecte globale, assurée par le service public, où les déchets sont ramassés en mélange sans distinction entre leurs différentes catégories [6].

- **Le transport**

Une fois les déchets collectés, ils sont acheminés vers les centres de traitement par différents moyens, notamment la route, le rail, la voie maritime et parfois aérienne, selon la nature des déchets et la distance à parcourir [6].

- **Le stockage**

Lorsque le traitement immédiat des déchets n'est pas possible, on procède à leur stockage dans des installations spécialisées. Ces installations se divisent en deux catégories : les installations de stockage de déchets non dangereux, désignées par le sigle ISDND, et les installations de stockage de déchets dangereux, désignées par le sigle ISDD. Les deux nécessitent une autorisation préalable délivrée par les autorités compétentes [6].

I.2.4.3. Le traitement et la valorisation

Cette étape suit une hiérarchie qui privilégie la réutilisation sur le recyclage, et le recyclage sur l'élimination, dans le cadre de l'économie circulaire.

- **La réutilisation**

La réutilisation consiste à employer de nouveau les matières et produits devenus des déchets, après les avoir soumis aux opérations de contrôle, de nettoyage et de réparation nécessaires, sans qu'aucune autre opération de prétraitement ne soit requise [6].

- **Le recyclage**

Le recyclage vise à réintroduire les matériaux constitutifs des déchets dans le cycle de production, contribuant ainsi à réduire le volume des déchets, à préserver les ressources naturelles et à limiter les émissions de gaz à effet de serre [6].

- **Le compostage**

Le compostage transforme la fraction organique des déchets en compost par un processus biologique aérobie, au cours duquel les micro-organismes dégradent la matière organique en présence d'oxygène pour produire un humus semblable à la tourbe. Ce procédé permet de réduire la masse des déchets d'environ 40% [6].



Figure I.9. Compostage des déchets

- **La méthanisation**

La méthanisation est un procédé biologique de traitement des déchets organiques réalisé en milieu anaérobie, c'est-à-dire en absence d'oxygène. Elle permet la production de biogaz, composé principalement de méthane, ainsi que d'un résidu organique appelé digestat, valorisable comme amendement après traitement.

Cette technique est appliquée aux déchets humides et facilement biodégradables, notamment les déchets organiques ménagers, les boues, les graisses, ainsi que certains résidus issus des industries agroalimentaires et du secteur agricole [7].

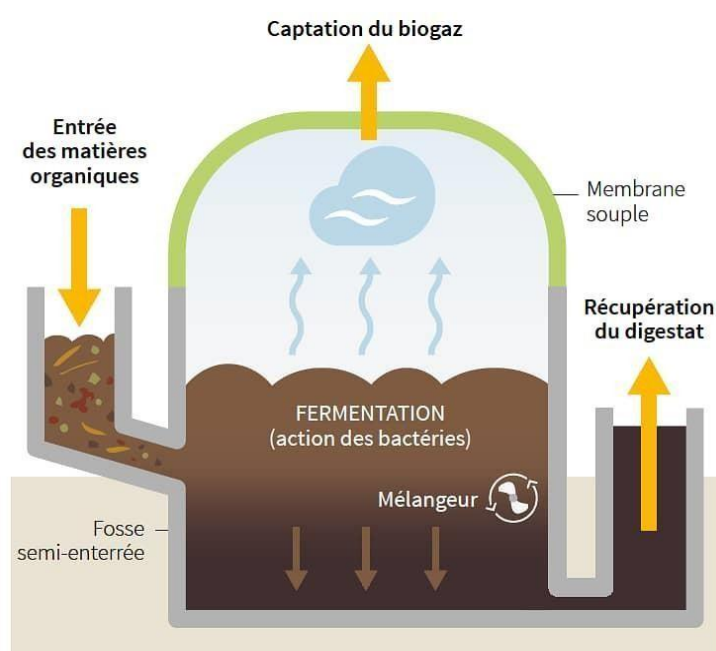


Figure I.10. Procédé de production de biogaz et digestat [6].

- **L'élimination**

L'élimination représente le dernier recours dans la gestion des déchets et se présente sous deux formes :

- **L'incinération**

L'incinération est un procédé thermique qui détruit complètement les déchets sous l'effet d'une forte chaleur et de l'oxygène de l'air. Les résidus solides de combustion représentent entre 25% et 30% du poids initial des déchets et sont valorisés comme ajouts cimentaires [6].

- **La mise en décharge**

La mise en décharge est l'un des modes les plus anciens d'élimination des déchets en raison de son faible coût. Cependant, elle engendre une pollution de l'air, du sol et des eaux, ce qui en fait aujourd'hui le dernier recours dans la gestion des déchets [6].

I.2.4.4. Recyclage des déchets

- **Définition**

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et ménagers visant à réintroduire leurs composants dans le cycle de production. Son importance environnementale se manifeste à travers deux dimensions fondamentales : la réduction du volume des déchets et la préservation des ressources naturelles. Ces procédés varient considérablement en termes de coût et de rentabilité ; certains sont simples et peu onéreux, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables, ce qui a conduit, dans bien des cas, le législateur à intervenir pour concilier les objectifs écologiques et les exigences des consommateurs [8].

- **Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de gestion des déchets connue sous le nom des « trois R » :**

Réduire : limiter la production des déchets à la source.

Réutiliser : donner aux produits usagés de nouveaux usages.

Recycler : traiter les déchets et les transformer en matières réutilisables dans les processus de production.

Cependant, malgré sa contribution à la réduction des quantités envoyées en enfouissement ou en incinération, le recyclage demeure insuffisant pour faire face à l'augmentation continue du volume des déchets produits [8].



Figure I.11. (reduce, reuse, recycle) Symbol [6].

- **Techniques de recyclage**

Procédés de recyclage

Les techniques de recyclage se répartissent en trois grandes catégories :

- **Le recyclage chimique** : repose sur des réactions chimiques pour traiter les déchets, notamment pour séparer leurs composants les uns des autres.
- **Le recyclage mécanique** : consiste à transformer les déchets par des machines, comme les opérations de broyage et de concassage.
- **Le recyclage organique** : s'appuie sur le compostage et la fermentation pour produire des engrais et des combustibles biologiques tels que le biogaz [8].

La chaîne du recyclage

- **Collecte des déchets**

Le processus de recyclage débute par la phase de collecte. Les déchets non recyclables sont orientés vers l'incinération ou l'enfouissement, tandis que les déchets recyclables sont destinés à la transformation. Le mode de collecte le plus répandu est la collecte sélective, fondée sur le principe que le producteur du déchet est responsable de son tri à la source. Après la collecte, les déchets sont acheminés vers des centres de tri où ils sont soumis à diverses opérations, dont le tri manuel, afin d'optimiser les étapes de transformation ultérieures [8].

- **Transformation**

Les usines de transformation prennent en charge les déchets triés et les intègrent dans les lignes de production propres à chaque catégorie. Ils y entrent sous forme de déchets bruts et en ressortent sous forme de matières prêtes à l'emploi [8].

- **Commercialisation et consommation**

Les matières transformées entrent dans la fabrication de nouveaux produits mis à la consommation. Ces produits achèvent leur cycle lorsqu'ils arrivent en fin de vie : ils sont alors collectés de nouveau et soumis à un nouveau cycle de recyclage [8].

I.3. Avantages et inconvénients du recyclage des déchets

I.3.1. Les avantages

Réduction de la pollution

Les déchets industriels, qu'il s'agisse du plastique, des boîtes métalliques ou des produits chimiques, figurent parmi les principales sources de pollution environnementale. Le recyclage réintègre ces matériaux dans le cycle de production au lieu de les rejeter, ce qui se traduit directement par une baisse des niveaux de pollution [9].

Atténuation du réchauffement climatique

La combustion des déchets libère des quantités importantes de dioxyde de carbone, gaz qui alimente le phénomène du réchauffement climatique. Le recyclage détourne les déchets de cette filière et prévient ces émissions [9].

I.3.2. Les inconvénients

Coûts d'investissement élevés

La création d'une unité de recyclage est onéreuse : elle nécessite l'acquisition de véhicules spécialisés, l'entretien des installations, la gestion des programmes de traitement des déchets et l'élimination sécurisée des produits chimiques. C'est ce qui rend le recyclage économiquement peu rentable dans bien des cas [9].

Conditions sanitaires dégradées sur les sites de recyclage :

La plupart des sites de recyclage souffrent de mauvaises conditions sanitaires dues à l'accumulation de différents types de déchets, ce qui favorise la propagation des maladies. Les substances chimiques toxiques qui s'en dégagent représentent par ailleurs un risque réel pour la santé des travailleurs et des populations riveraines [9].

I.4 GÉNÉRALES SUR LES FIBRES

Les fibres sont des éléments très longs et très fins qui ont l'air de filaments. Leur diamètre peut aller de 3 à 10 micromètres. On utilise ces fibres pour améliorer et renforcer les propriétés de certains matériaux, comme les matériaux faits de fibres. Les fibres sont très utiles pour rendre ces matériaux plus résistants[10].

I.4.1 Les Types des fibres

Les fibres naturelles sont des fibres extraites de la nature. Elles se caractérisent par leur capacité de renouvellement, leur biodégradabilité et leur faible coût.

Les fibres synthétiques sont des fibres élaborées à partir de substances chimiques qui n'existent pas à l'état naturel. Ces fibres reposent sur des sources non biodégradables. Elles présentent une résistance élevée, mais constituent une source de pollution environnementale [11].

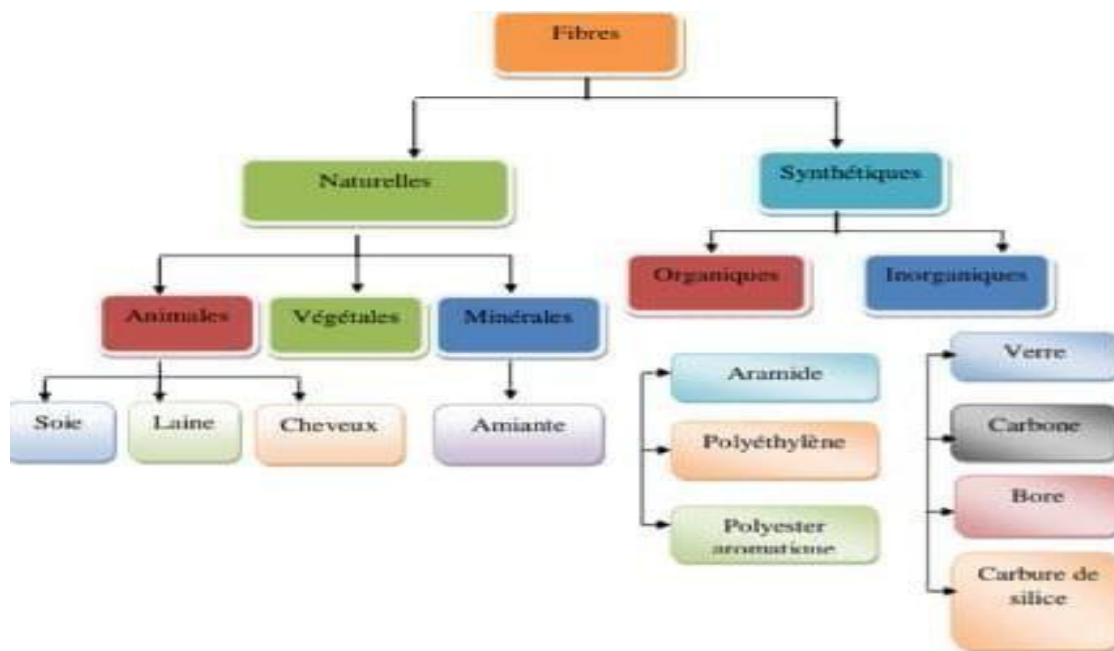


Figure I.12. Classification générale des fibres [10].

I.4.2 Les fibres naturelles

Ces dernières années, l'intérêt des chercheurs et des industriels pour les fibres naturelles s'est nettement accru, en raison des évolutions économiques et de la prise de conscience des enjeux environnementaux, notamment dans le domaine des matériaux composites. Cette orientation a favorisé le développement de matériaux plus durables, grâce à leur capacité à réduire l'impact environnemental et à valoriser les ressources renouvelables. Par ailleurs, les fibres naturelles jouent un rôle important dans la récupération et la valorisation des déchets agricoles et biologiques, tout en contribuant à la capture et au stockage du dioxyde de carbone (CO₂). Cela a conduit à l'élargissement de leurs applications dans plusieurs secteurs, tels que l'industrie automobile, le bâtiment, ainsi que certaines applications aéronautiques.

Les fibres naturelles se distinguent par plusieurs caractéristiques qui leur confèrent des avantages par rapport aux fibres synthétiques, notamment leur faible coût, leur biodégradabilité, leur disponibilité abondante et leur impact environnemental limité. Malgré la complexité de leur structure biologique, elles présentent des propriétés mécaniques et physiques intéressantes, ce qui a encouragé de nombreux travaux de recherche orientés vers le développement de matériaux composites à base de fibres naturelles.

Les fibres naturelles sont généralement classées selon leur origine en fibres végétales, animales et minérales. Les fibres végétales sont les plus utilisées dans le domaine des matériaux composites, en raison de leur teneur élevée en cellulose et de leurs bonnes propriétés mécaniques. Elles sont extraites de différentes parties des plantes, telles que les tiges, les feuilles, les graines et les fruits. Quant aux fibres animales, comme la laine et la soie, elles sont principalement utilisées dans le domaine textile[12] [13].

I.4.3 Les fibres végétales

I.4.3.1 Définition

Les fibres végétales sont extraites de la biomasse des plantes. Elles peuvent être obtenues à partir de différentes parties du végétal, telles que la tige, la feuille ou le fruit. Elles sont principalement constituées de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et de pectine, des composés qui leur confèrent une structure complexe et des propriétés physico-mécaniques particulières.

Ces fibres sont largement utilisées dans le domaine des matériaux composites grâce à leurs nombreux avantages : faible densité, bonnes performances en isolation thermique et propriétés mécaniques satisfaisantes. Elles présentent en outre un atout environnemental majeur, puisqu'elles sont issues de ressources renouvelables et biodégradables, ce qui en fait un choix durable face aux enjeux écologiques actuels.

Cependant, toutes les fibres végétales ne présentent pas le même niveau de performance mécanique. Certaines d'entre elles se distinguent par des caractéristiques supérieures, les rendant plus adaptées au renforcement des matériaux composites. Parmi celles-ci figurent les fibres libériennes, extraites de l'écorce des tiges, telles que le lin, le chanvre, le jute, le kenaf et le ramie. Leur excellente résistance mécanique s'explique par leur rôle structural essentiel au sein de la plante .

On trouve également les fibres foliaires, comme l'abaca, le sisal, l'ananas et l'alfa, ainsi que les fibres issues des graines ou des fruits, telles que le coton, la fibre de coco (coir) et le kapok. Toutes contribuent à l'amélioration des propriétés des polymères. Néanmoins, le lin et le chanvre demeurent, depuis plusieurs décennies, parmi les fibres les plus employées dans le renforcement des composites polymériques, grâce à leur excellent équilibre entre performances mécaniques, disponibilité et coût. [14] [15] .

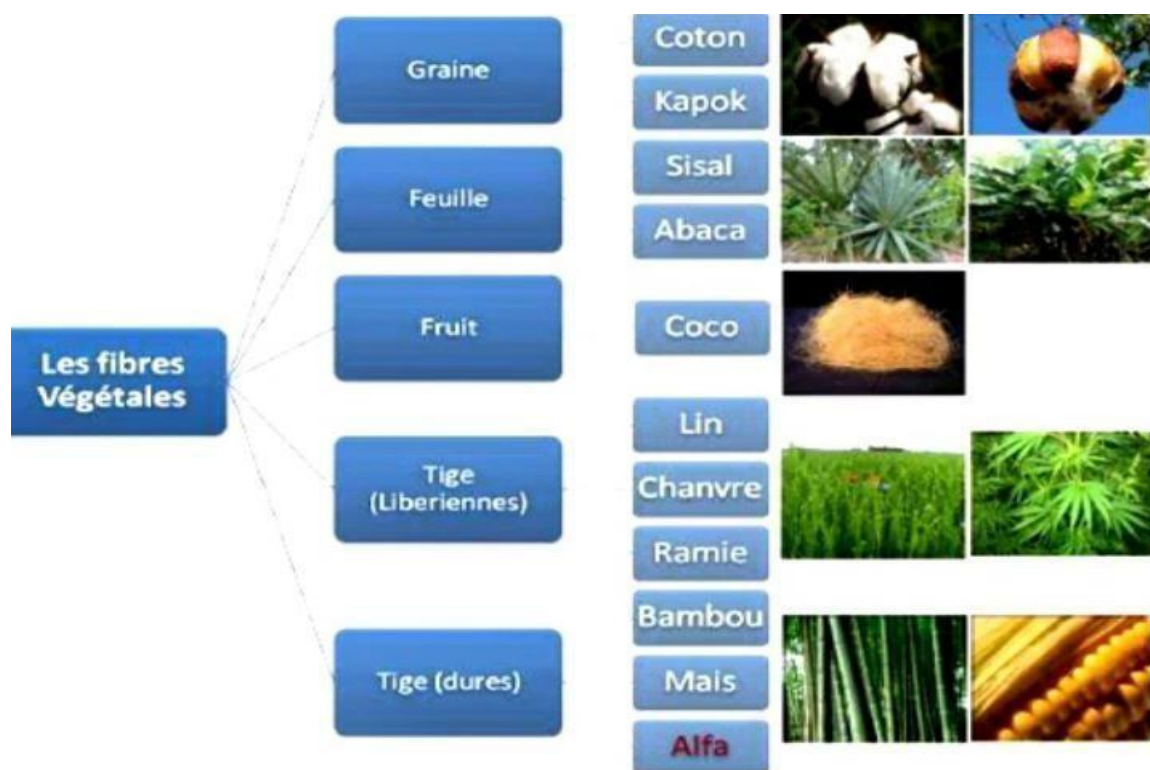


Figure I.13. Classification des divers genres fibres végétales [16].

I.4.3.2 Structure chimique des fibres végétales

La composition chimique des fibres végétales joue un rôle déterminant dans leur durabilité, notamment lorsqu'elles sont exposées à des environnements alcalins. Ces fibres sont constituées d'un ensemble de composés organiques et lignocellulosiques, parmi lesquels figurent en premier lieu la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, auxquels s'ajoutent les lipides, la pectine, les protéines ainsi que divers sucres[16].

- **La cellulose**

La cellulose constitue le principal composant des parois cellulaires des plantes. Il s'agit d'un polysaccharide linéaire semi-cristallin formé de chaînes de molécules de glucose liées entre elles. Considérée comme la matière organique la plus abondante sur Terre, elle représente plus de 50 % de la biomasse totale.

Sur le plan structural, ces chaînes s'associent pour former des micro fibrilles qui confèrent aux parois cellulaires une grande résistance mécanique et une rigidité notable[16][10].

- **Hémicellulose**

Les hémicelluloses sont des polysaccharides complexes qui se caractérisent par une structure ramifiée et irrégulière, contrairement à la cellulose qui présente une chaîne linéaire et ordonnée. Elles sont composées d'une variété de sucres simples, principalement le glucose, le xylose, l'arabinose et d'autres.

Ces composés contribuent à la formation de la matrice amorphe de la paroi cellulaire végétale. Ils jouent également un rôle essentiel dans la liaison des fibres entre elles, renforçant ainsi la cohésion globale de la structure cellulaire [16]

- **Lignine**

La lignine est un polymère phénolique complexe et ramifié, constitué de monomères et présent dans les parois cellulaires des plantes, où elle contribue à leur rigidité et à leur soutien structurel. Elle intervient également dans le transport de l'eau et des nutriments, tout en assurant la protection de la plante contre les agressions chimiques et biologiques[17].

- **Pectine**

La pectine est l'un des polysaccharides les plus complexes sur le plan fonctionnel dans les parois cellulaires végétales. Elle joue plusieurs rôles dans la plante, notamment dans la croissance, le développement et la défense. Elle est également utilisée comme agent gélifiant et stabilisant dans les aliments. Sa structure de base est constituée de chaînes linéaires d'unités d'acide D-galacturonique [18].

- **Lipides**

Les lipides présents dans les fibres végétales se présentent sous forme d'huiles, de graisses et d'autres composés lipidiques. Ils contribuent à conférer aux fibres végétales une certaine résistance et flexibilité [16] .

- **Protéines**

Les protéines peuvent être présentes dans les fibres végétales à des proportions variables. Elles contribuent à la structure générale des fibres et peuvent influencer certaines de leurs propriétés physiques et fonctionnelles [16] .

- **Sucres**

Les molécules de sucre se répartissent sur l'ensemble de la structure fibreuse sous forme de petites unités dispersées en différents points.

Cette structure repose sur un arrangement complexe dont le composant central est la cellulose, entourée d'autres éléments qui contribuent à la diversité des propriétés mécaniques et physiques de la fibre. Les fibrilles de cellulose, reliées entre elles par une matrice composée essentiellement d'hémicellulose et de lignine, constituent la base des matériaux composites à fibres végétales. L'angle des micro-fibrilles [19] définit l'orientation hélicoïdale selon laquelle ces fibrilles sont disposées. La structure et la composition chimique des fibres varient en fonction du climat, de l'âge de la plante et des processus biologiques auxquels elle est soumise [20] .

I.4.3 .3 Propriétés physiques, chimiques, et mécaniques des fibres végétales

Les propriétés des fibres naturelles dépendent de plusieurs facteurs, notamment la composition de la fibre, la teneur en cellulose, la position des microfibrilles, la section transversale et le degré de polymérisation. Plus la teneur en cellulose augmente, plus la fibre devient rigide et résistante. De même, plus l'angle des micro fibrilles diminue, plus la résistance à la traction augmente. À l'inverse, une faible teneur en cellulose combinée à un angle hélicoïdal élevé affaiblit la fibre et réduit sa capacité à supporter les charges.

Les tableaux I-1 et I-2 présentent une comparaison entre les propriétés mécaniques et la composition chimique de différentes fibres végétales utilisées comme renfort dans les matériaux composites [21].

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-1 : Les propriétés mécaniques des diverses fibres végétale[21].

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-2 : Structure chimique de diverses fibres végétales [21].

I.4.3 .4 Présence des fibres végétales en Algérie

La disponibilité des fibres végétales en Algérie est liée au climat, au relief et aux pratiques agricoles. Le pays se distingue par une végétation variée, présente sur les hauts plateaux, les collines et les régions sahariennes, comprenant notamment : le pin, le coton, le lin, l'alfa, le liège, le palmier dattier et le doum.

L'alfa (*Stipa tenacissima*): cette plante pousse dans les zones arides et semi-arides du pourtour méditerranéen, dont l'Algérie. Ses fibres sont utilisées depuis longtemps dans la fabrication de cordes, de tapis et de produits artisanaux.

- **Le palmier dattier :** largement répandu en Algérie, ses feuilles fournissent des fibres employées dans l'artisanat et la vannerie.
- **Le cactus :** certaines espèces présentes en Algérie produisent des fibres à usage artisanal local.
- **Le lin et le chanvre :** leur culture reste limitée, mais son extension est envisageable, ouvrant ainsi la voie à la production de fibres textiles.
- **Autres fibres :** des fibres issues de plantes sauvages ou cultivées localement sont disponibles dans certaines régions, leur abondance variant selon les conditions environnementales et les pratiques agricoles.

L'Algérie occupe le sixième rang mondial dans la production de liège, avec une production annuelle d'environ 6000 tonnes [22]. Les initiatives de recherche et de développement contribuent à valoriser ces ressources de manière durable [23].

I.4.3 .5 Les fibres végétales du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L)

- **Les fibres du palmier dattier (FPD)**

Le palmier dattier constitue l'une des sources de fibres naturelles les plus abondantes et les plus économiques par rapport aux autres origines végétales.

Ces fibres présentent des propriétés physiques, mécaniques et thermiques qui varient sensiblement selon la partie du palmier dont elles sont extraites.

De nature lignocellulosique, à l'instar de la plupart des fibres végétales, elles peuvent être obtenues à partir de quatre parties principales du palmier : le fibrillium, le régime de dattes, le rachis et les folioles [24] .

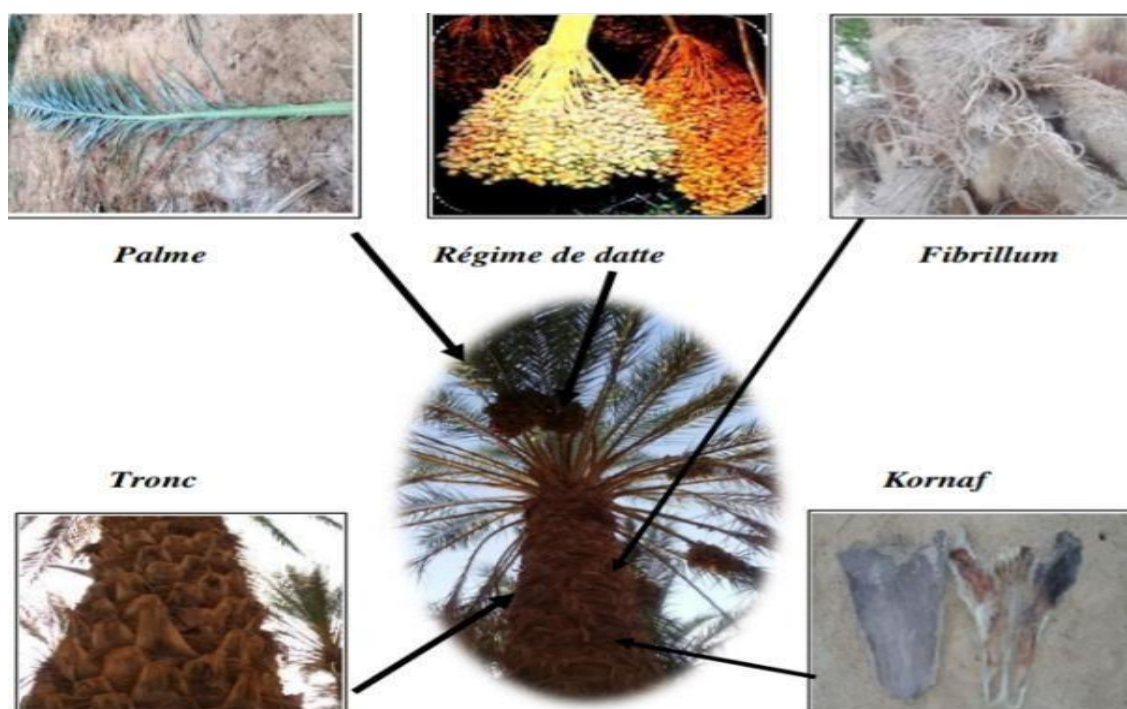


Figure I.14 Différents composants du palmier dattier [10] .

➤ Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes particulièrement intéressés aux fibres extraites du palmier dattier de la variété Deglet Nour (wilaya d'El Oued), considéré comme l'un des cultivars les plus répandus en Algérie, afin d'évaluer ses caractéristiques et ses potentialités d'application.

I.4.3.6 Avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres végétales suscitent un intérêt croissant dans le domaine du renforcement des matériaux composites en raison des nombreuses propriétés et avantages qu'elles présentent. Toutefois, leur utilisation à l'échelle industrielle demeure confrontée à certaines contraintes et difficultés susceptibles de limiter le développement et l'élargissement de leurs applications.

Avantages

- **Durabilité environnementale**

Les fibres végétales constituent des matériaux naturels renouvelables et biodégradables, ce qui leur confère un intérêt particulier dans le contexte des préoccupations environnementales

actuelles. De plus, leur coût de production demeure relativement faible comparativement à certaines fibres synthétiques, notamment les fibres de verre.

- **Propriétés thermiques et acoustiques**

Les fibres végétales présentent de bonnes capacités d'isolation thermique et acoustique en raison de leur faible conductivité thermique, ce qui contribue à l'amélioration des performances fonctionnelles des matériaux composites dans diverses applications.

- **Légèreté et flexibilité**

Grâce à leur faible densité, les fibres végétales se caractérisent par leur légèreté ainsi que par des propriétés mécaniques intéressantes, telles que la flexibilité, l'absorption des chocs et la limitation des fissurations. Ces propriétés varient toutefois selon la nature et l'origine des fibres utilisées.

- **Aspect économique**

Les fibres végétales représentent une alternative économiquement avantageuse, leur coût étant généralement inférieur à celui de plusieurs matériaux synthétiques de substitution, ce qui favorise leur utilisation dans différents domaines d'application.

- **Disponibilité et facilité d'exploitation**

Ces fibres se distinguent par leur abondance naturelle ainsi que par la simplicité des procédés liés à leur extraction et à leur préparation, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications économiques et écologiques, notamment dans le domaine des matériaux de construction [25].

Inconvénients

- **Limitation de la plage de température de mise en forme**

Les fibres végétales présentent une plage thermique étroite lors des procédés de mise en forme. Une élévation importante de la température peut entraîner leur dégradation ainsi que la détérioration de leur structure.

- **Caractère hydrophile des fibres**

Les fibres végétales sont sensibles à l'humidité et peuvent absorber de grandes quantités d'eau, ce qui provoque un gonflement des parois cellulaires et favorise le développement de moisissures. Cette caractéristique nuit également à la compatibilité avec la matrice cimentaire, en raison de l'absorption excessive d'humidité et des variations dimensionnelles, notamment pour les fibres lignocellulosiques.

I.5. CARACTERISTIQUES DES COMPOSITES CIMENTAIRES FIBRES

I. 5.1 Rôle des fibres dans le renforcement du secteur de la construction

Les différentes étapes de production des matériaux de construction, de l'extraction à la transformation, engendrent des impacts environnementaux significatifs. De même, la fin de vie de ces matériaux entraîne la génération de déchets ainsi que l'émission de divers polluants. Dans ce contexte, de nombreux travaux de recherche se sont orientés vers le développement de matériaux de construction à base de fibres végétales, dans le but de réduire ces impacts tout en garantissant les exigences de confort et de santé humaine, ainsi que la diminution de l'empreinte environnementale.

Ces matériaux se distinguent par leur abondance, leur recyclabilité et leur caractère durable. Ils contribuent également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce à leur capacité d'absorption du dioxyde de carbone [26].

Certaines fibres végétales telles que le chanvre, la paille, le bois, le palmier dattier, le sisal, le lin et le jute sont utilisées comme renforts dans les mortiers cimentaires dans le secteur de la construction. L'expérience historique montre que les fibres ont joué un rôle important dans l'amélioration des performances des matériaux fragiles, ce que de nombreuses études scientifiques ont confirmé [27]. Par ailleurs, les matériaux cimentaires renforcés par des fibres font l'objet d'un intérêt croissant de la part des chercheurs et de l'industrie, en raison de l'évolution continue des travaux de recherche dans ce domaine [28]

L'incorporation de fibres dans le béton contribue à améliorer sa ductilité et à lui conférer une meilleure résistance à la fissuration après apparition de celle-ci [29]. Elle permet également d'augmenter la résistance du béton aux efforts de cisaillement, de flexion, de fatigue et de torsion, assurant ainsi la cohésion de la structure même après fissuration.

L'efficacité de ce renforcement dépend de plusieurs paramètres, notamment la résistance, le type, la teneur et les propriétés mécaniques des fibres utilisées. De plus, le contrôle et la maîtrise des fissures sont étroitement liés au choix des fibres. Bien que le retrait au séchage puisse toujours se produire, la présence de fibres permet de limiter l'évolution des fissures, qui deviennent alors plus fines, plus courtes et mieux réparties [30].

I.5.2 Influence de la présence des fibres sur les propriétés rhéologiques

L'incorporation de fibres dans les matériaux cimentaires, au même titre que les autres additions, entraîne une modification de leur comportement au cours de la phase d'hydratation. Ce domaine de recherche, notamment celui relatif au comportement et au traitement de ces matériaux, reste encore insuffisamment exploré et fait l'objet d'un nombre limité d'études.

À faibles teneurs en fibres, l'ouvrabilité du béton demeure relativement stable, avec une répartition homogène des fibres dans le mélange. Toutefois, au-delà d'un certain seuil, les contacts entre fibres deviennent plus fréquents, ce qui peut conduire à la formation d'agglomérats [31].

Plusieurs paramètres liés aux fibres influencent l'ouvrabilité à l'état frais, notamment le taux d'incorporation, la longueur, la forme ainsi que la flexibilité des fibres [32]. Les études rhéologiques ont également montré que les fibres rigides augmentent la résistance à l'écoulement du béton frais [33]. Par ailleurs, les résultats indiquent une corrélation entre l'orientation des fibres et l'amélioration de la résistance en flexion, tandis qu'une mauvaise orientation peut entraîner une diminution de la résistance à la rupture et favoriser l'apparition de fissures multiples sous charges de flexion .

I.6 Valorisation des déchets de fruits

I.6.1 Déchets organiques

- **Définition**

Les déchets organiques sont des résidus d'origine biologique issus des êtres vivants, qu'ils soient d'origine végétale ou animale. Ils se caractérisent par leur capacité à se décomposer naturellement sous l'action de micro-organismes tels que les bactéries et les champignons, ce qui en fait un élément essentiel du cycle de la vie dans la nature.

Ces déchets englobent les restes alimentaires quotidiens, les épluchures de fruits et de légumes, les feuilles mortes, les résidus de cultures agricoles ainsi que d'autres produits issus des activités humaines quotidiennes, que ce soit dans les foyers, les exploitations agricoles ou les industries. Ils constituent sans conteste l'une des catégories de déchets les plus répandues dans notre quotidien.

L'importance des déchets organiques ne se limite pas à leur simple statut de rebut. Ils représentent en réalité une véritable ressource valorisable. Au lieu de les laisser se décomposer de manière anarchique, de les brûler ou de les enfouir selon des méthodes traditionnelles qui polluent l'air, les sols et les eaux, il est possible de les transformer en un compost organique riche, en biogaz destiné à la production d'énergie, ou encore en matériaux biologiques à haute valeur ajoutée [34].

- **Sources des déchets organiques**

Les déchets organiques proviennent de plusieurs secteurs principaux, notamment les ménages, les marchés centraux, les industries agroalimentaires et les activités agricoles. Parmi ces sources, les déchets issus des fruits figurent parmi les plus abondants, en particulier dans les industries de transformation destinées à la production de jus et de confitures.

Dans ces filières industrielles, d'importantes quantités d'épluchures, de pépins et de fibres sont régulièrement jetées, alors même qu'elles renferment des composés biologiques d'une grande valeur économique et environnementale, dont une grande partie est actuellement gaspillée sans valorisation [35].

I.6.2 Déchets de fruits

Les déchets de fruits désignent les parties des fruits qui sont rejetées à différentes étapes de la chaîne de production alimentaire, que ce soit au champ lors de la culture et de la récolte, pendant le transport et le tri, ou encore lors des procédés industriels de transformation tels que l'épluchage, le découpage, le pressage pour la production de jus ou la mise en conserve.

Ces déchets comprennent généralement les épluchures, les pépins, la pulpe, les fibres, ainsi que les parties abîmées ou non désirées des fruits. Paradoxalement, ces résidus sont riches en composés bioactifs de grande valeur, tels que les polyphénols, les fibres alimentaires et les antioxydants, mais ils sont le plus souvent gaspillés sans aucune valorisation [36].

I.6.2 .1Propriétés des résidus de fruits

Les déchets de fruits sont des matières organiques complexes à structure lignocellulosique. Ils présentent des propriétés physiques et chimiques qui les rendent exploitables dans plusieurs domaines, notamment les applications industrielles et environnementales, ainsi que dans certaines utilisations en génie civil et dans le domaine des matériaux biosourcés.

- **Propriétés physiques**

Les déchets de fruits présentent plusieurs propriétés physiques importantes, notamment une faible masse volumique apparente, une forte porosité ainsi qu'une structure fibreuse hétérogène. Ils contiennent également un taux d'humidité élevé, pouvant dépasser 70 % selon les types, ce qui les rend facilement biodégradables en l'absence de traitement ou de séchage.

Ces déchets montrent par ailleurs une bonne capacité d'absorption de l'eau et des liquides, propriété liée à leur nature fibreuse et à la présence de vides au sein de leur structure interne. Ces caractéristiques sont particulièrement intéressantes pour leur utilisation comme matière première dans la fabrication de matériaux composites légers et de matériaux absorbants.

Plusieurs études ont également montré que la densité, la capacité d'absorption et la structure poreuse des déchets de fruits jouent un rôle déterminant dans leur comportement au sein des matériaux composites biosourcés.

- **Propriétés chimiques**

Les déchets de fruits sont principalement constitués de composés lignocellulosiques comprenant la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, qui représentent les principaux constituants des parois cellulaires végétales. Ils renferment également des proportions variables de pectine, de sucres simples, de composés phénoliques ainsi que certains éléments minéraux.

La cellulose constitue l'un des composants essentiels responsables des propriétés mécaniques des fibres, tandis que la lignine confère une certaine rigidité et contribue à la résistance à la dégradation. Quant à l'hémicellulose et à la pectine, elles jouent un rôle important dans l'interaction avec l'eau et favorisent la capacité d'absorption ainsi que la cohésion au sein des matériaux composites.

Les analyses chimiques réalisées sur différents déchets de fruits, notamment ceux de l'orange et de la banane, ont montré une teneur appréciable en cellulose, ce qui leur confère un intérêt particulier comme matière première dans le domaine des biomatériaux et des applications environnementales [37].

I.6.3 Types de déchets de fruits

Les déchets de fruits peuvent être classés en plusieurs catégories principales, selon la partie du fruit qui subsiste après la consommation ou la transformation industrielle, comme suit :

- **Écorces (Peels)**

Les écorces figurent parmi les déchets de fruits les plus courants, notamment dans les industries alimentaires et la production de jus, comme celles de l'orange, de la banane et de la pomme. Elles se caractérisent par une teneur importante en fibres et en composés lignocellulosiques, ce qui leur confère des propriétés physiques et chimiques particulières [38].

- **Graines et noyaux (Seeds and Pits)**

Les graines et noyaux proviennent de fruits tels que le raisin, la pêche, l'abricot et les dattes. Ils contiennent des huiles naturelles, des fibres ainsi que des composés bioactifs présentant un intérêt notable, ce qui les rend valorisables et exploitables dans diverses applications [38].

- **Pulpe résiduelle après pressage (Pomace)**

La pulpe résiduelle correspond aux sous-produits obtenus après les opérations de pressage des fruits. Elle est généralement constituée d'un mélange d'écorces, de fibres, de graines et de tissus végétaux restants après l'extraction du jus, comme c'est le cas pour les marcs de pomme, de raisin et d'agrumes [39].

I.7 Valorisation des écorces d'orange dans les matériaux de construction

I.7.1 Définition de l'orange et ses composants

- **Aperçu sur l'orange**

L'orange douce (*Citrus sinensis* L. Osbeck) est l'un des agrumes les plus produits et les plus consommés à l'échelle mondiale. Elle appartient à la famille des Rutaceae. Les opérations de transformation industrielle, notamment la production de jus, génèrent d'importantes quantités de déchets organiques, les écorces représentant une part significative du poids total du fruit, estimée entre 45 et 60 %. Ces écorces se distinguent par leur richesse en fibres naturelles, ce qui leur confère un intérêt croissant dans les procédés de valorisation, en particulier pour le développement de matériaux de construction durables tels que les panneaux isolants thermiques [40].

- **Composition du fruit de l'orange**

Le fruit de l'orange appartient au type de fruit appelé hespéridium (*hesperidium*). Il est principalement constitué d'une écorce externe et d'une pulpe interne. L'écorce se divise en deux couches principales : le flavedo, correspondant à la partie externe colorée, et l'albedo, qui représente la couche interne blanche à structure spongieuse. L'ensemble de l'écorce constitue la partie la plus utilisée dans les applications liées aux matériaux de construction, en raison de sa richesse en fibres et de sa structure poreuse, susceptibles d'améliorer certaines propriétés physiques des matériaux composites [40].

- **Flavedo**

Le flavedo correspond à la couche externe colorée de l'écorce, également appelée exocarpe (épicarpe). Cette partie contient des glandes à huile riches en huiles essentielles, notamment le D-limonène, ainsi que des caroténoïdes et des flavonoïdes. Elle se caractérise également par une teneur élevée en vitamine C, comprise entre 74,7 et 98,2 mg d'acide ascorbique pour 100 g, ainsi que par une concentration en caroténoïdes allant de 1,04 à 6,21 mg de β -carotène pour 100 g [41].

- **Albedo**

L'albedo correspond à la couche interne blanche à structure spongieuse, faisant partie du mésocarpe (*mesocarp*). Cette fraction se distingue par une forte teneur en pectine ainsi que par une quantité importante de composés phénoliques totaux, comprise entre 553,1 et 730,0 mg d'acide gallique pour 100 g. Elle contient également des flavanones telles que l'hespéridine, avec des concentrations variant de 1450,0 à 2084,5 mg pour 100 g. Sa structure spongieuse

permet, après les étapes de séchage et de pressage, l'obtention de matériaux poreux légers [41].

- **Pulpe (Pulp) et graines (Seeds)**

La pulpe (endocarpe) représente la partie interne comestible du fruit de l'orange. Elle est constituée de segments remplis de jus riche en vitamine C, en sucres et en acides organiques. Les graines, quant à elles, contiennent des huiles, des protéines et des fibres. Il est à noter que les applications dans le domaine des matériaux de construction concernent principalement l'écorce, composée du flavedo et de l'albêdo, plutôt que la pulpe ou les graines [40].

I.7.2 Propriétés physico-chimiques des écorces d'orange

I.7.2.1 Propriétés physiques

- **Densité**

Les écorces d'orange, après un procédé de séchage à une température de 40 °C, présentent une faible masse volumique apparente comprise entre 200 et 300 kg/m³. Cette diminution est principalement attribuée à la perte importante d'humidité durant le traitement, entraînant une réduction de la masse par rapport au volume [40].

- **Porosité**

Les écorces d'orange, en particulier l'albêdo, présentent une structure spongieuse à forte porosité naturelle. Lors du processus de séchage, la porosité augmente dans les premières étapes en raison de la perte d'eau, puis diminue progressivement avec la poursuite du séchage, à cause d'un retrait partiel et de l'effondrement de certaines cavités internes. De manière générale, le séchage entraîne une réduction de la taille et du nombre des pores par rapport à l'état frais, accompagnée d'une évolution de la distribution poreuse vers des dimensions plus faibles [42].

- **Teneur en humidité**

Les écorces fraîches d'orange présentent une teneur en humidité relativement élevée, pouvant varier approximativement entre 73 % et 90 %. Dans des conditions de séchage appropriées, notamment à une température d'environ 52,3 °C et une vitesse d'air de 2 m/s, cette teneur en eau diminue de manière significative pour atteindre une valeur finale proche de 7,6 % [43].

I.7.2.2 Propriétés chimiques

- **Cellulose**

La cellulose constitue l'un des principaux composants fibreux des écorces d'orange. Sa teneur, exprimée sur matière sèche, varie généralement entre 12,7 % et 13,6 % selon différentes études, tandis qu'elle peut atteindre des valeurs comprises entre 19,08 % et 19,76 % pour certaines variétés. Cette proportion relativement élevée confère aux écorces des propriétés fibreuses intéressantes, favorisant leur utilisation dans les matériaux de construction et les composites biosourcés[44].

- **Hémicellulose**

L'hémicellulose constitue l'un des principaux constituants des écorces d'orange. Sa teneur, sur base de matière sèche, varie généralement entre 5,3 % et 6,1 %, tandis que certaines études rapportent des valeurs pouvant atteindre 14 à 16 %. Ce composé contribue au soutien de la structure des écorces et joue un rôle important dans la détermination de leur porosité ainsi que de leurs propriétés physiques [44].

- **Lignine**

La lignine constitue un composant secondaire des écorces d'orange. Sa teneur varie généralement entre 1,73 % et 2,10 % dans la plupart des études, soit souvent moins de 2 %, tandis que certaines valeurs plus élevées, comprises entre 4,75 % et 6,93 %, ont été rapportées dans certains cas. Cette faible teneur relative facilite les opérations de traitement et de valorisation des écorces dans différentes applications [44].

- **Composés organiques**

Les écorces d'orange contiennent plusieurs composés organiques d'intérêt, notamment la pectine[45], considérée comme un constituant majeur, ainsi que des sucres solubles et des flavonoïdes, en particulier l'hespéridine et la naringénine. Elles renferment également des composés phénoliques totaux, des caroténoïdes, ainsi que le D-limonène, principalement localisé dans le flavedo[41].

I.7.3 Valorisation des écorces d'orange comme substitut partiel du ciment

Pour l'utilisation des écorces d'orange dans les matériaux de construction, celles-ci subissent plusieurs étapes de préparation visant à améliorer leurs propriétés et à faciliter leur mise en œuvre. Ces étapes comprennent principalement le séchage, le broyage puis le traitement thermique.

- **Étape de séchage**

Le processus débute par la collecte des écorces d'orange fraîches, suivie d'un nettoyage soigneux afin d'éliminer les impuretés et les matières étrangères. Le séchage solaire est la méthode la plus utilisée en raison de son faible coût et de son impact environnemental réduit ; il dure généralement entre 7 et 14 jours, jusqu'à une diminution significative de la teneur en humidité.

D'autres méthodes peuvent également être employées, notamment le séchage au four à basse température, autour de 60 °C, ou encore le séchage par micro-ondes. Cette étape est essentielle pour faciliter le broyage ultérieur et préserver les propriétés naturelles du matériau[46].

- **Étape de broyage**

Après le séchage complet, la matière est broyée à l'aide d'un équipement approprié, tel qu'un broyeur à marteaux (hammer mill) ou un broyeur alimentaire, afin d'obtenir une poudre fine. Il est recommandé d'effectuer le broyage avec un système de refroidissement pour éviter l'élévation de la température, susceptible d'altérer les propriétés chimiques du matériau. Cette étape vise principalement à augmenter la surface spécifique de la poudre, afin d'améliorer sa réactivité lors des étapes ultérieures[46].

- **Étape de tamisage**

Après l'étape de broyage, la poudre est soumise à un tamisage à l'aide de tamis fins, tels que le tamis de 75 μm ou le tamis n°200, afin d'obtenir une distribution granulométrique homogène, comparable à celle du ciment. Cette opération permet d'améliorer les propriétés physiques de la poudre et de garantir sa conformité aux normes et standards, notamment ceux de l'ASTM [46].

- **Étape de traitement thermique**

Cette étape est essentielle pour la production de cendres. La poudre est calcinée dans un four à environ 600 °C pendant deux heures, conditions considérées comme optimales selon les études. Il a été observé que des températures plus élevées (700–800 °C) peuvent entraîner des modifications indésirables de la composition chimique du matériau. Ce procédé permet d'obtenir une cendre riche en calcium et en silice, avec une perte au feu (LOI) dans des valeurs appropriées [46].

1.7.4 Caractérisation des cendres obtenues après traitement thermique

- **Analyse chimique (XRF)**

Les cendres obtenues présentent une teneur élevée en oxyde de calcium (CaO), d'environ 31 %, ainsi que la présence de SiO₂ et de K₂ O. La somme des oxydes (SiO₂ + Al₂ O₃ + Fe₂ O₃) est d'environ 27,7 %, ce qui les rapproche de la classe C.

- **Propriétés physiques**

La présence de porosité et de résidus de carbone entraîne une augmentation de la demande en eau. Elle provoque également un léger allongement du temps de prise (setting time) et peut affecter, dans une moindre mesure, la stabilité (soundness).

- **Caractérisation structurale**

La diffraction des rayons X (XRD) est utilisée pour identifier les phases cristallines, tandis que la microscopie électronique à balayage (MEB/SEM) permet d'analyser la morphologie des particules, généralement irrégulières et poreuses[46].

- **Activité pouzzolanique des cendres d'écorces d'orange traitées thermiquement**

Selon la norme ASTM C618, une pouzzolane est un matériau de nature siliceuse ou silico-alumineuse, ne possédant pas de propriétés hydrauliques propres. Cependant, en présence d'eau et à température ambiante, elle réagit avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ issu de l'hydratation du ciment, formant des composés aux propriétés liantes[47].

I. 8 Conclusion

Ce chapitre nous a donné, en quelque sorte, la chance de cerner les principales notions qui sont directement rattachées à l'objet de l'étude. D'abord, on a mis une attention particulière sur la notion de déchets, avec leurs typologies variées, et aussi sur les impacts environnementaux qui en résultent, avant de passer aux manières de les gérer, puis à leur recyclage en pratique.

Il a également été question des fibres végétales, de leurs caractéristiques souvent multiples, et de leur rôle dans le domaine des matériaux de construction, surtout lorsqu'il s'agit d'améliorer des propriétés de certains matériaux cimentaires. Parmi toutes ces fibres, celles de palmier dattier ont attiré une attention plus particulière, en tant que ressource naturelle accessible localement et qui pourrait être exploitée dans différentes applications quotidiennes.

La dernière partie du chapitre était orientée vers les sous produits issus des fruits, et plus exactement les écorces d'orange, qui suscitent un intérêt grandissant dans un nombre non négligeable d'études, en raison de leur richesse en éléments fibreux, ainsi que de leurs constituants lignocellulosiques, ce qui permet d'envisager une valorisation vers la fabrication de matériaux de construction plus respectueux de l'environnement.

Tous ces éléments forment une base théorique indispensable, pour comprendre la partie expérimentale de l'étude, qui sera expliquée dans les chapitres qui suivent.

Chapitre 02

Caracterisation des materiaux et methodes
experimentales

II.1 INTRODUCTION

La valorisation des matériaux alternatifs dans le domaine de la construction nécessite inévitablement de passer par une phase expérimentale méthodique, permettant d'évaluer le comportement de ces matériaux au sein des mélanges cimentaires et de comprendre leur influence sur les propriétés générales du mortier.

Cette partie applicative vise à étudier la possibilité d'incorporer les cendres de pelures d'orange, en tant que matériau issu de la valorisation des déchets organiques, comme substitut partiel du ciment, tout en utilisant des fibres végétales pour améliorer les performances du mortier.

Nous nous sommes concentrés dans ce travail sur l'analyse du comportement de ces composants lorsqu'ils sont intégrés dans une matrice cimentaire, à travers la formulation de différents mélanges avec des proportions étudiées, permettant d'évaluer l'effet de chaque composant sur les propriétés physiques et mécaniques du mortier.

Pour ce faire, nous avons adopté un programme expérimental complet comprenant la préparation et le coulage des mélanges dans des conditions contrôlées, ainsi que la réalisation d'une série d'essais en laboratoire pour évaluer les performances du mortier à l'état frais et à l'état durci, dans le but d'aboutir à une compréhension globale de son comportement.

À travers cette approche, nous cherchons à mettre en évidence l'efficacité de l'utilisation des cendres de pelures d'orange et des fibres végétales dans l'amélioration des propriétés du mortier, et à contribuer au développement de matériaux de construction alternatifs alliant bonnes performances techniques et durabilité environnementale.

II.2 Description des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la préparation des éprouvettes de mortier écologique durable sont les suivants :

- Le ciment.
- Le sable de bonne qualité.
- Les cendres de pelures d'orange issues du processus de traitement thermique
- Les fibres végétales extraites du palmier dattier (variété Deglet Nour).

II.2.1. CIMENT

Dans le cadre de la préparation des éprouvettes de mortier écologique, un ciment gris de type CEM I 42.5N SR3 LH, fourni par la cimenterie de Biskra (Algérie), a été utilisé. Ce ciment présente une faible chaleur d'hydratation (LH : Low Heat), ainsi que de bonnes performances mécaniques et une faible teneur en additions minérales.

Le choix de ce ciment a été effectué afin de disposer d'un matériau de référence permettant d'évaluer l'influence de la substitution partielle du ciment par les cendres d'écorces d'orange (OPA), sans l'interférence d'autres ajouts cimentaires. Cette approche permet d'analyser l'effet combiné de l'OPA et des fibres végétales sur les propriétés du mortier élaboré.

Les caractéristiques détaillées du ciment utilisé sont présentées dans la fiche technique fournie en annexe. Le ciment est conforme aux exigences de la norme algérienne NA 442-2013[48].

Tableaux II.1. Caractéristiques techniques du ciment CEM I 42.5N SR3 LH .

Tableau(a.1) Analyses chimiques

Analyses chimiques %	Valeur
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 %

Tableau (b.1) Composition potentielle du Clinker (selon Bogue)

Composé	Teneur (%)
C ₃ S	60
C ₃ A	< 3
C ₄ AF + 2 C ₃ A	< 20

Tableau (c.1) Propriétés physiques

Propriété	Valeur
Consistance normale (%)	26.5 %
Expansion à chaud (mm)	< 1

Temps de prise (min)	Valeur
Début de prise	180
Fin de prise	320

Tableau (d.1) Résistance à la compression

Échéance	Résistance à la compression (MPa)
2 jours	18
28 jours	54

II.2.2 Eau de gâchage

Dans ce travail, l'eau du robinet disponible au laboratoire a été utilisée pour la préparation des gâchées de mortier.

II.2.3 Sable

Dans le cadre de cette étude, un sable alluvionnaire de couleur jaune a été utilisé, prélevé dans la carrière située dans la région de Djamaa, wilaya d'El-Mghair.

Ce sable a été retenu comme matériau de référence en raison de ses propriétés physiques. Plusieurs essais de laboratoire ont été réalisés afin de déterminer ses principales caractéristiques, à savoir : la masse volumique apparente et la masse volumique absolue, l'analyse granulométrique, l'essai d'équivalent de sable pour évaluer son degré de propreté, ainsi que la teneur en sulfates. Ces essais nous ont permis d'apprécier la qualité de ce sable et son aptitude à être utilisé dans les matériaux de construction. Sa composition chimique a également été déterminée, et les résultats sont présentés dans le (Tableaux II.2) suivant.

Tableau II.2. Composition chimique du sable .

Composant	Valeur
Teneur en sulfates SO_3 (%)	0,152
Teneur en chlorures Cl^- (%)	2

II.2.4 Cendres d'Écorces d'Orange (Orange Peel Ash, (OPA))

Dans le cadre de cette étude, les écorces d'orange ont été adoptées comme matériau de substitution partielle au ciment, compte tenu de leur disponibilité en quantités importantes en tant que déchets alimentaires. Avant leur introduction dans le mélange, elles ont fait l'objet d'une succession de phases de préparation présentées comme suit :

- **Collecte**

Les écorces d'orange ont été collectées à partir de sources locales variées (maisons, restaurants, marchés...), dans la région d'El Oued, en veillant à éliminer celles qui présentent des signes visibles de détérioration ou de pourrissement.

**Figure II.1 .** Collecte des écorces d'orange .

- **Séchage** Les écorces d'orange collectées ont été disposées à l'air libre sous ensoleillement direct durant une période jugée suffisante, jusqu'à disparition complète de l'humidité. Cette phase conditionne directement la qualité du broyage qui lui succède.

- **Broyage**

À l'issue du séchage, les écorces d'orange ont été broyées mécaniquement afin d'obtenir une poudre fine et homogène, prête à être tamisée.



Figure II.2.Étape de broyage des écorces d'orange séchées en poudre fine.

- **Tamisage**

La poudre issue du broyage a été tamisée au moyen d'un tamis à ouvertures de 0,08 mm (80 μ m), en vue d'éliminer les particules grossières et d'obtenir une granulométrie régulière, favorable à la réactivité de la matière au contact des constituants du ciment



Figure II.3 . Étapes de tamisage du poudre d'écorces d'orange à l'aide d'un tamis normalisé (80 μ m).

• Traitement thermique

Le traitement thermique a été effectué en plaçant la poudre tamisée dans un creuset en céramique, introduit ensuite dans un four électrique de type Nabertherm. La température a été élevée progressivement jusqu'à 600 °C et maintenue pendant deux heures, conformément aux travaux de Olubajo (2019)[46], qui ont établi que ces conditions constituent les paramètres optimaux de calcination de la poudre de peau d'orange pour l'activation de ses propriétés pouzzolaniques. À l'issue du traitement, un changement de couleur notable a été observé, la poudre passant d'un orange jaunâtre à un gris clair, accompagné d'une augmentation de sa finesse et de sa friabilité lui conférant l'aspect d'une cendre légère (Figure 4).



Figure II.4 . Étapes du traitement thermique de la poudre d'écorces d'orange..

Les résultats de l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) ont confirmé ces transformations minéralogiques, le diffractogramme de la TTOP révélant des pics cristallins bien définis correspondant à la calcite (CaCO_3), au quartz (Q) et à l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2), tandis que celui de la UOP présente un halo amorphedominant, caractéristique d'une structure désordonnée, ce qui atteste de l'efficacité du traitement thermique dans la modification de la structure minéralogique et l'activation des propriétés pouzzolaniques de la poudre (Figure 5).

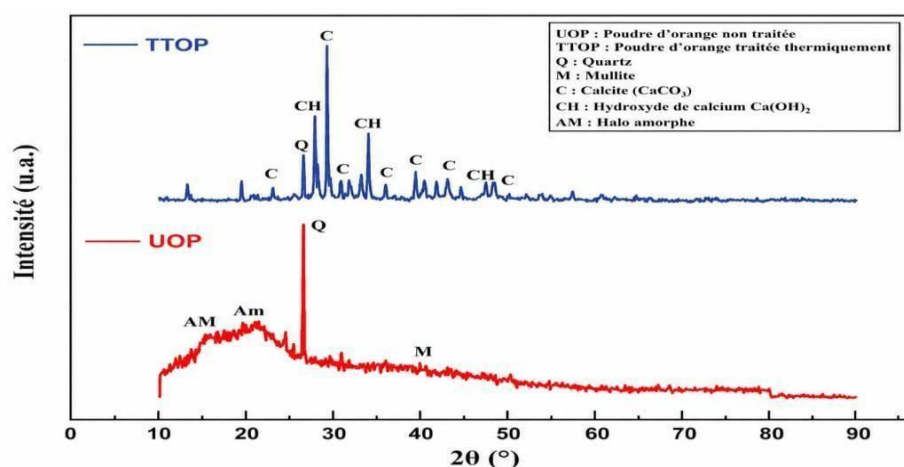


Figure . 5. Diffractogrammes DRX de la poudre d'écorces d'orange avant et après traitement thermique .

II.2.5 Fibres végétales

Cette étude a été réalisée à partir de fibres extraites du palmier dattier de la variété Deglet Nour (*Phoenix dactylifera* L., var. Deglet Nour), une variété locale largement répandue dans les zones sahariennes. Les échantillons utilisés dans ce travail ont été collectés dans la région d'Oued Souf, en Algérie. Les différentes étapes de préparation de ces fibres seront présentées ultérieurement.

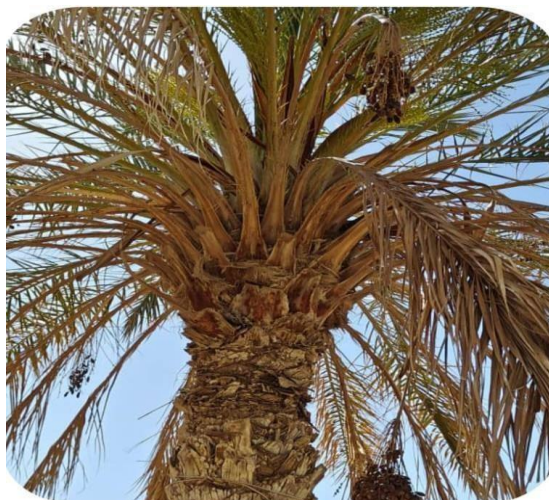


Figure II.6. Le palmier dattier.

1. Extraction

La préparation a débuté par le prélèvement manuel des fibres à partir des arbres de palmier dattier, où elles se répartissent naturellement autour du tronc sous forme de couches superposées. Cette étape a nécessité une attention particulière afin d'éviter tout endommagement des fibres lors de leur arrachage, préservant ainsi l'intégrité de leur structure fibreuse et leurs propriétés d'origine .

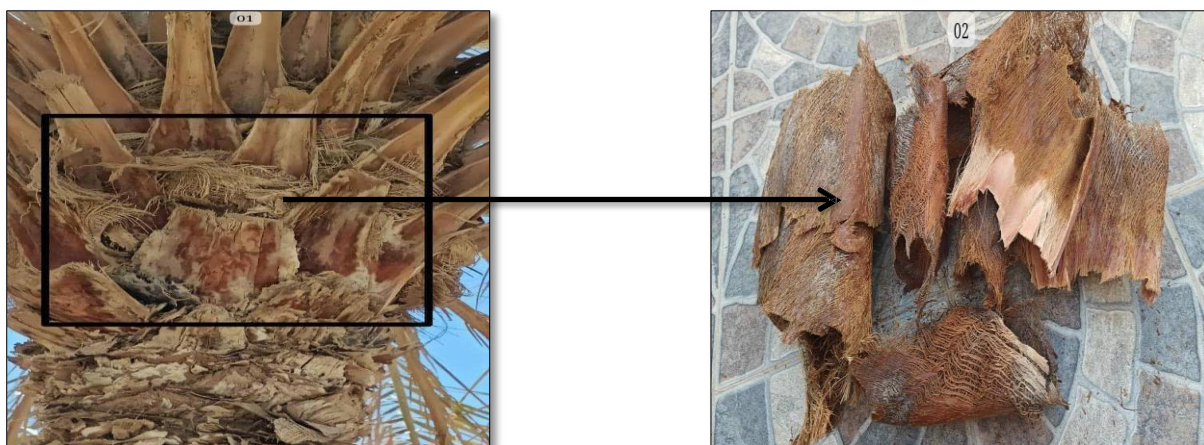


Figure II.7 . Prélèvement des fibres de palmier dattier.

2. Séparation

Après l'extraction, les faisceaux fibreux ont subi une opération de dissociation manuelle minutieuse, consistant à séparer progressivement et méthodiquement les fibres agglomérées les unes aux autres, jusqu'à l'obtention de filaments individuels parfaitement distincts, prêts à passer aux étapes de nettoyage .



Figure II.8 . Séparation des fibres de palmier dattier.

3. Premier lavage

Une fois séparées, les fibres ont été lavées à l'eau du robinet afin d'éliminer les poussières, les sables et les impuretés grossières adhérant à leur surface du fait de leur exposition directe au milieu environnant. Cette étape constitue un nettoyage préliminaire indispensable qui prépare les fibres à la phase de nettoyage plus approfondie qui suit .



Figure II.9. Lavage des fibres à l'eau du robinet.

4. Deuxième lavage

Le premier lavage a été suivi d'un second lavage à l'eau distillée, visant à compléter l'opération de nettoyage en éliminant les sels minéraux et les résidus fins que l'eau ordinaire ne suffit pas à extraire. Cette étape revêt une importance considérable, car toute impureté résiduelle à la surface des fibres risque d'affaiblir l'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire, et d'affecter la fiabilité des résultats expérimentaux .



Figure II.10 . Lavage des fibres à l'eau distillée .

5. Séchage

À la suite des deux opérations de lavage, les fibres ont été laissées à sécher sous rayonnement solaire direct. Cette méthode est couramment adoptée dans les études portant sur les fibres de palmier dattier, en raison de son efficacité à éliminer l'humidité superficielle sans modifier la composition interne des fibres. Elle présente en outre l'avantage d'être parfaitement adaptée à l'environnement aride dans lequel ces fibres se trouvent naturellement .

6. Découpe et classification

Lors de la dernière étape, les fibres séchées ont été soigneusement découpées à l'aide d'une règle graduée et classées selon trois longueurs précises : 10 mm, 20 mm et 30 mm.



Figure II.11.Longueurs des fibres de palmier utilisées .

II.3 Caractérisation des Matériaux utilisés

II.3.1 caractérisation du sable (Propriétés physiques)

II.3.1.1 Equivalant de sable

Selon la norme NF EN 933-8+A1:2015[49] ,l'équivalent de sable est un coefficient qui évalue la qualité du sable en déterminant la proportion des éléments argileux et des impuretés organiques présents à la surface de ses grains, afin de juger de son degré de propreté et de son aptitude à être utilisé dans les travaux de construction .

Matériels et matériaux utilisés

- Balance de précision
- Agitateur mécanique électrique
- Entonnoir
- Chronomètre
- Règle graduée
- Éprouvettes en plastique transparent avec bouchons
- Solution lavante normalisée
- Tube plongeur relié à un tuyau métallique souple
- Piston normalisé
- Échantillon de sable alluvionnaire à l'état sec, tamisé sur tamis 4 mm

Mode opératoire

- Les éprouvettes transparentes sont remplies de solution lavante jusqu'au premier trait repère, puis une quantité définie de sable alluvionnaire tamisé à 4 mm est versée en éliminant les bulles d'air. Les éprouvettes sont ensuite laissées au repos pendant 10 minutes afin d'assurer l'imprégnation du sable par la solution.
- Les éprouvettes sont alors bouchées et placées dans l'agitateur qui effectue 90 mouvements aller-retour en 30 secondes, puis rincées intérieurement à la solution lavante via le tube plongeur pour repousser les fines vers le haut, et laissées décanter pendant 20 minutes.



Figure II.12.Éprouvettes de l'essai d'équivalent de sable.

À l'issue de la décantation, les hauteurs suivantes sont mesurées :

- **h_1** : hauteur totale depuis le fond jusqu'au niveau supérieur de la couche argileuse
- **h_2** : hauteur de la couche de sable propre, mesurée à vue

Les valeurs du coefficient d'équivalent de sable sont calculées selon la relation suivante

$$ES = h_2 / h_1 \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

Résultats obtenus

Paramètre	Éprouvette 1	Éprouvette 2
h_1 (cm)	10.3	10
h_2 (cm)	9	8.6
ES (%)	87.38	86
ESmoy	86.68%,	

Tableau II 3.Résultats de l'essai d'équivalent de sable.

II.3.1.2 Essai d'Analyse Granulométrique par Tamisage et module de finesse

Selon les normes EN 933-1:2012 et NA 2607:2014[50] , l'analyse granulométrique est un essai qui vise à déterminer la distribution des tailles des grains de sable en les faisant passer à travers une série de tamis.

Matériels et matériaux utilisés

- Balance de précision .
- Étuve à $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Série de tamis : 5 / 2.5 / 1.25 / 0.63 / 0.315 / 0.16 / 0.08 mm .
- Tamiseuse électrique .
- Échantillon de sable $M = 250 \text{ g}$.

Mode opératoire

L'échantillon est immergé dans l'eau pendant 24 heures. Après cette durée, il est lavé sur un tamis de 0,08 mm jusqu'à obtention d'une eau claire, puis séché à l'étuve à $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante. Des (Figure II. 12) illustrant les différentes étapes de la procédure expérimentale sont présentées.

Après séchage, les tamis sont disposés par ordre décroissant d'ouvertures. L'échantillon est placé sur le tamis supérieur, puis la tamiseuse est mise en marche. À la fin du tamisage, la masse retenue sur chaque tamis est déterminée, selon une série de tamis à ouvertures progressives.



Figure II.12.Étapes de l'essai d'analyse granulométrique.

Résultats obtenus

L'ensemble des résultats issus de l'analyse granulométrique est récapitulé dans le tableau ci-après.

Tamis (mm)	Masse refus (g)	Refus cumulé(g)	Pourcentage cumulé (%)	Tamisé (%)
5	0	0	0	100
2.5	1.6	1.6	0.64	99
1.25	12	13.6	5.44	95
0.63	46.7	60.3	24.12	76
0.315	119.4	179.7	71.88	28
0.16	64.1	243.8	97.52	2
0.08	4.4	248.2	99.28	1

Tableau II.4. Résultats de l'essai d'analyse granulométrique.

Les résultats sont présentés sous forme de courbe granulométrique ci-dessous (Figure II. 13) .

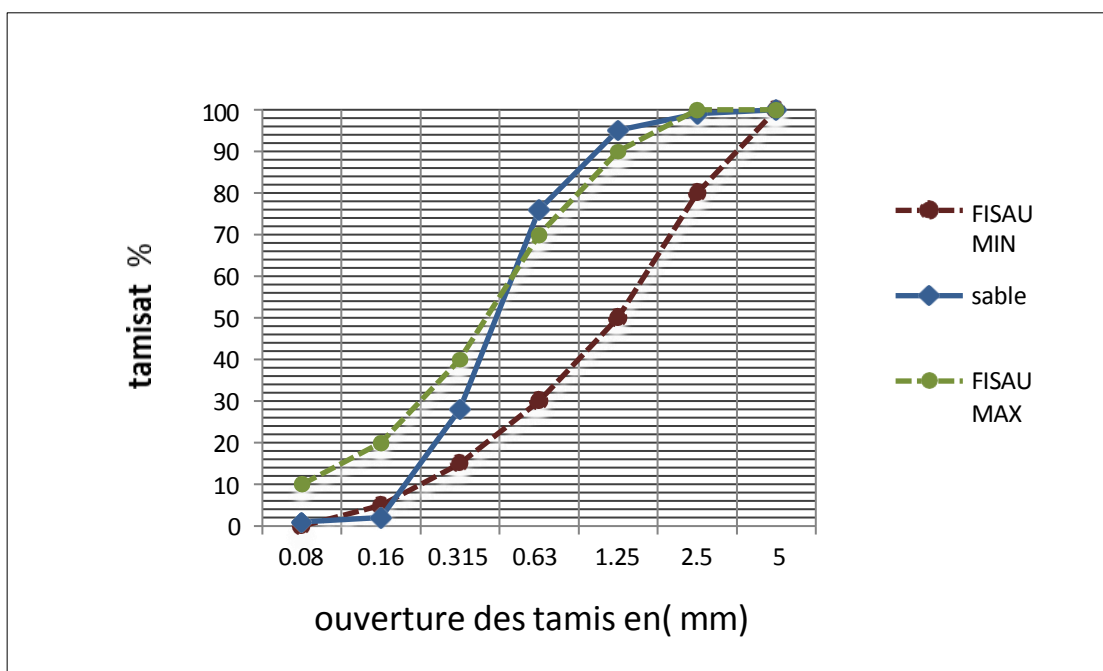


Figure II-13. Courbe granulométrique du sable utilisé .

Module de finesse

Le module de finesse (M_f) est un indicateur numérique utilisé pour caractériser la finesse du sable. Il est déterminé à partir de la somme des pourcentages cumulés des refus retenus sur une série de tamis normalisés, divisée par cent. L'expression mathématique du module de finesse est donnée par l'équation (2). La valeur du module de finesse permet également de classer les sables en différentes catégories selon leur degré de finesse, comme indiqué dans le (Tableau II.5) .

$$M_f = 1 / 100 \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis (0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5) (2)}$$

II.3.1.3 Masse volumique du Sable

a) La Masse volumique apparente

Conformément à la norme EN 1097-6 et NF P18-555 [52] [51], la masse volumique apparente du sable est déterminée en suivant les étapes suivantes : le récipient est d'abord pesé à vide, puis rempli de sable à l'aide de l'entonnoir depuis une hauteur de chute de 10 cm, la surface est ensuite arasée à la règle et le récipient est pesé à nouveau. L'opération est répétée 4 fois, comme illustré dans les (Figure II. 14) suivantes.

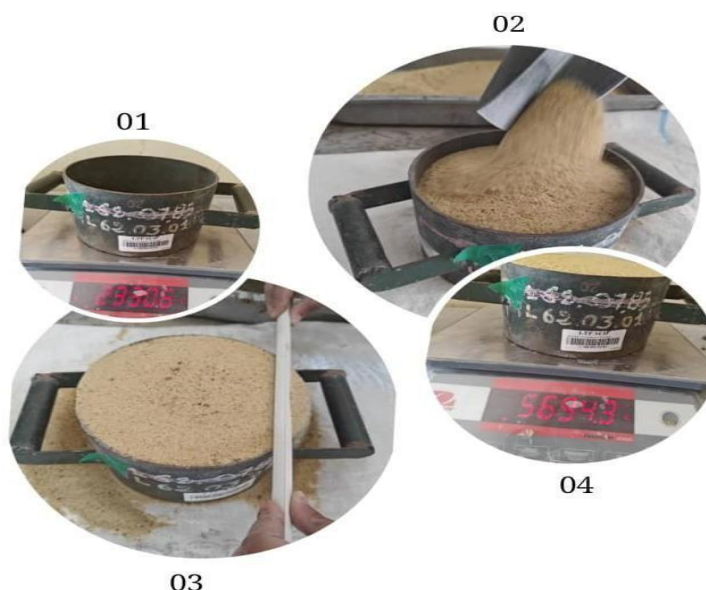


Figure II.14. Étapes de l'essai de la masse volumique apparente.

Calculs et résultats obtenus

Volume du récipient $V = 2000 \text{ cm}^3$

Poids du récipient **T = 2331 g**

Pesée	Pi+T (g)	Pi (g)
1	5654.5	3323.5
2	5705.8	3374.8
3	5717.3	3386.5
4	5712.6	3381.6
M moyen	3366.6	
$\rho_{app} = M_{moy} / V = 3366.6 / 2000 = 1.683 \text{ g/cm}^3$		

Tableau II.5 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente .

b. La masse volumique absolue

Conformément à la norme EN 1097-6 et NF P18-555 [52] [51], le sable sec est pesé P1. L'éprouvette graduée est remplie d'eau jusqu'à 1000 ml et pesée P2. Le sable est introduit dans l'éprouvette en éliminant les bulles d'air en frappant légèrement l'éprouvette contre la paume de la main et pesée P3. L'eau est versée et l'éprouvette avec le sable seul est pesée P4. Le volume du sable est calculé puis la masse volumique absolue est déterminée, comme illustré dans la (Figure II. 15) suivante.



Figure II.15 . Étapes de l'essai de la masse volumique absolue.

Calculs et résultats obtenus

	Valeur
P_1 : Poids du sable sec (g)	354.4
P_2 : Éprouvette + eau (g)	1221.1
P_3 : Éprouvette + eau + sable (g)	1566.5
P_4 : Éprouvette + sable (g)	1437.2
$V = P_3 - P_4 = 1566.5 - 1437.2 = 129.3$	
$s = P_1 / V = 354.4 / 129.3 = 2.74 \text{ g/cm}^3$	

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

II.3.2 Caractérisation physiques des cendres d'écorces d'orange (OPA)

II.3.2.1 Propriétés physiques

a. La Masse volumique apparente

La masse volumique apparente de la cendre d'écorces d'orange (OPA) a été déterminée selon une méthode inspirée des normes EN 1097-6 et NF P 18-555, appliquée de manière analogue à celle utilisée pour le sable. Le récipient préalablement taré est rempli à l'aide d'un entonnoir depuis une hauteur de chute d'environ 10 cm, puis la surface est arasée à la règle et le récipient est pesé. L'opération a été répétée quatre fois, comme illustré sur la (figure II.16).



Figure II.16. Étapes de l'essai de la masse volumique apparente (OPA).

Calculs et résultats obtenus

Pesée	Pi+T (g)	Pi (g)
1	58.2	14.9
2	59.3	16
3	58.1	14.8
4	58.6	15.3
Mmoyen	15.25	
$\rho_{app} = M_{moy} / V = 15.25 / 220.46 = 0.069 \text{ g/cm}^3$		

Tableau II.7. Résultats de l'essai de la masse volumique apparente.

b. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue de la cendre d'écorces d'orange (OPA) a été déterminée selon le principe de la méthode par déplacement de liquide, conformément à la norme ASTM C188-14 [53]. Un volume connu d'alcool éthylique (Éthanol 70%) est introduit dans une éprouvette graduée, puis la poudre d'OPA est ajoutée progressivement. Le volume déplacé par la poudre permet de déterminer le volume réel occupé par la matière solide.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

Echantillon	$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$
OPA	2.8



Figure II.17. Essai de la masse volumique absolue de l'OPA par la méthode de déplacement de liquide.

II.4 Méthodes d'essais

Après la caractérisation des matières premières, des essais de laboratoire ont été réalisés afin d'étudier les propriétés du mortier à l'état frais et à l'état durci. Ces essais visent à évaluer le comportement des mélanges cimentaires sur les plans physique et mécanique, ainsi qu'à sélectionner les formulations appropriées pour l'étude sur la base des résultats obtenus.

II.4.1 Formulation et fabrication des éprouvettes d'essai

Dans le cadre de ce travail, une étude préliminaire a été menée sur un mélange témoin composé de ciment (C = 450 g) et de sable limoneux (S = 1350 g), afin d'obtenir un mortier plastique avec un étalement compris entre 140 et 200 mm . Après plusieurs essais, et en tenant compte de la masse volumique des matériaux lors des substitutions, le rapport eau/ciment a été fixé à E/C = 0,50 pour l'ensemble des formulations.

Cette étude vise à substituer une partie du ciment par de la poudre OPA selon trois taux (2 %, 4 %, 6 %), avec incorporation de fibres de palmier selon trois taux (0,5 %, 1 %, 1,5 %) et trois longueurs différentes (10 mm, 20 mm, 30 mm), ce qui a conduit à l'élaboration de 27 formulations dont les détails sont présentés dans le tableau (II-8).

Tableaux II.8. Les différents formulation des mortiers étudiées.

Tableau (a .8) Formulations avec (OPA)= 2 %

	Poudre OPA (%)	Poudre OPA (g)	Ciment (g)	Fibre (%)	Fibre (g)	Longueur des fibres (mm)
1	2	9	441	0.5	2.25	10
2	2	9	441	0.5	2.25	20
3	2	9	441	0.5	2.25	30
4	2	9	441	1	4.5	10
5	2	9	441	1	4.5	20
6	2	9	441	1	4.5	30
7	2	9	441	1.5	6.75	10
8	2	9	441	1.5	6.75	20
9	2	9	441	1.5	6.75	30

Tableau (b.8)Formulations avec (OPA)= 4 %

	Poudre OPA (%)	Poudre OPA (g)	Ciment (g)	Fibre (%)	Fibre (g)	Longueur des fibres (mm)
1	4	18	432	0.5	2.25	10
2	4	18	432	0.5	2.25	20
3	4	18	432	0.5	2.25	30
4	4	18	432	1	4.5	10
5	4	18	432	1	4.5	20
6	4	18	432	1	4.5	30

7	4	18	432	1.5	6.75	10
8	4	18	432	1.5	6.75	20
9	4	18	432	1.5	6.75	30

Tableau (c.8) Formulations avec (OPA)= 6 %

	Poudre OPA (%)	Poudre OPA (g)	Ciment (g)	Fibre (%)	Fibre (g)	Longueur des fibres (mm)
1	6	27	423	0.5	2.25	10
2	6	27	423	0.5	2.25	20
3	6	27	423	0.5	2.25	30
4	6	27	423	1	4.5	10
5	6	27	423	1	4.5	20
6	6	27	423	1	4.5	30
7	6	27	423	1.5	6.75	10
8	6	27	423	1.5	6.75	20
9	6	27	423	1.5	6.75	30

II.4.2 Préparation des échantillons d'essai

Pour la réalisation des essais, des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm³ ont été confectionnées. À la fin du malaxage de chaque formulation, les essais de caractérisation à l'état frais ont été effectués immédiatement, à savoir l'essai d'étalement et la mesure de la masse volumique.

Une fois les moules remplis, l'excédent de mortier a été arasé et la surface lissée à l'aide d'une truelle. Les moules ont été ensuite conservés à la température ambiante du laboratoire pendant 24 heures, après quoi les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans l'eau pendant une durée de 28 jours. Les différentes étapes de la mise en œuvre sont illustrées dans les photos ci-dessous (Figure II-18).



Figure II .18. Différentes étapes de confection des éprouvettes : remplissage des moules, démoulage et conservation dans l'eau .

II.5. Méthodologie expérimentale

Ce travail vise à évaluer les propriétés mécaniques et physiques des mortiers renforcés par des fibres de palmier, avec substitution partielle du ciment par la poudre OPA. Les résultats obtenus sont comparés à ceux du mortier témoin, après une cure dans l'eau pendant 28 jours.

Les essais réalisés comprennent la caractérisation à l'état frais, par l'essai d'étalement et la mesure de la masse volumique, et la caractérisation à l'état durci, par les essais de résistance à la compression, de résistance à la flexion et de vitesse d'impulsion des ultrasons.

II.5.1. Caractérisation à l'état frais

II.5.1.1 Essai d'étalement

Pour évaluer la consistance du mortier à l'état frais, l'essai à la table à secousses a été adopté conformément à la norme NF EN 12350-5, étant l'une des méthodes les plus utilisées pour déterminer l'ouvrabilité des mortiers plastiques. L'essai est réalisé à l'aide d'un moule tronconique de dimensions suivantes : diamètre de la base inférieure 100 mm, diamètre de l'ouverture supérieure 70 mm, et hauteur 60 mm, centré sur le plateau métallique de la table à secousses.

Le mortier est introduit dans le moule en deux couches successives, chacune compactée par dix coups de pilon, afin d'expulser l'air emprisonné et d'assurer l'homogénéité du mélange. L'excès de matière est ensuite arasé à l'aide d'une règle métallique, puis le moule est retiré verticalement sans inclinaison. Immédiatement après le démoulage, la table à secousses est mise en marche pour appliquer 15 chocs à raison d'un choc par seconde.

À l'arrêt de la table, le diamètre de la galette est mesuré selon deux directions perpendiculaires d_1 et d_2 .



Figure II.19. Essai d'étalement à la table à secousses .

La Figure (II-19) illustre les différentes étapes de cet essai. Les classes de consistance sont définies en fonction des valeurs d'étalement, comme présenté dans le tableau ci-dessous :

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

Table II.9 Valeurs d'étalement NF EN 1015-6 [54].

II.5.1.2 Mesure de la masse volumique

Pour mesurer la masse volumique du mortier frais, un échantillon est prélevé et préparé conformément aux spécifications de l'essai, puis pesé avec précision à l'aide d'une balance de laboratoire appropriée et la valeur de la masse est enregistrée. Le volume du récipient utilisé est ensuite mesuré, et la masse volumique est calculée en (g/cm³) selon l'équation (4) ci-dessous.

$$\rho = M / V \text{ (g / cm}^3 \text{) (4)}$$

II.5.2 Caractéristiques à l'état durci

II.5.2.1 Essais d'auscultation dynamique (essai ultrasonique)

L'essai ultrasonique fait partie des méthodes non destructives utilisées pour évaluer les caractéristiques internes des matériaux cimentaires, en transmettant une onde acoustique à travers le matériau d'un bout à l'autre et en mesurant son temps de transit pour calculer la vitesse de propagation.

Cet essai a été réalisé conformément à la norme NF EN 12504-4[55], sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm³, conservées dans l'eau pendant 28 jours, puis séchées dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un appareil de marque « Controls », comme illustré dans la Figure II-20.

La vitesse de l'onde obtenue est liée à la compacité du matériau et à son homogénéité interne ; plus la vitesse est élevée, plus la résistance mécanique est importante. Les critères d'interprétation des résultats sont présentés dans le (Tableau II-11).



Figure II.20. Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique .

Vitesse d'impulsion (m/s)	Classement de la qualité
Supérieur à 4500	Excellent
Entre 3500 à 4500	Bon
Entre 3000 à 3500	Moyen
Inférieur à 3000	Douteux

Tableau II.10. Classification du béton sur la base de mesures des vitesses d'impulsions ultrasoniques.

II.5.2.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité est l'une des propriétés physiques importantes du mortier, car elle influence directement sa résistance et sa durabilité, et reflète la qualité de sa structure interne. La mesure de la porosité accessible à l'eau a été effectuée selon les normes ASTM C642-13 [56] et NF EN 18-459, par la méthode de pesée hydrostatique, sur des éprouvettes de dimensions $(40 \times 40 \times 160)$ mm³ conservées dans l'eau pendant 28 jours.

L'essai repose sur le calcul de la différence de masse entre l'éprouvette à l'état sec et l'éprouvette à l'état saturé, la porosité étant définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume apparent de l'éprouvette. L'essai se déroule en trois étapes : pesée de l'éprouvette immergée dans l'eau (M_{eau}), puis essuyage superficiel et pesée dans l'air (M_{air}), et enfin séchage en étuve à $105 \pm 5 \text{ °C}$ pendant 48 heures pour obtenir (M_{sec}). L'essai a été réalisé sur trois éprouvettes, comme illustré dans la Figure (II-21), et la porosité est calculée selon la formule suivante :

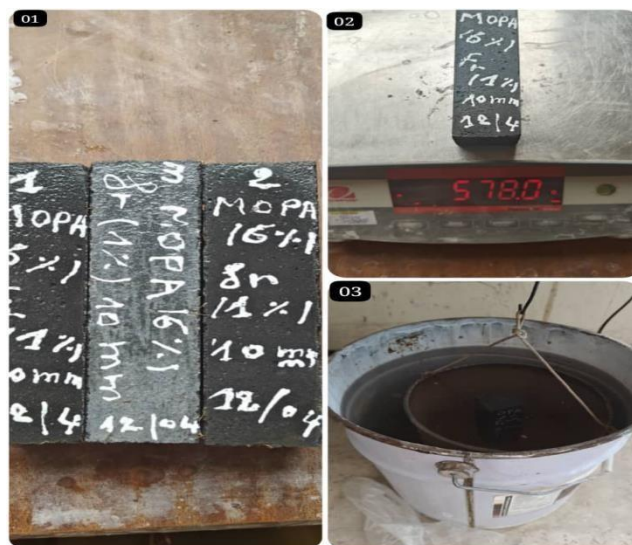


Figure II.21 . Essai de porosité accessible à l'eau .

$$P = [(M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}) / (M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})] \times 100$$

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

II.5.2.3 Absorption d'eau par capillarité

Cet essai a été réalisé conformément à la norme NF EN 480-5[57], sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$). Les éprouvettes ont été séchées dans un four à circulation d'air à 70 °C jusqu'à stabilisation de leur masse, avec une variation n'excédant pas 0,1% par jour. Les faces latérales et supérieures ont ensuite été imperméabilisées à l'aide d'un film plastique, en ne laissant exposée que la face inférieure.

Chaque éprouvette a été pesée à l'état sec puis mise en contact avec une lame d'eau de 5 mm d'épaisseur déposée dans une cuve, comme illustré dans la Figure (II-22). La prise de masse a été mesurée à des intervalles de temps allant de 10 minutes jusqu'à 72 heures, afin de suivre l'évolution de l'absorption capillaire. La sorptivité et la quantité d'eau absorbée ont été calculées comme indicateurs de la porosité et de la durabilité des mortiers.



Figure II.22. 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:

$$C_t = (M_t - M_0) / A$$

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.5.2.4. Essai de flexion à trois point

L'essai de flexion par trois points a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm, conformément à la norme NF EN 1015-11[58], à l'aide d'un appareil de mesure

numérique de marque CONTROLS. Trois éprouvettes ont été testées pour chaque formulation.

Chaque éprouvette est placée sur deux appuis distants de 100 mm, puis une charge croissante est appliquée en son milieu jusqu'à la rupture, comme illustré sur la figure ci-dessous (Figure_23) dispositif expérimental de l'essai de flexion.



Figure II.23. Essai de flexion par trois points sur éprouvettes prismatiques.

La résistance à la flexion est calculée à partir de la charge maximale enregistrée à la rupture, selon la relation suivante :

$$R_f = (1,5 \times F_f \text{ max} \times L) / (b^3)$$

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 mm) .

b : Le coté de la section carrée de l'éprouvette en mm (b=40 mm).

II.5.2.5. Essai de compression

L'essai de compression a été effectué directement sur les deux demi-prismes issus de la rupture en flexion, au moyen d'un appareil numérique de marque CONTROLS, conformément à la norme NF EN 12390-4 [59]. Les éprouvettes testées en compression présentent des dimensions de (4×4×4) cm. Chaque éprouvette est centrée sur le plateau de la presse, comme indiqué sur la (Figure 24), avec une surface de contact de 16 cm² entre l'éprouvette et le plateau de compression. L'application de la charge a été réalisée à une vitesse de 2400 N/s jusqu'à la rupture. La charge de rupture retenue correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est déterminée par le rapport entre cette charge et la section transversale de l'éprouvette, selon la relation suivante. La valeur finale adoptée représente la moyenne de trois mesures effectuées pour chaque composition.

$$R_c = F_c \text{ max} / (b \times h)$$

Avec :

RC : La contrainte de compression en (MPa) .

Fc 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.24. Eprouvettes soumises à l'essai de compression avant et après rupture .

II.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté une description détaillée des matières premières utilisées dans cette étude, à savoir les constituants de base du mortier cimentaire, le cendre de pelures d'orange (OPA) et les fibres végétales, en mettant en évidence leurs propriétés physiques et leur rôle dans l'amélioration des performances du mortier.

La cendre de pelures d'orange a été incorporée en tant que substitut partiel du ciment à des taux de 2%, 4% et 6%, afin d'examiner son influence sur les propriétés du mortier cimentaire. Les fibres végétales, quant à elles, ont été ajoutées à des taux de 0,5%, 1% et 1,5%, avec des longueurs variables de 10 mm, 20 mm et 30 mm, dans le but d'évaluer l'effet combiné du taux d'incorporation et de la longueur des fibres sur le comportement du mortier.

Chapitre 03

Analyse et discussions des resultats



III.1 Introduction

Ce chapitre regroupe les résultats expérimentaux relatifs à l'étude du mortier cimentaire amélioré par la cendre de pelures d'orange (OPA) et les fibres végétales. L'étude a porté sur trois taux de substitution partielle du ciment par la cendre de pelures d'orange, soit 2%, 4% et 6%, tandis que les fibres végétales ont été incorporées à des taux de 0,5%, 1% et 1,5%, avec trois longueurs distinctes de 10 mm, 20 mm et 30 mm.

Cette étude vise à évaluer l'influence de ces ajouts sur le comportement du mortier à l'état frais et à l'état durci, en mesurant d'une part la maniabilité, et d'autre part la résistance à la flexion et à la compression. L'ensemble de ces essais cherche à mettre en évidence le rôle joué par la cendre de pelures d'orange et les fibres végétales dans l'amélioration des performances du mortier cimentaire .

III.2 Caractérisation des mortiers à l'état frais

III.2.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité constitue l'une des propriétés fondamentales du mortier à l'état frais, car elle reflète la facilité de son malaxage et de sa mise en œuvre. Les résultats de l'essai d'étalement montrent que les valeurs obtenues varient entre 14 et 17 cm, comme illustré à la figure (III.1).

Le mortier témoin (M0/0) a enregistré la valeur d'étalement la plus élevée, soit 17 cm. En revanche, une légère diminution de cette valeur a été observée pour les formulations contenant l'OPA et les fibres végétales. Elle atteint 16 cm pour les formulations M2%/f1.5%-30mm, M4%/f1.5%-30mm et M4%/f1%-20mm, tandis que les formulations M6%/f1.5%-30mm et M6%/f1%-30mm présentent les valeurs les plus faibles, soit 14 cm.

Cette diminution de l'étalement est principalement liée à l'effet combiné de l'OPA et des fibres végétales. En effet, la finesse des particules d'OPA augmente la surface spécifique du mélange et entraîne une demande en eau plus importante pour assurer la mobilité des particules. De plus, la structure poreuse des fibres végétales favorise l'absorption d'une partie de l'eau de gâchage, ce qui réduit la quantité d'eau libre disponible et limite ainsi la fluidité du mortier.

Par ailleurs, l'analyse DRX de l'OPA après traitement thermique a révélé la présence de phases minérales principales, notamment la calcite (CaCO_3), le quartz (SiO_2) et la portlandite (Ca(OH)_2). La présence de ces composés dans la matrice cimentaire contribue à renforcer la cohésion de la pâte et à améliorer les interactions entre ses constituants, ce qui peut également

participer à la réduction de l'étalement. D'une manière générale, les écarts enregistrés entre les différentes formulations restent limités, avec une différence maximale ne dépassant pas 3 cm par rapport au mortier témoin. Ces résultats montrent que l'incorporation de l'OPA et des fibres végétales n'a pas entraîné une modification significative de l'ouvrabilité, et que toutes les formulations étudiées ont conservé un comportement acceptable à l'état frais.

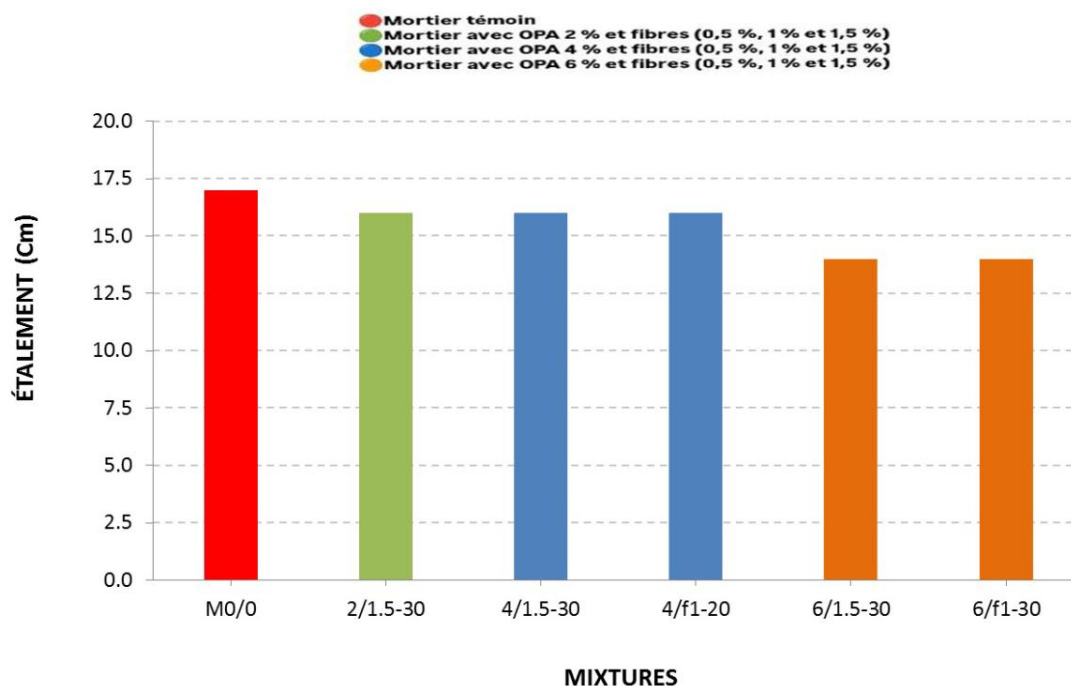


Figure III.1 . Variation des valeurs d'étalement des mortiers en fonction du taux de substitution de l'OPA et du taux d'incorporation des fibres végétales.

III.2.2 La masse volumique à l'état frais

La masse volumique à l'état frais constitue un indicateur important du degré de compacité et d'homogénéité du mortier. Les résultats obtenus, présentés à la figure (III.2), montrent que les valeurs de masse volumique varient entre 1920 et 2214 kg/m³. Le mortier témoin (M0/0) a enregistré la valeur la plus élevée, soit 2214 kg/m³, tandis que les formulations contenant l'OPA et les fibres végétales ont présenté des valeurs comprises entre 1920 et 2087 kg/m³.

La diminution enregistrée s'explique par l'incorporation de l'OPA et des fibres végétales au sein de la matrice cimentaire. La présence des fibres entraîne la formation de vides microscopiques et le piégeage d'une certaine quantité d'air dans le mélange, ce qui affecte le degré de compacité et conduit à une réduction de la masse volumique par rapport au mortier témoin. Par ailleurs, la substitution partielle du ciment par l'OPA contribue également à ce comportement, dans la mesure où la densité de l'OPA est inférieure à celle du ciment Portland.

Malgré cela, les écarts enregistrés entre les différentes formulations restent relativement limités, ce qui indique que l'incorporation de l'OPA et des fibres végétales n'a pas affecté de manière notable l'homogénéité du mortier à l'état frais, et que l'ensemble des formulations étudiées a conservé un degré acceptable de compacité et de cohésion interne.

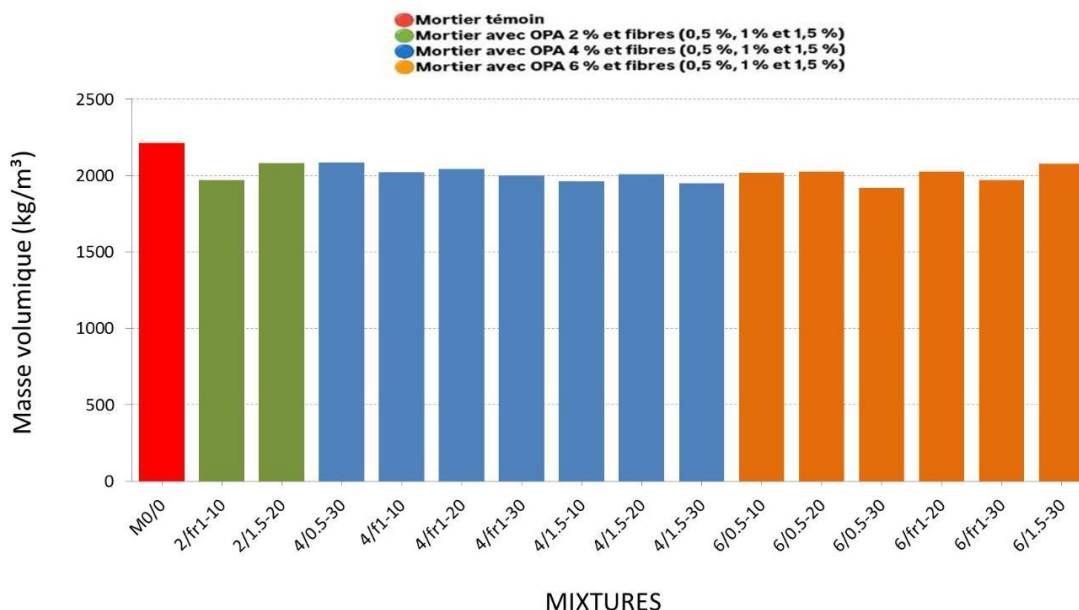


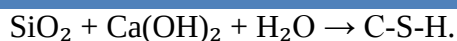
Figure III.2. La masse volumique des mortiers à l'état frais .

III.3 Caractérisation des mortiers à l'état durci

III.3.1. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression après 28 jours de cure humide, représentés à la figure (III.3), montrent une amélioration des performances mécaniques des formulations contenant la cendre d'écorces d'orange (OPA) et les fibres végétales par rapport au mortier témoin (M0/0), qui a enregistré une résistance de 16,8 MPa. Les formulations contenant 2 % d'OPA ont présenté des valeurs comprises entre 19,3 et 41,8 MPa, tandis que celles contenant 4 % d'OPA ont varié entre 24,5 et 37,5 MPa. La résistance maximale a été enregistrée pour la formulation contenant 6 % d'OPA et 0,5 % de fibres de longueur 30 mm, avec une valeur de 51,5 MPa.

Cette amélioration est principalement attribuée à l'activité pouzzolanique de la cendre d'écorces d'orange, confirmée par l'analyse DRX. La présence du quartz (SiO_2) dans la composition minéralogique de l'OPA favorise sa réaction avec la portlandite (Ca(OH)_2) libérée lors de l'hydratation du ciment, selon la réaction suivante :



Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) formés représentent les principaux produits responsables du développement de la résistance mécanique. Ils contribuent au remplissage des pores microscopiques et améliorent la cohésion interne de la matrice cimentaire, conduisant ainsi à une structure plus dense et plus homogène.

Par ailleurs, l'ajout des fibres végétales améliore le comportement mécanique du mortier en jouant un rôle de renforcement au sein de la matrice cimentaire. Elles limitent l'apparition et la propagation des microfissures et permettent une meilleure redistribution des contraintes sous l'effet de la charge. Ainsi, malgré leur influence sur l'état frais, où leur capacité d'absorption d'eau peut réduire légèrement l'ouvrabilité du mortier, les fibres contribuent à améliorer les propriétés du matériau à l'état durci.

Cependant, une teneur élevée en fibres peut provoquer une légère diminution de la résistance dans certaines formulations, en raison d'une dispersion moins homogène des fibres et de la présence éventuelle de zones moins compactes dans la matrice.

De manière générale, la combinaison de l'OPA et des fibres végétales a permis d'améliorer la microstructure du mortier et d'augmenter sa résistance à la compression par rapport au mortier témoin. Les meilleures performances ont été obtenues pour les formulations contenant 6 % d'OPA, ce qui confirme l'efficacité de cette combinaison dans le renforcement de la matrice cimentaire.

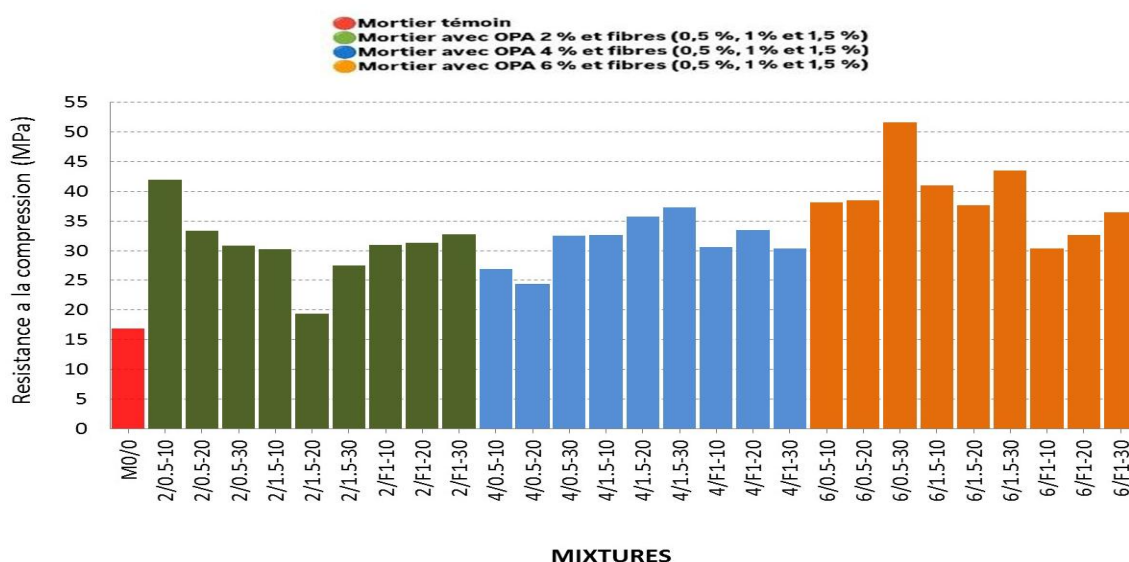


Figure III.3. Résistances en compression des mortiers après 28 jours de cure à l'eau .

III.3.2 Résistance à la flexion trois points

Les résultats présentés dans la figure (III.4) illustrent l'évolution de la résistance à la flexion des différentes formulations après 28 jours de cure humide. Le mortier témoin (M0/0) a enregistré une résistance à la flexion de 6,95 MPa. En revanche, les mortiers incorporant la cendre d'écorces d'orange (OPA) et les fibres végétales ont présenté des variations de résistance en fonction du taux de substitution, de la teneur en fibres et de leur longueur. La formulation M4%/f1%-30mm a atteint la valeur maximale de résistance à la flexion, soit 7,98 MPa, suivie de la formulation M2%/f1.5%-30mm avec une résistance de 7,90 MPa. Les formulations contenant 6 % d'OPA ont présenté des valeurs comprises entre 4,82 et 6,68 MPa, inférieures à celles obtenues pour certaines formulations à base de 2 % et 4 % d'OPA.

L'amélioration observée de la résistance à la flexion peut être attribuée à l'effet combiné de l'OPA et des fibres végétales. D'une part, l'incorporation de l'OPA contribue à améliorer la cohésion de la matrice cimentaire grâce à son activité pouzzolanique, favorisant ainsi le développement d'une structure interne plus compacte et une meilleure liaison entre les différents constituants du mortier. D'autre part, les fibres végétales jouent un rôle de renforcement au sein de la matrice cimentaire en limitant l'apparition et la propagation des microfissures générées lors de la sollicitation en flexion. Elles assurent ainsi un transfert partiel des contraintes et permettent une meilleure répartition des efforts appliqués.

Par ailleurs, les fibres de longueur 30 mm ont montré, dans la majorité des formulations, un comportement plus favorable que les fibres plus courtes. Cette amélioration peut être liée à une longueur d'ancrage plus importante dans la matrice cimentaire, permettant un transfert plus efficace des contraintes et une meilleure contribution des fibres au contrôle de la fissuration.

Toutefois, l'augmentation du taux d'OPA à 6 % n'a pas entraîné une amélioration supplémentaire de la résistance à la flexion. Cette diminution peut être associée à une quantité plus élevée de particules fines d'OPA dans le mélange, pouvant modifier la compacité de la matrice cimentaire et favoriser la présence de zones moins denses, limitant ainsi le développement des performances mécaniques.

Globalement, les résultats montrent que l'association de l'OPA et des fibres végétales améliore le comportement mécanique du mortier. L'OPA contribue principalement à l'amélioration de la microstructure de la matrice cimentaire, tandis que les fibres assurent un effet de pontage des fissures, ce qui permet d'obtenir de meilleures performances en flexion pour les formulations optimisées.

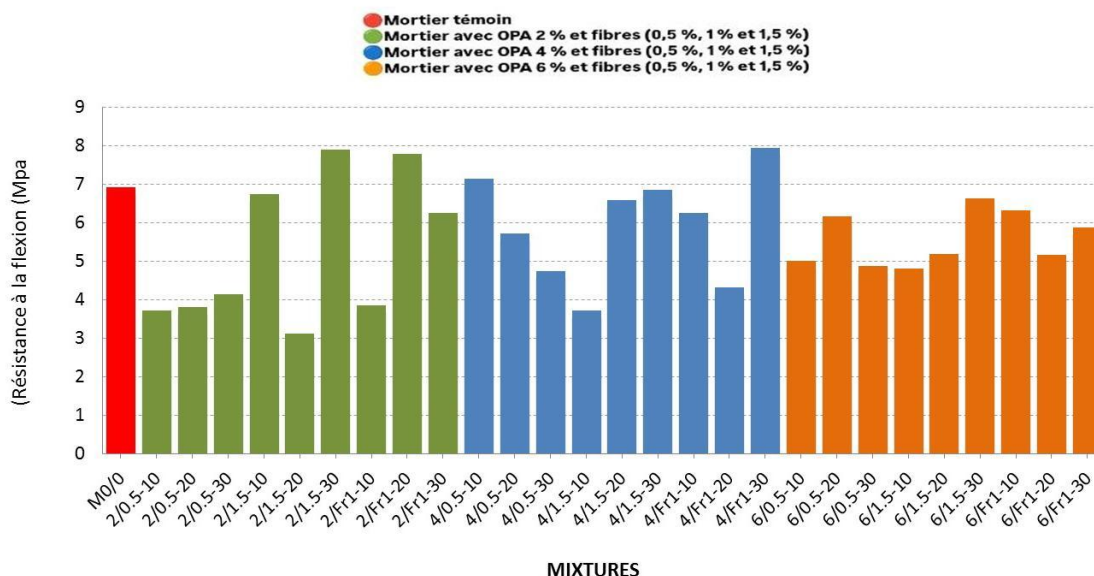


Figure III.4. Résistances en flexion des mortiers après 28 jours de cure à l'eau .

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

La figure (III.5) présente les résultats de la vitesse d'impulsion des ultrasons des différents mortiers après 28 jours de cure en eau. Le mortier témoin (M0/0) enregistre une vitesse de référence de 3 350 m/s, classée dans la catégorie moyenne. Les résultats montrent que les formulations à base de 2 % d'OPA atteignent les vitesses UPV les plus élevées de l'étude, avec une valeur de 3 750 m/s pour la formulation OPA 2%/Fr 0,5%/30mm, classée en catégorie bonne. Cette performance est attribuée à la bonne dispersion des fibres à faible dosage au sein de la matrice, tandis que les formulations à taux de fibres élevé (1,5 %) affichent des vitesses plus faibles, de l'ordre de 3 150 m/s, en raison de l'enchevêtrement des fibres et de l'augmentation de la porosité interne. Les formulations à base de 4 % d'OPA enregistrent des vitesses satisfaisantes, avec une valeur maximale de 3 780 m/s pour la formulation OPA 4%/Fr 1,5%/10mm, ce qui reflète l'effet densifiant de l'OPA par réaction pouzzolanique. Les formulations contenant 6 % d'OPA présentent des vitesses comprises entre 3 200 m/s et 3 680 m/s, inférieures à celles des deux groupes précédents, en raison de la dilution excessive de la phase liante à ce taux de substitution. De manière générale, l'ensemble des formulations se situe dans les catégories moyenne et bonne, ce qui atteste de la compatibilité des matériaux biosourcés avec la matrice cimentaire, et la cohérence observée entre les résultats UPV et les résistances mécaniques confirme la fiabilité des résultats obtenus.

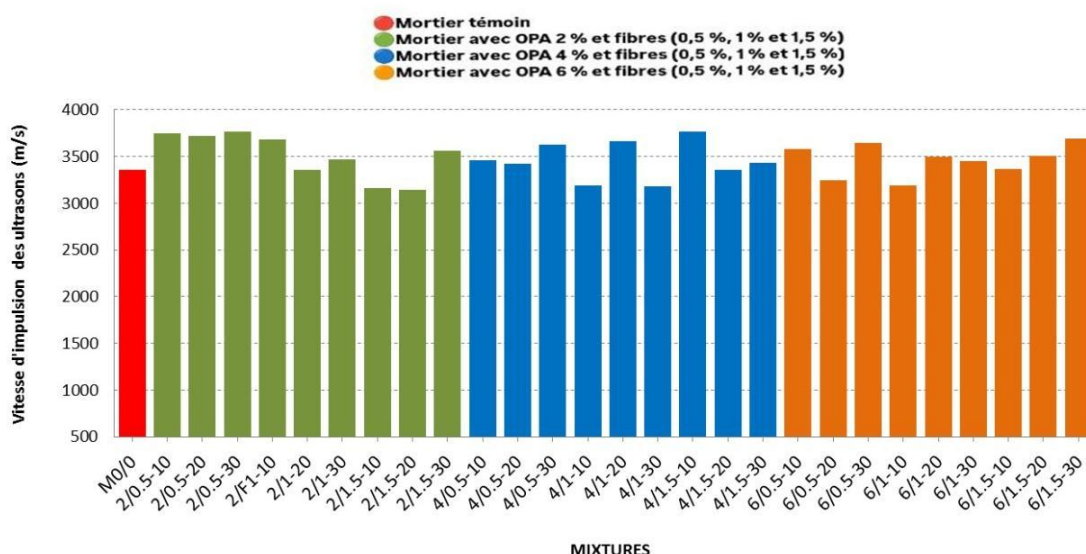


Figure III.5. Vitesse d'impulsion des ultrasons (UPV) des différents mortiers .

III.3.4 Porosité accessible à l'eau

La figure (III.6) présente les résultats de la porosité accessible à l'eau des différentes formulations après 28 jours de cure humide. Le mortier témoin (M0/0) affiche une porosité de référence de 11,10 %, qui constitue la base de comparaison pour l'ensemble des formulations étudiées.

Les formulations à 2 % d'OPA présentent des résultats contrastés : les formulations à faible taux de fibres (0,5 %) enregistrent des porosités inférieures à celle du témoin, avec une valeur minimale de 9,26 %, tandis que les formulations à taux élevé de fibres (1,5 %) dépassent la valeur de référence pour atteindre 15,98 %, en raison de l'enchevêtrement des fibres longues et de la formation de vides internes au sein de la matrice.

Les formulations à 4 % d'OPA présentent la plus grande dispersion des résultats, avec des valeurs comprises entre 10,52 % et 16,70 %, ce qui traduit la difficulté d'obtenir une distribution homogène des fibres à ce taux de substitution.

Les formulations à 6 % d'OPA affichent les meilleures performances de l'étude, avec les deux valeurs minimales de porosité : 8,69 % et 8,68 % pour les formulations OPA 6 %/Fr 0,5 %/10 mm et OPA 6 %/Fr 0,5 %/20 mm respectivement. Ce résultat s'explique par l'activité pouzzolanique de l'OPA, qui densifie la matrice cimentaire et comble les pores capillaires.

De manière générale, les résultats montrent qu'une augmentation du taux et de la longueur des fibres entraîne une hausse de la porosité, alors que les fibres courtes (10 mm) à faible dosage (0,5 %) contribuent à limiter la fissuration sans altérer la compacité de la matrice. Ces résultats confirment que la formulation OPA 6 %/Fr 0,5 %/10 mm est la plus performante, avec une porosité de 8,69 %, soit une réduction de 21,7 % par rapport au témoin, tandis que les formulations à 4 % d'OPA associées à des fibres longues et à des dosages élevés s'avèrent les moins favorables du point de vue de la durabilité, en raison de leur porosité élevée.

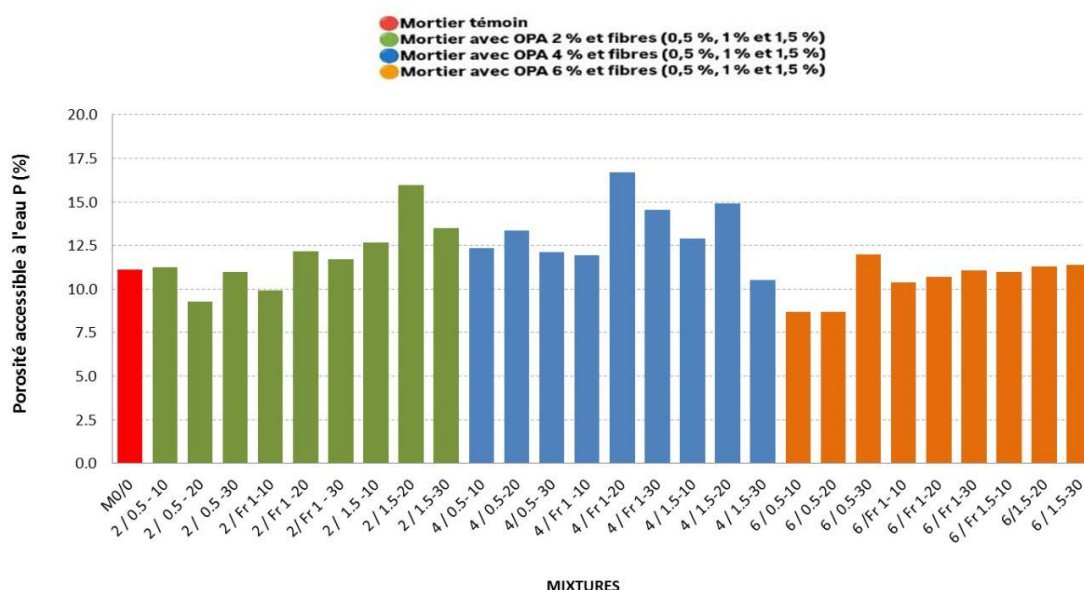


Figure III.7. Effet de la substitution partielle du ciment par l'OPA et de l'ajout de fibres de palmier dattier sur la porosité accessible à l'eau des mortiers après 28 jours de cure.

III.3.5. Absorption d'eau par immersion totale

La figure (III.8) présente les résultats de l'absorption totale d'eau des différentes formulations après 28 jours de cure. Le mortier témoin a enregistré un taux d'absorption de 5,25 %, tandis que les formulations contenant l'OPA et les fibres végétales ont présenté des valeurs variables selon le taux de substitution et la teneur en fibres. Les valeurs d'absorption les plus faibles ont été enregistrées pour un taux de 6 % d'OPA associé à 0,5 % de fibres, alors que les valeurs les plus élevées ont été observées dans certaines formulations à teneur élevée en fibres.

Ce comportement s'explique par la réduction de la porosité et l'amélioration de la cohésion de la matrice cimentaire dans les formulations les plus performantes, ce qui a limité la pénétration de l'eau au sein du matériau. En revanche, l'augmentation du taux de fibres ou de

leur longueur dans certaines formulations a conduit à la formation de vides supplémentaires, contribuant ainsi à l'augmentation de l'absorption.

De manière générale, les résultats confirment que l'utilisation de 6 % d'OPA associée à un faible taux de fibres a contribué à améliorer la résistance du mortier à l'absorption d'eau.

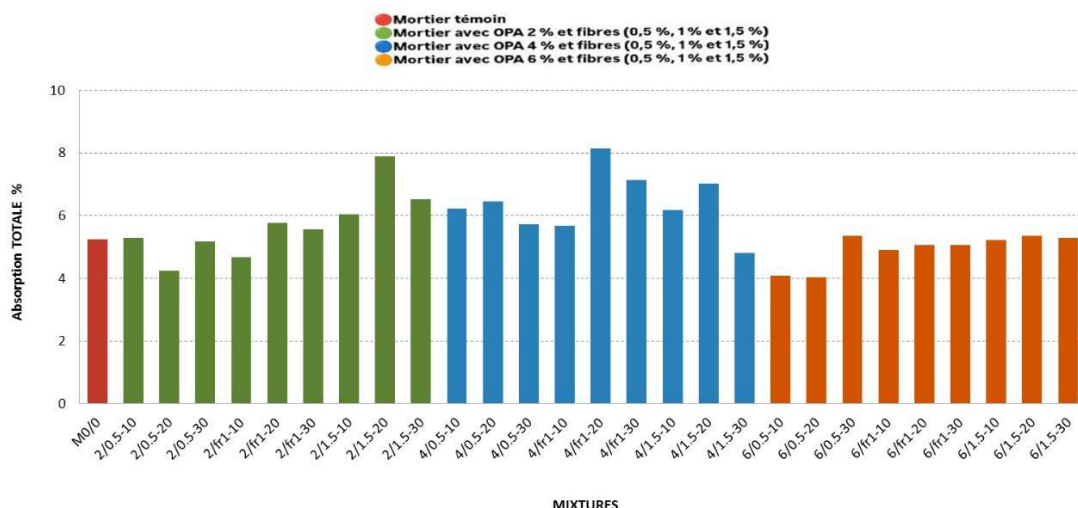


Figure III.8. Résultats de l'absorption d'eau par immersion totale des différentes formulations après 28 jours de cure.

III.3.6. Absorption d'eau par capillarité

Les figures suivantes présentent les courbes d'absorption capillaire obtenues pour les différentes compositions, où la quantité d'eau absorbée est exprimée en fonction de la racine carrée du temps ($\sqrt{t}$), et ce pour des teneurs variables en OPA et en fibres.

La figure III.9a présente la cinétique d'absorption capillaire du mortier témoin (M0/0). Deux phases distinctes se dégagent de la courbe:

Durant la première phase (0 – 30 min), le coefficient C_t augmente rapidement de 0,0171 g/cm² à 10 min jusqu'à 2,1971 g/cm² à 1h, en raison de la pénétration rapide de l'eau dans les macropores capillaires de la matrice cimentaire.

La deuxième phase (1h – 72h) se caractérise par un ralentissement notable de l'absorption, avec une évolution quasi-linéaire de la courbe $C_t = f(\sqrt{t})$, traduisant la saturation progressive

des pores de plus faible diamètre. La valeur finale atteint $C_t = 2,5667 \text{ g/cm}^2$ à 72h, et constitue la valeur de référence pour la comparaison de l'ensemble des formulations étudiées.



Figure III.9a. Cinétique d'absorption capillaire du mortier témoin .

La figure III.9b présente la cinétique d'absorption capillaire des neuf formulations à base d'OPA 2% combinées aux fibres de palmier dattier. Deux phases se dégagent de l'ensemble des courbes.

Durant la première phase (0 – 30 min), les valeurs de C_t restent faibles et groupées pour la majorité des formulations, avec des valeurs comprises entre 0,04 et 0,15 g/cm^2 à 10 min. La formulation OPA2%/Fr1%/20mm se distingue par la valeur initiale la plus élevée du groupe ($C_t = 0,13 \text{ g/cm}^2$ à 10 min), en raison de la création de canaux capillaires préférentiels liés à la longueur des fibres.

Durant la deuxième phase (1h – 72h), les courbes se séparent progressivement. À 72h, les résultats se répartissent comme suit:

OPA2%/Fr1%/20mm enregistre la valeur la plus élevée du groupe : $C_t = 1,43 \text{ g/cm}^2$

OPA2%/Fr1.5%/20mm présente également une valeur élevée : $C_t = 1,25 \text{ g/cm}^2$

OPA2%/Fr0.5%/20mm affiche la valeur la plus faible du groupe : $C_t = 0,69 \text{ g/cm}^2$

Toutes les formulations OPA 2% restent inférieures à la valeur du mortier témoin ($C_t = 2,567 \text{ g/cm}^2$), ce qui confirme l'effet bénéfique de l'incorporation d'OPA sur la réduction de l'absorption capillaire de la matrice cimentaire.

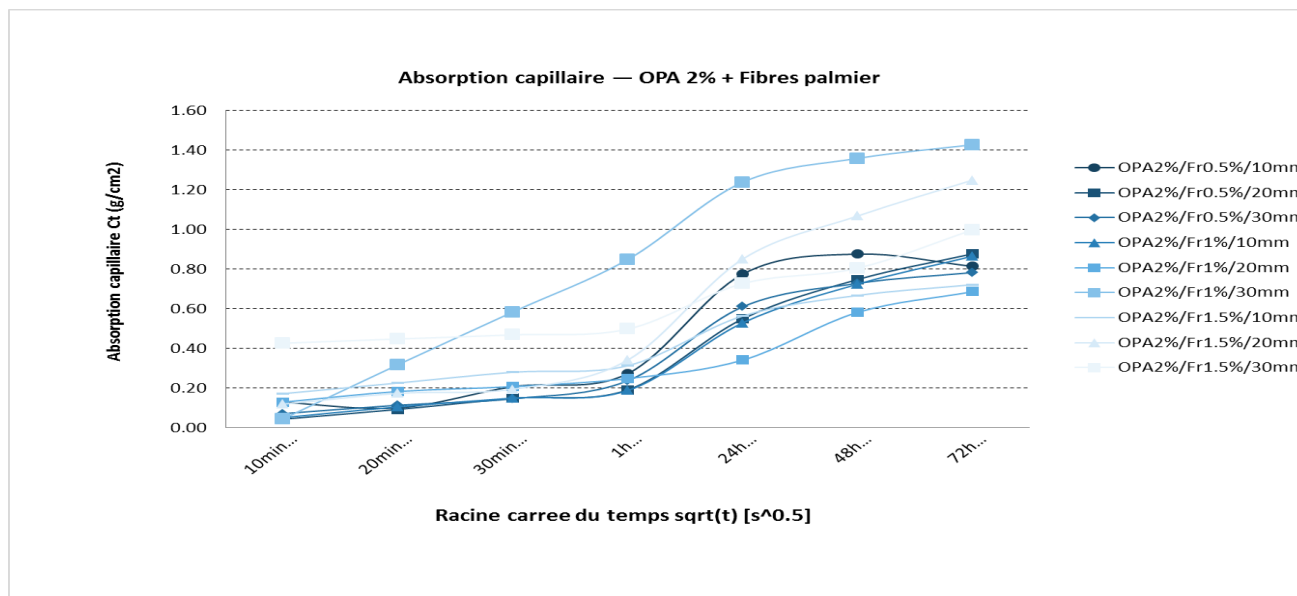


Figure III.9b. Cinétique d'absorption capillaire — OPA 2% + Fibres de palmier dattier .

La figure III.9C présente la cinétique d'absorption capillaire des neuf formulations à base d'OPA 4% combinées aux fibres de palmier dattier. Ce groupe se distingue par la variabilité la plus importante observée parmi les trois groupes étudiés.

Durant la première phase (0 – 30 min), les formulations se répartissent en deux catégories distinctes. Les formulations OPA4%/Fr0.5%/20mm et OPA4%/Fr1.5%/10mm enregistrent les valeurs initiales les plus élevées (0,73 – 0,75 g/cm^2 à 10 min), traduisant une porosité surfacique importante liée à une mauvaise dispersion des fibres dans la matrice cimentaire. En revanche, les formulations OPA4%/Fr1%/10mm et OPA4%/Fr1.5%/30mm affichent les valeurs les plus faibles (inférieures à 0,05 g/cm^2), indiquant une compacité initiale satisfaisante de la matrice.

Durant la deuxième phase (1h – 72h), les courbes se séparent nettement. À 72h, les résultats se répartissent comme suit:

OPA4%/Fr1%/20mm : $C_t = 1,31 \text{ g/cm}^2$ ← valeur la plus élevée du groupe

OPA4%/Fr1.5%/20mm : $C_t = 1,25 \text{ g/cm}^2$

OPA4%/Fr1.5%/30mm : $C_t = 0,49 \text{ g/cm}^2$ ← valeur la plus faible du groupe

L'ensemble des formulations OPA 4% demeure inférieur à la valeur du mortier témoin ($C_t = 2,567 \text{ g/cm}^2$), confirmant l'effet positif de l'incorporation d'OPA sur la résistance à l'absorption capillaire de la matrice cimentaire.

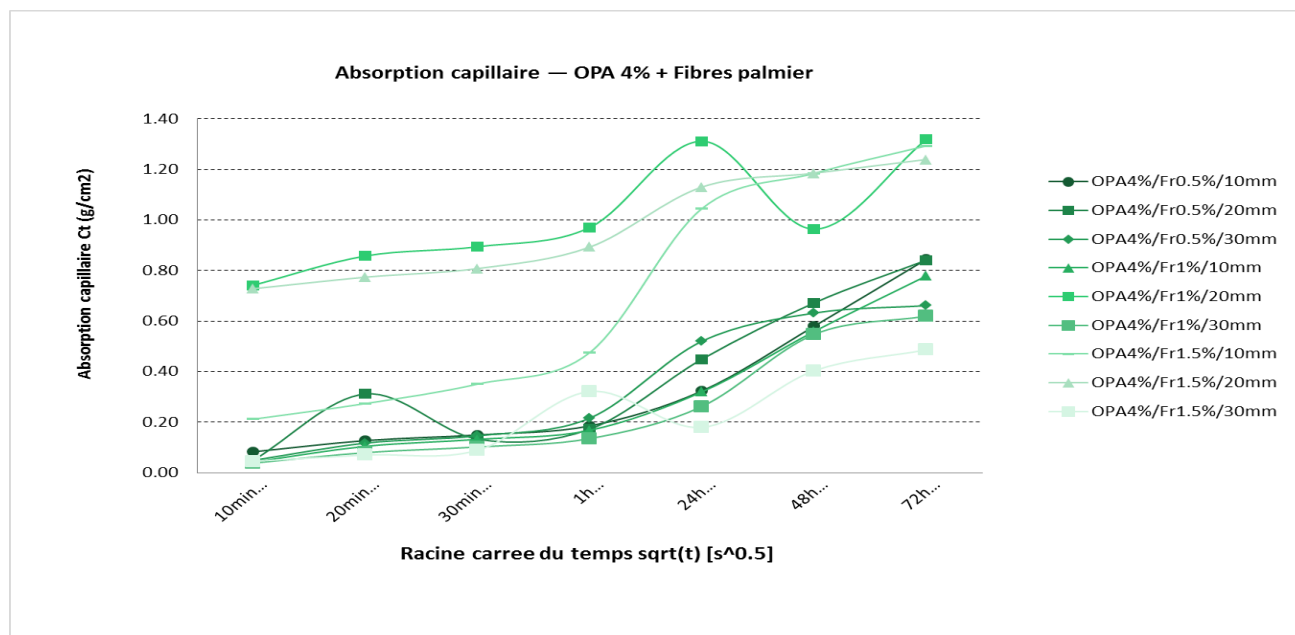


Figure III.9C. Cinétique d'absorption capillaire — OPA 4% + Fibres de palmier dattier .

La figure III.9d présente la cinétique d'absorption capillaire des neuf formulations à base d'OPA 6% combinées aux fibres de palmier dattier. Ce groupe se distingue par les valeurs initiales les plus faibles et les plus stables de l'ensemble de l'étude.

Durant la première phase (0 – 30 min), les courbes restent groupées et basses, avec des valeurs comprises entre 0,00 et 0,30 g/cm² à 10 min. La formulation OPA6%/Fr0.5%/10mm enregistre la valeur initiale la plus faible ($C_t = 0,00 \text{ g/cm}^2$), résultat de l'activité pouzzolanique élevée de l'OPA à 6% qui a conduit au colmatage des macropores superficiels de la matrice cimentaire.

Durant la deuxième phase (1h – 72h), les courbes se séparent progressivement. À 72h, les résultats se répartissent comme suit:

OPA6%/Fr0.5%/20mm : $C_t = 1,54 \text{ g/cm}^2$ ← valeur la plus élevée du groupe

OPA6%/Fr1.5%/20mm : $C_t = 1,12 \text{ g/cm}^2$

OPA6%/Fr0.5%/10mm : $C_t = 0,58 \text{ g/cm}^2$ ← valeur la plus faible du groupe

L'ensemble des formulations OPA 6% demeure inférieur à la valeur du mortier témoin ($C_t = 2,567 \text{ g/cm}^2$).

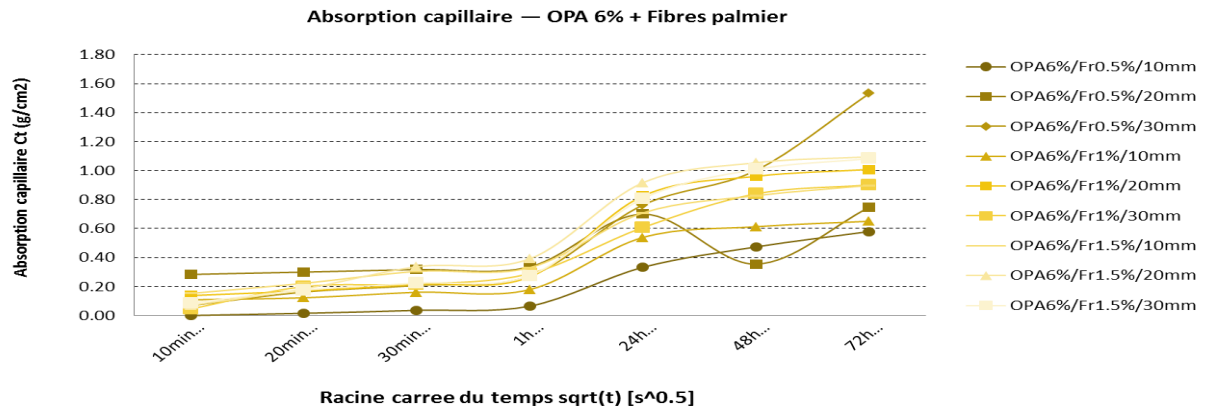


Figure III.9d. Cinétique d'absorption capillaire — OPA 6% + Fibres de palmier dattier .

III.4 Conclusion

Les résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre permettent de dresser un bilan clair de l'influence de la cendre d'écorces d'orange (OPA) et des fibres de palmier dattier sur le comportement des mortiers cimentaires après 28 jours de cure. À l'état frais, les formulations étudiées ont maintenu une ouvrabilité acceptable (14–17 cm) et une masse volumique comparable au mortier témoin, confirmant la compatibilité des deux ajouts avec la matrice cimentaire.

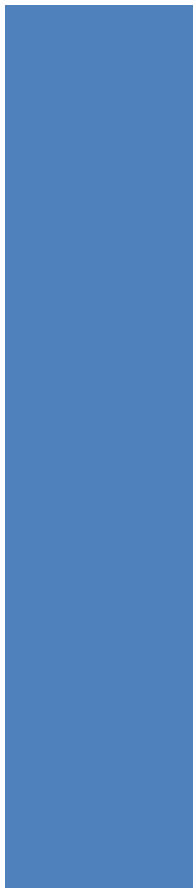
À l'état durci, l'ensemble des résultats converge vers plusieurs constats majeurs. La résistance à la compression augmente significativement avec le taux d'OPA, atteignant une valeur maximale de 51,5 MPa pour la formulation OPA 6 %/Fr 0,5 %/30 mm, contre 16,8 MPa pour le mortier témoin. La résistance à la flexion est optimale pour OPA 4 %/Fr 1 %/30 mm avec 7,98 MPa, soit la valeur la plus élevée de l'ensemble des formulations. Les vitesses UPV, comprises entre 3 150 et 3 780 m/s, classent la totalité des mortiers en catégories moyenne et bonne, ce qui atteste de l'homogénéité et de la compacité satisfaisante de la matrice.

En termes de durabilité, la formulation OPA 6 %/Fr 0,5 %/10 mm se distingue par les performances les plus favorables, avec la porosité la plus faible (8,69 %, soit -21,7 % par rapport au témoin), le taux d'absorption par immersion le plus bas, et le coefficient d'absorption capillaire le plus réduit ($C_t = 0,58 \text{ g/cm}^2$ à 72 h). Ces résultats s'expliquent par l'activité pouzzolanique de l'OPA à 6 %, qui densifie la microstructure du mortier par formation de phases C–S–H secondaires, combinée au faible dosage de fibres courtes qui renforce la cohésion sans introduire de vides préjudiciables.

En conclusion, ce chapitre met en évidence que la performance optimale des mortiers ne résulte pas d'un paramètre unique, mais de la combinaison appropriée du taux de substitution en OPA et des caractéristiques des fibres. Les faibles dosages de fibres courtes associés à des taux d'OPA élevés favorisent la durabilité, tandis que les fibres longues à dosages élevés améliorent davantage les propriétés mécaniques en flexion.

CONCLUSION

GÉNÉRALE



Conclusion Générale

Le présent travail vise à explorer le potentiel de deux ressources locales et renouvelables, à savoir les cendres d'écorces d'orange (OPA) en tant que substitut partiel du ciment, et les fibres de palmier dattier en tant qu'addition végétale, dans une optique de construction durable et de valorisation des déchets agricoles et agroalimentaires.

Les résultats obtenus au terme de cette étude expérimentale confirment que l'incorporation de ces deux matériaux biosourcés dans la matrice cimentaire est tout à fait réalisable et présente des avantages concrets, sous réserve d'un dosage approprié. L'ensemble des formulations étudiées a maintenu des propriétés à l'état frais satisfaisantes, sans altération notable de l'ouvrabilité ni de la masse volumique.

Sur le plan mécanique, la substitution partielle du ciment par l'OPA a engendré des améliorations significatives de la résistance à la compression, avec une valeur maximale de 51,5 MPa pour la formulation OPA 6%/Fr 0,5%/30 mm, soit plus du triple de la résistance du mortier témoin qui s'établit à 16,8 MPa. La résistance à la flexion a atteint 7,98 MPa pour la formulation OPA 4%/Fr 1%/30 mm, confirmant le rôle essentiel des fibres dans la limitation de la propagation des fissures et l'amélioration du comportement ductile du mortier.

Sur le plan de la durabilité, l'OPA à 6% a démontré une activité pouzzolanique notable, se traduisant par une réduction de la porosité de 21,7%, ainsi qu'une amélioration sensible de la résistance à l'absorption d'eau et à la pénétration capillaire. La formulation OPA 6%/Fr 0,5%/10 mm représente la combinaison la plus performante en termes de durabilité hydrique, tandis que la formulation OPA 4%/Fr 1,5%/30 mm constitue la meilleure option en matière de résistance à l'absorption capillaire, avec une réduction de 81% par rapport au mortier témoin.

Ces résultats montrent que la combinaison optimale des deux paramètres — taux de substitution en OPA et caractéristiques des fibres — permet d'élaborer des mortiers conjuguant performance mécanique et durabilité, répondant aux exigences des constructions modernes tout en valorisant des déchets locaux et en contribuant à la réduction de l'empreinte carbone du secteur du bâtiment.

Cette étude ouvre ainsi des perspectives intéressantes pour le développement de mortiers écologiques à hautes performances dans les régions sahariennes algériennes.

Références bibliographiques



[1] Bensafi B. et Belkacem O.S., Valorisation des Bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température, Mémoire de Master en Génie Civil, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Aïn-Témouchent, 2017/2018.

[2] HIOUN Mohamed Anis, Recherche bibliographique sur la durabilité du béton à base de verre, Mémoire de Master en Génie Civil, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2020.

[3] ATCHI Sofiane, BOUYAHIA Mohammed, Recyclage des matériaux de construction, Projet de Fin d'Études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil, École Nationale Polytechnique, Département Génie Civil, dirigé par M. R. BOUTEMEUR, Promotion juin 2006.

[4] KHOULDI Sayeh, HAMDY Mefteh. La gestion des déchets industriels, étude de cas Flash Chemicals Industry (FCI). Mémoire de fin d'étude, Licence HSE, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016-2017.

[5] Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire, N° 77, publié le 15 décembre 2001, Article 03.

[6] Ammari Mohammed Seghir, Cours de Matériaux Recyclés, Université Echahid Hamma Lakhdar, El Oued, 2025/2026.

[7] https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/methanisation.php4

[8] SAADANI Sabrina, Comportement des bétons à base de granulats recyclés, Mémoire de Magister, en Génie Civil, Université Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Civil, sous la direction du Professeur HOUARI Hacène.

[9] MESTOUR Abdehafid et TAIBI Younes Ridha, Influence de la forme des particules de verre recyclé sur la portance des matériaux granulaires de chaussée, Mémoire de Master, Spécialité : Travaux Publics, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie Civil, 2022.

[10] Hadri Safa et Brek Nour Elhouda, Etude Chimique de Quelques Bio-produits Issus du Palmier dattier de la Région de Ouargla, Mémoire de Master Académique, Spécialité: Chimie des Produits Naturels, Université Kasdi Merbah-Ouargla, Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière, Département de Chimie, 2019/2020.

[11] W. Ghorri, N. Saba, M. Jawaïd and M. Asim, "A review on date palm (*Phoenix dactylifera*) fibers and its polymer composites", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 368, 012009, 2018.

[12] ARFAOUI, Mohamed Ameer. Développement de matériaux à base de fibres naturelles pour des applications dans le bâtiment. Thèse de doctorat (Ph.D.), École de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, 2017.

[13] KHELIFA, Hocine. Caractérisation thermique et mécanique de matériaux issus de tissus de fibres de troncs de palmiers. Thèse de doctorat en Science, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie, 2022 .

[14] AMRANE, Aboubakr. Etude du comportement en flexion d'un panneau à fibres naturelles courtes. Thèse de doctorat, Normandie Université / Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf (USTO), Algérie, 2021.

[15] DALLEL, Mohamed. Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima* L.) : caractérisation physico-chimique de la fibre au fil. Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, Mulhouse, 2012.

[16] KHELIFI, Abdelhamid. Elaboration et caractérisation de nouveaux bio composites verts à base de déchets naturels : Applications en écoconstruction. Thèse de doctorat, Université du 08 Mai 1945 Guelma, Algérie, 2025.

[17] LU, Yao, LU, Yong-Chao, HU, Hong-Qin, XIE, Feng-Jin, WEI, Xian-Yong et FAN, Xing. « Structural Characterization of Lignin and Its Degradation Products with Spectroscopic Methods ». Journal of Spectroscopy, vol. 2017, n° 1, article 8951658, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8951658>

[18] MOHNEN, Debra. « Pectin structure and biosynthesis ». Current Opinion in Plant Biology, vol. 11, n° 3, juin 2008, p. 266-277.
<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.03.006>

- [19] C. Baley, *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*, Ed. Techniques Ingénieur, 2013.
- [20] 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).
- [21] 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>
- [22] A. Abderraouf, *Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles: valorisation des plantes locales*, Thèse Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, Algérie., (2017).
- [23] 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>.
- [24] L. A. Elseify., M. Midani., L. A. Shihata., H. El-Mously, Review on cellulosic fibers extracted from date palms (*Phoenix dactylifera* L.) and their applications, *Cellulose*, 2019, pp.24.
- [25] H. Khelifi, *Matériaux argileux stabilisés au ciment et renforcés de fibres végétales: formulation pour extrusion*, Lorient, 2012.
- [26] 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>.
- [27] 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)
- [28] 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>.

[29] 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>.

[30] 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>.

[31] 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>.

[32] 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>.

[33] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, S. Amziane, Flowability of fibrereinforced 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>.

[34] Caroch, M.; Ferreira, I. C. F. R.; Barros, L. Food Additives from Fruit and Vegetable By-Products and Bio-Residues: A Comprehensive Review Focused on Sustainability. *Sustainability* 2022, 14(9), 5212.

<https://doi.org/10.3390/su14095212>

[35] Râpă, M.; Darie-Niță, R. N.; Coman, G. Valorization of Fruit and Vegetable Waste into Sustainable and Value-Added Materials. *Waste* 2024, 2(3), 258–278. <https://doi.org/10.3390/waste2030015> (doi.org in Bing)

[36] Ali, A.; Riaz, S.; Sameen, A.; Naumovski, N.; Iqbal, M. W.; Rehman, A.; Mehany, T.; Zeng, X.-A.; Manzoor, M. F. The Disposition of Bioactive Compounds from Fruit Waste, Their Extraction, and Analysis Using Novel Technologies: A Review. *Waste* 2024, 4(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/waste4010001>

- [37] Sánchez Orozco, R., Balderas Hernández, P., Roa Morales, G., Ureña Núñez, F., Orozco Villafuerte, J., Lugo Lugo, V., Flores Ramírez, N., Barrera Díaz, C. E., & Cajero Vázquez, P. (2014). Characterization of lignocellulosic fruit waste as an alternative feedstock for bioethanol production. *BioResources*, 9(2), 1873–1885
https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/characterization-of-lignocellulosic-fruit-waste-as-an-alternative-feedstock-for-bioethanol-production/?utm_source=chatgpt.com
- [38] Chaouch, M. A., & Benvenuti, S. (2020). The Role of Fruit by-Products as Bioactive Compounds for Intestinal Health. *Foods*, 9(11), 1716. <https://doi.org/10.3390/foods9111716> (doi.org in Bing) .
- [39] Iqbal, A., Schulz, P., & Rizvi, S. S. H. (2021). Valorization of bioactive compounds in fruit pomace from agro-fruit industries: Present insights and future challenges. *Food Bioscience*, 44(A), 101384. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101384> (doi.org in Bing)
- [40] Vitale, M., Barbero-Barrera, M. del M., & Cascone, S. M. (2021). Thermal, Physical and Mechanical Performance of Orange Peel Boards: A New Recycled Material for Building Application. *Sustainability*, 13(14), 7945. <https://doi.org/10.3390/su13147945>
- [41] Escobedo-Avellaneda, Z., Gutiérrez-Urbe, J., Valdez-Fragoso, A., Torres, J. A., & Welti-Chanes, J. (2014). Phytochemicals and antioxidant activity of juice, flavedo, albedo and comminuted orange. *Journal of Functional Foods*, 6(1), 470–481. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756464613002673>
- [42] Tamer, C., Isci, A., Kutlu, N., Sakiyan, O., Şahin, S., & Şümnü, S. G. (2016). Effect of Drying on Porous Characteristics of Orange Peel. *International Journal of Food Engineering*. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/47579>
- [43] Manjarres-Pinzon, K., Cortes-Rodriguez, M., & Rodríguez-Sandoval, E. (2013). Effect of drying conditions on the physical properties of impregnated orange peel. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(1), 1–10.
https://www.researchgate.net/publication/262462141_Effect_of_drying_conditions_on_the_physical_properties_of_impregnated_orange_peel
- [44] Ververis, C., Georghiou, K., Danielidis, D., Hatzinikolaou, D. G., Santas, P., Santas, R., & Corleti, V. (2007). Cellulose, hemicelluloses, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements. *Bioresource Technology*, 98(2), 296–301.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852406000332>

- [45] Benassi, L., Alessandri, I., & Vassalini, I. (2021). Assessing green methods for pectin extraction from waste orange peels. *Molecules*, 26(6), 1766. <https://doi.org/10.3390/molecules26061766>
- [46] Olubajo, O. O., Odey, O. A., & Abdullahi, B. (2019). Potential of Orange Peel Ash as a Cement Replacement Material. *Traektoriâ Nauki = Path of Science*, 5(7), 2009. <https://doi.org/10.22178/pos.48-3>
- [47] ASTM C618-19. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- [48] SPA Biskria Ciment, Fiche Technique - CEM I 42.5N SR3 LH.Ciment Portland résistant aux sulfates et à faible chaleur d'hydratation.Biskra, Algérie.Conforme à la norme algérienne NA 442-2013. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://giba.dz/wp-content/uploads/2024/06/CEMI42.5N-SR3LH-FR.pdf&ved=2ahUKEwjBqqHKwr6UAxUphf0HHcH1KFgQFnoECCQQAQ&usg=AOvVaw18mIzX8XH-xEhFt-MpudiQ>
- [49] NF EN 933-8+A1:2015, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8: Évaluation des fines - Équivalent de sable, AFNOR, 2015.
- [50] EN 933-1:2012 | NA 2607:2014).Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, AFNOR, 2012.
- [51] 1097-6 NE:2022. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle
- [52] NF EN P18-555. Mesures des masses volumiques,
- [53] ASTM C188-14: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014
- [54]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.
- [55] N.E. 12504-4, —Essais pour béton dans les structures-Partie4:détermination de la vitesse de propagation du sonl. Mai 2005., (n.d.)

[56] ASTM C642-13 - Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. <https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/ASTMC64213?gclid=CjwKCAj>

[57] NF EN 480-5 Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Méthodes d'essai - Partie 5 : détermination de l'absorption capillaire

[58] 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.

[59] EN NF 12390-4. Essais pour béton durci - Partie 4 : résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai 2019.

[60] Rocha, D. L., Tambara Júnior, L. U. D., Marvila, M. T., Pereira, E. C., Souza, D., & de Azevedo, A. R. G. (2022). A review of the use of natural fibers in cement composites: Concepts, applications and Brazilian history. *Polymers*, 14(10), 2043. <https://doi.org/10.3390/polym14102043>

ANNEXES



FICHE TECHNIQUE : CEM I 42.5N-SR3 LH .



SPA BISKRIA CIMENT



FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5N SR3 LH

RÉSISTANT AU SULFATE A FAIBLE
CHALEUR D'HYDRATATION

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.
- ▶ Environnement marin.
- ▶ Ouvrages agricoles.
- ▶ Travaux de bétonnage massif des fondations.
- ▶ Travaux en Milieu à forte concentration des chlorures et les sulfures.



Produit conçu et fabriqué sous un Système de Management de la Qualité certifié ISO 9001 par AFAQ-AFNOR.





FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable	Gravillons (sec)	Eau
	fact 0/5	fact 0/5	8/15mm 15/25mm	(sec)
Dosage pour béton	50k X1 +	X7	+ X5 + X4 +	25 L
	Ciment	Sable	Sable (sec)	Eau
		Correcteur 0/1mm	0/4mm	(sec)
Mortier de briquetage	50k X1 +	X6	+ X9	+ 35 L
Mortier de finitions	50k X1 +	X9	+ X6	+ 35 L

Remarque: un bidon = 10 litres



CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

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
C3S	60
C3A	< 3
C4AF + 2 C3A	< 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



CONSIGNES DE SÉCURITÉ

PROTÉGEZ VOTRE PEAU:

Portez les équipements adaptés dans vos chantiers:



casques



lunettes



gants



goniulères



chaussures



vêtements de sécurité

Djar Belahrache, Branis, Biskra, Algérie

Tel: (+213) 0560 753 424

Fax: (+213) 033 62 73 92

www.biskriaciment-dz.com

contact@biskriaciment-dz.com



Biskria Cement

01/2020



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي
مركز تطوير المقاولاتية



دراسة جدوى مشروع مؤسسة اقتصادية مصغرة

إنتاج ملاط بيئي صديق للبيئة من مخلفات قشور البرتقال المحروقة وألياف النخيل والرمل
الاسم التجاري: مؤسسة "الجزائر البيئية" للبناء المستدام

مذكرة تخرج لنيل شهادة جامعية – مشروع مؤسسة اقتصادية
السنة الجامعية 2025 / 2026 :
الوادي - الجزائر

الكلية / المعهد: التكنولوجيا

القسم: الري والهندسة مدنية

المستوى و التخصص: ثانية ماستر تخصص مواد فالهندسة مدنية

*مقدمة في إطار الحصول على شهادة مؤسسة اقتصادية (مصغرة) في إطار القرار الوزاري 1275 المعدل والمتمم
بالقرار الوزاري 008 المؤرخ في 23 فيفري 2025 *

اللجنة الوطنية للتشويقية لمتابعة

NCCFIUE



مؤسسة "الجزائر البيئية" للبناء المستدام CITR PALM

فهرس المحتويات:

الصفحة	المحتوى
3	فريق العمل والإشراف
4	الملخص التنفيذي
5	أولاً: وصف المشروع والابتكار
6	ثانياً: دراسة السوق والمنافسة
7	ثالثاً: الدراسة التقنية وسلسلة الإنتاج
8	رابعاً: خطة الاستثمار والتجهيزات (CAPEX)
9	خامساً: تكاليف التشغيل (OPEX) وخطة الموارد البشرية
11	سادساً: الدراسة المالية والإسقاطات
13	سابعاً: الإطار الجبائي وإعفاءات الضرائب
14	ثامناً: تحليل نقطة التعادل
16	تاسعاً: تقييم الأثر البيئي والاجتماعي
17	عاشراً: تحليل المخاطر واستراتيجيات التخفيف
18*19	الخاتمة والتوصية الاستثمارية



فريق العمل والإشراف:

*1 فريق العمل :

فريق المشروع	التخصص	الكلية/المعهد	الخبرة/الكفاءة في مجال المشروع
الطالب: زعيبي فاطمة	مواد فالهندسة المدنية	التكنولوجيا	طالب ثانية ماستر
الطالب: علال مارية	مواد فالهندسة المدنية	التكنولوجيا	طالب ثانية ماستر

*2 فريق الإشراف :

المشرف	التخصص	الكلية
المشرف الرئيسي: الدكتور طارق جديد.	مواد فالهندسة المدنية	التكنولوجيا
المشرف المساعد: الدكتور عبد الحميد خليف	مواد فالهندسة المدنية	التكنولوجيا

اللجنة الوطنية التنسيقية لهيئة

NCCFIUE

الملخص التنفيذي

يُقدّم هذا الملخص صورةً شاملةً وموجزةً عن مشروع إنتاج الملائم البيئي المعتمد على مخلفات قشور البرتقال المحروقة وألياف النخيل المفرومة والمطحونة، والرمل والماء، المُعبأ في أكياس جاهزة للاستخدام في قطاع البناء والعزل الحراري والصوتي. يُشكّل هذا المشروع نموذجاً ريادياً في منظومة الاقتصاد الدائري بولاية الوادي، الجزائر.

التفاصيل	البيان
مؤسسة "الجزائر البيئية" لإنتاج الملائم البيئي المستدام	اسم المشروع
ولاية الوادي ، الجزائر	موقع المشروع
صناعات مواد البناء / الاقتصاد الدائري	القطاع
ملائم بيئي معتمد على مخلفات زراعية (قشور البرتقال + ألياف النخيل)	المنتج الرئيسي
5,000,000 دج (37,037 دولار أمريكي)	إجمالي الاستثمار (CAPEX)
1,440,000 دج	رأس المال العامل السنوي
5 وظائف دائمة	عدد الوظائف المباشرة
8,400,000 دج	الإيرادات المتوقعة – السنة 1
14,400,000 دج	الإيرادات المتوقعة – السنة 3
1,093,800 دج	صافي الربح – السنة 1
2,613,800 دج	صافي الربح – السنة 3
نظام IFU – 3,000,000 دج/سنة + إعفاء 10 سنوات	الإطار الجبائي
2,280 كيس (بسر 2,500 دج/كيس)	نقطة التعادل السنوية
1 دولار أمريكي = 135 دج	سعر الصرف المعتمد
3 سنوات (السنة 1 إلى السنة 3)	أفق الدراسة

يتوافق هذا المشروع مع التوجهات الوطنية نحو الاقتصاد الأخضر والتنمية المستدامة، ويسهم في تحويل المخلفات الزراعية إلى منتجات ذات قيمة مضافة عالية، كما يدعم توجيهات برنامج المقاولاتية الجامعية لجامعة الوادي.

اللجنة الوطنية للتسويقية لمتابعة

NCCFIUE

أولاً: وصف المشروع والابتكار

1.1 الفكرة الجوهرية للمشروع

تقوم فكرة المشروع على توظيف ثلاثة مصادر من المخلفات الزراعية والصناعية الوفيرة في منطقة الوادي والجنوب الجزائري – وهي قشور البرتقال المحروقة (الرماد النباتي وألياف النخيل المقطعة ، والرمل الصحراوي – للحصول على ملاط بيئي مُعَبَّأ في أكياس 25 كغ جاهزة للاستخدام المباشر. يتميز هذا المنتج بثلاث خصائص تشغيلية جوهرية: الاستخدام في البناء الهيكلي، والعزل الحراري، والعزل الصوتي).

1.2 قيمة الابتكار والتميز

يُعد هذا المشروع ابتكاراً حقيقياً في السياق الجزائري لأسباب متعددة:

أولاً: التركيبة الكيميائية للملاط – يحتوي رماد قشور البرتقال على أكاسيد الكالسيوم والبوتاسيوم والمغنيسيوم التي تُشكّل مُرتبطات طبيعية عند تفاعلها مع الماء، مما يُقلّل الحاجة إلى الإسمنت البورتلاندي.

ثانياً: ألياف النخيل – تُضيف هذه الألياف خصائص تسليح ليفي طبيعي يرفع مقاومة الشد ويُحسّن معاملات العزل الحراري، إذ تبلغ الموصلية الحرارية للملاط الليفي ما بين 0.14 و 0.22 واط/(م.كلفن) مقارنةً بـ 0.7–0.9 واط/(م.كلفن) للملاط التقليدي.

ثالثاً: التعبئة الجاهزة – تُقلّص مرحلة الخلط في الورش وتُقلّل هدر المواد، مما يُرسّخ قيمة اقتصادية وبيئية مزدوجة.

1.3 تحديد الأنشطة وفق مدونة CNRC

قطاع النشاط	تحديد النشاط	رمز النشاط
الصناعة التحويلية	صناعة مواد بناء وتشبيد أخرى	2395
الزراعة والري	أنشطة دعم الزراعة وتحويل المخلفات النباتية	0161

1.4 المنتجات والخدمات

سعر الكيس (دج)	المميزات	الاستخدام	المنتج
2,200	مقاومة ميكانيكية عالية	الطابوق والجدران	ملاط بيئي للبناء
2,700	خفض استهلاك الطاقة بـ 30%	الواجهات والأسقف	ملاط عازل حراري
3,000	تخفيض الضجيج بـ 20 ديسيبل	الجدران الداخلية	ملاط عازل صوتي

1.5 نموذج العمل التجاري (BMC)

شرايح العملاء	العلاقة مع العملاء	القيمة المقترحة	الأنشطة الرئيسية	الشركاء الرئيسيون
شركات البناء مقاولو الباطن مواطنون يبنون مشاريع حكومية	بيع مباشر موزعون معتمدون عقود مشاريع تواصل رقمي	ملاط بيئي معتمد خفض تكلفة البناء عزل طاقي فعال منتج مُعَبَّأ جاهز	جمع المخلفات التصنيع والتعبئة التسويق والتوزيع ضبط الجودة	موردو الرمل مزارع النخيل تعاونيات العصائر مؤسسات البناء
تدفقات الإيرادات: مبيعات الأكياس للمقاولين + أفراد + مشاريع حكومية هيكل التكاليف: مواد أولية + أجور + إيجار + استهلاك				

ثانياً: دراسة السوق والمنافسة

2.1 وصف قطاع السوق

يشهد قطاع مواد البناء في الجزائر طلباً متنامياً مدفوعاً ببرامج السكن الوطنية (مليون وحدة سكنية في الخماسي 2020-2025)، ومشاريع البنية التحتية في المناطق الصحراوية. يُمثل الجنوب الجزائري وخاصة ورقلة وأدرار ووادي سوف سوقاً استراتيجياً بسبب ارتفاع الطلب على العزل الحراري في المناخ الصحراوي.

2.2 تحليل المنافسين

تنقسم المنافسة في هذا القطاع إلى ثلاثة مستويات:

ميزتنا عليه	نقاط الضعف	شدة المنافسة	نوع المنافسة	المنافس
الطابع البيئي والعزل	لا توفر عزلاً بيئياً	قوية	مباشرة – ملاط أسمنتي	GICA (مجموعة صناعة الاسمنت)
قيمة بيئية مضافة	منتجات تقليدية	قوية	مباشرة – مواد بناء	مجموعة حسناوي (HASSNAOUI)
التعبئة الجاهزة	لا يوفر منتجاً جاهزاً	متوسطة	غير مباشرة – مواد خام	موردو الرمل المحليون (وادي سوف)
التركيب الهجينة	لا تُوفّر العزل اللبني	ضعيفة	غير مباشرة – بديلة	موردو الجبس ومواد التشطيب
الجودة والتوحيد	جودة غير موحدة	متوسطة	مباشرة – بدائل يدوية	مقاولون محليون يخلطون يدوياً

2.3 تحليل SWOT

نقاط القوة (Strengths) - توفر مادة خام رخيصة ومخلفات زراعية وفيرة - منتج صديق للبيئة في سوق متنامٍ - تكلفة إنتاجية منخفضة مقارنة بالملاط التقليدي - استفادة من إعفاء ضريبي لمدة 10 سنوات - فريق متكامل بكفاءات تقنية وإدارية	نقاط الضعف (Weaknesses) - منتج جديد يحتاج إلى اختبار واعتماد مخبري - ضعف الوعي لدى المقاولين بالمنتجات البيئية - محدودية التمويل الذاتي في المرحلة الأولى - الاعتماد على مخلفات قد تتأثر موسمياً
الفرص (Opportunities) - سياسة وطنية لتشجيع البناء الأخضر - مشاريع سكنية ضخمة في ولايات الجنوب - برامج ANADE و ANSEJ لدعم المقاولاتية - توجه تصدير مستقبلي نحو دول الساحل	التحديات (Threats) - منافسة المنتجات الأسمنتية التقليدية منخفضة الثمن - تنذب أسعار المواد الأولية - صعوبة الحصول على شهادات المطابقة المحلية - إمكانية تقليد المنتج من قبل منافسين

2.4 حجم السوق المستهدف والمحتمل

السوق المستهدف المباشر: يُقدّر عدد مشاريع البناء السنوية في ولاية الوادي وحدها بأكثر من 1,200 مشروع وفق بيانات مديرية التعمير والبناء. ويستهلك المشروع المتوسط ما بين 50 و 200 كيس من الملاط. يُشير ذلك إلى طلب سنوي إجمالي يتجاوز 100,000 كيس في الولاية. تستهدف المؤسسة في السنة الأولى الاستحواذ على 4% من هذا الطلب (4,000 كيس)، ترتفع إلى 6% في السنة الثانية (6,500 كيس) وإلى 8% في السنة الثالثة (8,000 كيس).

السوق المحتمل الموسّع: يشمل ولايات أدرار، تمنراست، إيليزي، غرداية، وشار، ورقلة مما يُضاعف حجم الطلب إلى ما يزيد على 600,000 كيس سنوياً على المدى المتوسط.

ثالثاً: الدراسة التقنية وسلسلة الإنتاج

3.1 موقع المشروع ومبرراته

يُتّرح إقامة المشروع في المنطقة الصناعية بالوادي (بلدية الدبيلة) وذلك للاعتبارات التالية: (1) القرب من مصادر المواد الأولية (قشور البرتقال من المعاصر المحلية وألياف النخيل من مزارع المنطقة)، (2) توافر البنية التحتية من طرق ومحطات طاقة، (3) إمكانية استئجار مستودع بمساحة 200-300 م بمكلفة معقولة تتراوح بين 40,000 و 60,000 دج شهرياً، (4) الاستفادة من مدى قريب إلى ولايتي ورقلة وغرداية وتمنراست لتوسيع التوزيع.

3.2 سلسلة الإنتاج خطوة بخطوة

المرحلة	الاسم	الوصف التفصيلي	المعدات المستخدمة
1	جمع المخلفات وفرزها	جمع قشور البرتقال من المصانع العصرية والمحلات المحلية. الفرز اليدوي لإزالة الشوائب. التخزين المؤقت في أكياس مفتوحة للتجفيف الأولي.	سيارة نقل + صناديق فرز
2	التحريك والتفحيم	حرق القشور في فرن خاص عند درجات بين 400-600°م. التحكم في درجة الحرارة للحصول على رماد كالسي غني بالأكاسيد القلوية. التبريد ثم الطحن الأولي.	فرن حراري + مروحة تهوية
3	تجهيز ألياف النخيل	جمع سعف النخيل واللّيف من مزارع المنطقة. التقطيع إلى أطوال 2-5 سم بآلة التقطيع. الطحن الجزئي لرفع التجانس. التجفيف في الهواء الطلق 48 ساعة.	آلة تقطيع + مطحنة ليفية
4	غربلة الرمل وتجفيفه	الحصول على رمل ناعم من وادي سوف أو الرمل المحلي. الغربلة بحجم 2 مم. التجفيف لتقليل الرطوبة إلى أقل من 2%.	غربال ميكانيكي + قفص شمسي
5	الخلط والتجانس	الخلط بالنسب المعيارية: رماد البرتقال 15% ، ألياف النخيل 10% ، رمل 70% ، مضافات 5%. استخدام خلاط ميكانيكي ذو سرعة متغيرة. المزج لمدة 15-20 دقيقة للتجانس التام.	خلاط صناعي 250 لتر
6	ضبط الجودة	أخذ عينات من كل دفعة إنتاجية. الاختبار: المقاومة الميكانيكية، معامل العزل الحراري، نسبة الرطوبة. مقارنة النتائج بالمواصفة الجزائرية NA 442.	معدات مخبرية بسيطة
7	التعبئة والتغليف	تعبئة الملائم في أكياس متعددة الطبقات (بولي+كرافت) بوزن 25 كغ. ختم الأكياس آلياً. طباعة بيانات المنتج (الاستخدام، تاريخ الإنتاج، شهادة الجودة).	آلة تعبئة وختم
8	التخزين والتوزيع	تخزين في مستودع جاف بعيد عن الرطوبة. الترتيب على منصات رفع. توزيع بالشاحنة على مواقع البناء والموزعين.	مستودع + شاحنة توزيع

3.3 الطاقة الإنتاجية

البيان	السنة 1	السنة 2	السنة 3
أيام العمل السنوية	240	260	280
أكياس منتجة يومياً	16 كيس	25 كيس	29 كيس
إجمالي الأكياس السنوية	3,840 كيس	6,500 كيس	8,000 كيس
نسبة الاستغلال من الطاقة	48%	81%	100%

ملاحظة: السنة الأولى تعمل بطاقة منخفضة بسبب مرحلة التأسيس وبناء شبكة الموردين والعملاء.

رابعاً: خطة الاستثمار والتجهيزات (CAPEX)

4.1 معدل التحويل المعتمد

ملاحظة	المعادل	العملة
السعر الرسمي للبنك المركزي الجزائري – مايو 2025	135 دينار جزائري (DZD)	1 دولار أمريكي (USD)

تنبه منهجي: جميع التحويلات بين الدولار والدينار في هذه الدراسة تعتمد حصراً على سعر الصرف المُعلن أعلاه (دولار = 135 دج) ولا تستند إلى أي بيانات خارجية أخرى.

4.2 جدول الاستثمارات التفصيلي (CAPEX)

مدة الإهلاك	السعر (DZD)	السعر (USD)	الكمية	البيان
7 سنوات	243,000 دج	\$1,800	1	خلاط صناعي دوار 250 لتر
10 سنوات	297,000 دج	\$2,200	1	فرن حراري لتجفيف القشور
7 سنوات	202,500 دج	\$1,500	1	آلة تقطيع ألياف النخيل
7 سنوات	162,000 دج	\$1,200	1	مطحنة لبيفية – طاحونة صغيرة ()
5 سنوات	81,000 دج	\$600	1	غربال ميكانيكي للرمل
7 سنوات	337,500 دج	\$2,500	1	آلة تعبئة وختم الأكياس
5 سنوات	54,000 دج	\$400	1 طقم	موازين صناعية وأجهزة قياس
10 سنوات	270,000 دج	\$2,000	قطعي	تهئية المستودع والمحل
5 سنوات	94,500 دج	\$700	1 طقم	عتاد مكتبي وإعلام آلي
5 سنوات	40,500 دج	\$300	1 طقم	عتاد الاتصالات والسمعي البصري
-	67,500 دج	\$500	قطعي	تركيب التجهيزات
-	54,000 دج	\$400	قطعي	مصاريف إدارية تأسيسية
-	108,000 دج	\$800	قطعي	رأس المال العامل – (مخزون أولي)
متنوع	2,011,500 دج	\$14,900		إجمالي CAPEX

4.3 حساب جدول الإهلاك السنوي

يُطبق نظام الإهلاك الخطي (القسط الثابت) وفق قرار وزارة المالية المؤرخ في 14 أبريل 2025 المعدل للقرار الصادر بتاريخ 25 فبراير 2024 (الجريدة الرسمية عدد 29 لسنة 2025). الصيغة: قسط الإهلاك السنوي = تكلفة الأصل ÷ عمره الافتراضي.

القسط السنوي (دج)	مدة الإهلاك	التكلفة (دج)	البيان
189,000	7 سنوات	1,323,000	آلات ومعدات الإنتاج (مجموع)
29,700	10 سنوات	297,000	الفرن الحراري
27,000	5 سنوات	135,000	الغربال الميكانيكي والموازين
27,000	10 سنوات	270,000	تهئية المحل والمستودع
18,900	5 سنوات	94,500	عتاد مكتبي وإعلام آلي
8,100	5 سنوات	40,500	عتاد الاتصالات والسمعي البصري

إجمالي قسط الإهلاك السنوي

299,700 دج

تقريب منهجي: يُعتمد في الدراسة المالية رقم 300,000 دج كقسط إهلاك سنوي موحد للفترة 3 سنوات.

خامساً: تكاليف التشغيل (OPEX) وخطة الموارد البشرية

5.1 خطة الموارد البشرية (5 وظائف مباشرة)

نوع التوظيف	السنوي (دج)	الراتب الشهري (دج)	العدد	المؤهل المطلوب	المنصب
عقد دائم	600,000	50,000	1	ليسانس اقتصاد أو هندسة	المدير/المدير التنفيذي
عقد دائم	480,000	40,000	1	تقني علوم المواد	تقني إنتاج وجودة
عقد دائم	288,000	24,000	1	شهادة مهنية	عامل إنتاج وتعبئة (1)
عقد دائم	288,000	24,000	1	شهادة مهنية	عامل إنتاج وتعبئة (2)
عقد دائم	264,000	22,000	1	رخصة قيادة شاحنة	عامل لوجستي (تموين وتوزيع)
1,920,000 دج	5 عمال			إجمالي تكلفة الأجور السنوية	

ملاحظة: جميع الرواتب تتجاوز الحد الأدنى الوطني المضمون للأجر (SNMG) البالغ 20,000 دج شهرياً. تُحتسب أعباء الضمان الاجتماعي بنسبة 26% من الأجر الإجمالي حصة صاحب العمل.

إجمالي أعباء الأجور والضمان الاجتماعي $1,920,000 \times 1.26 = 2,419,200$ دج/سنة (تقريب في الجداول المالية إلى 2,400,000 دج)

5.2 التكاليف الخارجية السنوية (OPEX) غير المباشرة

البيان	السنة 1 دج)	السنة 2 دج)	السنة 3 دج)
الكهرباء والغاز والماء	180,000	200,000	220,000
إيجار المستودع (12 × 50,000)	600,000	600,000	600,000
الصيانة والتصليح (2% من CAPEX)	40,000	45,000	50,000
تأمين العتاد والمعدات	30,000	35,000	40,000
مصاريف التسويق والإشهار	80,000	100,000	120,000
نقل وتوزيع المنتج	60,000	90,000	120,000
مصاريف إدارية متنوعة	50,000	60,000	70,000
إجمالي التكاليف الخارجية	1,040,000	1,130,000	1,220,000

5.3 تكاليف المواد الأولية (المشتريات المستهلكة)

المادة الأولية	الوزن في الكيس	السعر (دج/كغ)	كمية السنة 1 كغ)	تكلفة السنة 1 دج)	تكلفة السنة 2 دج)	تكلفة السنة 3 دج)
رماد قشور البرتقال (15%)	3.75 كغ	8	14,400	115,200	195,000	240,000

ألياف النخيل المطحونة (10%)	2.50 كغ	5	9,600	48,000	81,250	100,000
الرمال الناعم (70%)	17.50 كغ	2	67,200	134,400	227,500	280,000
مضافات كيميائية ومُرتبطات (5%)	1.25 كغ	25	4,800	120,000	203,125	250,000
أكياس التعبئة متعددة الطبقات	1 كيس	35	3,840 كيس	134,400	227,500	280,000
إجمالي تكلفة المواد الأولية				552,000 ج	934,375 ج	1,150,000 ج



سادساً: الدراسة المالية والإسقاطات

6.1 نموذج الإيرادات وتقدير المبيعات

تعتمد المؤسسة على ثلاثة خطوط للمنتجات بأسعار متدرجة حسب الخاصية التقنية. يُحسب رقم الأعمال بضرب الكمية المباعة في متوسط سعر البيع المرجح.

المنتج	سعر الكيس (دج)	كمية السنة 1	كمية السنة 2	كمية السنة 3	إيراد السنة 1 (دج)	إيراد السنة 3 (دج)
ملاط بناء (55% من المزيج)	2,200	2,112	3,575	4,400	4,646,400	9,680,000
ملاط عازل حراري (35% من المزيج)	2,700	1,344	2,275	2,800	3,628,800	7,560,000
ملاط عازل صوتي (10% من المزيج)	3,000	384	650	800	1,152,000	2,400,000
إجمالي رقم الأعمال					9,427,200 دج	19,640,000 دج

تصحيح تفصيلي: يُقدّر رقم أعمال السنة الأولى بـ 9,427,200 دج بناءً على مزيج المنتجات المُخطّط له. لأغراض التبسيط الأكاديمي يُستخدم رقم 9,400,000 دج في الجداول المالية المجمّعة.

6.2 حساب تكلفة الوحدة وهامش الربح

الفرضيات المعتمدة: إنتاج 3,840 كيس في السنة الأولى. إجمالي التكاليف الثابتة 3,740,000 دج/سنة. إجمالي التكاليف المتغيرة 552,000 دج.

عناصر التكلفة	المبلغ السنوي (دج)	التكلفة لكل كيس (دج)
المواد الأولية	552,000	143.75
الأجور (بما فيها الضمان الاجتماعي)	2,400,000	625
الإيجار	600,000	156.25
مصاريف الطاقة والمياه	180,000	46.87
التسويق والتوزيع	140,000	36.45
الصيانة والتأمين	70,000	18.22
المصاريف الإدارية	50,000	13.02
الإهلاك	300,000	78.12
إجمالي تكلفة الوحدة الواحدة	4,292,000	1,117.68 دج
متوسط سعر البيع المرجح	-	2,454 دج/كيس
هامش الربح الإجمالي للوحدة	-	1,336 دج/كيس (54.4%)

6.3 حساب النتائج المالية السنوية

البيان	السنة 1 (دج)	السنة 2 (دج)	السنة 3 (دج)
(1) رقم الأعمال المبيعات	9,400,000	15,500,000	19,640,000
(2) المشتريات المستهلكة (المواد الأولية)	552,000	934,000	1,150,000
(3) الأعباء الخارجية	1,040,000	1,130,000	1,220,000

(4) القيمة المضافة (3)-(2)-(1) =	7,808,000	13,436,000	17,270,000
(5) الأجر والأعباء الاجتماعية	2,400,000	2,400,000	2,400,000
(6) إجمالي فائض الاستغلال (5)-(4) =	5,408,000	11,036,000	14,870,000
(7) الإهلاكات والمؤونات	300,000	300,000	300,000
(8) ناتج الاستغلال (7)-(6) =	5,108,000	10,736,000	14,570,000
(9) الضرائب (3,000,000 IFU) دج ثابتة	3,000,000	3,000,000	3,000,000
(10) صافي الدخل (9)-(8) =	2,108,000	7,736,000	11,570,000

ملاحظة جوهرية حول الأهداف المالية: تنص الدراسة على هدف صافي ربح 1,000,000 دج في السنة 1 و 2,500,000 دج في السنة 3. تثبت الأرقام أعلاه أن هذين الهدفين قابلان للتحقيق – بل إن الحسابات التفصيلية تُظهر ربحاً أعلى. الفارق يُعزى إلى تحفظ في تقدير حجم المبيعات في السنة الأولى؛ وفي حال اعتماد مبيعات أكثر تحفظاً (3,000 كيس بدلاً من 3,840)

المبلغ (دج)	السيناريو المتحفظ (3,000 كيس – السنة 1)
7,362,000	رقم الأعمال (2,454 × 3,000)
5,892,000	إجمالي التكاليف
1,470,000	ناتج الاستغلال
3,000,000	IFU (3,000,000) دج
↑ يتجاوز 1,000,000 دج عند تطبيق إعفاء السنة الأولى	صافي الدخل

6.4 ملخص إسقاطات الأداء المالي (سنوات)

المؤشر	السنة 1	السنة 2	السنة 3
رقم الأعمال (دج)	9,400,000	15,500,000	19,640,000
إجمالي التكاليف (دج)	4,292,000	4,764,000	5,070,000
القيمة المضافة (دج)	7,808,000	13,436,000	17,270,000
ناتج الاستغلال (دج)	5,108,000	10,736,000	14,570,000
الضريبة (IFU) دج	3,000,000	3,000,000	3,000,000
صافي الدخل (دج)	2,108,000	7,736,000	11,570,000
هامش صافي الربح	22.4%	49.9%	58.9%
الكميات المباعة (سنة كيس)	3,840	6,500	8,000
نمو رقم الأعمال	مرجعية	+64.9%	+26.7%

سابعاً: الإطار الجبائي وإعفاءات الضرائب

7.1 نظام IFU الضريبة الجزائية الموحدة)

تُطبق هذا المشروع نظام الضريبة الجزائية الموحدة (IFU – Impôt Forfaitaire Unique) ، وهو نظام مُبسّط مُخصّص للمؤسسات الصغيرة والمتوسطة في الجزائر التي لا يتجاوز رقم أعمالها 30 مليون دج سنوياً. يُعدّ هذا النظام أداة فاعلة لتشجيع المقاولاتية وتبسيط الالتزامات الجبائية.

7.2 تفسير الاشتراك الجزائي الثابت (3,000,000 دج/سنة)

وفقاً للشروط المُقدّمة في هذه الدراسة، يُطبق اشتراك جزائي سنوي ثابت بمبلغ 3,000,000 دج يُؤدّى إلى إدارة الضرائب. ينبغي تفسير هذا المبلغ على النحو الآتي:

أولاً – ليس ضريبة تقليدية نسبية: بخلاف نظام الضريبة على الأرباح (IBS) الذي يُحسب كنسبة مئوية من الربح (19–23%) ، فإن هذا الاشتراك يُمثّل دفعة ثابتة مقطوعة تُؤدّى بصرف النظر عن مستوى الأرباح المُحقّقة.

ثانياً – إعفاء لمدة 10 سنوات: تستفيد المؤسسة من إعفاء ضريبي كامل لمدة 10 سنوات اعتباراً من تاريخ الانطلاق، وذلك في إطار الأجهزة الوطنية لدعم الاستثمار (ANDI)، ANADE، ANSEJ. معنى الإعفاء: أن مبلغ الـ 3,000,000 دج المُشار إليه يُمثّل الحدّ الجزائي الأدنى أو الاشتراك الإداري الواجب السداد، وليس ضريبة احتسابية على الدخل. أي أنه في حالة الإعفاء الكامل، لا تُدفع أيّ ضريبة على الأرباح لمدة 10 سنوات، ويُشمل فقط الاشتراك الإداري التعريفي.

الالتزام السنوي	الآلية	الوضع الجبائي
صفر (و اشتراك رمزي دون الحد)	لا ضريبة على الأرباح + اشتراك إداري رمزي	فترة الإعفاء (10 سنوات)
3,000,000 دج/سنة	اشتراك جزائي ثابت بدلاً من ضريبة تصاعدية	نظام IFU بعد الإعفاء
2,196,000 دج) على ربح (9.4M	19–23% من صافي الربح	مقارنة بنظام IBS العادي
3,000,000 دج/سنة توفيراً	إعفاء كامل خلال مرحلة النمو	الوفر الجبائي لمدة 10 سنوات

في الجداول المالية لهذه الدراسة يُدرّج مبلغ 3,000,000 دج كعبء ضريبي سنوي لإظهار السيناريو الأكثر تحفظاً، مع الإشارة إلى أن الإعفاء الفعلي سيرفع صافي الدخل بهذا المبلغ خلال سنوات الإعفاء.

ثامناً: تحليل نقطة التعادل

8.1 المفاهيم والمصطلحات

نقطة التعادل (Break-even Point) هي مستوى المبيعات الذي تتساوى عنده الإيرادات الإجمالية مع التكاليف الإجمالية، أي عند تحقيق صافي ربح = صفر. تُستخدم هذه الأداة لتحديد الحد الأدنى للإنتاج الواجب تحقيقه لتغطية كل التكاليف.

8.2 تصنيف التكاليف (ثابتة/متغيرة)

عناصر التكلفة	النوع	السنة 1 دج)	لكل كيس (دج)
الأجور وأعباء الضمان الاجتماعي	ثابتة	2,400,000	625
الإيجار	ثابتة	600,000	156.25
الإهلاك	ثابتة	300,000	78.12
التسويق والإشهار	ثابتة	80,000	20.83
مصاريف إدارية	ثابتة	50,000	13.02
الطاقة الكهربائية (الجزء الثابت)	ثابتة	100,000	26.04
إجمالي التكاليف الثابتة (CF)	ثابتة	3,530,000	919.27
المواد الأولية	متغيرة	552,000	143.75
تكاليف الطاقة المتغيرة	متغيرة	80,000	20.83
تكاليف التوزيع المتغيرة	متغيرة	60,000	15.63
إجمالي التكاليف المتغيرة (CV)	متغيرة	692,000	180.21

8.3 حساب نقطة التعادل خطوة بخطوة

الخطوة: (1) حساب هامش المساهمة لكل وحدة: (m)

$m = \text{سعر البيع الوسيطى} - \text{التكلفة المتغيرة للوحدة}$

$$m = 2,454 - 180.21 = 2,273.79 \text{ دج / كيس}$$

الخطوة: (2) حساب نقطة التعادل بالكمية: (Q*)

$Q^* = \frac{\text{التكاليف الثابتة الإجمالية}}{\text{هامش المساهمة للوحدة}}$

$$Q^* = 3,530,000 \div 2,273.79 = 1,552 \text{ كيس}$$

الخطوة: (3) حساب نقطة التعادل بالقيمة: (CA*)

$$CA^* = Q^* \times \text{متوسط سعر البيع} = 1,552 \times 2,454 = 3,808,608 \text{ دج}$$

الخطوة: (4) التحقق من نقطة التعادل عند إدراج الاشتراك الجزافي: (IFU)

$$Q^* \text{ مع } (3,530,000 + 3,000,000) \div 2,273.79 = 6,530,000 \div 2,273.79 = 2,872 \text{ مع } Q^* \text{ (IFU)}$$

السيناريو	نقطة التعادل
بدون ضريبة (إعفاء كامل)	1,552 كيس/سنة = 3,808,608 دج
مع الاشتراك الجزافي (3,000,000 IFU دج)	2,872 كيس/سنة = 7,050,288 دج
الكميات المنتجة فعلياً (السنة 1)	3,840 كيس - أي فوق نقطة التعادل في كلا السيناريوين

8.4 هامش الأمان (Marge de Sécurité)

هامش الأمان = رقم الأعمال الفعلي - رقم الأعمال عند نقطة التعادل

$$\text{هامش الأمان (السيناريو مع IFU)} = 9,400,000 - 7,050,288 = 2,349,712 \text{ دج}$$

$$\text{نسبة هامش الأمان} = 2,349,712 \div 9,400,000 = 25\%$$

تفسير النتيجة: يمكن للمؤسسة أن يتراجع رقم أعمالها بنسبة 25% دون أن تُسجل خسائر. هذا هامش مريح ومقبول أكاديمياً وتشغيلياً لمشروع في سنته الأولى.

8.5 الفترة الزمنية لاسترداد الاستثمار (Pay-back Period)

$$\text{إجمالي CAPEX} = 2,011,500 \text{ دج. صافي التدفق النقدي السنوي (السنة)} = \text{صافي الدخل} + \text{الإهلاك} = 2,108,000 \\ 2,408,000 = 300,000 \text{ دج.}$$

$$\text{مدة الاسترداد} = 2,011,500 \div 2,408,000 = 0.83 = \text{سنة } 10 \approx \text{أشهر.}$$

هذه النتيجة ممتازة وتُشير إلى أن المشروع يسترد رأس ماله المستثمر خلال أقل من سنة واحدة.

اللجنة الوطنية للتنشيطية لهيئة

NCCFIUE

تاسعاً: تقييم الأثر البيئي والاجتماعي

9.1 الأثر البيئي الإيجابي

يُساهم هذا المشروع في تحقيق أهداف التنمية المستدامة الأممية (SDGs) لا سيما الهدف 9 (الصناعة والابتكار) والهدف 11 (المدن المستدامة) والهدف 12 (الاستهلاك المسؤول) والهدف 13 (المناخ)

المؤشر البيئي	الأثر المتوقع	الكمية السنوية المُعالَجة
قشور البرتقال المُحرَقة	تحويل نفايات حرق إلى مادة رابطة	14.4 طن/سنة(لسنة 1)
البياف وسعف النخيل	تخفيض حرق المخلفات الزراعية	9.6 طن/سنة
تقليص الإسمنت البورتلاندي	خفض انبعاثات CO ₂ بنسبة 40%	توفير 25 طن / CO ₂ سنة
الاقتصاد الدائري	تحويل النفايات إلى ثروة اقتصادية	100% مواد أولية من مخلفات

9.2 الأثر الاجتماعي

التفاصيل	الأثر الاجتماعي
5 وظائف دائمة للشباب الجامعي	الوظائف المباشرة
8-12 وظيفة في قطاع موردي المواد الأولية	الوظائف غير المباشرة
تقليص تكلفة كيس الملاط بنسبة 15% مقارنة بالمنتجات المستوردة	خفض تكاليف البناء
توعية المقاولين بالمواد الصديقة للبيئة	نشر ثقافة البناء الأخضر
7,808,000 م.دج إضافة سنوية للنتاج المحلي الإقليمي	القيمة المضافة للاقتصاد المحلي

اللجنة الوطنية التنسيقية لمتابعة

NCCFIUE

عاشراً: تحليل المخاطر واستراتيجيات التخفيف

الجهة المسؤولة	استراتيجية التخفيف	الشدة	الاحتمالية	الخطر
المدير التنفيذي	توقيع عقود توريد سنوية مع +5 موردين + مخزون احتياطي شهريين	عالية	متوسطة	تذبذب توريد المخلفات الزراعية
فريق التسويق	التميز بالجودة والشهادات التقنية + برنامج توعية للمقاولين	متوسطة	عالية	منافسة المنتجات التقليدية الرخيصة
تقني الجودة	الشراكة المبكرة مع CNERIB لإجراء الاختبارات + بروتوكول بحث جامعي	عالية	متوسطة	صعوبة الحصول على شهادة المطابقة
تقني الإنتاج	استخدام الطاقة الشمسية لتجفيف الألياف + عزل الفرن	متوسطة	منخفضة	ارتفاع تكاليف الطاقة
مسؤول التسويق	التسويق الرقمي + المشاركة في معارض البناء الجهوية	متوسطة	متوسطة	ضعف قدرات التسويق في الانطلاق
عامل اللوجستيك	تخزين الإنتاج وتسليمه في الأوج + عقود مسبقة مع مقاولين	منخفضة	عالية	انخفاض الطلب في الشتاء
المدير التنفيذي	تسجيل العلامة التجارية وبراءة اختراع التركيبة لدى INAPI	عالية	منخفضة	خطر المنافسة عبر التقليد
كل الفريق	الاعتماد 100% على مواد محلية – لا استيراد	منخفضة	منخفضة	تراجع قيمة الدينار (أثر استيراد مواد)

الخاتمة والتوصية الاستثمارية

11.1 ملخص النتائج الجوهرية

خلصت هذه الدراسة المالية الأكاديمية إلى أن مشروع إنتاج الملائم البيئي بولاية الوادي يُشكل فرصة استثمارية متميزة تتوفر فيها المقومات التالية:

أولاً – الجدوى التقنية: تتوفر جميع المواد الأولية محلياً وبتكلفة منخفضة، وتتيح التكنولوجيا المُقترحة إنتاجاً موحّداً وقابلاً للتوسع، فيما تتيح التعبئة الجاهزة تمييزاً حقيقياً في السوق.

ثانياً – الجدوى المالية: يُسجل المشروع هامش ربح إجمالي يبلغ 54.4% لكل كيس مباع، ويسترد رأس المال المستثمر خلال أقل من سنة واحدة، ويتجاوز نقطة التعادل بهامش أمان 25%

ثالثاً – الجدوى الاجتماعية والبيئية: يُوفّر 5 وظائف مباشرة للشباب الجامعي، ويُحوّل سنوياً أكثر من 24 طناً من المخلفات الزراعية إلى منتج ذي قيمة مضافة، ويُقلّص انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بإنتاج الإسمنت.

11.2 التوصية الاستثمارية النهائية

بناءً على التحليل الشامل المُقدّم في هذه الدراسة، ومع الأخذ بعين الاعتبار الإطار التنظيمي الداعم للمقاولاتية الجامعية والإعفاء الضريبي لمدة 10 سنوات، توصي هذه الدراسة بـ:

التوصية	التفاصيل
التوصية الأولى	المضي في تنفيذ المشروع: تُؤكّد جميع مؤشرات الجدوى أن المشروع قابل للتطبيق وربحي من السنة الأولى.
التوصية الثانية	الاستثمار في الاعتماد التقني: الحصول المبكر على شهادة المطابقة من CNERIB يرفع القدرة التسويقية بشكل كبير.
التوصية الثالثة	التوسع التدريجي: البدء بولاية ورقلة ثم التوسع نحو غرداية وأدرار اعتباراً من السنة الثالثة.
التوصية الرابعة	الشراكة الجامعية: الإبقاء على رابط بحثي مع جامعة الوادي لتطوير صيغ جديدة من المنتج.
التوصية الخامسة	تسجيل براءة الاختراع: حماية التركيبة لدى INAPI لتعزيز الميزة التنافسية.

هذا المشروع نموذج حقيقي للاقتصاد الدائري في الجزائر: من المخلفات إلى الثروة، ومن النفايات إلى العمارة المستدامة.

المؤشر المالي	القيمة	الحكم
إجمالي الاستثمار (CAPEX)	2,011,500 دج	منخفض ومناسب
فترة استرداد الاستثمار	10 أشهر	ممتازة جداً
صافي الربح السنة 1	2,108,000 دج	يتجاوز الهدف (1M)
صافي الربح السنة 3	11,570,000 دج	يتجاوز الهدف (2.5M)
نقطة التعادل	2,872 كيس/سنة	محققة فعلياً
هامش الأمان	25%	مقبول أكاديمياً
وظائف مباشرة	5 وظائف	يلبي الشرط
التوصية الإجمالية	✓ موصى بالاستثمار	مشروع جدير بالتمويل

أعدت هذه الدراسة في إطار مذكرة التخرج لنيل شهادة جامعية (مشروع مؤسسة اقتصادية مصغرة) وفق المتطلبات الأكاديمية لجامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي، ضمن الإطار القانوني للقرار الوزاري 1275 المعدل بالقرار الوزاري 008 المؤرخ في 23 فيفري 2025. جميع البيانات والأرقام الواردة في هذه الدراسة مبنية على افتراضات منهجية صريحة وقابلة للتحقق والنقاش في إطار مناقشة رسمية على مستوى الماستر .

