

Université 20 août 1955-SKIKDA-

Faculté de Technologie

Département : Génie Mécanique

Réf : D012125019D



جامعة 20 أوت 1955 – سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم: الهندسة الميكانيكية

المرجع: D012125019D

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences

En Génie Mécanique

**Elaboration et caractérisation mécanique de nouveaux
biocomposites à base de déchets végétaux : Modélisation par RSM
et ANN**

Présentée par :

Mme Hassina Boudermine

Soutenue publiquement le : 20 MAI 2025

Devant le jury composé de :

Président : Dr. Azzedine BEDJAOUI	Maitre de conférences A	(Université de Skikda)
Encadreur : Pr. Ahmed BELAADI	Professeur	(Université de Skikda)
Co-Encadreur : Dr. Messaouda BOUMAAZA	Maitre de conférences A	(Université de Guelma)
Examineur : Pr Azzedine MEKHLOUF	Professeur	(Université de Khenchla)
Examineur : Pr Salah AMROUNE	Professeur	(Université de M'Sila)
Examineur : Dr Aziz SAIDIA	Maitre de conférence A	(ENSET de Skikda)
Examineur : Dr Chouki FARSI	Professeur	(Université de M'Sila)

Remerciements

Ce travail a été réalisé au département de Génie Mécanique, Université de SKIKDA, sous le pilotage de monsieur le Professeur Ahmed belaadi.

Mes remerciements ; vont d'abord à mon directeur de thèse, Pr Ahmed Belaadi, et Un grand merci à mon co-directeur de thèse, madame Messaouda Boumaaza, dont l'efficacité et la bonne conduite auront été un secours fidèle pour la confiance qu'ils m'ont manifestée en m'accueillant dans leur équipe, pour le temps qu'ils ont consacré au suivi de mes marches ainsi que pour leurs relectures minutieuses des multiples travaux, article et du présent manuscrit.

Je remercie vivement les membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail et d'être présent pour ma soutenance.

J'exprime ma gratitude particulière à l'ensemble des enseignants et équipes de laboratoire de génie mécanique, de génie civile et hall technologique au sein de l'université de Skikda, pour leur aide au cours de ces années, pour leur intérêt et leur assistance dans mon travail, pour leur collaboration quotidienne ; et pour leur aide à la réalisation d'expériences.

Mes remerciements vont aussi aux doctorants et masters du département ; qui ont partagé mon quotidien ; et à mes collègues et mes amis pour leur présence et leurs encouragements, pour les discussions fondamentales interminables, qui m'ont apporté du courage et beaucoup de vaillance.

Enfin, je remercie mes parents et ma famille qui m'ont soutenue, supportée et encouragée dans mes projets. Merci pour leur amour et leur confiance, c'est grâce à eux que je suis ici aujourd'hui et je leur en serai éternellement reconnaissante.

Résumé

Dans la quête d'un avenir plus propre et plus vert, l'adoption de solutions technologiques plus propres est devenue une partie intégrante de la conception des bâtiments conventionnels. Les nouveaux projets de construction doivent tenir compte des préoccupations écologiques. En outre, en réponse au problème pressant du réchauffement climatique et de l'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone (CO_2), des efforts ont été entrepris pour produire de nouveaux matériaux de construction capables d'absorber et de stocker le CO_2 . L'utilisation de substituts du ciment réduit la propagation du dioxyde de carbone et contribue à la préservation de l'environnement. En Algérie, une part importante des déchets est générée chaque année sous la forme de centaines de tonnes d'ordures produites lors des opérations de maintenance du *Washingtonia Robusta*. Une option pratique pour augmenter le taux de recyclage des déchets ligneux est de pyrolyser ces déchets pour créer du biochar, qui peut être utilisé pour cimenter le mortier. L'abondance des déchets de *Washingtonia Robusta* (WRW) et du sable des dunes du désert du Sahara algérien, ainsi que la production de biochar issu d'une pyrolyse à 500°C de ces résidus (WRWB) sur les propriétés de flexion, de compression et de porosité des mortiers cimentaires sont explorées. L'analyse et l'optimisation des quantités de ces composants constituent l'objectif de la recherche. D'après les résultats, les taux optimaux étaient de 1,3 % de WRW, 1,8 % de WRWB et 4 % de concentration de CaCO_3 pour un traitement de 23,6 heures des déchets fibreux. Les coefficients de corrélation ANN pour la résistance et le déplacement en flexion, la compression et l'absorption d'eau étaient respectivement de 0,9873, 0,9840, 0,9812, 0,9884 et 0,9844. Toutefois, il convient de noter que la précision des prédictions utilisant des modèles de réseaux neuronaux artificiels (ANN), qui se sont avérés avoir une bonne corrélation avec les données expérimentales des modèles développés, est plus élevée que celle des modèles de la méthodologie de la surface de réponse (RSM). Ces méthodes ont permis d'accroître l'utilisation des mortiers verts et leur acceptation en tant que matériaux de construction.

Mots-clés : Optimisation, mortier vert, déchets de *Washingtonia Robusta*, biochar, propriétés mécaniques, apprentissage automatique, méthodologie de la surface de réponse.

Abstract

In the quest for a cleaner, greener future, the adoption of cleaner technological solutions has become an integral part of conventional building design. New construction projects must take ecological concerns into account. Moreover, in response to the pressing problem of global warming and rising carbon dioxide (CO₂) levels, efforts are underway to produce new building materials capable of absorbing and storing CO₂. The use of cement substitutes reduces the spread of carbon dioxide and helps preserve the environment. In Algeria, a significant proportion of waste is generated every year in the form of hundreds of tonnes of garbage produced during maintenance operations on the *Washingtonia Robusta*. A practical option for increasing the recycling rate of wood waste is to pyrolyze this waste to create biochar, which can be used to cement mortar. The abundance of *Washingtonia Robusta* waste (WRW) and dune sand from the Algerian Sahara desert, and the production of biochar from 500°C pyrolysis of these residues (WRWB) on the flexural, compressive and porosity properties of cementitious mortars are explored. The abundance of *Washingtonia Robusta* waste (WRW) and dune sand from the Algerian Sahara desert, as well as the production of biochar from 500°C pyrolysis of these residues (WRWB) on the flexural, compressive and porosity properties of cementitious mortars are explored. The analysis and optimization of the quantities of these components is the objective of the research. According to the results, the optimum levels were 1.3% WRW, 1.8% WRWB and 4% CaCO₃ concentration for a 23.6-hour treatment of fibrous waste. ANN correlation coefficients for flexural strength and displacement, compression and water absorption were 0.9873, 0.9840, 0.9812, 0.9884 and 0.9844 respectively. However, it should be noted that the accuracy of predictions using artificial neural network (ANN) models, which were found to correlate well with experimental data from the models developed, is higher than that of Response Surface Methodology (RSM) models. These methods have increased the use of green mortars and their acceptance as construction materials.

Keywords: Optimization, green mortar, *Washingtonia Robusta* waste, biochar, mechanical properties, machine learning, response surface methodology.

ملخص

في إطار السعي نحو مستقبل أنظف وأكثر اخضراراً، أصبح اعتماد الحلول التكنولوجية الأنظف جزءاً لا يتجزأ من تصميم المباني التقليدية. يجب أن تراعي مشاريع البناء الجديدة المخاوف البيئية. بالإضافة إلى ذلك، واستجابة للمشكلة الملحة المتمثلة في الاحتباس الحراري وارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون (CO2)، تُبذل الجهود لإنتاج مواد بناء جديدة قادرة على امتصاص وتخزين ثاني أكسيد الكربون. إن استخدام بدائل الأسمنت يقلل من انتشار ثاني أكسيد الكربون ويساعد في الحفاظ على البيئة. في الجزائر، تتولد كمية كبيرة من النفايات كل عام في الجزائر في شكل مئات الأطنان من القمامة التي تنتج أثناء عمليات الصيانة في واشنطنيا روبوستا. ويتمثل أحد الخيارات العملية لزيادة معدل إعادة تدوير نفايات الخشب في التحلل الحراري لهذه النفايات لإنتاج الفحم الحيوي الذي يمكن استخدامه في تدعيم الملاط. كان الهدف من البحث هو تحليل وتحسين كميات هذه المكونات. ووفقاً للنتائج، كانت المستويات المثلى هي 1.3% من النفايات الليفية و1.8% من النفايات الليفية و4% من تركيز ثاني أكسيد الكربون الكربون، وذلك لمعالجة النفايات الليفية لمدة 23.6 ساعة. كانت معاملات ارتباط الشبكة ANN لمعاملات الارتباط لقوة الانثناء والإزاحة والضغط وامتصاص الماء 0.9873 و0.9840 و0.9812 و0.9884 و0.9844 على التوالي. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن دقة التنبؤات باستخدام نماذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN)، والتي وُجد أنها ترتبط بشكل جيد بالبيانات التجريبية من النماذج المطورة، أعلى من نماذج منهجية سطح الاستجابة (RSM). وقد زادت هذه المنهجيات من استخدام الملاط الأخضر وقبولها كمواد بناء.

الكلمات المفتاحية: التحسين الأمثل، الملاط الأخضر، نفايات واشنطن روبوستا، الفحم الحيوي، الخواص الميكانيكية، التعلم الآلي، منهجية سطح الاستجابة.

Table de matière

Remerciements

Résumé

Abstrat

ملخص

Table de matière

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Analyse bibliographique et état d'art

I.1 Introduction..... 5

I.2 Analyse bibliométrique 7

I.3 Introduction aux matériaux composites... 10

I.4 Définition d'un matériau composite 11

I.4.1 La matrice..... 11

I.4.1.1 Les composites à matrice métallique... 11

I.4.1.2 Les composites à matrice céramique.....11

I.4.2 Résines.....11

I.4.2.1 Résines thermodurcissables.....12

I.4.2.2 Résines thermoplastiques 13

I.4.2.3 La différence entre les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables..... 13

I.4.3. Additifs..... 14

I.4.4 Renforts..... 14

I.5 Classification par la taille des particules de renfort..... 15

I.6 Classification par le type de matrice 16

I.7 Classification par marché..... 17

I.8 Les biocomposites..... 17

Table de matière

I.8.1 Matériaux composites à bases de fibres naturelles.....	17
I.8.2 Facteurs influant sur les propriétés des matériaux composites	19
I.8.2.1 Influence de la nature et dosage des constituants.....	19
I.8.2.2 La dispersion et l'orientation de la fibre.....	19
I.8.2.3 Interface fibre/matrice	19
I.8.2.4 Influence des dimensions... ..	20
I.9 Origines des fibres naturelles... ..	20
I.9.1 Définition d'une fibre végétale	21
I.9.2 Structure des fibres lignocellulosiques... ..	21
I.9.3 Morphologie d'une fibre végétale	22
I.9.4 Critères de classification des fibres végétales	22
I.9.5 Rôle des fibres... ..	23
I.9.6 La composition chimique des fibres végétales... ..	23
I.9.6.1. Cellulose... ..	23
I.9.6.2 L'hémicellulose... ..	25
I.9.6.3. La lignine... ..	25
I.9.6.4 Les pectines... ..	26
I.9.6.5 Extractifs... ..	26
I.9.6.6 Les cires (waxes)	27
I.9.7 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales.....	29
I.9.8 Caractéristiques thermiques et acoustiques des fibres végétales.....	30
I.10 Présentation de quelques fibres végétales... ..	30
I.10.1 Fibre de lin.....	30
I.10.2 Fibres de chanvre.....	31
I.10.3 Fibres de jute	32
I.10.4 Fibre de kenaf... ..	33
I.10.5 Fibre de sisal... ..	34
I.10.6 Fibre d'abaca	34
I.10.7 Fibre de coco... ..	35
I.10.8 Fibres de palmier dattier.....	36
I.10.8.1 Morphologie du palmier dattier.....	36
I.11 Valorisation des Fibres naturelles locales : Fibres de palmiers dattiers.....	40
I.12 Influence des renforts végétaux sur les matériaux biocomposites... ..	41

Table de matière

I.13 Contribution des fibres naturelles à l'industrie de la construction	43
I.13.1 Influences des renforts végétaux sur l'ouvrabilité des matériaux de construction.....	44
I.13.2 Influence des fibres végétales sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux de construction.....	44
I.13.3 Caractéristiques à l'état frais	44
I.13.4 Comptabilité ciment-fibres végétales lors de l'hydratation de ciment.....	44
I.13.5 Caractéristiques à l'état durci	45
I.13.6 Effet de l'addition de fibres sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers.....	45
I.13.7 Effet de l'addition de fibres sur les propriétés thermiques des mortiers	48
I.13.8 Ténacité et résistance des mélanges.....	49
I.13.9 Durabilité des biocomposites cimentaires.....	49
I.14 Conclusion.....	51
Références.....	53
Chapitre II : Techniques Et Méthodes Expérimentales	
II.1 Introduction.....	61
II.1.1 L'industrie cimentière.....	61
II.1.2 Prise et durcissement du ciment.....	61
II.1.3 Définition d'un ciment	62
II.1.4 Les constituants du ciment.....	62
II.1.5 Caractéristiques et emplois des ciments.....	64
II.1.6 Les mortiers.....	65
II.1.7 Composants du mortiers.....	65
II.1.7.1 Le sable.....	65
II.1.7.2 Le liant	65

Table de matière

II.1.7.3 L'eau.....	65
II.1.7.4 Les adjuvants	66
II.1.8 Fonctions d'un mortier	66
II.1.8 Formulation (fabrication) des mortiers.....	67
II.1.9 Caractéristiques des mortiers.....	67
II.1.9.1 Mortier à l'état frais.....	68
II.1.9.2 Mortier à l'état durci.....	68
II.2. Définition de la pyrolyse.....	68
II.2.1 Définition du Biochar	69
II.3 Méthodologie expérimentale.....	69
II .3.1. Matériaux.....	70
II.3.2 Production d'échantillons de mortier.....	73
II.3.3 Densité apparente, porosité et absorption d'eau capillaire des mortiers verts élaborés à partir de déchets végétaux de Robusta et de biochar.....	76
II.3.4 Résistance mécanique.....	77
II.3.5 Planification des expériences sur base de statistiques.....	77
II.3.6 Modélisation ANN.....	79
II.3.7 Critères de comparaison.....	79
II.3.8 Conclusion.....	80
Références	81

Chapitre III: Résultats Et Analyse Statistiques Par La Méthodologie des Surfaces De Réponses

III.1 Introduction.....	84
III.2 Résultats et discussion.....	84

Table de matière

III.2.1 Densité apparente, porosité et absorption d'eau...	84
III.2.2 Propriétés mécaniques...	89
III.2.2.1 Modélisation à l'aide de la méthode RSM...	89
III.2.2.2 Résultats de l'ANOVA.....	95
III.2.2.3 Optimisation numérique des réponses.....	104
III.3 Conclusion...	111
Références.....	112

Chapitre IV : Modélisation Par Les Réseaux De Neurones Artificiels

IV.1 Introduction...	114
IV.2 Résultats et discussions...	114
IV.2.1 Modélisation à l'aide d'ANN.....	114
IV.2.2 Précision et pertinence du modèle	124
IV.3 Conclusion...	127
Références.....	129
Conclusion générale.....	131

Références bibliographique

Annexe

Liste des figures

Figure I 1: Visualization/mapping of studies utilizing palm oil clinker using VOSviewer.....	9
Figure I.2 : Types de matrice.....	12
Figure I.3: Structures moléculaires (a) d'un polymère thermoplastique, (b) d'un polymère thermodurcissable.....	14
Figure I.4 : Structures moléculaires, (a) d'un polymère thermoplastique, (b) d'un polymère thermodurcissable.....	15
Figure I.5 : Classification schématique des différents types de composites.....	16
Figure I.6 : Illustration de composite selon la nomenclature.....	16
Figure I.7 : Différentes fibres naturelles : animales, végétales et minérales.....	18
Figure I.8 : Classification générale des fibres.....	21
Figure I.9 : Modèle de description de la structure d'une fibre végétale.....	22
Figure I.10: Structure chimique de la cellulose.....	24
Figure I.11 : Molécule de cellulose (n répétitions du motif cellobiose)	24
Figure I.12 : Représentation des micro-fibrilles constituant les fibres de cellulose.....	24
Figure I.13 : Formules chimiques des principaux monosaccharides des hémicellulose.....	25
Figure I.14 : Formules chimiques des principaux constituants de la lignine.....	26
Figure I.15 : Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique	26
Figure I.16 : Structure tridimensionnelle de la paroi primaire	27
Figure I.17 : Plante et fibre de lin	31
Figure I.18 : Vue en coupe transversale de la fibre de lin.....	31
Figure I.19: Plante et fibre de chanvre.....	32
Figure I.20 : Plante et fibre de jute.....	33
Figure I.21 : Plante et fibre de kénaf	33
Figure I.22 : Plante et fibre de sisal.....	34

Liste des figures

Figure I.23 : Plante et fibre d'Abaca.....	35
Figure I.24 : Plante et fibre de coco.....	35
Figure I.25 : Schéma de palmier dattier.....	37
Figure I.26 : Schéma d'une palme de palmier dattier.....	38
Figure I.27 : les fibres de tige et du tronc de palmier.....	39
Figure I.28: Bois de palmier dattier (pétioles, feuilles et grappes) considéré souvent comme déchets agricoles sans valeur économique.....	40
Figure I.29 : Images MEB d'une fibre de pétiole (variété Deglet-Nour), échelle de 100µm....	40
Figure I.30 : Impact de la distribution du peuplier sur la chaleur dégagée pendant l'hydratation.....	45
Figure I.31 : La résistance en flexion des échantillons à 28 jours.....	46
Figure I.32: L'impact de la longueur et de la quantité des fibres de lin sur la contrainte à la flexion des mortiers.....	47
Figure I.33: Effet de la teneur en fibres de lin sur la contrainte de compression des mortiers...	48
Figure I.34 : Conductivité thermique des mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier de 3 mm, 6 mm et le mélange de deux diamètres.....	48
Figure I.35 : Contrainte résiduelle sur des mortiers en jute et sisal.....	49
Figure I.36 : Propriétés mécaniques des mortiers renforcés (a) solution de NaOH pendant 28 jours et (b) après 12 mois de vieillissement naturel.....	50
Figure II.1: Texture d'un béton fibré.....	55
Figure II.2 : Analyse granulométrique du ciment, du biochar et du sable de dune utilisés dans la composition de mortiers verts.....	58
Figure II.3 : (a) Plante <i>Washingtonia robusta</i> , (b) tronc de la plante, (c) déchets de maille extraits du tronc, (d) détail du zoom des fibres de maille utilisées dans cette étude (e) fibres extraites de la maille et regroupées en série, (f) fibres WR traitées, (g) déchets coupés à petite taille, (h) four de pyrolyse et (i) biochar obtenu.....	60

Liste des figures

Figure II.4: (a) Élaboration des mortiers verts, (b) mortier frais sous la table vibrante et (c) éprouvettes de compression et de flexion.....	64
Figure III.1 : Variabilité de la porosité (a-b), de l'absorption d'eau (c-d) et de la densité apparente (e-f) des mortiers renforcés en fonction de WRW et WRWB.....	85
Figure III.2 : Variation de la porosité et de l'absorption d'eau des mortiers verts.....	86
Figure III.3: Résistance à la flexion et à la compression et déplacement des mortiers verts renforcés avec WRWB, et WRW traités et non traités après 28 jours de cure.....	90
Figure III.4: Résistance à la flexion et à la compression et déplacement des mortiers verts renforcés avec WRWB, et WRW traités en fonction du temps d'immersion et CaCO ₃ % : après 28 jours de durcissement.....	92
Figure III.5 : (a) Rupture en flexion des mortiers verts renforcés avec des fibres de W. robusta, (b) zoom de la section du mortier avec des fibres non traitées dans la zone rouge #3, (c) zoom du mortier avec des fibres traitées dans la zone jaune #16, et (d) zoom de la section du mortier dans la zone verte #16.....	94
Figure III.6: Réponses de la résistance et du déplacement en flexion ainsi que de la résistance et du déplacement en compression respectivement (a-d) Valeurs prédites en fonction des valeurs réelles, (e-h) tracés normaux des résidus et (i-l) résidus par rapport aux données prédites.....	101
Figure III.7 : Contours de surface des données WRW vs. WRWB, WRW vs. temps, et WRW vs. CaCO ₃ pour (a-c) la résistance à la flexion, (d-f) le déplacement en flexion, (g-i) la résistance à la compression et (j-l) le déplacement en compression respectivement.....	103
Figure III.8 : 3D RSM des données WRW vs. FWB, WRW vs. Temps, et WRW vs. CaCO ₃ de (a-c) résistance à la flexion, (d-f) déplacement en flexion, (g-i) résistance à la compression et (j-l) déplacement en compression, respectivement.....	107
Figure III.9 : Diagramme de rampe des conditions optimisées à l'aide d'une approche d'optimisation.....	109

Liste des figures

- Figure IV.1 :** Architecture ANN des propriétés mécaniques des mortiers à base de WRW/WRWB : (a) résistance à la flexion, (b) déplacement en flexion, (c) résistance à la compression, (d) déplacement en compression et (e) absorption d'eau.....117
- Figure IV.2 :** Les valeurs expérimentales et prévisionnelles des données d'apprentissage, de validation et globales sont comparées pour : (a-c) la résistance à la flexion, (d-f) le déplacement en flexion, (g-i) la résistance à la compression et (j-l) le déplacement en compression et (m-o) l'absorption d'eau.....119
- Figure IV.3 :** Représentation des erreurs ANN à l'aide d'un histogramme des mortiers WRW/WRWB : (a) résistance à la flexion, (b) déplacement en flexion, (c) résistance à la compression, (d) déplacement en compression et (e) absorption d'eau.....121
- Figure IV.4 :** Évolution de l'erreur quadratique moyenne en fonction des cycles des mortiers WRW/WRWB : (a) résistance à la flexion, (b) déplacement en flexion, (c) résistance à la compression, (d) déplacement en compression et (e) absorption d'eau.....123
- Figure IV.5 :** Analyse comparative des valeurs prévues RSM/ANN et observées des mortiers verts WRWs-WRWB : (a,b) résistance et déplacement en flexion et (c,d) résistance et déplacement en compression respectivement et e absorption d'eau.....125

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	13
Tableau I.2 : Caractéristiques des résines thermoplastiques.....	13
Tableau I.3 : Composition chimique des fibres végétales.....	28
Tableau I.4 : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.....	29
Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites.....	41
Tableau II.1 : Composition chimique du ciment.....	70
Tableau II.2 : Propriétés physiques des agrégats et du biochar.....	71
Tableau II.3 : Propriétés physico-mécaniques des fibres brutes de W. Robusta.....	73
Tableau II.4 : La composition des mortiers produits (Kg/m^3).....	74
Tableau II.5 : Développement des différentes variables d'essai du processus et de leurs niveaux correspondants.....	78
Tableau III.1 : Résultats des propriétés physiques et mécaniques des mortiers dans lesquels WFW et WRWB ont remplacé partiellement le ciment.....	86
Tableau III.2 : Analyse ANOVA de la résistance et du déplacement en flexion, de la résistance et du déplacement en compression et de l'absorption d'eau pour les mortiers produits.....	96
Tableau III.3 : Modèles mathématiques des caractéristiques mécaniques et de l'absorption d'eau basés sur la méthode RSM.....	98
Tableau III.4 : Objectifs et variations des variables d'optimisation.....	99
Tableau III.5 : Résultats du processus d'optimisation.....	105
Tableau III.6 : Informations sur les données produites à l'aide d'ANN.....	107
Tableau III.7 : Plan expérimental et réponses prédites par RSM et ANN des propriétés mécaniques et de l'absorption d'eau des mortiers verts testés.....	109

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : Modèles créés à l'aide de la méthode ANN de résistance et le déplacement en compression et en flexion et d'absorption d'eau pour différents mortiers verts.....	115
Tableau IV.2 : Les résultats statistiques pour le R^2 , MSE , $RMSE$ et $MAPE$ obtenus pour les modèles des propriétés mécaniques et de l'absorption d'eau par RSM et ANN.....	120
Tableau IV.3 : Les résultats statistiques pour le R^2 , MSE , $RMSE$ et $MAPE$ obtenus pour les modèles des propriétés mécaniques et de l'absorption d'eau par RSM et ANN.....	126

Listes des abréviations

GM: Green mortar

W: Washingtonia

WRW: Washingtoniarobusta waste

WRWB: Washingtoniarobusta waste biochar

ANN: Artificial neural network

MLP: Multi-Layer Perceptron

FNN: Feed forward neural networks

R²: Coefficient of determination

RMSE: Root means square error

MSE: Mean square error

MAPE: Mean absolute percentage error

RSM: Response surface methodology

CCD: Central composite design

ANOVA: Analysis of variance

Introduction générale

L'impact environnemental des matériaux de construction traditionnels, notamment le ciment, est devenu un sujet de préoccupation croissant à l'échelle mondiale. La production de ciment, bien qu'indispensable au développement des infrastructures modernes, est responsable d'une part importante des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère. Cette industrie contribue non seulement au réchauffement climatique, mais consomme également d'importantes ressources naturelles et énergétiques. Dans un contexte mondial où la transition vers des pratiques durables et respectueuses de l'environnement est une priorité, il est essentiel de repenser les formulations des matériaux de construction en intégrant des alternatives écoresponsables.

Parmi les solutions envisagées, l'incorporation de fibres naturelles dans les mortiers cimentaires offre une opportunité prometteuse. Ces fibres, issues de ressources renouvelables telles que le lin, le chanvre, le bambou ou encore les déchets agricoles, présentent des propriétés mécaniques intéressantes et une faible empreinte carbone. En plus de leur durabilité écologique, ces fibres permettent d'améliorer certaines caractéristiques des matériaux cimentaires, telles que la résistance à la fissuration, la flexibilité et l'absorption d'énergie.

Cependant, l'intégration de fibres naturelles dans les mortiers cimentaires soulève des défis scientifiques et techniques. Ces fibres, en raison de leur nature organique, peuvent présenter des incompatibilités avec la matrice cimentaire, entraînant une dégradation au fil du temps ou une réduction des performances mécaniques. De plus, les mécanismes d'interaction entre les fibres et la matrice cimentaire, ainsi que les effets de la substitution partielle ou totale du ciment par ces fibres sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des mortiers, nécessitent une compréhension approfondie.

Pour relever ces défis et optimiser l'utilisation des fibres naturelles dans les mortiers cimentaires, des outils avancés de modélisation et d'analyse sont indispensables. La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN) se révèlent être des approches puissantes pour explorer, prédire et optimiser les performances des matériaux composites. RSM permet de concevoir des expériences efficaces et d'étudier l'effet des paramètres expérimentaux clés sur les propriétés des mortiers, tout en identifiant les combinaisons optimales. De leur côté, les ANN, grâce à leur capacité à modéliser des relations

Introduction Générale

complexes et non linéaires, offrent une approche robuste pour prédire les propriétés mécaniques et durables des mortiers enrichis en fibres naturelles en fonction de divers paramètres d'entrée.

Cette thèse s'inscrit dans ce contexte en combinant des approches expérimentales, analytiques et numériques pour explorer le potentiel des fibres naturelles en tant que substitut partiel du ciment dans les mortiers cimentaires. L'objectif principal est de caractériser les performances mécaniques, physiques et durables de ces mortiers tout en optimisant leurs formulations à l'aide de RSM et ANN. Une attention particulière sera portée à l'étude des interactions entre les fibres et la matrice cimentaire, ainsi qu'à l'évaluation des impacts environnementaux et économiques.

En intégrant ces outils de modélisation avancés, cette recherche ambitionne de contribuer au développement de matériaux de construction innovants, alignés avec les objectifs globaux de réduction de l'empreinte écologique de l'industrie du bâtiment. Elle répond ainsi à un double enjeu : valoriser les ressources naturelles renouvelables et adopter des pratiques constructives plus durables et performantes.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres, chacun contribuant à l'atteinte des objectifs scientifiques et techniques de l'étude. Le 1^{er} chapitre est sur l'état de l'art, il offre une synthèse critique des connaissances actuelles sur l'utilisation des fibres naturelles dans les matériaux de construction, notamment leur rôle en tant que substituts partiels du ciment dans les mortiers cimentaires. Dans la partie principale de ce chapitre, nous présenterons une étude bibliographique se focalise sur l'étude sur les matériaux composites, les divers aspects qui entourent la compréhension du comportement structural des composites, en plus, on a abordé les propriétés des biocomposites renforcés par des fibres naturelles.

Ensuite, la deuxième partie est consacré à un état de l'art relatif aux différents types de fibres naturelles, leurs disponibilités dans le monde et en Algérie, leurs compositions chimiques, leurs structures, leurs propriétés, leurs avantages et inconvénients ainsi que leurs domaines d'application. En portant une attention particulière sur les propriétés des fibres de palmier dattier, et sur l'importance actuelles des matériaux de constructions à renfort végétal.

Le second chapitre divisé en deux parties, traite des caractéristiques nécessaires des matières entrant dans la composition cimentaire en basant sur une synthèse bibliographique des travaux réalisés sur les biocomposites et leurs intérêt actuel. Par ailleurs, l'élaboration et les différentes méthodes de caractérisation utilisées dans ce travail sont présentées. La première partie très technique, dédiée au matériaux utilisés, notamment les types de fibres naturelles sélectionnées,

les matrices cimentaires, matériel et méthodes utilisés, Elle s'attache également à décrire les méthodes de préparation et de caractérisation des biocomposites cimentaires finaux, ainsi que les différentes techniques et essais expérimentaux employées pour la réalisation de ce travail. Par ailleurs, les principes de conception expérimentale (DOE) utilisés pour la mise en œuvre de RSM, ainsi que l'architecture et les algorithmes des ANN, sont expliqués pour poser les bases des travaux de modélisation.

Le chapitre III est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus et RSM pour les propriétés physiques (densité, porosité, absorption d'eau) et mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) des mortiers cimentaires modifiés avec des fibres naturelles. Cependant RSM est utilisé pour comprendre l'influence des paramètres clés (tels que la teneur en fibres, le rapport eau/ciment et les traitements appliqués aux fibres) et pour identifier les combinaisons optimales permettant d'atteindre les meilleures performances mécaniques et physiques. Les performances des formulations étudiées sont discutées en fonction des taux d'incorporation des fibres et des conditions de traitement. Ces analyses permettent d'identifier les effets des fibres sur les propriétés globales du matériau et constituent une base essentielle pour la modélisation.

Le dernier chapitre est consacré à la modélisation par ANN pour prédire les propriétés des mortiers à partir des données expérimentales et connaître les interactions complexes entre les variables. Ce chapitre met également en lumière les avantages et limites des deux approches, tout en proposant des recommandations pour les travaux futurs. Cette structure vise à fournir une contribution significative au développement de matériaux de construction durables, en exploitant le potentiel des fibres naturelles et en utilisant des approches modernes de prédiction et d'optimisation.

La thèse se termine par une conclusion générale qui synthétise le travail expérimental effectué afin d'en tirer les perspectives les plus intéressantes.

Chapitre **I** : Analyse Bibliographique Et Etat D'art

I.1 Introduction

L'utilisation de matériaux durables et respectueux de l'environnement est devenue un problème important dans l'industrie du bâtiment au cours des dernières années. Les scientifiques étudient actuellement les applications potentielles de l'utilisation du biochar pour produire des composites cimentaires lorsqu'il est associé à d'autres additifs[1, 2]. Le biochar incorporé dans le ciment composite est apparu comme une solution prometteuse pour relever les défis associés à la production de ciment conventionnel. Les professionnels du bâtiment reconnaissent de plus en plus la nécessité d'adopter des technologies plus propres et plus durables dans la conception et la construction des bâtiments[3]. La production traditionnelle de ciment est connue pour ses importantes émissions de carbone et son impact sur l'environnement. Par conséquent, l'intégration de biochar, une source de biomasse riche en carbone, offre aux composites de ciment la possibilité de réduire leur impact environnemental tout en améliorant leurs propriétés mécaniques et physiques[4, 5].L'attention a été portée sur le potentiel du biochar, une substance riche en carbone créée par la combustion de la biomasse, pour une utilisation dans différents types d'industries, y compris le bâtiment[6]. Le biochar possède plusieurs caractéristiques avantageuses qui lui permettent d'améliorer les composites à base de ciment. Il présente une surface spécifique élevée, une excellente porosité et une capacité d'absorption supérieure [7]. Ces propriétés contribuent à améliorer la résistance et la durabilité des composites de ciment. En incorporant du biochar, les chercheurs visent à créer des composites de ciment qui sont non seulement plus solides et plus durables, mais aussi plus respectueux de l'environnement. Le biochar peut également contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre en stockant le carbone de manière durable. C'est pourquoi de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'application du biochar, un produit fabriqué à partir de biomasse carbonisée qui est bien connu pour ses qualités avantageuses dans l'agriculture et la préservation de l'environnement. En plus du biochar, les chercheurs explorent les effets synergiques de la combinaison du biochar avec d'autres additifs, tels que les nanomatériaux, les polymères et les fibres naturelles[3].Cependant, l'ajout de fibres naturelles dans les composites de ciment a également un certain nombre d'effets bénéfiques. Le jute [8], *Washingtonia filifera*[9, 10], le palmier-dattier[11], le chanvre[12], ou sisal [13], servent de renforts mécaniques pour augmenter la ductilité et la dureté des matériaux composites. Ils offrent une résistance mécanique intéressante et sont renouvelables et biodégradables[14, 15]. Les caractéristiques des composites à base de ciment pourraient être encore améliorées grâce à ces combinaisons.

Des études menées par Praneeth et al. [16] sur des composites cendres volantes-ciment complétés par du biochar de canne à sucre soumis à une carbonatation accélérée de deux heures ont révélé le potentiel du

biochar à améliorer l'absorption du dioxyde de carbone et la résistance à la compression à un âge précoce. Cela suggère que l'ajout de biochar améliore leur capacité à absorber le CO₂ dans le mortier de ciment et de cendres volantes en capturant le dioxyde de carbone du biochar. Les échantillons contenant 8 % de biochar et 20 % de ciment à base de cendres volantes, ainsi que les échantillons contenant 2 % de biochar et 50 % de ciment à base de cendres volantes, ont montré le gain le plus important en termes de résistance à la compression. Les résultats d'une étude menée par Gupta et Kua [17] recommandent d'utiliser du biochar fabriqué à partir de déchets alimentaires à la place de la fumée de silice à de faibles doses de remplacement du ciment. Dans la recherche de Gupta et al. [18], la performance mécanique des mortiers renforcés avec des fibres de propylène (PP) a été améliorée par l'ajout de biochar. Les résultats de cette recherche ont montré que l'ajout de biochar améliorerait considérablement les propriétés mécaniques des mortiers renforcés par des fibres de PP. Par rapport aux mortiers renforcés par des fibres de PP non enduites, les fibres de PP enduites de biochar ont montré une amélioration substantielle de 19% de la résistance à la flexion et de 20% de la résistance à la compression. En outre, l'amélioration de la ductilité des fibres après fissuration est le résultat de l'enrobage de biochar. L'interaction entre la cendre de balle de riz industrielle (iRHA) et le biochar de balle de riz a été étudiée par l'étude [19] pour voir comment elle affecte les caractéristiques du mortier de ciment. La résistance à la compression du mortier créé avec 12 % de iRHA et 8 % de biochar de balle de riz comme substitut du ciment a augmenté de 17 % par rapport au mortier fabriqué uniquement avec de l'iRHA.

Cependant, l'influence de l'ajout de biochar ou de fibres naturelles aux composites de ciment sur leur durabilité et leurs propriétés physiques et mécaniques doit faire l'objet d'une analyse approfondie. Le développement de matériaux de construction durables offrant une résistance mécanique supérieure, une durabilité accrue et un impact environnemental réduit est un objectif important pour l'industrie du bâtiment, qui a fait l'objet d'une attention particulière au cours des dernières années. Les chercheurs explorent continuellement des approches innovantes pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des composites à base de ciment.

Les difficultés associées à l'analyse non linéaire des données ainsi qu'à l'optimisation pendant les expériences afin de prévoir leurs caractéristiques mécaniques ont été jugées mieux résolues par les méthodes ANN et RSM [20–23]. Ces méthodes ont été récemment appliquées à la recherche sur l'optimisation des matériaux [24–28]. Cependant, il n'y a pas assez de recherches examinant l'impact de l'incorporation de fibres naturelles et de biochar dans les mortiers cimentaires. Les chercheurs [28] ont effectué une comparaison entre les modèles ANN et RSM pour prévoir la résistance mécanique à la compression à 7, 28 et 56 jours. Kursuncu et al. [29] ont étudié les effets du remplacement partiel des

agrégats et du ciment par des cendres de riz et de la poudre de marbre dans le béton mousse sur la résistance à la compression et à la flexion, le coefficient de conductivité thermique ainsi que la porosité en utilisant les techniques ANN et RSM. Les coefficients de corrélation des résultats des tests ANN pour la conductivité thermique et la porosité étaient respectivement de 0,9694 et 0,9933. Il a été découvert que la technique ANN était efficace pour prédire les résultats.

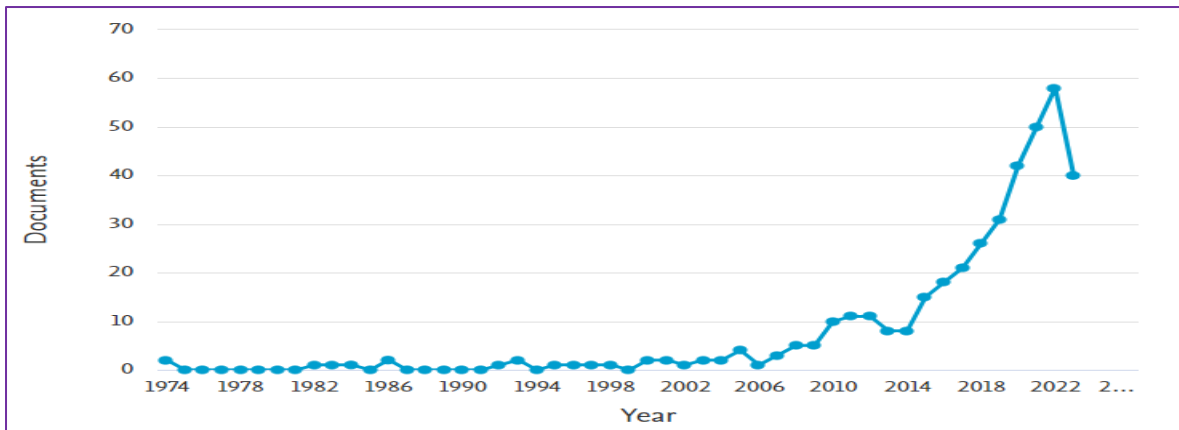
Au cours de la maintenance annuelle, les usines de W robusta en Algérie produisent des dizaines de tonnes de déchets, ce qui représente une part substantielle des déchets mis au rebut. La pyrolyse de ces déchets permet de produire du biochar. Dans cette étude, un nouveau substitut de ciment a été établi dans la production de mortiers de ciment pour produire un matériau cimentaire afin d'augmenter la quantité recyclée de résidus ligneux qui est bénéfique pour l'environnement. À la connaissance des auteurs, aucune étude antérieure n'a porté sur la fabrication de mortiers de ciment en utilisant la combinaison de biochar et de fibres végétales de robusta.

Les effets de la quantité de déchets WRW de W robusta et de sable des dunes du Sahara en Algérie, ainsi que du biochar généré par la pyrolyse de ces résidus pour produire des WRWB, sur les caractéristiques de flexion et de compression, l'absorption d'eau et la porosité des mortiers à base de ciment, sont étudiés. La nouveauté de cette recherche réside dans l'examen des caractéristiques mécaniques d'une nouvelle composition de mortier consistant principalement en une matrice de ciment incorporant des déchets WRW, du biochar WRWB et du sable de dune. Pour la première fois, des quantités de ciment allant de 0,5 % à 2 % ont été partiellement remplacées par des WRW et WRWB, qui ont été traités avec des concentrations de 4 % à 20 % de CaCO_3 pendant des durées allant de 24 à 168 heures.

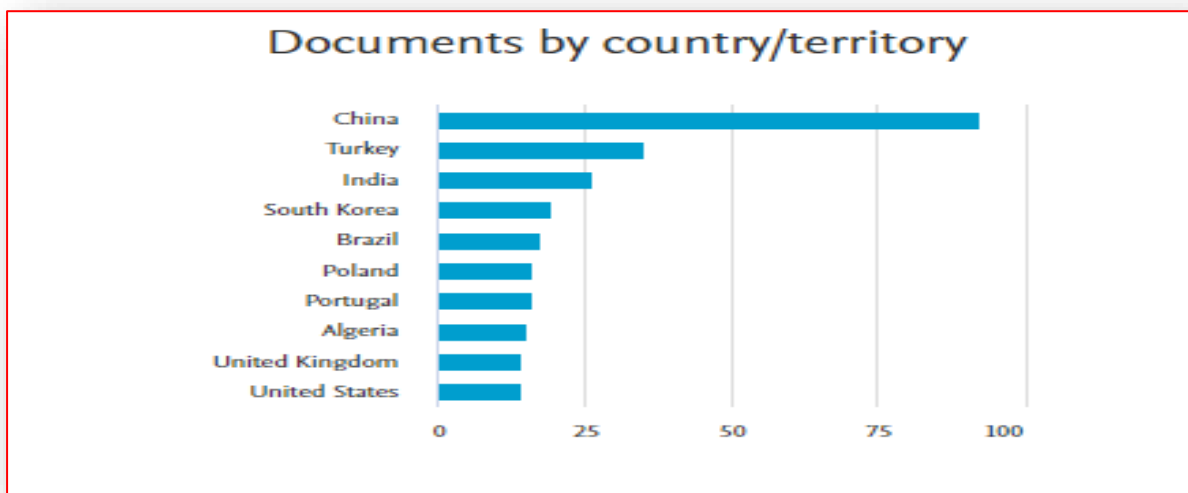
Dans ce contexte, l'utilisation des modèles ANN et RSM ajoute une dimension importante à la recherche. Ces méthodes de modélisation sophistiquées permettent d'évaluer et d'améliorer les qualités souhaitables des mortiers verts, augmentant ainsi leur acceptabilité en tant que matériaux de construction.

1.2. Analyse bibliométrique

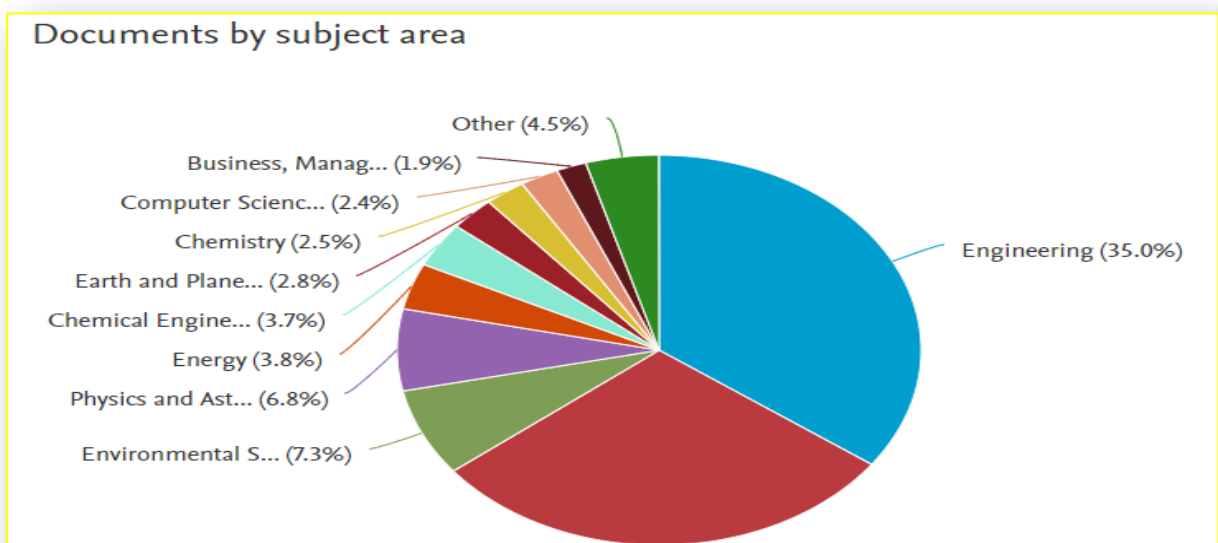
Une cartographie et une analyse bibliométrique de la littérature sur la prédiction des caractéristiques de compression et de flexion des mortiers de ciment fabriqués avec des fibres naturelles et du biochar sont présentées dans la **Figure I.1**.



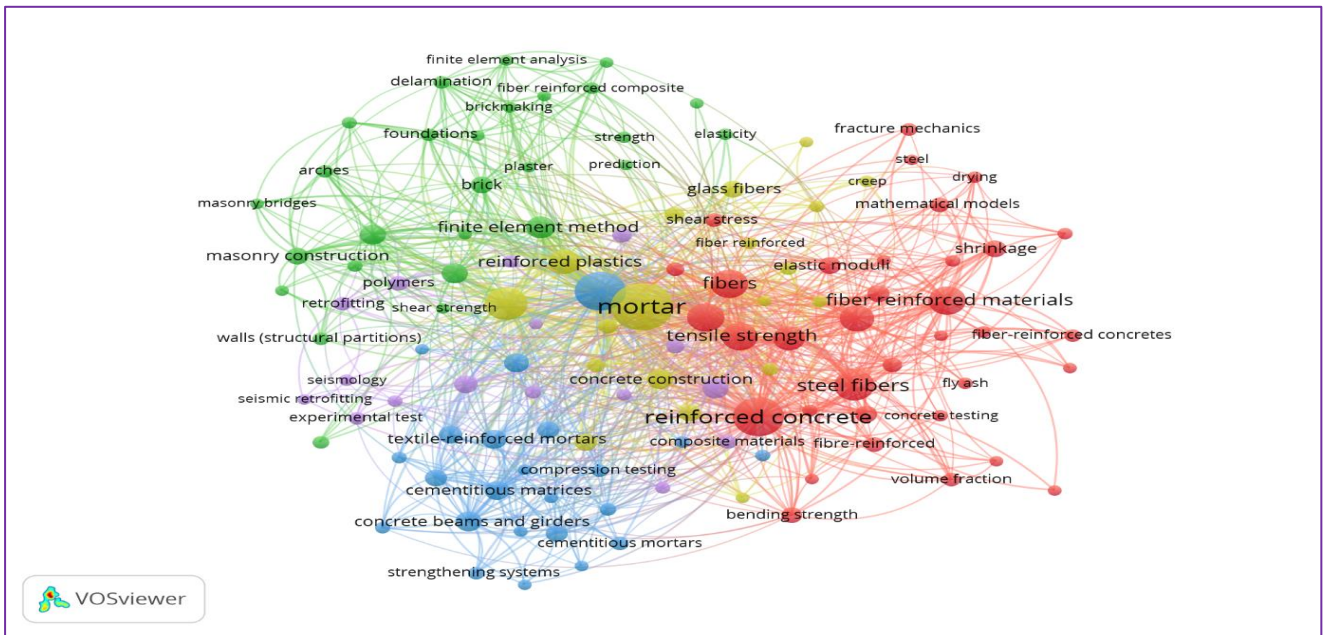
(a)



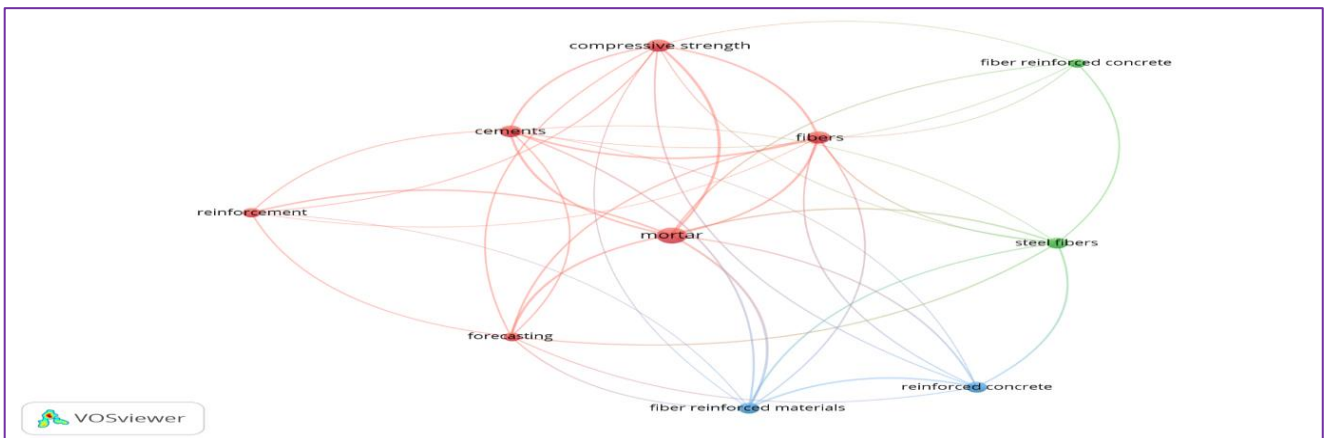
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure I.1: Visualization/mapping of studies utilizing palm oil clinker using VOSviewer. (a),(b),(c),(d),(e)

Nous avons effectué une recherche approfondie dans la base de données Scopus jusqu'en septembre 2023 en utilisant des termes clés spécifiques liés aux mortiers de ciment, aux fibres naturelles, à la prédiction et au biochar afin de recueillir des informations importantes sur les articles de recherche pertinents. VOSviewer a ensuite été utilisé pour cartographier les connexions entre les nations, les auteurs, les mots-clés et les documents afin de présenter un résumé de cette interaction fascinante entre les technologies et l'environnement.

Cette étude bibliométrique nous a permis d'obtenir une analyse approfondie des publications parues chaque année. Depuis 2018, la recherche sur la prédiction et l'optimisation des paramètres des mortiers cimentaires renforcés de fibres s'est développée, en s'appuyant sur des études qui ont débuté en 1974 sur la prédiction des propriétés de flexion et de compression.

Il a été noté que l'utilisation des fibres dans les mélanges de béton est le point central de la majorité des études sur l'optimisation des qualités du mortier[30–37]. Elles ont démontré qu'elles améliorent les qualités mécaniques des mélanges. De même, certaines recherches ont indiqué que l'utilisation de fibres naturelles ou de biochar comme alternative au ciment améliore les propriétés du béton [18, 38–42]. À l'exception de l'étude de Boumaaza et al. [43] qui ont examiné les propriétés mécaniques et physiques du mortier de plâtre renforcé avec des déchets de *Washingtonia filifera* et du biochar, l'utilisation de RSM et d'ANN dans les mortiers cimentaires utilisant une combinaison de fibres naturelles et de biochar comme renfort n'a pas reçu beaucoup d'attention dans la littérature. Ces résultats peuvent servir de base aux études, décisions et développements technologiques à venir dans les domaines de l'environnement et de l'ingénierie.

I.3 Introduction aux matériaux composites

Les matériaux composites font partie des matériaux du futur, De nombreuses recherches sont menées principalement sur le développement renouvelable et écologique, vu que les déchets provenant de différentes sources posent divers problèmes environnementaux liés à leur stockage et leurs quantités croissantes. Il est donc important de réfléchir au développement de matériaux composites avec des agrégats provenant de déchets agricoles. De ce point de vue, Au début de ce chapitre nous faisons un passage bibliographique sacré au thème choisi, nous allons présenter par la suite, dans la première partie état de l'art, les matériaux composites qui disposent d'éventualités importantes par rapport aux matériaux traditionnels ainsi que leurs avantages fonctionnels. Nous nous proposons de présenter une description des différents constituants entrant dans la mise en forme des matériaux composites, Ensuite nous nous donnant une description des matériaux composites renforcés par des fibres végétales. La connaissance de la structure et la composition chimique de chacun des constituants est nécessaire pour appréhender l'étude des interactions entre les fibres de renforts et les matrices. Enfin, la deuxième partie de l'état d'art est consacrée aux fibres végétales, pour comprendre leur structure complexe et l'origine de leur comportement, il est nécessaire donc de connaître leur microstructure et leur composition. Le développement des matériaux de constructions ; et les matériaux cimentaires renforcés par les déchets végétaux, sont présentés aussi dans cette partie.

I.4 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de plusieurs matériaux non miscibles de natures différentes, et dont les qualités complémentaires permettent des performances supérieures à celles de chacun de ses composants. Un matériau composite est alors un matériau généralement formé de deux composés principaux :

- La matrice, qui assure la liaison de l'ensemble, répartit les efforts.
- Le renfort, qui constitue l'ossature de la pièce, et supporte l'essentiel des contraintes

I.4.1 La matrice

La matrice est un liant qui maintient en place la dispersion des éléments de renfort, les protège physiquement et chimiquement et assure la liaison mécanique entre eux et, en plus, elle conditionne le choix du procédé de mise en forme. Pour ces raisons, les composites peuvent être classés suivant la nature de leurs matrices en trois groupes :

- Les composites à matrice métallique
- Les composites à matrice céramique
- Les composites à matrice organique.

I.4.1.1 Les composites à matrice métallique

Les composites à matrice métallique ont été élaborés dans le but d'améliorer les qualités des métaux en ce qui concerne la légèreté et les bonnes caractéristiques mécaniques propres aux structures composites. Plusieurs matériaux composites tels que ; l'Aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique et thermique, une bonne tenue à des températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques mais le coût de leur fabrication est très élevé. Ils sont réservés à des applications très exigeantes [44].

I.4.1.2 Les composites à matrice céramique

Ils sont employés dans les applications à très haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage. Ils présentent une très haute résistance à la température et bonne stabilité chimique mais ils sont moins répandus par rapport aux autres composites en raison du coût élevé [45]. Les composites à matrice organique sont les plus répandus et constituent la partie la plus importante aujourd'hui à l'échelle industrielle grâce au coût suffisamment réduit, cette famille regroupe des gammes de prix et de performances très étendues dont on distingue généralement deux types [44], [45] :

- Les composites à grande diffusion, peu coûteux et représentant près de 95% des composites à matrice organique fabriqués, utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées.
- Les composites à haute performance, plus coûteux mais présentant des qualités mécaniques supérieures, notamment employés dans l'aéronautique, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle.

Les composites à matrice organique sont généralement constitués d'une matrice de résine et d'un renfort de fibres. Les deux types de résines qui sont, actuellement, utilisées présentent des propriétés profondément différentes [46].

I.4.2 Résines :

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes [47]. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur **la figure I.2**.

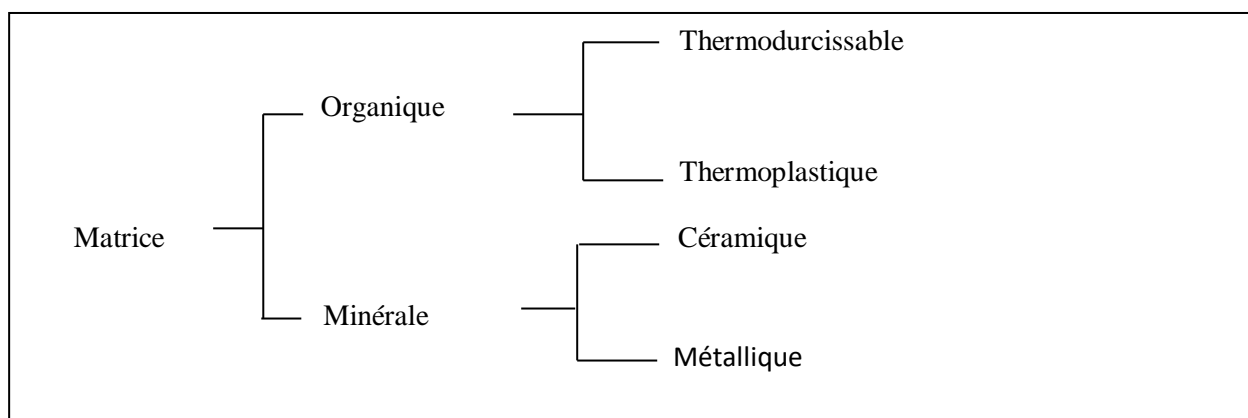


Figure I.2 : Types de matrice [47].

I.4.2.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension

dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556.

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible [47]. Ces caractéristiques sont présentées dans le **tableau I.1**:

Tableau I.1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables

résines	T_f (c °)	ρ (kg/ m ³)	ϵ_t^R (%)	σ_t^R (MPa)	σ_t^R (MPa)	E(GPa)
polyesters	60 à 100	1140	2 à5	50 à 85	90 à 200	2 ,8 à 3,6
phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
epoxydes	290	1100 à1500	2 à5	60 à 80	250	3 à 5

I.4.2.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible présentées dans le **tableau I.2**.

Tableau I.2 : Caractéristiques des résines thermoplastiques.

résines	T_f (c °)	ρ (kg/ m ³)	ϵ_t^R (%)	σ_t^R (MPa)	σ_t^R (MPa)	E(GPa)
polyamide	65 à 100	1140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypropylène	900	1200		20 à 35		1,1 à 1,4

I.4.2.3 La différence entre les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables

La différence essentielle entre ces deux types de polymères est la nature des phénomènes physiques assurant leur cohésion. Les thermoplastiques sont constitués de longues molécules linéaires, maintenues

entre elles par des liaisons physiques de faible énergie (liaisons hydrogène ou de Van der Waals, (**Figure I.3a**)) ; ces liaisons se cassent lorsque l'on chauffe le polymère et se rétablissent lorsqu'on le refroidit, de façon réversible.

A l'inverse, les thermodurcissables sont des molécules en forme de réseaux tridimensionnels, maintenus par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes (**Figure I.3b**)) établies de manière irréversible lors de la polymérisation. [44]



Figure I.3 : Structures moléculaires (a) d'un polymère thermoplastique, (b) d'un polymère thermodurcissable. [44].

Cette différence fondamentale est à l'origine de propriétés bien distinctes. Voici quelques différences [44] , [48]. Les thermoplastiques sont moins rigides et moins résistants que les thermodurcissables (mais cela importe peu sur les composites à fibres longues, car la rigidité et la résistance proviennent essentiellement des fibres). De manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées que les thermoplastiques en raison de leur plus grande facilité de mise en forme (il est plus facile d'imprégner des fibres avec un liquide qu'avec des granulés ramollis, et les températures à utiliser sont souvent plus raisonnables).

I.4.3 Additifs :

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques (charges renforçantes, ex : charges sphériques creuses 5 à 150 μm). Des charges non renforçantes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites [47] .

I.4.4 Renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée.

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tridirectionnel ou plus) [47]. La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la **figure I.4**.

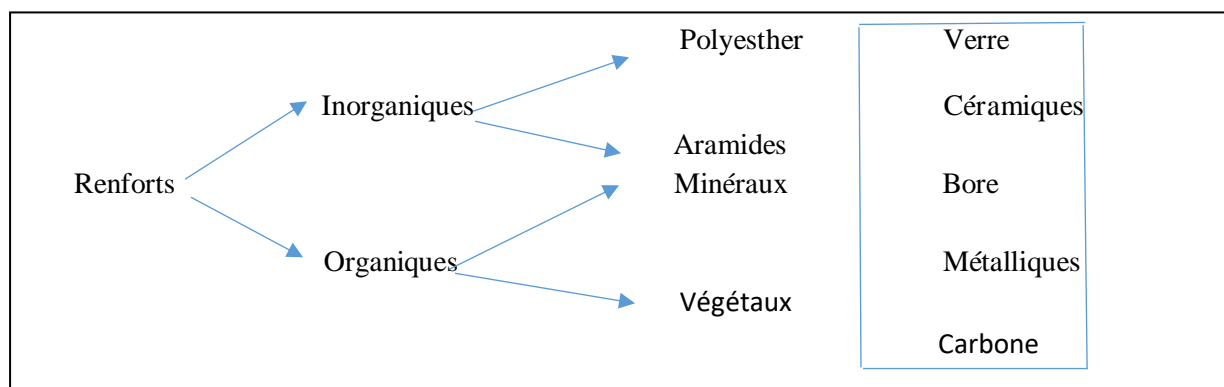


Figure I.4 : Types de renforts [47]

I.5 Classification des composites par la taille des particules de renfort

Dans cette classification, **La figure I.5** représente un organigramme de classification des composites selon Callister, il est important de noter que sous la famille “structuraux” (matériaux obtenus par assemblage multicouches: sandwich et/ou stratifiés), on peut retrouver les 2 premières familles : “renforcés par des particules”, “renforcées par des fibres”.. Les particules désignent ici des éléments qui vont renforcer le matériau mais qui n’ont pas la caractéristique principale d’une fibre à savoir une très grande longueur. Ensuite, le terme « Fibres alignées » va signifier un renfort composite utilisant un placement de fibres de type de tissu ou unidirectionnel. Les matières fibreuses utilisées peuvent être des filaments, des faisceaux de fibres constitués de filaments réunis ou des filés de fibres courtes.

Enfin, le terme “fibres discontinues” désigne un renfort réalisé à partir de fibres de longueurs déterminées (1 à 100 cm) généralement courtes (inférieure à 10 cm). Ces fibres ne sont pas assemblées préalablement les unes aux autres dans un fil. Elles peuvent soit être directement mélangées dans une matrice, soit liées un matelas de fibres que l’on nomme « Mat » ou « nontissé » [49].

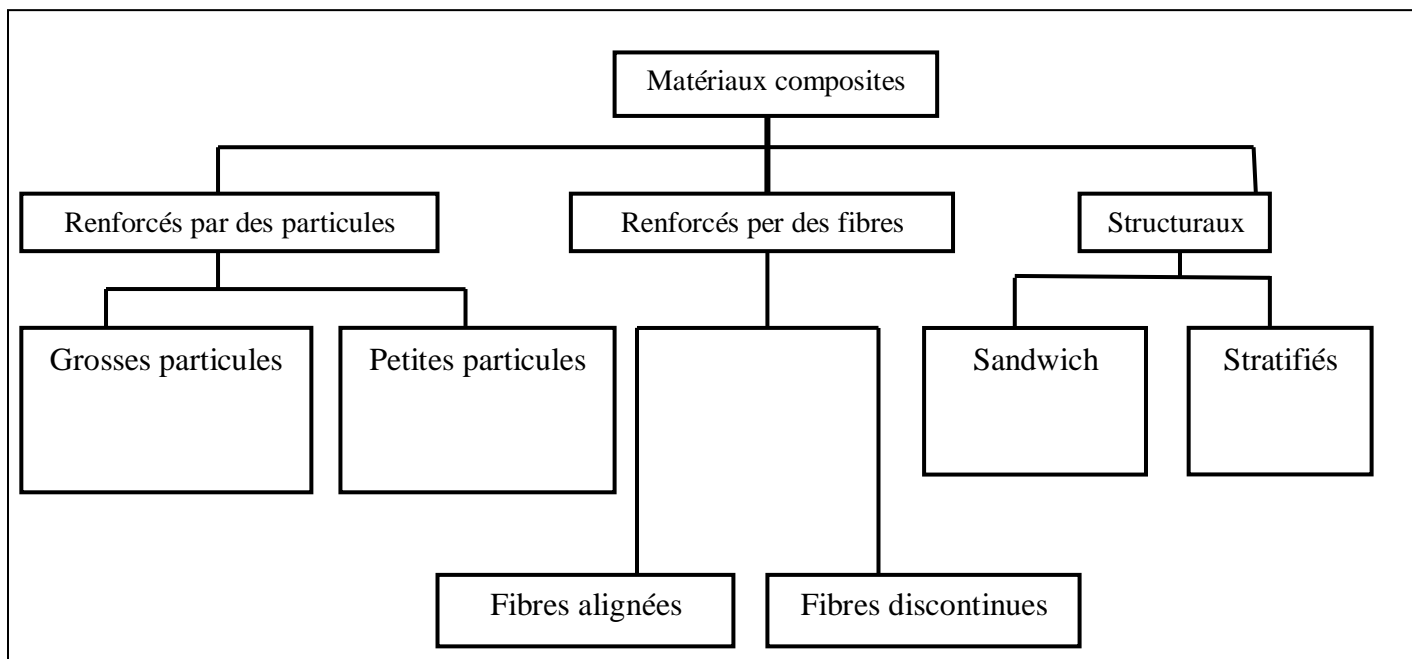


Figure I.5 : Classification schématique des différents types de composites [49]

Sur la **figure I.6** ; ci-dessous, nous avons représenté une illustration de ce que pourrait être des composites selon la nomenclature.

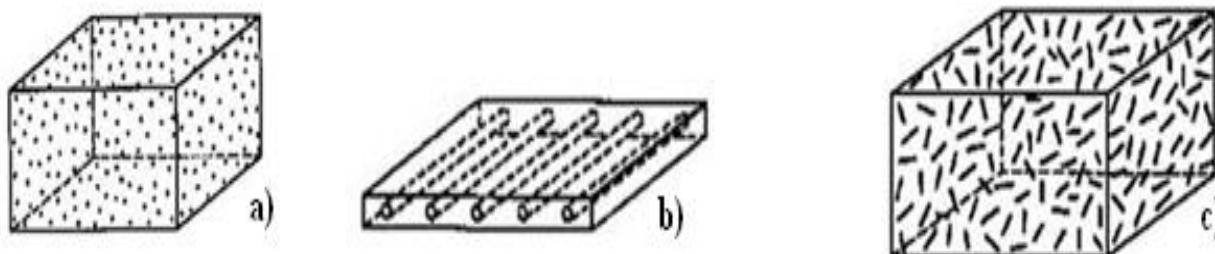


Figure I.6 : Illustration de composite selon la nomenclature [50,51]:

a) Particules, b) Fibres alignées, c) Fibres discontinues)

I.6 Classification des composites par le type de matrice

Un deuxième type est la classification selon la matrice. Dans ce cas, on distingue également 3 grandes familles de composites : Les CMO (matrices organiques thermodurcissables et thermoplastiques), les CMC (matrice céramique) et les CMM (matrice métallique). Le choix du renfort fibres, éventuellement d'une charge et d'une interface, doit être fait en fonction de la matrice et du procédé de fabrication de la pièce. Les composites organiques (CMO) sont les composites les plus courants en termes de volumes.

I.7 Classification par marché

On retrouve souvent la distinction suivante par laquelle les matériaux sont classés en fonction de leur marché :

-Les composites de grande diffusion (GD). Ce sont des composites peu coûteux (< 10 à 40 €/kg) qui occupent une large part de marché. On les trouve dans l'industrie du bâtiment, le transport nautique, les piscines, les équipements électriques.

-Les composites hautes performances (HP), ce sont des composites assez onéreux, dont le marché est encore réduit pour les applications aérospatiales, transports, sports de compétition (coût > 40€/kg) [49].

I.8 Les biocomposites

Depuis peu d'années, on trouve une nouvelle classe de matériaux que l'on nomme "biocomposites". Il existe d'autres appellations proches comme "éco-composites" et "agrocomposites" qui s'inscrivent également pleinement dans les concepts émergents de chimie verte et de chimie durable. Ces matériaux doivent être fabriqués impérativement à partir de ressources naturelles plus ou moins transformées mécaniquement et/ou chimiquement. Les biocomposites sont ainsi composés dans le principe de renforts généralement en fibres naturelles et d'une matrice également issue préférentiellement de la biomasse. Cette famille de composites, les "biocomposites" est le fond de cette thèse.

I.8.1 Matériaux composites à bases de fibres naturelles

Depuis longtemps, on associe les fibres végétales à des matériaux de construction. L'homme les utilise depuis des milliers d'années ; très tôt, on a mélangé de la paille avec de l'argile pour élever des parois. En Chine, il y a 2000 ans, les premiers papiers étaient à base de chanvre et de mûrier. Mais depuis peu, les industriels portent un intérêt à ces fibres comme moyen de remplacement des fibres de carbone ou de verre. Il existe une grande variété de fibres naturelles présentée dans la **Figure 1.7**, ces fibres naturelles contiennent essentiellement de la cellulose, de l'hémicellulose et la lignine. En simplifiant, une fibre est un matériau composite multicouche dont la lignine serait la matrice. Leur composition dépend des conditions de croissance, de l'âge des végétaux, des conditions climatiques et d'autres facteurs.

D'une manière générale, l'utilisation de fibres naturelles comme renforts de matériaux composites se justifie pour valoriser une ressource locale dans des pays industrialisés ou peu industrialisés.

Les fibres naturelles sont produites et se recyclent naturellement sur terre depuis des millions d'années (matériaux biodégradables et renouvelables par culture). Le choix des fibres provenant d'un milieu

naturel et présentant des performances mécaniques intéressantes est guidé par leur origine, leur fonction et leur disponibilité : une fibre naturelle est considérée comme disponible si le volume de fibres présent sur le marché est suffisant pour réaliser une production industrielle. Bien que les matériaux composites soient souvent présentés comme originaux et innovants, le milieu naturel en offre déjà un large panel, que ce soit dans le monde végétal ou dans le monde animal. Une multitude de matériaux naturels, les uns rigides mais légers, comme les coquilles de noix, et les autres souples mais résistants, comme le bois, doivent leurs propriétés mécaniques à leur structure composite.

Un matériau est dit biodégradable s'il est totalement décomposé par des microorganismes (des bactéries par exemple). Les fibres naturelles sont biodégradables et doivent le rester à la suite des traitements qu'elles subissent pour une application de renfort d'un matériau composite (la vitesse de dégradation peut être modifiée). Le résultat de cette décomposition est la formation d'eau, de dioxyde de carbone et/ou de méthane et éventuellement de sous-produits non toxiques pour l'environnement. Ces fibres sont considérées comme neutres vis-à-vis des émissions de CO_2 dans l'atmosphère puisque leur combustion ou leur biodégradation ne produit qu'une quantité de dioxyde de carbone égale à celle que la plante a absorbé pendant sa croissance.

Les objets en composites à fibres naturelles sont donc plus faciles à recycler et, si leur matrice est biodégradable (bio polymères), ils sont compo-stables après broyage [52].

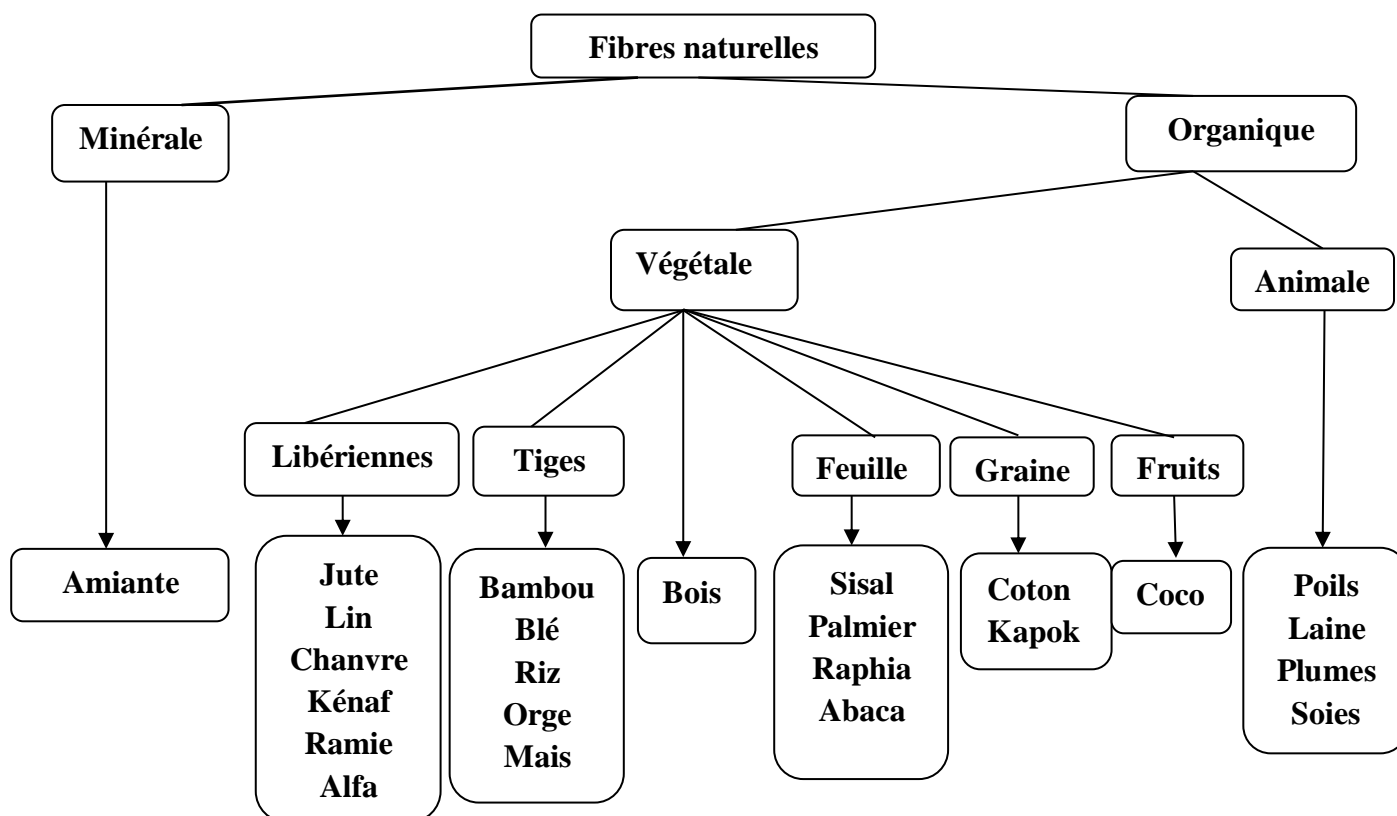


Figure 1.7 : Différentes fibres naturelles : animales, végétales et minérales [52]

I.8.2 Facteurs influant sur les propriétés des matériaux composites

Le renforcement des matériaux composites par des fibres végétales est conditionné par les paramètres suivants : Influence de la nature et dosage des constituants, la dispersion et l'orientation de la fibre, interface fibre/matrice et influence de la morphologie [53].

I.8.2.1 Influence de la nature et dosage des constituants

Il est essentiel de rechercher le dosage idéal des renforts dans une matrice suivant leur nature, dimension, etc..., dans le but d'améliorer sa rigidité. Une trop grande quantité de renforts diminue l'adhésion ce qui conduit à une baisse de performances.

D'après la littérature, il est assez peu fréquent de trouver des composites contenant un pourcentage de fibres supérieur à 50-60%, sans qu'il y est une influence néfaste sur les caractéristiques mécaniques des composites et leur mise en oeuvre. D'après les recherches, un taux supérieur à 50% de fibres, donne des matériaux rugueux avec des surfaces présentant des ruptures à de faibles charges [53], [54].

I.8.2.2 La dispersion et l'orientation de la fibre

Les propriétés physico-mécaniques du matériau composite sont influencées par plusieurs facteurs y compris la dispersion du renfort dans les matrices qui conduit à un mélange plus ou moins homogène des composants. Les fibres qui ont tendance à se regrouper et à s'agglomérer créent des hétérogénéités. L'orientation des fibres génère une anisotropie, qui détermine des axes forts pour le produit final.

Par ailleurs, les dimensions et l'orientation des fibres dans une matrice, sont des facteurs déterminants. Pour un résultat optimal, et pour obtenir un renforcement maximal et un meilleur comportement des matrices [53, 55].

I.8.2.3 Interface fibre/matrice

Les interactions échangées entre le renfort et la matrice déterminent les performances d'un composite. Celles-ci sont conditionnées par les propriétés intrinsèques des matériaux constitutifs et dépendent également très étroitement de l'adhésion. Parmi les critères responsables de l'interface fibre/matrice, nous pouvons citer [53], [56].

- 1-La nature et la composition du renfort ainsi que l'influence du taux et de la taille du renfort ;
- 2- La nature de la matrice ;
- 3- Les forces d'interaction renfort/matrice, et la mouillabilité du renfort par la matrice.

I.8.2.4 Influence des dimensions

Les dimensions des fibres végétales sont un élément clef déterminant leurs propriétés mécaniques. Parmi les éléments morphologiques on peut citer :

- La taille des renforts qui a une grande influence sur les propriétés mécaniques du composite ainsi que le procédé de fabrication [53] , [57]. Les fibres courtes résistent mieux aux contraintes en traction que les fibres longues qui ont plus de chance de contenir des défauts de formation [53], [58] ,
- Le facteur de forme L/D est un paramètre important. Il a été prouvé par des études consacrées à la morphologie des renforts (farines, particules et fibres) que pour des facteurs de forme inférieurs à 10, les renforts se comportent comme charges, au-delà, les renforts confèrent des caractéristiques mécaniques améliorées [53], [59]. On distingue trois grandes familles : les fibres inorganiques obtenues par fusion ou pyrolyse, les fibres chimiques (synthétiques + artificielles) issues de ressources fossiles ou de la biomasse et les fibres naturelles [60].

Comme nous l'avons déjà évoqué les contraintes environnementales et économiques orientent les marchés vers les fibres naturelles disponibles et renouvelables et à faible impact environnemental. Dans ces fibres, les fibres animales et le coton pour les fibres végétales sont majoritaires et plus destinées au textile / habillement, tandis que les autres fibres végétales et en particulier les fibres des plantes à tiges vont se retrouver dans des applications plus techniques. Ces fibres de plantes à tiges (lin, chanvre ou jute) devant assurer un rôle de maintien de la plante, possèdent des caractéristiques, notamment de rigidité, appréciables pour la réalisation de matériaux composites TD et TP [49].

I.9 Origines des fibres naturelles :

Les fibres naturelles sont subdivisées en fonction de leurs origines, venant de plantes (cellulosique), d'animaux (protéinique) ou de minéraux (amiante) [61]. La classification des différents types de fibres naturelles est présentée précédemment dans la **figure 1.7** , Les fibres végétales proviennent de différentes sources ; elles sont issues de déchets de bois, de déchets de palmiers, de résidus agricoles et de différentes parties des plantes à fibre : de tiges (kénaf, jute, lin, ramie, etc.), de feuilles (sisal, abaca, paille de graminées, etc.), de fruits (noix de coco) et de graines (coton, kapok, etc.) [44].

L'utilisation des fibres végétales comme renfort remonte à la période des briques renforcées par les pailles, Actuellement les fibres végétales sont en train de pénétrer le secteur industrielle pour fabriquer des composites plus performés et moins coûteux grâce aux avantages présentés par ces fibres naturelles par rapport aux fibres traditionnellement utilisées dans les composites, parmi ces avantages on trouve la

faible densité, le faible coût, la capacité acoustique, la faible conductivité thermique, les bonnes propriétés mécaniques spécifiques et surtout la disponibilité et le renouvellement.

Il existe toutefois quelques inconvénients de renforcer avec les fibres naturelles ; en plus de leur capacité d'absorption d'eau et leur faible résistance au feu (200-230°C). La biodégradabilité des fibres est un avantage mais également un inconvénient. C'est un avantage du point de vue de la recyclabilité, mais lorsque ces fibres sont introduites dans des matrices, elles peuvent être dégradées à long terme par les micro-organismes présents dans le milieu ou par la basicité de ce dernier [44].

I.9.1 Définition d'une fibre végétale :

Le terme " Fibre " se rapporte à un corps solide flexible, de nature variable, des formes pratiquement cylindriques. Elles se distinguent soit par leur nature (métallique, minérale, végétale et synthétique), soit par leur dimension (macro ou micro-fibres), par leur forme (droites, ondulées, crochetées aux extrémités...etc.) et bien évidemment par leurs propriétés mécaniques. Elles sont réparties dans la matrice d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle [53].

I.9.2 Structure des fibres lignocellulosiques

D'un point de vue cellulaire dans une fibre lignocellulosique ci montrée dans la **figure 1.8** ; une lamelle moyenne assure la cohésion entre les cellules et confère à la fibre ses propriétés de rigidité. On distingue une paroi primaire très fine et une paroi secondaire beaucoup plus dense et résistante. La paroi secondaire est subdivisée en trois couches notées S1, S2 et S3. Elle est constituée essentiellement de micro-fibrilles de cellulose alignées parallèlement et dispersées en hélices. Les couches S1, S2 et S3 vont fournir à la fibre sa résistance à la traction et à l'écrasement. Enfin, le lumen est la cavité au centre de la fibre qui va permettre la circulation de la sève [53].

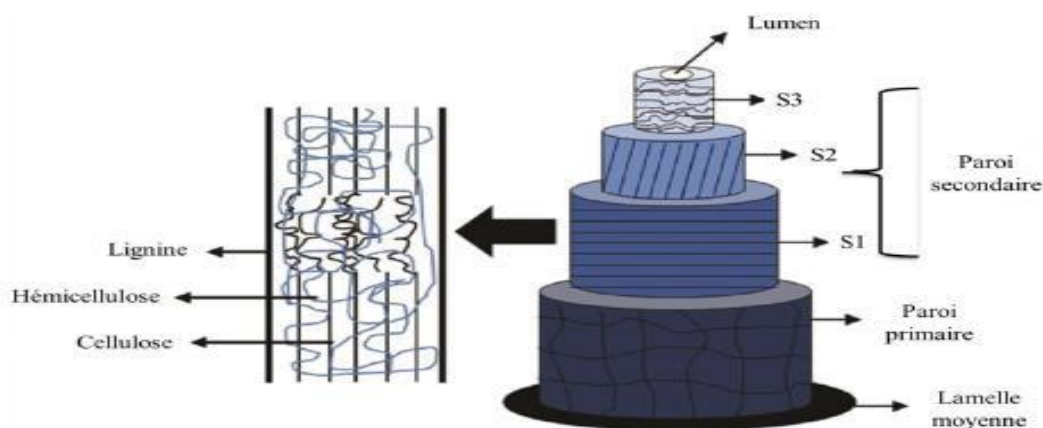


Figure 1.8 : Représentation schématique de la paroi cellulaire [53].

I.9.3 Morphologie d'une fibre végétale

Une fibre végétale est considérée comme étant un matériau composite dont le renfort est assuré par des fibrilles de cellulose. La matrice est principalement composée d'hémicelluloses, de pectines et de lignine.

Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice suivant un angle nommé angle microfibrillaire présenté dans **la figure I.9**, dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres, plus que l'angle des microfibrilles augmente, le module d'Young décroît, tandis que l'extensibilité des parois augmente [53].

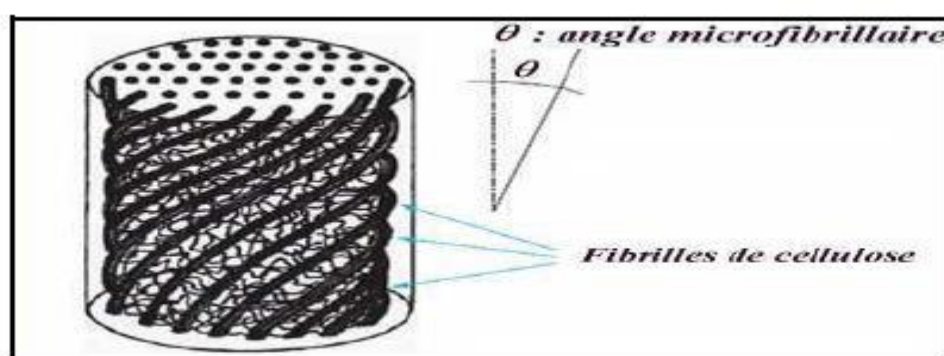


Figure I.9: Modèle de description de la structure d'une fibre végétale [53].

I.9.4 Critères de classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées selon les critères suivants :

a- L'organe de la plante : Les fibres végétales peuvent être classées suivant l'organe de la plante dont elles sont issues. Nous distinguons :

- Les fibres issues des tiges comme le kénaf, le jute, le lin, l'Alfa et le Diss, etc...
- Les fibres issues des feuilles comme le sisal, la paille de graminée et le Palmier, etc...

b- Leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine : Deux catégories de fibres se distinguent selon leur teneur en holocellulose et en lignine :

- Les fibres ligneuses dures et rigides provenant de végétaux ligneux tels que le bois d'oeuvre, les déchets de l'industrie du bois.
- Les fibres non ligneuses douces et souples, issues de végétaux non ligneux, moins riches en lignine tels que le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin, etc...

c- Leur longueur : En fonction de la longueur, les fibres végétales sont groupées comme suit : - Fibres longues, dites libériennes, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles assez douces,

tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides grâce à leur richesse en lignine [53],- Fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues.

I.9.5 Rôle des fibres

Les raisons fondamentales de l'emploi des fibres comme renfort tiennent à leur bonne contrainte à la rupture. Les fibres incorporées dans une matrice ont pour rôle d'augmenter la résistance à la traction de la matrice et limiter la propagation des microfissures. Elles peuvent également dans certains cas renforcer la structure ou remplacer les armatures passives. En général, les fibres permettent aussi une meilleure répartition des contraintes mécaniques. L'incorporation de fibres a pour effet d'augmenter la ductilité de la matrice et donc ses caractéristiques post-fissurations. De plus, les fibres peuvent améliorer la résistance à la flexion, torsion, cisaillement, aux impacts et à la fatigue. Une matrice fibrée continue permet de supporter les efforts après l'apparition de fissures. L'amélioration des résistances précédemment citées est fonction de la teneur, de la nature, de la taille et du mode de traitements que les fibres utilisées ont subi. Il est important de souligner qu'une répartition uniforme des fibres dans le mélange est une condition essentielle pour améliorer les caractéristiques mécaniques de la matrice fibrée. Selon le type utilisé, les fibres permettent également de mieux contrôler la propagation des fissures et leur ouverture [53].

I.9.6 La composition chimique des fibres végétales

Les fibres végétales sont des fibres ligno-cellulosiques composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine, et en proportions relativement faibles d'extractibles non azotés, de matière protéique brute, de lipide et de matière minérale. Les proportions de ces différents constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [44].

I.9.6.1. Cellulose

La cellulose est une macromolécule formée de longues chaînes de polymères linéaires non ramifiées dont le motif de base est le glucose $C_6H_{12}O_6$ (**Figure I.10**). Le motif de répétition est le dimère cellobiose (**Figure I.11**). Le nombre de motifs de répétition ou le degré de polymérisation varie suivant l'origine de la cellulose.

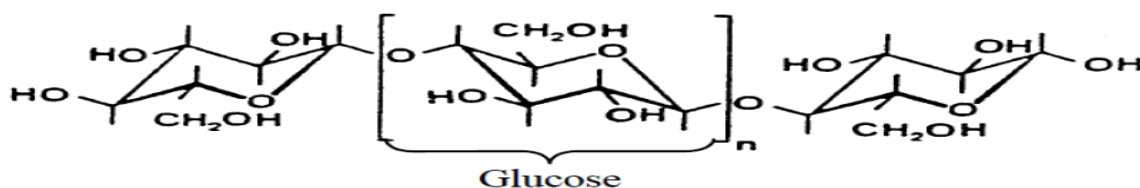


Figure I.10 : Structure chimique de la cellulose [44].

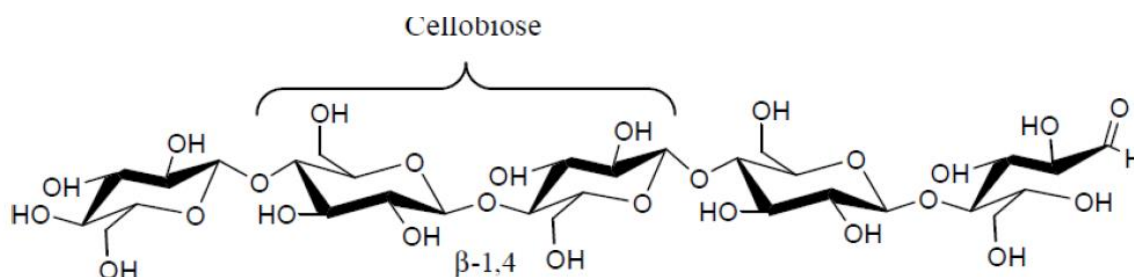


Figure I.11 : Molécule de cellulose (n répétitions du motif cellobiose) [44].

La cellulose est un polymère qui possède une structure fibrillaire partiellement cristalline (**Figure I.12**) les microfibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées

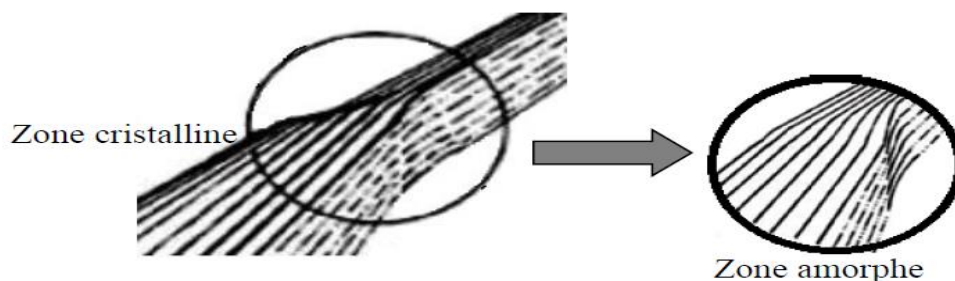


Figure I.12 : Représentation des micro-fibrilles constituant les fibres de cellulose[44].

Dans la zone cristalline, les chaînes cellulosiques sont disposées parallèlement les unes aux autres, liées par des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène qui se développent entre les chaînes, elle contribue à la force et à la rigidité de la fibre. Les interactions moléculaires sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs. Grâce à sa grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. La cellulose est de nature très hydrophile. Le remplacement d'une partie des interactions inter-chaînes par des liaisons hydrogènes entre la cellulose et l'eau provoque une plastification du matériau et donc une diminution de ses caractéristiques

mécaniques. La cellulose contribue à la force et à la rigidité de la fibre grâce à ses chaînes fortement orientées ,Zone cristalline, Zone amorphe [44].

I.9.6.2 L'hémicellulose

L'hémicellulose diffère de la cellulose dans la composition chimique, par son degré de polymérisation, ainsi que par la ramification des chaînes moléculaires. Elle est formée de monosaccharides et d'acides de sucre (les pentoses, les hexoses, les acides hexuroniques et les désoxy-hexoses), (**Figure 1.13**). Son poids moléculaire est beaucoup inférieur à celui de la cellulose. L'hémicelluloses constitue une classe de polymères très variés solubles dans l'eau et pouvant être extraits de la paroi des cellules végétales par des solutions alcalines. L'hémicellulose est hydrophilique et est attachée à la surface de cellulose via des liaisons hydrogènes. Elle a aussi des liaisons fortes avec la lignine. L'hémicellulose est responsable de la biodégradation, de l'absorption d'humidité, et de la dégradation thermique de la fibre [44].

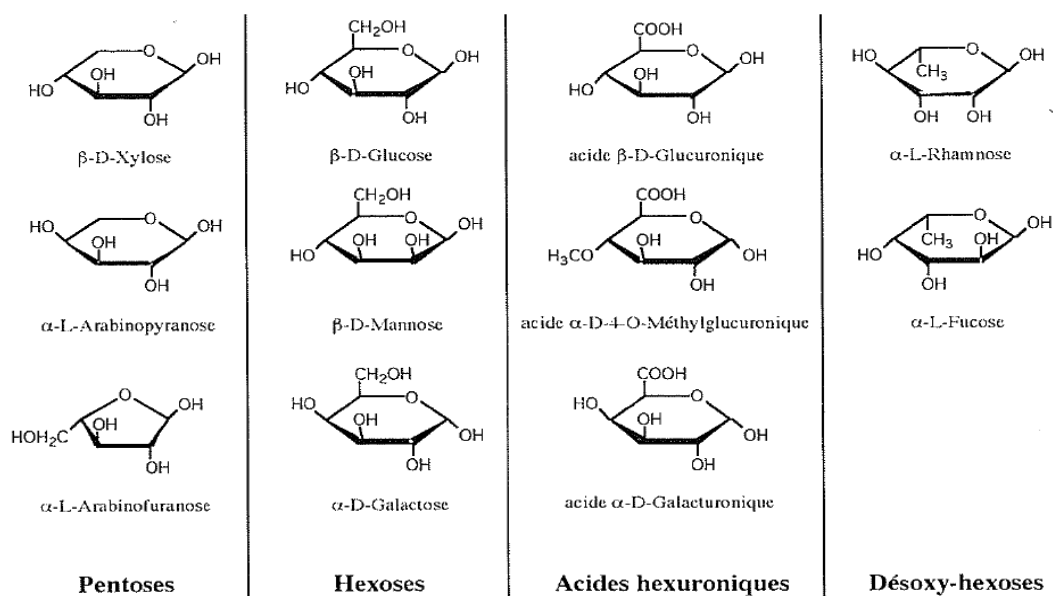


Figure I.13 : Formules chimiques des principaux monosaccharides des hémicelluloses[44].

I.9.6.3. La lignine

La lignine est une molécule complexe tridimensionnelle, non aromatique cristalline, sa structure moléculaire n'est pas encore précisément connue. Cependant les précurseurs de la lignine, les alcools p-hydroxycinnamylique (p-coumarylique, conifrylique et sinapylique), (**Figure I.14**), sont très bien connus grâce à des études au ^{14}C . Leurs proportions varient selon l'espèce végétale et la localisation au sein de la paroi. En effet, la nature de la lignine dans les différentes parties d'une même plante peut être

différente. La lignine est hydrophobique, elle entraîne une résistance à l'eau et fournit la dureté et la rigidité à la cellule de la fibre végétale. La Lignine est peu sensible à la dégradation biologique, elle crée une barrière morphologique à la pénétration et à la progression des agents pathogènes, et contribue à la protection naturelle des végétaux contre certaines attaques parasitaires.

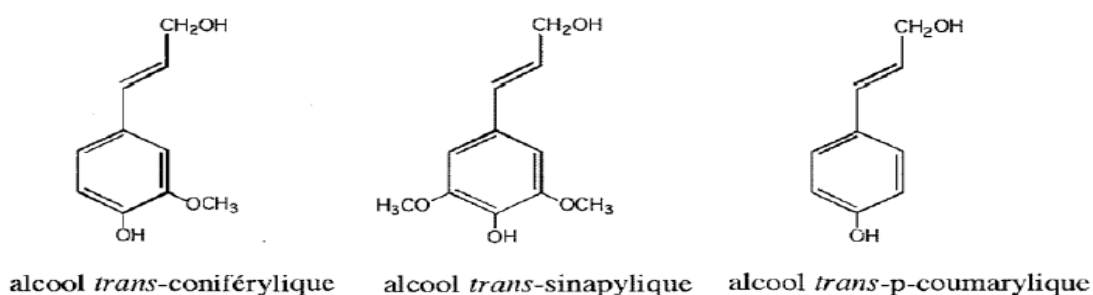


Figure I.14: Formules chimiques des principaux constituants de la lignine. [44].

I.9.6.4 Les pectines

Les pectines sont des polymères de polysaccharides acides, composées d'une chaîne principale d'acide uronique et qui consistent essentiellement en l'acide de polygalacturon (**figure 1.15**). La pectine est soluble dans l'eau seulement après une neutralisation partielle par alkali ou hydroxyde ammonium.

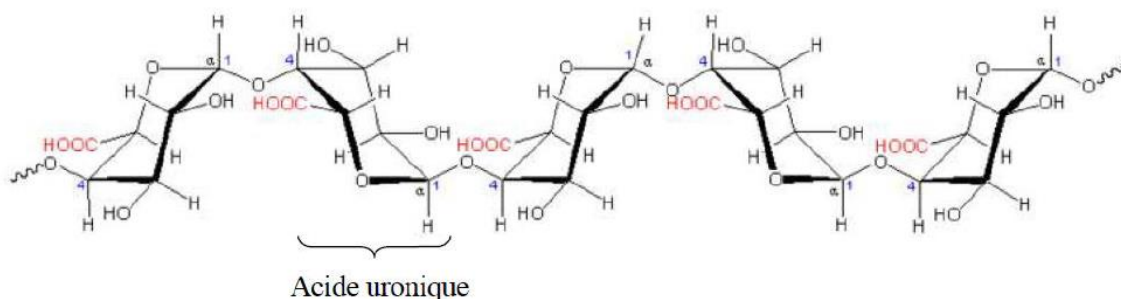


Figure I.15 : Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique [44].

I.9.6.5 Extractifs

Les extractifs ne font pas partie intégrante de la paroi cellulaire de la fibre végétale, ils sont responsables de sa couleur et de son parfum. Les extractifs sont facilement éliminés par des solvants naturels. Ils comprennent plusieurs substances chimiques différentes comme certaines graisses, composés aromatiques, huiles volatiles, alcools à haut poids moléculaire et acides gras. Les extractifs ne contribuent pas aux propriétés mécaniques de fibre végétale mais ils lui augmentent sa résistance contre la dégradation et contre les attaques des insectes.

I.9.6.6 Les cires (waxes)

Les cires constituent une partie de la fibre qui peut être extraite avec les solutions organiques. Ces matériaux cireux sont composés de différents types d'alcools qui sont insolubles dans l'eau et aussi dans quelques acides.

Les fibres végétales sont elles-mêmes des matériaux composites renforcés par des fibres de cellulose dans une matrice amorphe d'hémicellulose et pectine qui est associée par liaisons hydrogène et covalentes à la lignine (**Figure I .16**) [44].

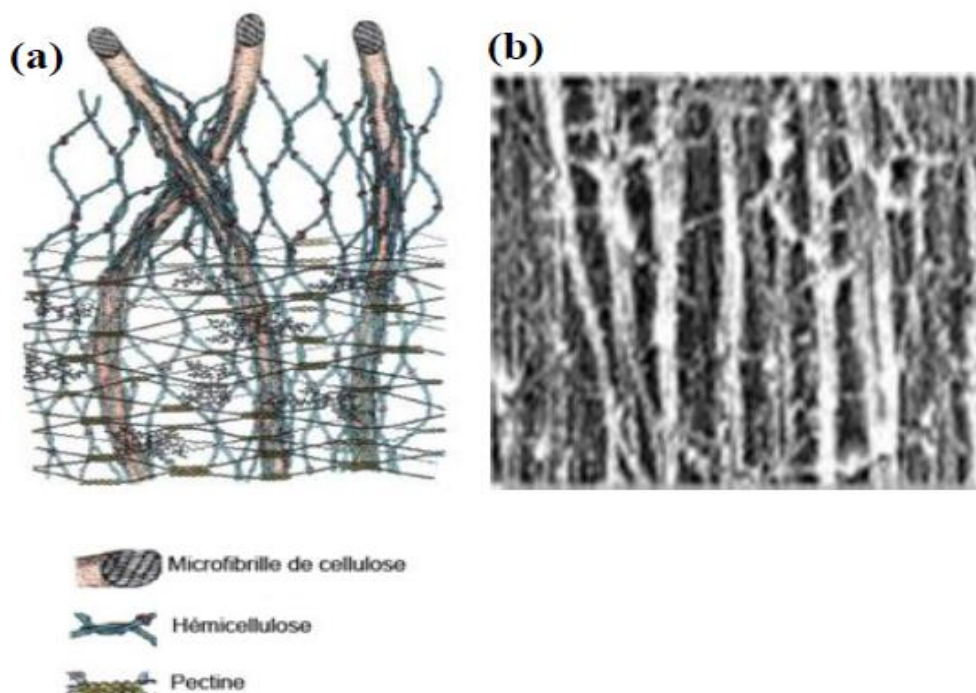


Figure I.16 : Structure tridimensionnelle de la paroi primaire : (a) schéma tridimensionnelle , (b) photo MEB de la paroi végétale (biologie et multimédia) [44].

Les proportions cellulose-hémicellulose-lignine des fibres végétales sont très variables d'une espèce à l'autre. Dans la même espèce, ces proportions dépendent de l'organe de provenance des fibres, de l'état de maturité et de l'environnement de croissance des plantes. La composition chimique moyenne de différentes fibres végétales est donnée dans le tableau suivant :

Tableau I.3 : Composition chimique des fibres végétales [44] .

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	56 -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

I.9.7 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

La variabilité dans les proportions des constituants chimiques des fibres végétales implique une variabilité des propriétés physico-mécaniques des fibres végétales. Plusieurs travaux ont montré que les fibres végétales ont des propriétés mécaniques variées, à l'intérieur même d'une espèce donnée. Cette variation de propriétés représente un des inconvénients des fibres végétales en comparaison aux fibres synthétiques. Les propriétés mécaniques et la structure des fibres végétales sont influencées par quelques conditions de croissance et varient selon l'habitat, le climat et l'âge de la plante. Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, son porosité, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, à la rupture et par le module d'élasticité. Le **tableau I.4** montre la variation des propriétés physico-mécaniques de différentes espèces de la fibre végétale[44].

Tableau I.4 : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales

Fibre	Densité(g /cm³)	Allongement(%)	Résistance en traction (Mpa)	Module d'élasticité (GPa)
Cotton	1.5 -1.6	7.0 – 8.0	287 – 597	5.5 -126
Jute	1.3	1.5 – 1.8	393 -773	26.5
Flax	1.5	2.7 – 3.2	345 -1080	26.7
Chanvre	1.4	1.6	900 -938	10 -25
Ramie	-	3.6 – 3.8	400 – 938	61.4 -128
Sisal	1.5	2.0 -2.5	511 – 635	9.4 -22.0
Coco	1.2	30.0	150 -175	4.0 – 6.0

On constate que les propriétés mécaniques des fibres dépendent fortement de leurs compositions chimiques. De plus, chaque fibre présente une composition chimique et des propriétés physiques et mécaniques différentes des autres, c'est pour cela que le comportement de chaque fibre végétale intégrée à une matrice en tant que renfort est spécifique [61].

I.9.8 Caractéristiques thermiques et acoustiques des fibres végétales

Les propriétés thermiques des fibres végétales, sont très importantes. En effet, la dégradation thermique est un facteur limitant des procédés de fabrication à chaud des composites. La plupart des fibres végétales perdent de leur rigidité dès 160°C et on voit la lignine se dégrader aux alentours de 200°C. Néanmoins, la destruction de l'ordre cristallin n'apparaît qu'au-dessus de 320°C par agitation thermique des molécules.

La conductivité thermique des fibres végétales est faible, celles-ci possèdent les caractéristiques d'un bon isolant. La densité et la porosité sont les facteurs influençant de façon prédominante les transferts de chaleur, ceux-ci sont aussi influencés par la conduction via la paroi cellulaire et par la teneur en humidité de la fibre végétale.

Les capacités acoustiques font aussi partie des avantages de l'utilisation de fibres végétales comme renfort, elles leur donnent une bonne qualité pour le renforcement des composites à des applications qui nécessitent l'isolation phonique[44].

I.10 Présentation de quelques fibres végétales

I.10.1 Fibre de lin

Le lin (*Linum usitatissimum*) (**Figure I.17**), la plus ancienne fibre textile au monde, a été cultivé depuis l'antiquité dans le but de confectionner des tissus et des cordages (Figure18), jusqu'à son apogée au 17^e siècle. Bien qu'ayant subi la concurrence du coton au 19^e siècle, le lin reste cultivé dans de nombreuses régions du monde. Avec le chanvre, le lin est la plante à fibres la plus cultivée en Europe. 80% de la production mondiale de lin est européenne.

Le lin cultivé est une plante dicotylédone annuelle de la famille des linacées. Il en existe de multiples variétés. Elle est constituée d'une tige non ramifiée au sommet de laquelle se développent les fleurs, puis les capsules de graines. La plante est élancée à maturité, elle peut mesurer jusqu'à 1 m hauteur pour un diamètre de tige d'environ 1 à 3 mm. Les tiges de lin contiennent en leur sein des tissus de soutien fibreux, qui leur permettent de résister aux sollicitations mécaniques importantes provoquées par le vent et les intempéries. C'est le rôle de renfort dans la tige qui confère aux fibres de lin leurs propriétés mécaniques élevées [52].



Figure I.17 : Plante et fibre de lin [52].

Concernant la morphologie de la tige de lin, l'épiderme ou écorce est constitué d'une couche de cellules à paroi cellulosique avec une première couche de cellule nommé cuticule (Figure19). Les fibres regroupées en faisceaux appelé également le cortex, qui contient les fibres corticales regroupées en amas, appelés faisceaux. Les tiges comportent de 20 à 40 faisceaux, et l'on peut trouver dans chaque faisceau entre 12 et 40 fibres élémentaires. Ces fibres ou cellules fibreuses mesurent de 4 à 10 cm de longueur en général et 10 à 30 μm en général de Diamètre [52].

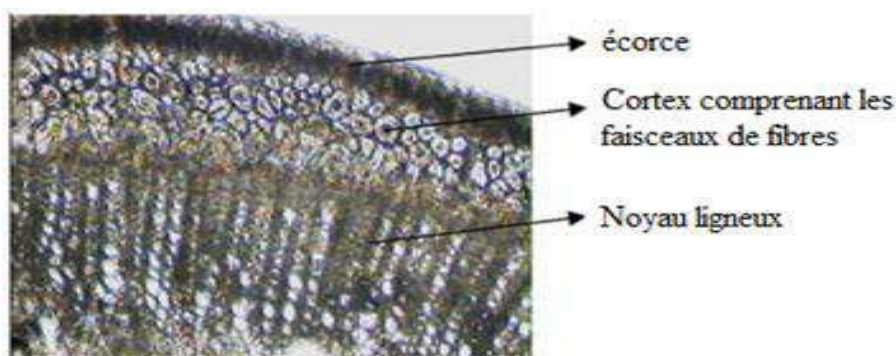


Figure I.18 : Vue en coupe transversale de la fibre de lin [52].

1.10.2 Fibres de chanvre

Le chanvre (*Cannabis sativa* L.) est une plante annuelle à feuilles palmatiséquées de la famille des cannabacées (**Figure I.19**). En 2021, plus de 122 mille ha de chanvre ont été cultivés dans le monde, principalement en Asie et en Europe. La République populaire démocratique de Corée est le premier producteur mondial avec 21247 ha exploités en 2021 (Source FAO 2021). Le chanvre est une plante rudérale qui peut être cultivée sur de nombreux types de sol avec une préférence pour les sols riches en nutriments, de pH compris entre 6 et 7,5 et profond ce qui favorise le développement de la plante. Les

semis sont généralement réalisés au printemps et la récolte se fait en septembre. Le cycle végétatif est compris entre 100 et 120 jours. La culture du chanvre ne nécessite pas ou peu d'intrants ou de traitements et permet également de stocker le dioxyde de carbone. En plus de ces avantages en faveur de l'environnement, la culture du chanvre s'inscrit dans un objectif de développement durable puisque tous ces constituants peuvent être valorisés. Les fibres, les graines, la chènevotte ainsi que les poudres sont utilisés dans divers domaines pour des applications telles que la fabrication du papier, l'alimentation, le textile et désormais, de plus en plus dans l'isolation et la plasturgie. En effet, les tendances actuelles en termes de recherche et développement visent à introduire les fibres de chanvre dans les matériaux composites à matrice organique.



Figure I.19: Plante et fibre de chanvre [52].

1.10.3 Fibres de jute

Le jute est une plante appartenant au genre des *Corchorus*, famille *Tiliaceae* (**Figure I.20**). Le plus grand producteur de jute est l'Inde avec plus de 1,9 millions de tonnes produites en 2021, suivi du Bangladesh avec plus de 1,4 millions de tonnes sur la même période. (Source FAO 2021). L'utilisation principale du jute est la filature et le tissage pour la fabrication de sacs, mais de nombreuses autres applications sont possibles comme les revêtements de sol, le non-tissé pour les agro-textiles. Dans le domaine des matériaux rigides, les déchets de décorticage du jute sont déjà utilisés industriellement dans le domaine des panneaux de particules. L'opération d'extraction des fibres sous forme de fillasse peut être mécanique mais reste encore le plus souvent réalisée manuellement et traditionnellement ; même pour les applications industrielles. L'avantage de cette méthode est qu'elle préserve beaucoup plus les qualités mécaniques des fibres.



Figure I.20 : Plante et fibre de jute [52].

I.10.4 Fibre de kenaf

Le kénaf (*Hibiscus cannabinus* L.) peut pousser sous un climat dans les zones tropicales et sub-tropicales (**Figure I.21**). La hauteur de la plante peut atteindre 4 mètres dans de bonnes conditions. Le pays le plus producteur de kénaf est l'Inde avec 110 000 tonnes, suivi de la Chine avec 63 000 tonnes. La production mondiale était au total entre 2014 et 2015 plus de 232 000 tonnes. Les applications de cette plante se trouvent dans l'industrie du papier, du cordage et des nantissés. Après un rouissage généralement à l'eau et un teillage généralement réalisé manuellement, le kénaf permet d'obtenir également des fibres multicellulaires comme le chanvre et lin et le jute à majorité de cellulosique.



Figure I.21 : Plante et fibre de kénaf [52].

I.10.5 Fibre de sisal

La fibre de sisal est une fibre dure extraite des longues feuilles de la plante du même nom. La plante sisal (**Figure I.22**), de nom scientifique *Agave sisalana*, est d'origine mexicaine et cultivée au Brésil, en Afrique de l'est, en Haïti, en Inde, en Indonésie et en Thaïlande. Ces feuilles sont composées de 4% de fibres, 0,75% de cuticule, 8% de matière sèche et 87,25% d'eau. Une feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres et une plante produit environ 200 à 250 feuilles avant la floraison.



Figure I.22 : Plante et fibre de sisal[52] .

I.10.6 Fibre d'abaca

L'abaca (*Musa textiles* nee L.) appartient à la famille des bananiers. L'abaca est une fibre foliaire composée de longues cellules minces qui font partie de la structure porteuse des feuilles (**Figure I.23**). La plante abaca mature est composée d'environ 12 à 30 tiges rayonnant à partir d'un système racinaire central. La fibre d'abaca est extraite de la gaine foliaire de manière traditionnelle par extraction manuelle ou par entraînement mécanique, par exemple décapage de la broche. Les fibres d'abaca peuvent être extraites en utilisant le procédé de décortication, où les fibres sont récupérées à partir de la gaine entière de la feuille, à la fois les fibres primaires et secondaires. Le processus de décortication assure l'obtention de beaucoup plus de fibres à partir des feuilles, par exemple 3-3,5% par rapport à l'extraction manuelle, où il est possible de récupérer environ 1% de fibres. Après décapage ou décortication, les rubans de fibres, qui peuvent mesurer jusqu'à 3 m de long, sont suspendus pour sécher. Les fibres d'abaca sont traitées de la même manière que d'autres fibres dures comme le sisal.



Figure 1.23 : Plante et fibre d'Abaca[52].

I.10.7 Fibre de coco

Le cocotier (*Coco nucifera L.*) est un arbre de la zone intertropicale. Les cocotiers sont cultivés dans les pays tropicaux (**Figure 1.24**), de grandes zones de production se trouvent le long des régions côtières dans les zones tropicales humides d'Asie aux Philippines, Indonésie, Inde, Sri Lanka et Malaisie. Dans ces pays, des millions de personnes vivent du cocotier et de ses nombreux produits. La fibre de coco est issue de la partie de la noix de coco. Elle est généralement utilisée en corderie. L'avantage de cette fibre est la présence d'une fine couche de composés aliphatiques qui assure ainsi une bonne liaison fibre/matrice suivant la matrice utilisée. En effet, grâce à cette couche aliphatique, la fibre est utilisée avec du polyéthylène sans aucun traitement de surface ni modification chimique du renfort, car cette couche grasse a pour avantage d'améliorer l'interface fibre-matrice. Mais cette couche aliphatique doit être enlevée par un traitement alcalin pour fabriquer un composite polyester/ fibre de coco.



Figure 1.24 : Plante et fibre de coco [52].

I.10.8 Fibres de palmier dattier

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) est l'un des arbres fruitiers le plus anciennement cultivé dans le monde [19], il est rustique s'adaptant aux régions les plus arides du monde et constitue la principale source de vie de la population saharienne. Cette espèce se trouve principalement dans la région afro-asiatique, est une composante essentielle de l'écosystème oasien ; grâce à son adaptation aux conditions climatiques, la haute valeur nutritive de ses fruits et les multiples utilisations de ses produits. Le Phoenix est une plante dioïque, on en trouve donc deux organismes avec des palmiers mâles et femelles (**Figure I.25**). Beaucoup d'auteurs considèrent le palmier dattier comme source de matières premières pour des applications industrielles. On distingue dans la littérature cinq parties du bois de palmier, il s'agit de folioles, du rachis, du bois de tronc, de pétioles et de la grappe.

I.10.8.1 Morphologique du palmier dattier

Le palmier dattier appartient à la classe des monocotylédones (une feuille embryonnaire dans la graine). Les monocotylédones ont une organisation différente, ils n'ont pas de cambium (une couche mince située entre le bois et l'écorce), alors que le bois de palmier présentant une structure et des propriétés bien différentes de celle des autres arbres. En effet, Le palmier est une herbe géante de 20 à 30m de hauteur (**Figure I.25**), au tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles, les feuilles sont pennées, divisées avec une longueur de 4 à 7m. Il porte des inflorescences mâles ou femelles [52]. Selon la littérature, on distingue les parties de palmier dattier suivantes :

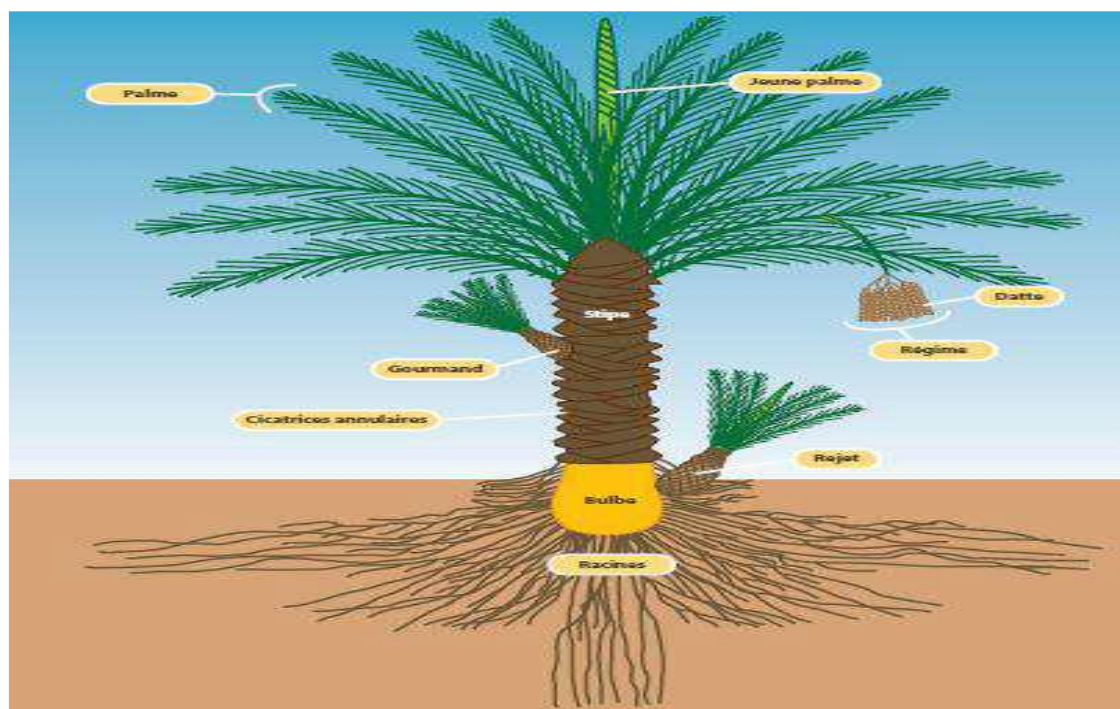


Figure I.25 : Schéma de palmier dattier.

a. Le stipe ou tronc

Le palmier dattier a un tronc unique colonnaire sans branche appelé stipe. Le stipe se termine par un bourgeon terminal unique produisant des feuilles appelées palmes (frondes), il est généralement cylindrique. L'enveloppe extérieure, l'écorce, n'est qu'une expansion de la base des pétioles des feuilles. Les fibres des pétioles ne forment point un tissu comme dans le bois ordinaire. Ce tissu présente des couches assez semblables à des toiles d'araignées (ils sont placés sans ordre, les uns à côté des autres). Le tronc n'est composé que de fibres pétiolaires superposées les unes sur les autres de l'intérieur à l'extérieur[52]. Ceci explique pourquoi le bois est plus dur à l'extérieur qu'à l'intérieur

b. La couronne

On appelle la couronne, l'ensemble des palmes vertes. Le nombre des palmes chez un palmier dattier adulte peut atteindre de 50 à 200 palmes. Elles sont émises par le bourgeon terminal ou « phyllophore ».

c. Palme ou feuille

La palme ou « Djérid » est une feuille pennée (Figure I.26) dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis qui s'étend au pétiole. Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. Le pétiole (Kornaf) est dur et relativement rigide. Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de bourgeon et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement, la Figure présente un schéma d'une palme de palmier dattier.

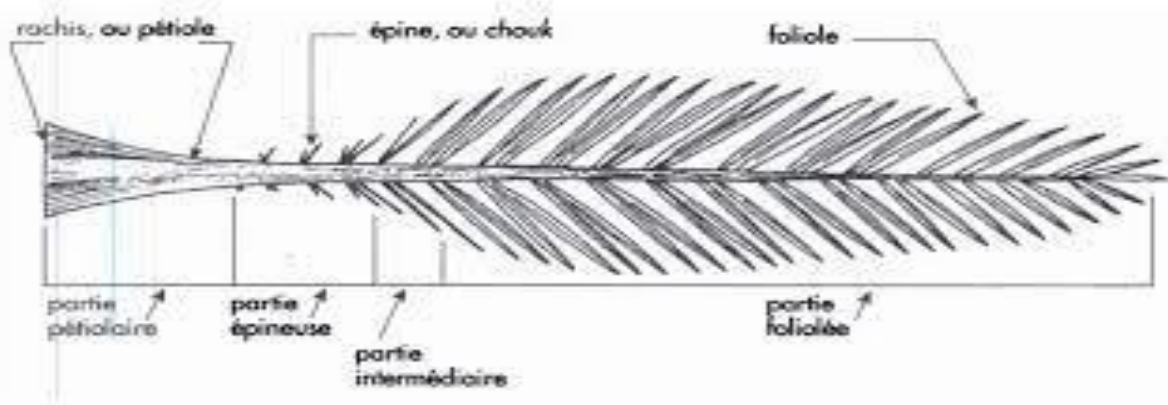


Figure I .26 : Schéma d'une palme de palmier dattier

Le palmier dattier a une structure fibreuse (**Figure I.27**), possédant quatre types de fibre :

- Fibres de bois de tronc.
- Fibres de feuilles au niveau des pédoncules.
- Fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe).
- Fibres de surface autour de son tronc ou de bases de palmes (pétiole)
- Fibres de life (entre les kornaf, le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le life).



Figure I.27 : Les fibres de tige et du tronc de palmier[61].

En général, le choix de la fibre à incorporer dans le composite est primordial et dépend de propriétés spécifiques telles que la disponibilité, le coût, la légèreté, le caractère renouvelable et la haute résistance spécifique (**Figure I.28, Figure I.29**). A cet effet, nous discutons par la suite des chapitres les détails de l'élaboration de nouveaux matériaux, nous visons aussi d'examiner l'intérêt de l'utilisation des fibres naturelles locale. De point de vue disponibilité et coût, le déchet du palmier dattier apparait satisfaisant aux exigences demandées[63].



Figure I.28 : Bois de palmier dattier (pétioles, feuilles et grappes) considéré souvent comme déchets agricoles sans valeur économique [63].

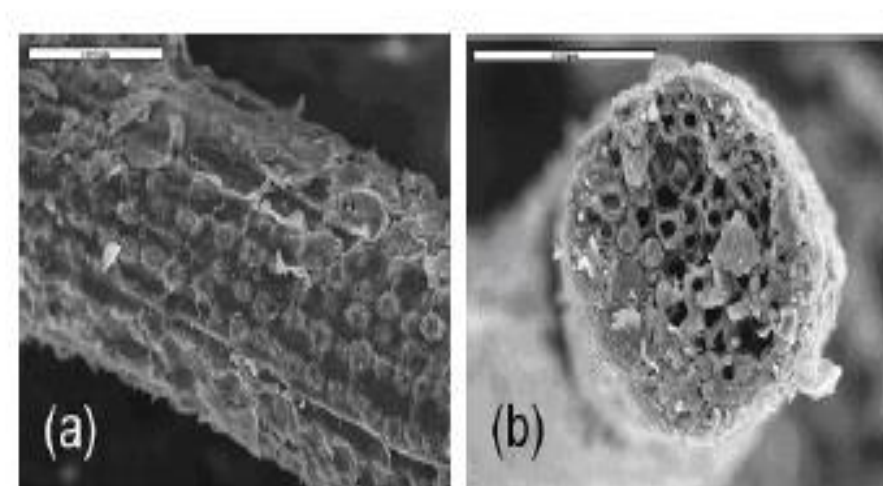


Figure I.29 : Images MEB d'une fibre de pétiole (variété Deglet-Nour), échelle de 100 μ m[63].

I.11 Valorisation des Fibres naturelles locales : Fibres de palmiers dattiers

Le palmier dattier revêt une importance particulière parmi les espèces végétales cultivées au Sahara avec un rôle majeur dans l'équilibre des écosystèmes oasiens. Il constitue pour les populations des régions sahariennes l'arbre de la providence qui fournit non seulement des dattes, nourriture riche pour les hommes et les animaux, mais aussi un grand nombre de productions diverses (matériaux destinés à l'artisanat, à la construction ou à la production d'énergie). Nous nous présentant quelques avantages et inconvénients des fibres végétales dans le **Tableau I.5** suivant :

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites :

Avantages	Inconvénients
<p>Ressource renouvelable.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Faible coût. - Propriétés mécaniques spécifiques importantes - Biodégradabilité. - Non abrasif pour les outillages. - Neutre pour l'émission de CO₂. - Demande peu d'énergie pour être produite. - Pas de résidus après incinération - Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres. - Bonne isolation thermique et acoustique. 	<p>Absorption d'eau.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Faible stabilité dimension-elle. - Biodégradabilité. - Faible tenue thermique (200 à 230°C max). - Fibres anisotropies. - Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo... - Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock. - Renfort discontinue

I.12 Influence des renforts végétaux sur les matériaux biocomposites :

Les études sur des composites à différentes matrices et renforts végétales ont pu valoriser les déchets agricoles, citant par exemple, les fibres de folioles de palmier dattier et leur introduction comme renfort dans la préparation des biocomposites à matrice polymère. L'étude était consacrée à la caractérisation mécanique en traction de fibre de foliole pour optimiser les propriétés mécaniques de fibre en utilisant la méthode de Taguchi [52]. D'autres résultats montrent que le traitement alcalin, respectif à 1 et 3% de NaOH des fibres de Doum et Diss pendant 30 minutes à une température ambiante, a montré à la fois une amélioration optimale de l'indice de cristallinité par rapport à la fibre brute et une modification de la surface des fibres traitées en une surface plus rugueuse qui favorise l'adhérence à la matrice cimentaire. Le renforcement des mortiers avec ces deux fibres induit une diminution de leurs masses

volumiques et par conséquent des résistances à la compression ainsi qu'une augmentation de leur porosité. Les résultats montrent que l'addition des fibres diminue la conductivité thermique des matériaux composites et favorise l'absorption de la chaleur [61].

D'autres recherches ont pu valoriser le déchet agricoles du palmier dattier par leur utilisation sous forme des particules associés avec deux types de liants disponibles à faible coût (la colle poly acétate de vinyle et la résine polyester insaturé) dans la préparation des panneaux de particules [44].

D'autre part, on trouve des études sur les propriétés physico-mécaniques et hydriques de matériaux composites à matrices cimentaires et argileuses renforcés par les fibres d'Alfa, de Diss et de Palmier Dattier de dimensions allant de 2 à 8 cm. Les essais réalisés sur des composites à base de fibres d'Alfa, de Diss et de Palmier dans différentes matrices (cimentaire et argileuse) et différentes dimensions qui varient de 2 à 8 cm, ont permis de constater, que les meilleures résistances en flexion des composites cimentaires sont généralement atteintes pour les fibres de 2 à 4 cm, due à la bonne adhérence fibre-pâte de ciment, et entre 6 à 8 cm pour les composites argileux [53].

Des résultats mentionnent que le comportement mécanique du bois dépend de son organisation cellulaire mais aussi de l'âge du matériau, de sa teneur en eau, de sa rétractibilité et de sa densité. Les fibres naturelles se présentent dans le bois comme des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicellulose et lignine ; Ces fibres présentent une excellente alternative d'un point de vue environnemental en raison de leur biodégradabilité et de leur combustibilité beaucoup plus neutre en termes de dégagement de gaz nocifs ou de résidus solides. Selon d'autres études, il est possible de mieux contrôler et de diminuer le phénomène de fissuration et d'augmenter les propriétés mécaniques en post fissuration. L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique. Pour le béton durci, le retrait de séchage reste présent, mais les fissures sont mieux contrôlées ; plus minces, moins longues et mieux distribuées sur la surface totale de l'ouvrage [63].

Dans la littérature, des travaux ont visés la valorisation des tiges de dattiers (ou branchettes) par leur incorporation dans la formulation des mortiers et des bétons afin de minimiser la propagation de la fissuration. L'incorporation des tiges dans le mortier diminue le risque d'une rupture fragile car la forte résistance des tiges à la traction leur permet de reprendre l'effort après rupture du mortier. Les fibres habituellement utilisées dans les matériaux cimentaires ont l'inconvénient d'être dérivées de ressources non renouvelables (fibres d'acier, de polypropylène, de verre, etc.). De ce point de vue, les fibres végétales, du fait de leur caractère naturel et renouvelable, pourraient constituer une solution d'avenir pour l'industrie de la construction à base de ciment. Parmi les fibres végétales, le lin se démarque en raison de ses propriétés mécaniques élevées et sa faible densité.

On trouve aussi une synthèse profonde de quelques travaux qui ont étudié l'impact de la pyrolyse (200°C, 2h) sur des fibres de bagasse. Les fibres pyrolysées présentaient une teneur moindre en hémicelluloses et en matières extractibles à l'origine d'une augmentation de leur porosité de 6%. Si les dimensions des fibres n'ont pas été modifiées, leurs surfaces sont devenues plus rugueuses présumant d'augmenter l'accrochage mécanique au niveau de l'interface entre les fibres et la matrice (Bilba & Arsène, 2008). Les parois cellulaires des fibres lignocellulosiques soumises à la pyrolyse sont entourées d'une couche carbonisée les protégeant de dégradation thermique ultérieure et augmentant ainsi leur stabilité thermique (Saheb & Jog, 1999). Ce phénomène, selon les auteurs, pourrait s'expliquer par une plus grande teneur en lignines des fibres de cocotiers, les lignines se dégradant à une température aux alentours de 250°C.

I.13 Contribution des fibres naturelles à l'industrie de la construction

Le secteur du bâtiment est l'un des domaines les plus préoccupants. En effet, les bâtiments sont responsables du tiers des rejets de dioxyde de carbone (CO₂), qui est un gaz à impact sur l'effet de serre qui contribue au changement global de l'environnement [64,65]. Pour réduire ces conséquences, des travaux de recherche sont menés pour promouvoir les matériaux de construction à base de fibres végétales. Ces matériaux, en plus d'être abondants, recyclables et durables, contribuent à la diminution des émissions de gaz à effet de serre en absorbant le dioxyde de carbone.

En Algérie, l'habitat résidentiel est le principal responsable d'émissions de CO₂ provenant de la construction. Il contribue à plus de 41% dans la consommation nationale d'énergie et émet plus de 6 300 tonnes d'équivalent CO₂ [66]. Des solutions écologiques ont pour but de réduire l'impact environnemental de la construction. Elles peuvent inclure l'utilisation de matériaux de construction durables, la réduction des déchets et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables [67]. Cependant, il est nécessaire de poursuivre ces efforts pour atteindre les objectifs de la neutralité carbone d'ici 2050.

Certaines fibres végétales telles que le chanvre, la paille, le bois, le palmier dattier, le sisal, le lin et le jute servent de renforts pour les mortiers à base de ciment dans le secteur de la construction, ces fibres permettent une plus grande résistance du béton aux forces de cisaillement, de flexion, de fatigue, de torsion. Ainsi, le renforcement du béton par des fibres permet de conserver sa structure même après la fissuration. L'amélioration de ces facteurs dépend de la résistance, du type, de la quantité des fibres incorporées et de leur solidité [68].

I.13.1 Influences des renforts végétaux sur l'ouvrabilité des matériaux de construction :

La présence de fibres comme les autres additifs entraîne une modification des caractéristiques des matériaux cimentaires en phase d'hydratation. En présence de faibles concentrations de fibres, la maniabilité du béton n'est généralement pas altérée, et la dispersion des fibres dans le mélange demeure homogène. Toutefois, il existe un seuil critique où les contacts entre les fibres deviennent significatifs, pouvant conduire à la formation d'agrégats [69].

Divers facteurs associés à des fibres sont susceptibles d'influencer l'ouvrabilité des mélanges au stade frais, comprenant des variables telles que le taux d'incorporation, la longueur des fibres, la forme des fibres et la souplesse [70]. De plus, une étude sur la rhéologie a mis en évidence que les fibres rigides sont liées à la résistance à l'écoulement du béton frais [71]. Cette recherche a également établi une corrélation significative entre l'alignement et la résistance à la flexion du béton.

I.13.2 Influence des fibres végétales sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux de construction

L'utilisation des fibres naturelles comme renfort dans les matériaux à base de ciment est une pratique récente, Il est important de noter que l'objectif principal de l'incorporation de fibres naturelles dans les composites à matrice à base de ciment est d'accroître leur contrainte mécanique en flexion, et leur capacité à supporter la fissuration, conduisant à la production de matériaux dotés d'une bonne ductilité. En outre, incorporer des fibres de plantes dans les matériaux de construction aide à améliorer les caractéristiques d'isolation thermique et acoustique de ces derniers.

I.13.3 caractéristiques à l'état frais : Le mélange de fibres végétales dans un composant minéral entraîne une diminution de l'ouvrabilité qui peut être compensée par une adaptation du rapport eau/liant ou par un superplastifiant, comme le mentionne [72]. De nombreux chercheurs ont constaté un ralentissement de la prise associé à cette incorporation des fibres végétales.

I.13.4 Comptabilité ciment-fibres végétales lors de l'hydratation de ciment : le processus d'hydratation du ciment. En présence du bois est retardée et inhibée, par une libération de chaleur nettement inférieure à celle observée normalement [73]. Une concentration plus élevée de copeaux de bois est associée à une diminution du dégagement de chaleur (**Figure I.30**). La thermographie a révélé une inhibition significative de la formation de Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Comme indiqué, la présence du bois induit une modification des condensations de silicates, favorisant la création de silicates de calcium hydratés (C-S-H).

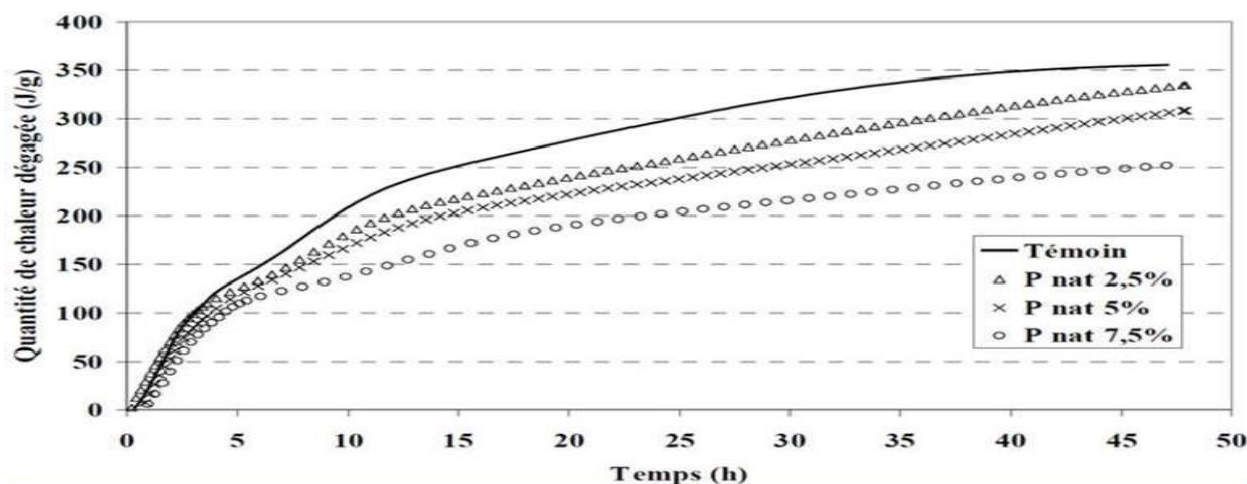


Figure I.30 : Impact de la distribution du peuplier sur la chaleur dégagée pendant l'hydratation [74].

I.13.5 Caractéristiques à l'état durci

De nombreux facteurs influencent les caractéristiques du béton de fibres végétales dont Les principaux à considérer sont : Le type de fibre, Il peut s'agir de diverses options comme le chanvre, le sisal, le jute, le coco, le bambou, le lin, la bagasse etc. La Morphologie de la fibre tels que la longueur, le diamètre et la section transversale de la fibre. Le fait que les fibres soient utilisées individuellement, en paquets ou en torons joue un rôle dans leur interaction avec la matrice du béton.

La dimension des granulats, la nature du ciment et l'incorporation d'additifs dans le mélange de béton et Proportions des constituants ont un impact direct sur la matrice. Les spécificités du processus de mélange, y compris le type de malaxeur utilisé, l'ordre dans lequel les constituants sont ajoutés, la façon d'incorporer les fibres, ainsi que la durée et la vitesse du mélange, sont déterminants. La façon dont le béton est appliqué, que ce soit par vibration standard, projection ou extrusion, peut affecter le produit final. Enfin, Les Conditions de durcissement ont un rôle essentiel dans l'évolution des propriétés du matériau.

I.13.6 Effet de l'addition de fibres sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers

Des études récentes portant sur des mortiers cimentaires à base de fibres végétales ont démontré l'impact significatif des fibres végétales sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux. Les propriétés mécaniques des fibres, notamment leur haute résistance à la traction, permettent d'augmenter considérablement la résistance à la flexion des matrices fragiles [75].

D'autre étude, a permis d'analyser l'impact des fibres de palmier à huile incorporées dans les mortiers sur les caractéristiques mécaniques de ces derniers. Ces fibres mesurant 3 cm de long et présentant des fractions volumétriques de 0,25%, à 1,0 % de la quantité de ciment, ont été intégrées à la composition des mortiers fibreux. En effet, après 90 jours, une amélioration de 12% de la résistance en compression et 21% de la résistance en flexion a été observée dans les composites, au fur et à mesure que la teneur en fibres augmentait jusqu'à 0,5%. Au-delà de cette concentration de fibres, on observe une légère diminution des contraintes de flexion et de compression. Cette baisse est due à la hausse de la porosité causée par la concentration plus élevée de fibres [76].

En utilisant des fibres de noix de coco. Les mortiers en question ont été renforcés en incorporant des fibres à quatre niveaux de concentration différents : 0,6% à 2,4% par rapport au liant, présentant des longueurs allant de 20 à 30 mm. Les tests révèlent que la performance est maximale avec une teneur en fibres de 1,8%, ce qui se traduit par une hausse de 18% de la contrainte en flexion des mortiers fibrés comparativement aux bétons non fibrés après 28 jours **Figure I.31**. Par ailleurs, il a été constaté une augmentation de la capacité aux chocs des bétons renforcés comparé au béton de référence [77].

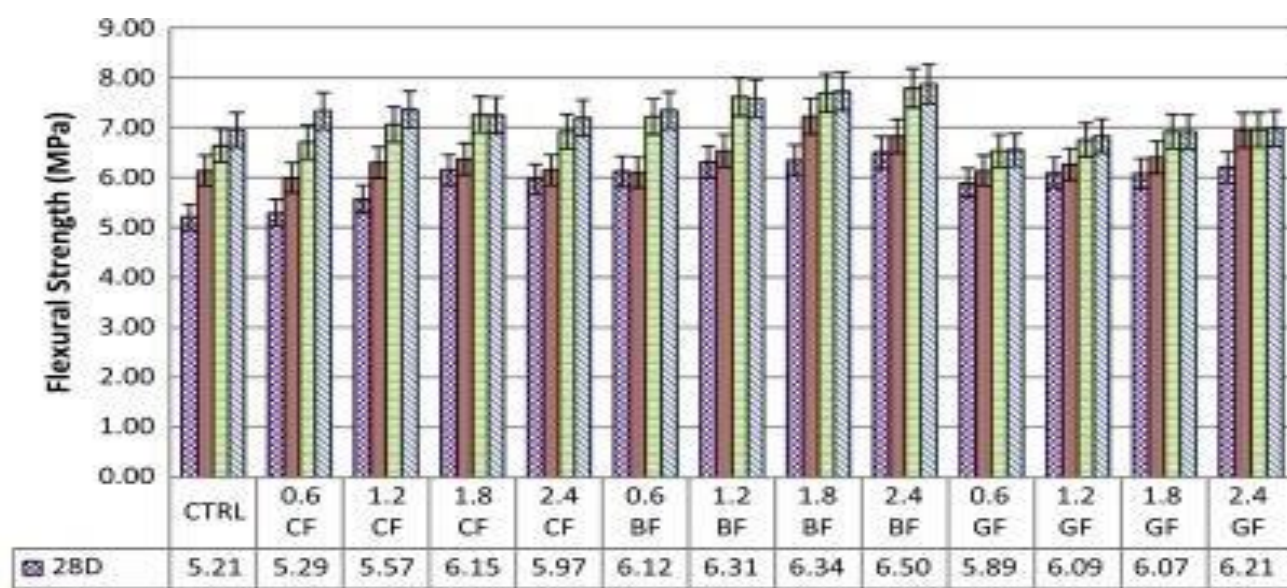


Figure I.31 : La résistance en flexion des échantillons à 28 jours [77].

Des études ont constaté que La performance du composite est particulièrement impactée par la longueur et la densité des fibres, comme illustré dans la Figure **I.32**, [72].

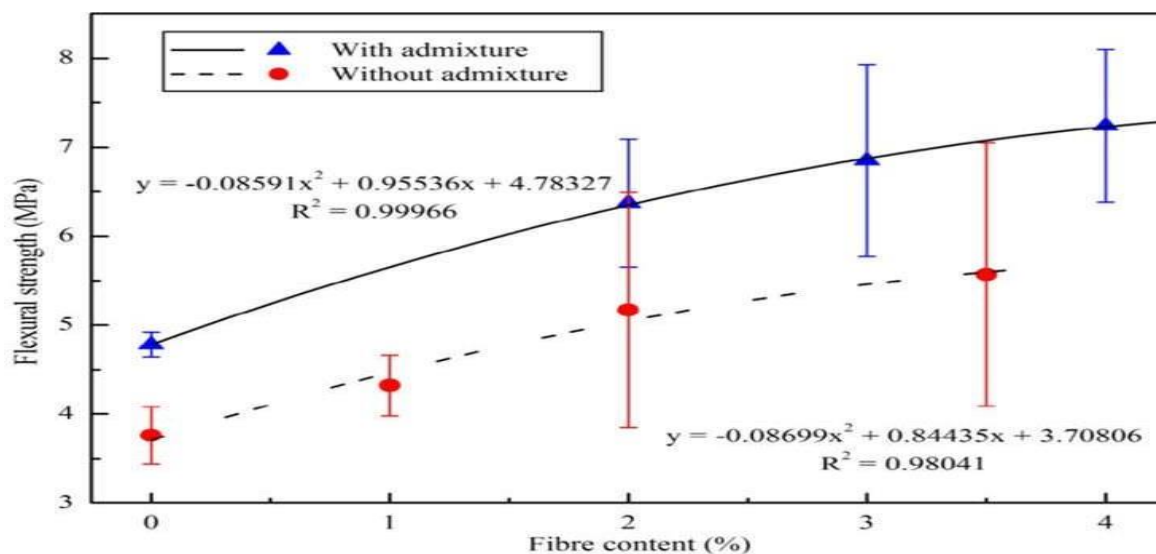


Figure I.32: L'impact de la longueur et de la quantité des fibres de lin sur la contrainte à la flexion des mortiers [78].

Une recherche a porté sur l'examen de contrainte en compression des composites renforcés par des biofibres, en particulier ceux incorporant des fibres de lin. Des tests de compression ont été effectués sur des mortiers à différents intervalles : 7, 14, 28 et 90 jours. L'étude a porté sur différents niveaux de teneur en fibres, notamment 0 %, 2 %, 3 % et 4 %. Les observations ont révélé une réduction notable de la résistance à la compression avec l'introduction de fibres végétales, comme l'illustre la **Figure I.33**. En outre, la contrainte en compression a diminué quand la teneur en fibres augmentait, soulignant une fois de plus l'impact négatif des fibres sur la contrainte en compression de ces composites [79].

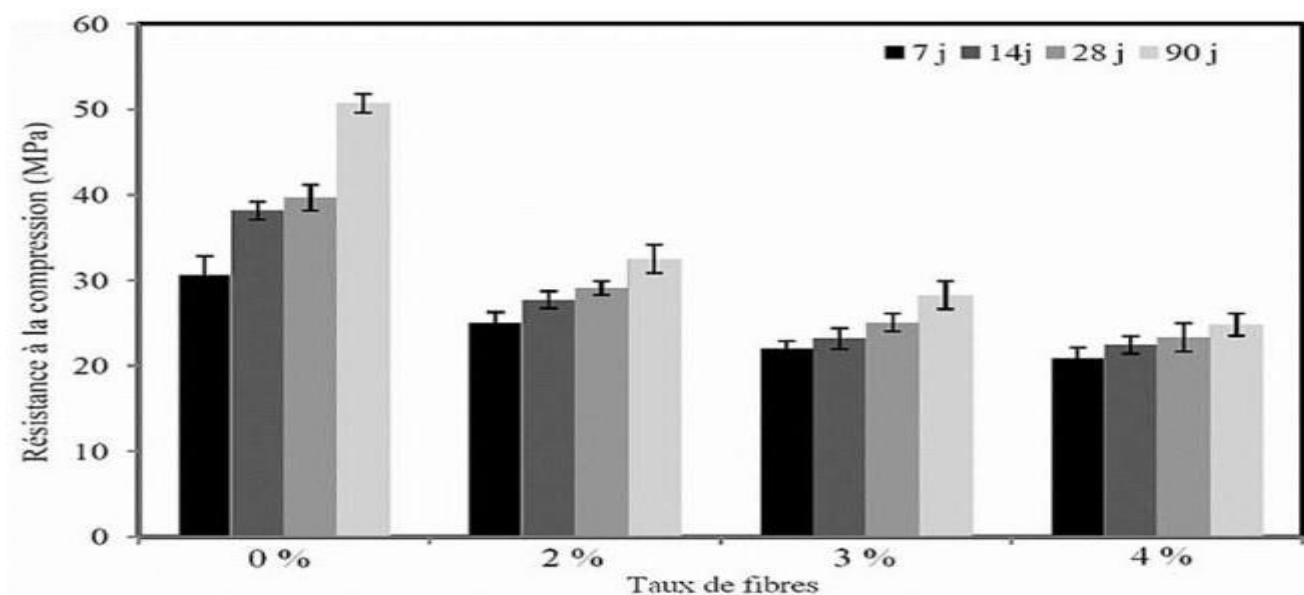


Figure I.33: Effet de la teneur en fibres de lin sur la contrainte de compression des mortiers, [79].

I.13.7 Effet de l'addition de fibres sur les propriétés thermiques des mortiers

L'intégration des fibres végétales dans les composites cimentaires entraîne une baisse de leur conductivité thermique en raison d'une porosité accrue dans ces matériaux. Une étude sur le comportement thermique des mortiers cimentaires contenant des fibres de bois provenant du palmier dattier a été menée sur le diamètre des fibres, qui peut être de 3 mm, 6 mm ou un mélange équivalent des deux diamètres, ainsi que le taux de fibre, variant de 5% à 30% de la masse du ciment, comme illustré dans la Figure I.34, [80].

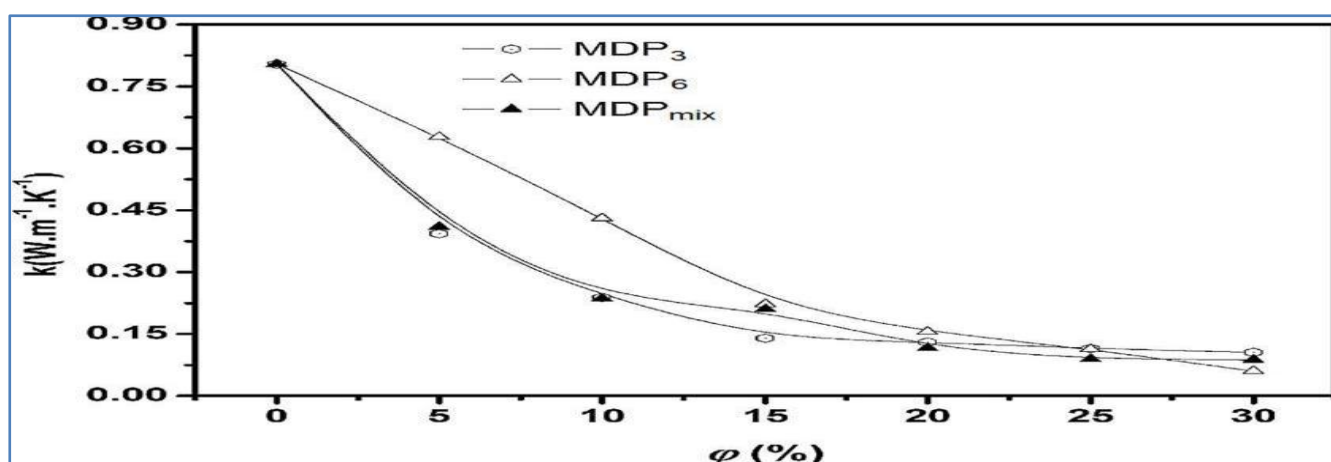


Figure I.34 : Conductivité thermique des mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier de 3 mm, 6 mm et le mélange de deux diamètres [80].

Les auteurs ont conclu que l'intégration des fibres de palmier a diminué fortement la conductivité thermique des composites fabriqués. Cette réduction est attribuable à l'incorporation de fibres dans la matrice cimentaire, ce qui entraîne une augmentation de la porosité des composites fabriqués et une diminution de leur densité, favorisant ainsi leur capacité d'isolation thermique.

1.13.8 Ténacité et résistance des mélanges

En général, les composites qui intègrent des fibres végétales présentent une amélioration du ratio de résistance aux chocs résiduels (**Figure I.35**). Concernant le jute, il semble que la quantité de fibres idéale pour améliorer la résistance des composites soit d'environ 1 % ou 1,5 %. Il est recommandé d'avoir une teneur d'environ 1,5 % pour le sisal, surtout si la longueur de la fibre est de 20 mm, [81].

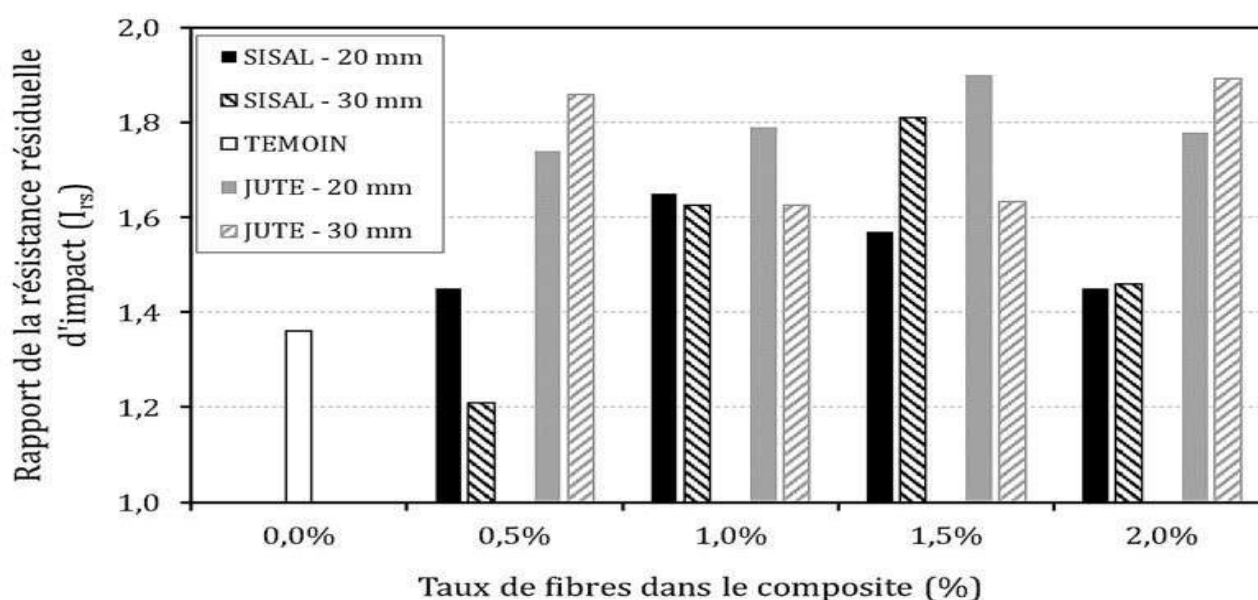


Figure I.35 : Contrainte résiduelle sur des mortiers en jute et sisal [81].

1.13.9 Durabilité des biocomposites cimentaires :

Lors l'examen des aspects mécaniques des composites cimentaires renforcés par des biofibres, les auteurs ont constaté une réduction dans la ductilité de ces matériaux dans le temps. En effet, les résultats de Sedan, illustrés par la **Figure I.36**, démontrent effectivement ce phénomène, [78].

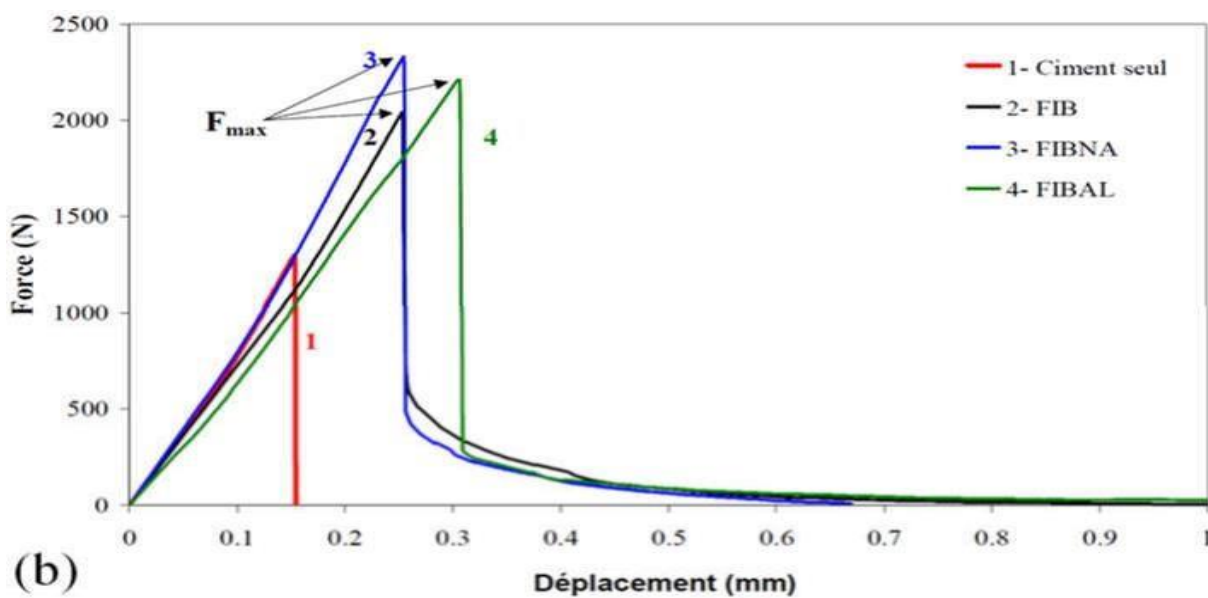
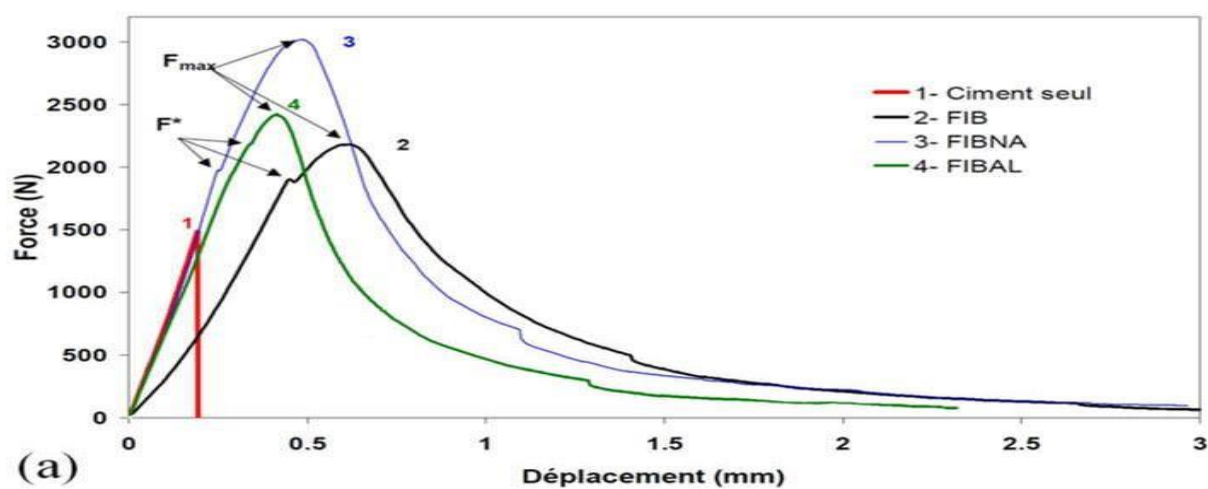


Figure I.36 : Propriétés mécaniques des mortiers renforcés (a) solution de NaOH pendant 28 jours et (b) après 12 mois de vieillissement naturel [78].

Après un vieillissement naturel de 12 mois, une transformation substantielle se produit dans les caractéristiques mécaniques de ces composites. La force nécessaire à l'initiation de la première fissure reste assez proche des niveaux observés lors des tests effectués à 28 jours. Néanmoins, l'étape post-fissure diminue après le vieillissement, rendant le matériau plus fragile, proche d'une matrice non fibreuse. Outre la baisse de ductilité, l'augmentation de la contrainte lors du déclenchement de la première craquelure, comme le soulignent plusieurs auteurs. [72,79,82].

La présence de fibres dans les mortiers cimentaires vise à augmenter leur résistance aux fissures et à leur donner un caractère plus ductile. Après les premières fissures, la présence de fibres permet au béton de maintenir sa capacité à supporter des charges tout en augmentant leur résistance en flexion, en cisaillement et en torsion. Toutefois, l'augmentation de ces contraintes varie selon le type, la contrainte et la nature des fibres employées. Les fibres végétales soient donc une option prometteuse pour renforcer les matrices cimentaires par rapport aux fibres synthétiques classiques. Leur avantage réside dans leur faible empreinte économique et environnementale.

I.14 Conclusion :

On peut conclure à partir de cet aperçu bibliographique qu'un un matériau composite est constitué de différents éléments, principalement de fibres noyées dans une matrice. Les fibres utilisées ont le rôle d'assurer le renfort quant à la matrice, elle assure la cohésion entre les fibres de manière à répartir les sollicitations mécaniques et le transfert des efforts aux fibres. L'arrangement des fibres, leur orientation, leur longueur définissent les propriétés mécaniques de la structure. L'introduction des fibres naturelles telles que le chanvre, le lin, le jute, le sisal, le bambou ou encore l'Alfa, le Diss et le Palmier dans l'industrie des composites, présente des propriétés spécifiques intéressantes.

Parmi la grande diversité de fibres végétales qui existe dans notre pays, nous nous sommes intéressés aux fibres Palmier Dattier. Les fibres palmier sont donc une ressource locale, à valoriser en tant que matière première, pour la production de nouveaux matériaux innovants plus respectueux de l'environnement dans la construction, pour des usages et propriétés spécifiques. D'après cette revue bibliographique, nous retenons que :

- L'Algérie est riche en matière fibreuse, chaque année après la récolte, cette matière est soit jetés ou brûlée ce qui a une influence sur l'écosystème et l'environnement,
- Vu les problèmes de santé que présente les fibres d'amiante, leur substitution par des fibres végétales ou polymères est un enjeu médico-économique important. Par conséquent, des recherches sont en cours dans le but d'améliorer les propriétés des matériaux renforcés par des fibres végétales, de verre ou de polymère.
- La possibilité d'utiliser ces déchets pour la fabrication de panneaux de particules contribuerait dans une certaine mesure à limiter les importations de bois.

L'utilisation de fibres naturelles comme renfort de matériaux composites se justifie donc pour :

- Valoriser une ressource locale dans des pays peu industrialisés ;
- Développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement.

Références

1. Kang-Hao T, Tian-Yu W, Zu-Heng Z, Ying-Hong Q (2021) Biochar as a Partial Cement Replacement Material for Developing Sustainable Concrete: An Overview. *J Mater Civ Eng* 33:3121001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003987](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003987)
2. Sirico A, Bernardi P, Sciancalepore C, et al (2021) Biochar from wood waste as additive for structural concrete. *Constr Build Mater* 303:124500. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124500>
3. Maljaee H, Madadi R, Paiva H, et al (2021) Incorporation of biochar in cementitious materials: A roadmap of biochar selection. *Constr Build Mater* 283:. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122757>
4. Kurniawan TA, Othman MHD, Liang X, et al (2023) Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. *J Environ Manage* 332:117429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117429>
5. S. SS, K. P, A. R, Raghavan V (2021) Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. *Biomass Convers Biorefinery* 11:2247–2267. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00604-5>
6. Danesh P, Niaparast P, Ghorbannezhad P, Ali I (2023) Biochar Production: Recent Developments, Applications, and challenges. *Fuel* 337:126889. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126889>
7. Haque MI, Khan RI, Ashraf W, Pendse H (2021) Production of sustainable, low-permeable and self-sensing cementitious composites using biochar. *Sustain Mater Technol* 28:e00279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00279>
8. Kesikidou F, Stefanidou M (2019) Natural fiber-reinforced mortars. *J Build Eng* 25:100786. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100786>
9. Belaadi A, Boumaaza M, Alshahrani H, et al (2023) Improving the Mechanical Performance of Biocomposite Plaster/ *Washingtonia filifera*: Optimization Comparison Between ANN and RSM Approaches. *J Nat Fibers* 20:2170945. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2170945>
10. Boumaaza M, Belaadi A, Bouchak M, et al (2023) Optimization of flexural properties and thermal conductivity of *Washingtonia* plant biomass waste biochar reinforced bio-mortar. *J Mater Res Technol* 23:3515–3536. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.009>
11. Vantadori S, Carpinteri A, Zanichelli A (2019) Lightweight construction materials: Mortar reinforced with date-palm mesh fibres. *Theor Appl Fract Mech* 100:39–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.12.011>
12. Çomak B, Bideci A, Salli Bideci Ö (2018) Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar. *Constr Build Mater*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.029>

13. Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M (2020) The Effect of Alkaline Treatment on Mechanical Performance of Natural Fibers-reinforced Plaster: Optimization Using RSM. *J Nat Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1724236>
14. Xie X, Zhou Z, Yan Y (2019) Flexural properties and impact behaviour analysis of bamboo cellulosic fibers filled cement based composites. *Constr Build Mater* 220:403–414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.029>
15. Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M (2022) Systematic Review on Reinforcing Mortars with Natural Fibers: Challenges of Environment-Friendly Option. *J Nat Fibers* 0:1–25. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2060408>
16. Praneeth S, Guo R, Wang T, et al (2020) Accelerated carbonation of biochar reinforced cement-fly ash composites: Enhancing and sequestering CO₂ in building materials. *Constr Build Mater* 244:118363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118363>
17. Gupta S, Kua HW (2020) Combination of Biochar and Silica Fume as Partial Cement Replacement in Mortar: Performance Evaluation Under Normal and Elevated Temperature. *Waste and Biomass Valorization* 11:2807–2824. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00573-x>
18. Gupta S, Kua HW, Tan Cynthia SY (2017) Use of biochar-coated polypropylene fibers for carbon sequestration and physical improvement of mortar. *Cem Concr Compos* 83:171–187. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.012>
19. Muthukrishnan S, Gupta S, Kua HW (2019) Application of rice husk biochar and thermally treated low silica rice husk ash to improve physical properties of cement mortar. *Theor Appl Fract Mech* 104:102376. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102376>
20. Afshoon I, Miri M, Mousavi SR (2023) Using the Response Surface Method and Artificial Neural Network to Estimate the Compressive Strength of Environmentally Friendly Concretes Containing Fine Copper Slag Aggregates. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01152-4>
21. Behnood A, Golafshani EM (2018) Predicting the compressive strength of silica fume concrete using hybrid artificial neural network with multi-objective grey wolves. *J Clean Prod* 202:54–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.065>
22. Ofuyatan OM, Agbawhe OB, Omole DO, et al (2022) RSM and ANN modelling of the mechanical properties of self-compacting concrete with silica fume and plastic waste as partial constituent replacement. *Clean Mater* 4:100065. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100065>
23. Rizalman AN, Lee CC, Engineering F, Kinabalu UMSK (2020) Comparison of Artificial Neural Network (ANN) and Response Surface Methodology (RSM) in Predicting the Compressive Strength of POFA Concrete. *Appl Model Simul* 4:210–216
24. Nakkeeran G, Krishnaraj L (2023) Prediction of cement mortar strength by replacement of hydrated lime using RSM and ANN. *Asian J Civ Eng* 24:1401–1410. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00577-6>

25. Pratap B, Mondal S, Rao BH (2023) Prediction of compressive strength of bauxite residue-based geopolymer mortar as pavement composite materials: an integrated ANN and RSM approach. *Asian J Civ Eng*. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00797-w>
26. Khan K, Johari MAM, Amin MN, et al (2023) Optimization of colloidal nano-silica based cementitious mortar composites using RSM and ANN approaches. *Results Eng* 20:101390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101390>
27. Çalışkan A, Demirhan S, Tekin R (2022) Comparison of different machine learning methods for estimating compressive strength of mortars. *Constr Build Mater* 335:127490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127490>
28. Hammoudi A, Moussaceb K, Belebchouche C, Dahmoune F (2019) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater* 209:425–436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119>
29. Kursuncu B, Gencil O, Bayraktar OY, et al (2022) Optimization of foam concrete characteristics using response surface methodology and artificial neural networks. *Constr Build Mater* 337:127575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127575>
30. Sahraei Moghadam A, Mirza Goltabar Roshan A, Omidinasab F (2023) Utilization of agricultural wastes as fiber, binder and aggregates of geopolymer mortars: Application of taguchi method for strength and durability optimization. *J Build Eng* 75:106906. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106906>
31. Wang P, Dong B, Zhang Y (2023) Evaluation and characteristic analysis of compressive strength and resistivity of EG cement conductive mortar based upon hybrid-BP neural network. *Constr Build Mater* 394:132203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132203>
32. Li Z, Dong J, Chen H, et al (2023) Mechanical behaviour and acoustic emission characteristics of basalt fibre mortar rubble under uniaxial cyclic compression. *Constr Build Mater* 393:132145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132145>
33. Chen Z, Liu Y, Wang M, et al (2023) Effect of coarse aggregate grading optimization on temperature, thermal stress and compressive strength of carbon fiber-reinforced concrete by ohmic heating curing. *J Build Eng* 66:105882. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105882>
34. Khelifi A, Boumaaza M, Belaadi A, et al (2023) Effects of alkaline treatment of Washingtonia mesh waste on the mechanical and physical properties of bio - mortar : experimental and prediction models. *Biomass Convers Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04221-w>
35. Insaf Mehrez Houda Hachem RG, Jemni A (2023) Optimization of Mortar/Agave americana Fibers Composite Behavior Based on Experimental Design. *J Nat Fibers* 20:2152149. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2152149>

36. Amran M, Lesovik V, Tolstoy A, et al (2022) Properties and performance of polypropylene fibered high-strength concrete with an improved composite binders. *Case Stud Constr Mater* 17:e01621. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01621>
37. Raheel Shah SA, Ben Kahla N, Atig M, et al (2023) Optimization of fresh and mechanical properties of sustainable concrete composite containing ARGF and fly ash: An application of response surface methodology. *Constr Build Mater* 362:129722. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129722>
38. Mobili A, Cosoli G, Giulietti N, et al (2023) Biochar and recycled carbon fibres as additions for low-resistive cement-based composites exposed to accelerated degradation. *Constr Build Mater* 376:131051. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131051>
39. Tayyab S, Khitab A, Iftikhar A, et al (2023) Manufacturing of high-performance light-weight mortar through addition of biochars of millet and maize. *Waste Dispos Sustain Energy* 5:97–111. <https://doi.org/10.1007/s42768-023-00135-5>
40. Gupta S (2022) Comparison of improved autogenous and bio-based self-healing techniques in fiber-reinforced mortar: Effect of bacteria incorporation strategy and fiber hybridization. *J Build Eng* 45:103607. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103607>
41. Gupta S, Kua HW, Pang SD (2018) Healing cement mortar by immobilization of bacteria in biochar: An integrated approach of self-healing and carbon sequestration. *Cem Concr Compos* 86:238–254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.015>
42. Chen Q, Qin J, Sun P, et al (2018) Cow dung-derived engineered biochar for reclaiming phosphate from aqueous solution and its validation as slow-release fertilizer in soil-crop system. *J Clean Prod* 172:2009–2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.224>
43. Boumaaza M, Belaadi A, Alshahrani H, et al (2023) Environmentally mortar development using Washingtonia/biochar waste hybrid: mechanical and thermal properties. *Biomass Convers Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04743-3>
44. Almi Kenza. Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie. Diss. Université Mohamed Khider BISKRA, 2018.
45. H. H. Molinaro. Matériaux composites et structures composites. ENS Paris-Saclay, 2015.
46. G.Tripathi, D. Srivastava. Effect of Carboxyl-Terminated Poly (Butadiene-co-Acrylonitrile)(CTBN) Concentration on Thermal and Mechanical Properties of Binary Blends of Diglycidyl Ether of Bisphenol-A (DGEBA) Epoxy Resin. *Materials Science & Engineering A*, 443, 2007, 262-269.]
47. Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. France. 2008. cel- 00470296v2HAL Id: cel-00470296 <https://cel.hal.science/cel-00470296v2> . 2011

48. S. Steven, V. A Guy, V. M. Bruno, Reaction Kinetics Modeling and Thermal Properties of Epoxy-Amines as Measured by Modulated-Temperature DSC. I. Linear Step-Growth Polymerization of DGEBA + Aniline, Journal of Applied Polymer Science, vol. 91, 2004, 2798-2813.].
49. Raphaël Kueny. Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles HAL Id : tel-01750535.<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750535>
50. W. D Callister. Science and Engineering: An Introduction, Materials (6) (2006).
51. Baley. C, Grohens. Y, and Pillin. I, State of the art regarding biodegradable composites. Revue des Composites et des Matériaux Avancés, 14, p. 135- 166. (2004).
52. Bouhmame Nasser. Etude des matériaux composites à matrice polymère chargée par des fibres de Palmier Dattier
53. Belkhir Zohra. Amélioration des propriétés mécaniques des composites à différentes matrices à base de fibres naturelles locales.2022.
54. Fadel, A. Influence des diverses modifications du Genêt d'Espagne sur les propriétés mécaniques, rhéologiques et thermiques de composites à matrice thermoplastique'', Thèse de magister, Université Sétif-1-, 2014, pp 106.
55. Merzoud, M. Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de diss dans la fabrication de la maçonnerie'', Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007, pp 123.
56. Souakir, M. Élaboration et caractérisations des composites hybrides, PEHD/fibres PET recyclés/montmorillonite organophile : Étude des effets de la composition et du traitement de surface de la fibre PET'', Thèse de magister, Université Setif-1-, Décembre 2014, pp 105.
57. Boussehel, H. Etude des moyens de stabilisation des composites à base de polystyrène'', Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2018, pp 139.
58. Bouhank, S. Elaboration de matériaux composites PVC/fibres de genêt d'Espagne : formulations et caractérisations'', Thèse de doctorat, Université de Ferhat ABBAS, Sétif 1 2017, pp 130.
59. Boussehel, H. Etude des moyens de stabilisation des composites à base de polystyrène'', Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2018, pp 139.
60. Raphaël Kueny. Généralités sur les fibres naturelles ; Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles HAL Id : tel-01750535.<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750535>
61. Achour Abderraouf . Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles : valorisation des plantes locales .2017
62. Bouhemame Nasser. Etude des matériaux composites à matrice polymère chargée par des fibres de Palmier Dattier
63. Touloum et AL-C. Bois local : les palmiers dattiers Nouveau bio-composite local à base de fibres cellulosiques. Application à l'isolation thermique en bâtiment. Farid

Touloum1, Adel Benchabane, Abdelhak Kaci Biskra, 7 et 8 Décembre 2011 Premier Séminaire National de Génie Mécanique (SNGM01).

64. N. Benmansour, Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat, Thèse de doctorat Université de Batna, Algérie, (2015).
65. 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>.
66. R. GHEDAMSI, Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive en Algérie, (2019).
67. M. Iqbal, J. Ma, N. Ahmad, K. Hussain, M.S. Usmani, M. Ahmad, Sustainable construction through energy management practices in developing economies: an analysis of barriers in the construction sector, *Environmental Science and Pollution Research*. 28 (2021) 34793–34823. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12917-7>.
68. 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).
69. 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>.
70. 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>.
71. B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, S. Amziane, Flowability of fibereinforced 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>.
72. 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.
73. A. Govin, A. Peschard, R. Guyonnet, Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood, *Cement and Concrete Composites*. 28 (2006) 12–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002>.
74. A. Govin, Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois, (2004).
75. Y. Lamia, Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss), 2011.
76. E.T. Dawood, M. Ramli, Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers, *Construction and Building Materials*. 28 (2012) 193–200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.057>.

77. W.H. Kwan, M. Ramli, C.B. Cheah, Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment, *Construction and Building Materials*.63(2014) ;62–71.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.004>.

78. C. Sawsen, K. Fouzia, B. Mohamed, G. Moussa, Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite, *Construction and Building Materials*. 79 (2015) 229–235.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.091>.

79. N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, A. Boudenne, Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building, *Energy and Buildings*. 81 (2014) 98–104.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.032>.

80. G. Ramakrishna, T. Sundararajan, Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: A comparative study, *Cement and Concrete Composites*. 27 (2005) 547–553.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>.

81. J. de Almeida Melo Filho, F. de Andrade Silva, R.D. Toledo Filho, Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems, *Cement and Concrete Composites*. 40 (2013) 30–39.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>.

82. F. de Andrade Silva, B. Mobasher, R.D.T. Filho, Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*. 31 (2009) 721– 730. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.00>.

Chapitre **II** :
Techniques Et
Methodes
Experimentales

II.1 Introduction

Le des matériaux de construction à savoir : béton, mortier, ciment et argile, par des fibres naturelles, a montré ses preuves pour améliorer leurs performances mécaniques, notamment leurs résistances à la traction, à la fissuration et la ductilité. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce chapitre qui consiste à élaborer un éco-matériau. Par principe, En fait intérêt à La préparation des mortiers cimentaires à partir de déchets solides pouvant remplacer le ciment Portland ordinaire qui est un moyen efficace de recycler les déchets solides pour fournir une méthode d'élimination écologique et pour réduire l'impact environnemental de la production industrielle de fibres. Cette étude permettra de montrer le fort potentiel de ces matériaux pour des applications de structures tout en réduisant les impacts environnementaux. Un programme expérimental visant à déterminer l'effet du type de fibre, de la teneur d'addition et du mode de préconditionnement sur les résistances mécaniques (flexion et compression), l'absorption d'eau des différents matériaux avec et sans ajout et enfin la porosité des échantillons réalisés. Ensuite, le programme expérimental pourrait être complété par les études suivantes basés sur des méthodes numériques avancées à savoir les formules cimentaires et les notions de base sur le (mortier).

II.1.1 L'industrie cimentière :

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le ciment s'est surtout développé à partir de 1950 (7,4 Mt) du fait de l'essor du béton et des besoins de la reconstruction. Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 % et 20 %.

II.1.2 Prise et durcissement du ciment

Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes. Les constituants anhydres donnent naissance, en présence d'eau, à des silicates et des aluminates de calcium hydratés ainsi que de la chaux hydratée dite portlandite formant un gel microcristallin, à l'origine du phénomène dit de « prise ». C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques.

La pâte de ciment (ciment + eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à plusieurs heures suivant la nature du ciment et la température).

En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent, mais elles sont ralenties par la présence du gypse.

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

II.1.3 Définition d'un ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment est obtenu à partir d'un ou plusieurs constituant(s).

II.1.4 Les constituants du ciment

Les constituants du ciment présentent des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau, des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés, stables ; et des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage, etc.).

Clinker Portland (K)

Le clinker Portland est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile fixé avec précision et contenant des proportions visées de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et F_2O_3 . Le clinker entre dans la composition de tous les ciments courants.

Laitier granulé de haut fourneau (S)

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment.

Pouzzolanes naturelles (Z) ou naturelles calcinées (Q)

Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques.

Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé.

Schistes calcinés (T)

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzalaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières.

Calcaires (L, LL)

Les calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75 %.

Fumées de silice (D)

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium.

Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium, généralement du gypse, doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise.

Constituants secondaires

Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants décrits dans les paragraphes ci-dessus (sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment). Ils ne peuvent excéder 5 % du poids total du ciment.

Additifs

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans ceux énumérés ci-dessus et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1 % en masse de ciment. La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % en masse de ciment.

Les cinq types de ciments courants sont :

Le ciment Portland : CEM I Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.

Le ciment Portland composé : CEM II/A ou B

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires. Il est à noter que les ciments Portland et Portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs.

Le ciment de haut fourneau : CEM III/A ou B... Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker...**et CEM III/C** (anciennement ciment de laitier au clinker) , Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.

Le ciment composé : CEM V/A ou B (anciennement ciment au laitier et aux cendres) Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier. Les ciments courants peuvent comporter au plus 5 % de constituants secondaires.

II.1.5 Caractéristiques et emplois des ciments

L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés.

La gamme étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits du béton sur chantier ou en usine, pour la réalisation de bâtiments ou de structures de génie civil [1].

II.1.6 Les mortiers :

Le **mortier** est un matériau composite et de construction obtenu par mélange de liant, de sable et d'eau, éventuellement des adjuvants, réalisé dans des proportions bien définies de manière à obtenir une pâte de plasticité convenable pour la mise en œuvre. Il sert à lier les différents éléments de construction tels que des briques, des pierres, des blocs de béton (parpaings)... [2] ou à exécuter des revêtements et des enduits de façade.

II.1.7 Composants du mortier

Les composants principaux des mortiers sont : le sable, de liant et d'eau. Le liant le plus courant depuis le début du 20^e siècle est le ciment Portland, Dans un mortier, le liant peut être du ciment, de la chaux ou un mélange des deux.

II.1.7.1 Le sable

Le choix de la granulométrie du sable est en fonction des travaux à réaliser, pour des travaux de maçonnerie, on emploie souvent des sables 0/5 mm ; Cependant pour des travaux de briquetage ou d'enduits, le sable est plus fin 0,5 et 2 mm. Le rôle du sable dans un mortier est de diviser la masse du liant pour permettre la prise (liant aérien). Aussi pour abaisser le prix de revient du mortier. Et enfin, diminuer le retrait et ses conséquences (les fissurations) du fait que le sable est incompressible que le retrait se trouve amoindri.

II.1.7.2 Le liant :

Quel qu'il soit, le liant employé doit être de bonne qualité. Son choix pour la confection d'un mortier est très important. Il peut-être du ciment portland, du ciment de maçonnerie, de la chaux.

Le ciment de maçonnerie : est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air.

La chaux : qui est le composant traditionnel du mortier, possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air ; ce processus peut être fortement ralenti par temps froid et humide.

II.1.7.3 L'eau :

Le choix de l'eau de gâchage a aussi une grande importance car elle remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Les mortiers

devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

II.1.7.4 Les adjuvants :

Les adjuvants sont employés pour les mortiers de maçonnerie et dans certains cas leur emploi est certainement avantageux. Cependant, leur emploi n'est généralement pas recommandé. Ils donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment et chaux. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec en plus des adjuvants.

II.1.8 Fonctions d'un mortier

La fonction principale d'un mortier est de liasonner les éléments de maçonnerie de manière à ce qu'ils constituent un seul bloc. Par ailleurs, le mortier sépare les éléments et remplit toutes les fentes et fissures en formant une surface de contact homogène. Le rejointoiement doit permettre de renforcer les propriétés structurales des éléments et en même temps empêcher la pénétration de la pluie. Ceci exige une adhérence complète. Si elle est réalisée, le mur aura une durabilité suffisante pour résister aux éléments.

Les mortiers sont des éléments indispensables à toute construction. Il peut être utile pour la plupart des travaux de construction et de rénovation en maçonnerie. :

- Lier des briques ou des pierres entre elles,
- Effectuer l'enduit d'un mur,
- Sceller des éléments,

Les types de mortiers sont choisis selon l'application. Il existe de multiples types de mortiers avec différentes propriétés et applications, plus ou moins adaptés en fonction des usages ou en fonction du liant.

Les mortiers les plus fréquemment utilisés sur les chantiers sont Les mortiers de ciment, c'est le produit le plus basique qui soit, indispensable pour construire un mur et lier les pierres ou briques entre elles. Il s'agit d'un mélange classique de ciment, de sable et d'eau.

Le mortier de ciment est très résistant et étanche à l'eau mais sujet à la fissuration : convient pour l'assemblage de blocs béton , Pour les jointements et les scellements, on peut envisager de se passer de sable. [1, 2]

II.1.8 Formulation (fabrication) des mortiers :

Les proportions de liant et de sable dépendent en grande partie de la qualité et la résistance du mortier mise en œuvre. L'eau, bien qu'en quantité limitée, joue également un rôle déterminant dans la bonne tenue du mortier. Le rapport quantité de liant sur quantité du mortier prend le nom de "dosage".

Le dosage du mortier peut varier sensiblement en fonction de l'utilisation et du type de mortier à réaliser. Il est une opération qui doit être faite avec précision car la résistance finale de l'ouvrage en étant très dépendante. Il ne peut alors être question d'en changer les données soit volontairement pour des raisons d'économies soit involontairement par négligence.

Il existe deux façons de formuler le mortier.

A. Dosage en volume :

Les quantités des composantes des mortiers sont déterminées et ajustées en volume. Le mortier se dose de manière générale de façon assez simple :

1 volume de ciment, 2 à 4 volumes de sable pour 1/2 de volume d'eau.

Par exemples pour Mortier normalisé : un volume de ciment, 3 volumes de sable normalisé pour 1/2 de volume d'eau. ($S/C = 3$ et $E/C = 0,5$).

B. Dosage en poids :

Le dosage en poids d'un mortier est le poids de liant inclus dans un mètre cube de mortier fini. Selon les masses volumiques, la quantité de mélange et de matériaux qui le composent nous donnera des résultats différents en matière de construction.

II.1.9 Caractéristiques des mortiers

D'après leurs propriétés, les mortiers se subdivisent en deux catégories : les mortiers plastiques et les mortiers durcis.

II.1.9.1 Mortier à l'état frais « état plastique »

La propriété la plus importante du mortier plastique est son ouvrabilité. On peut la définir comme la propriété du mortier à s'étaler à la truelle pour colmater toutes les fentes et fissures de l'élément de maçonnerie. En réalité, c'est une combinaison de plusieurs propriétés, comprenant la plasticité, la compacité et la cohérence.

Bien que la classe des sables et la proportion des matériaux jouent un rôle important, c'est la teneur en eau qui détermine les valeurs finales de l'ouvrabilité du mortier.

II.1.9.2 Mortier à l'état durci

Le mortier durci possède un certain nombre de propriétés de résistance mécanique d'importance majeure.

La solidité du rejointoiement entre le mortier et l'élément est très importante, ainsi que la bonne ouvrabilité et un bon pouvoir de rétention d'eau donnent au rejointoiement une force maximale et par le fait même ces qualités sont plus importantes que la résistance du mortier à la compression.

La résistance à la flexion est également importante, parce qu'elle détermine la capacité d'un mortier à résister à la fissuration. Les mortiers devraient toujours avoir moins de résistance que les éléments de maçonnerie pour que les fissures se produisent dans les joints, où elles peuvent être facilement colmatées.

Les résistances du mortier sont mesurées sur des éprouvettes fabriquées à partir des moules normalisées de différentes **dimensions** et **matériaux (plastique ou, métal)** [2].

II.2. Définition de la pyrolyse :

Par définition **la pyrolyse** a pour principe de chauffer le composé organique en l'absence d'oxygène pour éviter l'oxydation et la combustion. Son action sur une surface a pour effet la modification de sa structure et la dégradation de certains de ses constituants botaniques fonction de la température.

La cellulose se décompose rapidement à des températures aux alentours de 350°C, les autres composés lignocellulosiques (lignines, pectines, hémicelluloses, matières extractibles) se dépolymérisant partiellement ou complètement à des températures inférieures.

II.2.1 Définition du biochar

Le biochar est un matériau solide carbonique poreux à haute teneur en carbone, produit en chauffant de la biomasse telle que du bois, du fumier ou des feuilles dans un récipient couvert avec peu ou pas d'air dans un processus appelé pyrolyse. L'intensité de la température de pyrolyse améliore la qualité du Biochar. Ce processus se produit dans un environnement pauvre en oxygène et la température peut varier de 600 à 700°C. Le biochar donc est une forme stable de carbone qui dure plus longtemps ; Le charbon actif peut être créé à partir de précurseurs de biocharbon par activation physique ou chimique. L'activation physique implique une pyrolyse ou un traitement thermique suivi d'une exposition à un gaz oxydant. Il possède des propriétés uniques qui le rendent utile dans la construction et l'agriculture. Il peut améliorer la qualité de l'air, absorber l'humidité, protéger contre les rayonnements électromagnétiques et absorber les odeurs et polluants indésirables. Les enduits à base de biocharbon conviennent à une utilisation toute l'année car ils n'empêchent pas la circulation de l'air dans les bâtiments.

Le biocharbon pyrolysé a le potentiel d'absorber le CO₂ dans les applications à base de ciment, ce qui en fait une option peu coûteuse et respectueuse de l'environnement pour la fabrication de composites cimentaires à haute performance. De ce fait, Le biochar peut être utilisé comme adjuvant dans le béton et comme additif composite cimentaire. Des études ont montré que l'ajout de 1 à 2 % en poids de biocharbon au mortier peut améliorer sa résistance mécanique, avec une augmentation des résistances à la traction et à la compression de plus de 20 %. L'incorporation de 4 % de biochar dans le béton entraîne des améliorations significatives de diverses propriétés mécaniques et de durabilité. En utilisant des particules de biocharbon plus petites dans le mélange de béton, les espaces vides du mélange sont remplis plus efficacement, ce qui donne une structure plus compactée et plus dense [3].

II.3 Méthodologie expérimentale

Au total, 32 mélanges différents de mortier vert ont été créés et réalisés en utilisant différents taux de WRW, WRWB, %CaCO₃ et temps d'immersion. Une étude expérimentale a été menée sur des échantillons prismatiques mesurant 40x40x160 mm³ afin d'évaluer les différentes qualités fournies par les mortiers verts préparés pendant la phase de durcissement.

II .3.1. Matériaux

Le ciment Portland ordinaire de type II avec une résistance de 42,5 N, a été utilisé pour produire des mélanges de mortier vert dans cette étude. Le ciment a été acheté en Algérie auprès d'un fabricant local et était conforme aux exigences de la norme ASTM C150 [4] selon le Tableau II.1.

Tableau II.1 : Composition chimique du ciment.

Analyse des caractéristiques chimiques%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
Valeurs	21.1	4.7	3.5	61.2	1	2.4	0.9	0.4	0.007

Le **Tableau II.1** est une liste des propriétés chimiques du ciment utilisé pour créer n'importe quel type de mortier de ciment montrant le CaO le plus élevé (61.2%). Les tests ont été effectués dans le laboratoire de la société Hadjar-Soud Cement Company (SCHS).

Dans cette étude, le sable de dune a été utilisé car il est abondant dans les régions sahariennes de l'Algérie et couvre plus de 60% du pays.

Les courbes de taille des particules pour le ciment, le biochar et le sable des dunes du désert algérien sont présentées dans la **Figure II. 2**.

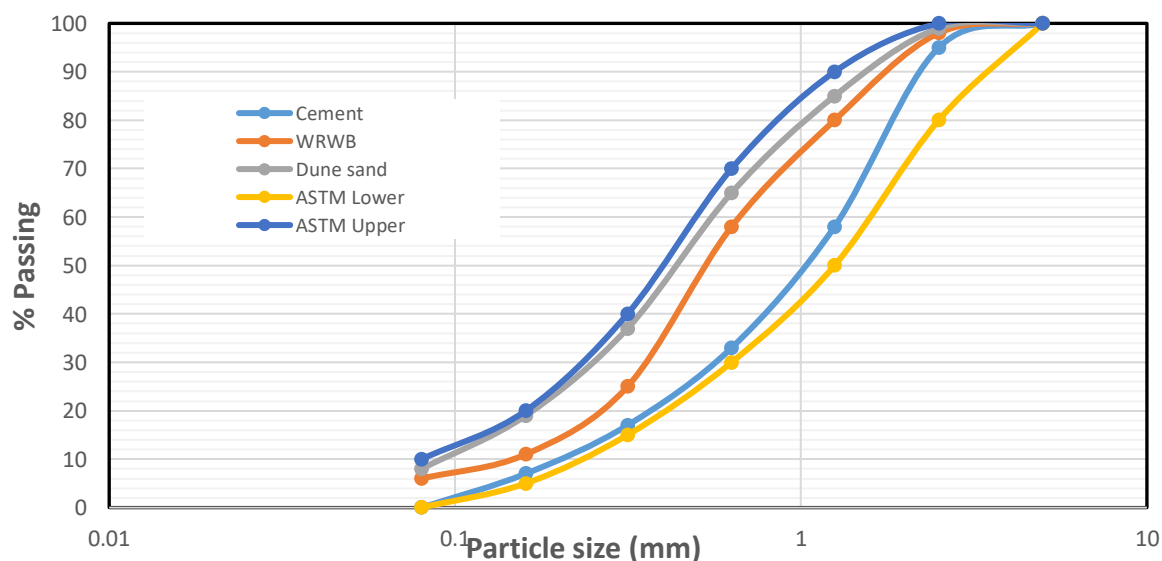


Figure II.2 : Analyse granulométrique du ciment, du biochar et du sable de dune utilisés dans la composition de mortiers verts.

En ce qui concerne les états limites de l'ASTM C33, il a été constaté que la distribution des tailles de particules des différents mélanges étudiés était satisfaisante [5]. Les caractéristiques physiques des agrégats utilisés conformément aux exigences de l'ASTM sont résumées dans le **Tableau II.2**.

Tableau II.2 : Propriétés physiques des agrégats et du biochar.

Caractéristiques	Unit	Ciment	Sable de dune	Biochar
Densité apparente	Kg/m ³	3100	1570	1460
Densité absolue	Kg/m ³	---	2550	2640
Coefficient d'uniformité	---	2.05	2.46	5.25
Module de remise en forme	---	1.45	1.55	3.11
Absorption d'eau	%	2.88	1.88	3.10

En termes de poids spécifique et de densité apparente, le tableau montre que le ciment est plus léger que le biochar. Tous les paramètres mesurés se situent toutefois dans les fourchettes des normes ASTM conventionnelles, à l'exception de l'absorption d'eau accrue du biochar. Afin de faciliter cette absorption, il est composé d'un rapport eau/ciment ($E/C = 0,6$).

L'entretien régulier des palmiers *W robusta* entraîne une accumulation annuelle substantielle de déchets agricoles. Plutôt que d'être jetés, ces déchets représentent une ressource précieuse et potentiellement lucrative qui peut être réutilisée efficacement dans une variété d'applications industrielles. La grande quantité de ces déchets par rapport à *Washingtonia filifera* a servi de source principale pour générer les fibres de déchets WRW utilisées dans cette étude pour remplacer le ciment dans la production de matériaux cimentaires (**Figure II.3**).

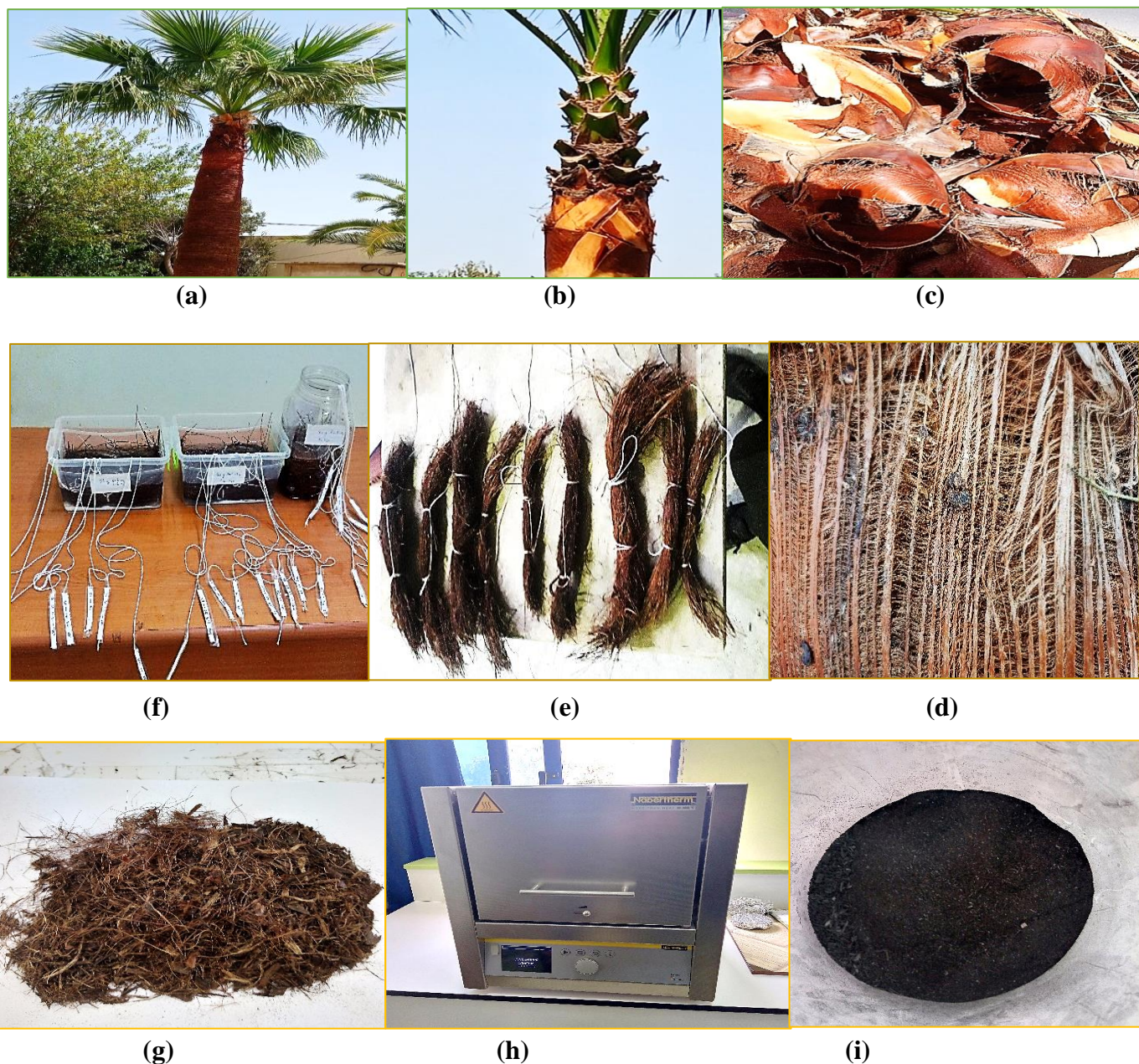


Figure II.3 :(a) Plante *Washingtonia robusta*, (b) tronc de la plante, (c) déchets de maille extraits du tronc, (d) détail du zoom des fibres de maille utilisées dans cette étude (e) fibres extraites de la maille et regroupées en série, (f) fibres WR traitées, (g) déchets coupés à petite taille, (h) four de pyrolyse et (i) biochar obtenu.

Dans les applications utilisant du ciment, le biochar peut être utilisé pour séquestrer le carbone. Ainsi, les déchets *W robusta* ont été pyrolysés à une température de 500°C pour produire du biochar. Pour garantir que les déchets soient suffisamment secs avant la pyrolyse, ils ont été séchés à 60-70°C pendant 24 heures. Les déchets WRW ont été pyrolysés à 500°C après avoir été chauffés dans un four à mouffles à température ambiante (25°C). Cette température de pyrolyse a été choisie sur la base de

nos recherches antérieures [6]. Un petit évent et un système de ventilation à l'intérieur du four servent d'émission et aident à garantir que les vapeurs sont expulsées de manière uniforme pendant la pyrolyse. Cela empêche les matières organiques et volatiles de se redéposer dans les pores et sur la surface du biochar. Après avoir atteint la température de pyrolyse, la température a été maintenue pendant 30 minutes à une vitesse de 10°C/min. Le biochar ainsi créé a été conservé dans un récipient hermétique après refroidissement à température ambiante.

Les essais de traction expérimentaux des fibres sont réalisés à l'aide d'un appareil électromécanique universel d'une capacité de 5 KN fabriqué par Zwick/Roell Z005 avec une vitesse de 1 mm/min et une longueur de mesure de 20 mm entre les prises de fixation, comme indiqué dans le **Tableau II.3**.

Tableau II.3 : Propriétés physico-mécaniques des fibres brutes de W. Robusta.

propriétés	Echantillons testés	Longueur de jauge (mm)	diamètre (µm)	Résistance à la traction (MPa)	Module de young (GPa)	Résistance à la rupture (%)
valeurs	30	20	267 ± 78	264 ± 179	3.56 ± 2.14	10.13 ± 8.02

II.3.2 Production d'échantillons de mortier

Dans cette étude, un rapport eau/ciment de 0,6 a été utilisé, et le rapport typique ciment/sable dans les mélanges de mortier vert a été maintenu à un rapport de 1 :3. Cependant, la quantité de ciment dans les mélanges a été modifiée en la remplaçant par différentes proportions de biochar WRWB et de déchets de fibres WRW. Les caractéristiques des échantillons de mortier vert pour chaque combinaison sont indiquées dans le **Tableau II .4**, ainsi que leurs désignations et les pourcentages de combinaison correspondants.

Tableau II.4 : La composition des mortiers produits (Kg/m³)

Cluster	Runs	Mortar mix	Factors			D-CaCO ₃ (%)	Sand (g)	Water (g)	W/C	Cement (g)	WRW (g)	WRWB (g)
			A- WRW (%)	B- WRWB (%)	C-Time (hours)							
Control mortar	1	RM	0	0	0	0	1350	225	0.5	450	0	0
	2	GR-0.5-0	0.5	0	0	0	1350	225	0.6	447.75	2.25	0
Green mortar (GR -R)	3	GR-1-0	1	0	0	0	1350	225	0.6	445.5	4.5	0
	4	GR-2-0	2	0	0	0	1350	225	0.6	441	9	0
	5	GR-0-2	0	2	0	0	1350	225	0.6	441	0	9
Hybrid green mortar (WRW - T/WRWB)	6	GR-0.5-1.5-4-24	0.5	1.5	0	0	1350	225	0.6	441	6.75	2.25
	7	GR-1-1-4-24	1	1	1	4	1350	225	0.6	441	4.5	4.5
	8	GR-1.5-0.5-4-24	1.5	0.5	1	4	1350	225	0.6	441	2.25	6.75
	9	GR-0.5-1.5- 4-72	0.5	1.5	1	4	1350	225	0.6	441	6.75	2.25
	10	GR-1-1-4-72	1	1	2.5	4	1350	225	0.6	441	4.5	4.5
	11	GR-1.5-0.5-4-72	1.5	0.5	2.5	4	1350	225	0.6	441	2.25	6.75
	12	GR-0.5-1.5- 4-168	0.5	1.5	2.5	4	1350	225	0.6	441	6.75	2.25
	13	GR-1-1-4-168	1	1	5	4	1350	225	0.6	441	4.5	4.5
	14	GR-1.5-0.5-4-168	1.5	0.5	5	4	1350	225	0.6	441	2.25	6.75
	15	GR-0.5-1.5- 8-24	0.5	1.5	5	4	1350	225	0.6	441	6.75	2.25
	16	GR-1-1-8-24	1	1	1	8	1350	225	0.6	441	4.5	4.5
	17	GR-1.5-0.5-8-24	1.5	0.5	1	8	1350	225	0.6	441	2.25	6.75
	18	GR-0.5-1.5- 8-72	0.5	1.5	1	8	1350	225	0.6	441	6.75	2.25
	19	GR-1-1-8-72	1	1	2.5	8	1350	225	0.6	441	4.5	4.5
	20	GR-1.5-0.5-8-72	1.5	0.5	2.5	8	1350	225	0.6	441	2.25	6.75
	21	GR-0.5-1.5- 8-168	0.5	1.5	2.5	8	1350	225	0.6	441	6.75	2.25
	22	GR-1-1-8-168	1	1	5	8	1350	225	0.6	441	4.5	4.5
	23	GR-1.5-0.5-8-168	1.5	0.5	5	8	1350	225	0.6	441	2.25	6.75
	24	GR-0.5-1.5- 16-24	0.5	1.5	5	8	1350	225	0.6	441	6.75	2.25
	25	GR-1-1-16-24	1	1	1	24	1350	225	0.6	441	4.5	4.5
	26	GR-1.5-0.5-16-24	1.5	0.5	1	24	1350	225	0.6	441	2.25	6.75
	27	GR-0.5-1.5- 16-72	0.5	1.5	1	24	1350	225	0.6	441	6.75	2.25
	28	GR-1-1-16-72	1	1	2.5	24	1350	225	0.6	441	4.5	4.5
	29	GR-1.5-0.5-16-72	1.5	0.5	2.5	24	1350	225	0.6	441	2.25	6.75
	30	GR-0.5-1.5- 16-168	0.5	1.5	2.5	24	1350	225	0.6	441	6.75	2.25
	31	GR-1-1-16-168	1	1	5	24	1350	225	0.6	441	4.5	4.5
	32	GR-1.5-0.5-16-168	1.5	0.5	5	24	1350	225	0.6	441	2.25	6.75

GRx-y-z-w

X : WRWcontent (%), Y : WRWB content (%), Z: CaCO₃concentration (%) and W: immersion duration (h).

Quatre dosages différents de déchets de fibres WRW et de biochar WRWB ont été utilisés à la place du ciment dans des proportions de 0,5 % en poids, 1 % en poids, 1,5 % en poids et 2 % en poids. La durée d'immersion pour le traitement allait de 24 à 168 heures.

Les déchets de fibres de bois traités ont été retirés après le traitement et rincés avec de l'eau distillée jusqu'à ce que la composition chimique de l'eau de rinçage soit neutre. Les eaux usées traitées ont ensuite été séchées au four pendant 24 heures à 50°C. Elles ont ensuite été conservées pour une utilisation ou un examen ultérieur après avoir été séchées et refroidies. Conformément à la norme NF-EN 196-1, pour la fabrication de mortiers standards, des mortiers contenant des BRF et du biochar de BRF ont été développés [7]. L'eau a été incorporée au mélange pour créer un mélange homogène après que les ingrédients granulaires, y compris le ciment, le sable WRW et WRWB, aient été préalablement introduits.

Après avoir été mélangés pendant 4 minutes, les bio-mortiers ont été stratifiés en deux phases dans des moules prismatiques, qui ont reçu 70 impacts avec une table vibrante conçue pour réaliser des essais de flexion, afin d'éliminer toute bulle d'air supplémentaire. Après une période de 24 heures, les échantillons ont été démoulés puis séchés pendant 28 jours à 25°C et 90% d'humidité avant d'être analysés (**Figure II.4**). La résistance mécanique et la porosité des échantillons ont été évaluées après 28 jours.

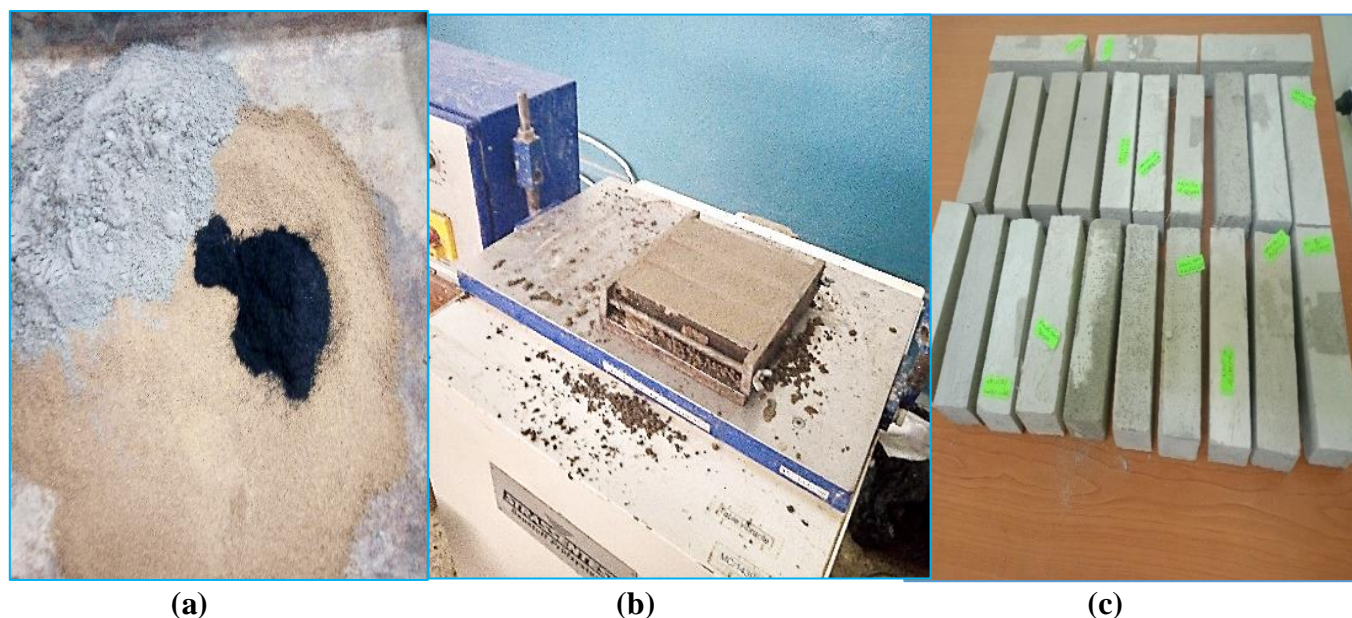


Figure II.4:(a) Élaboration des mortiers verts, (b) mortier frais sous la table vibrante et (c) éprouvettes de compression et de flexion.

II.3.3 Densité apparente, porosité et absorption d'eau capillaire des mortiers verts élaborés à partir de déchets végétaux de Robusta et de biochar

La densité apparente, la porosité et l'absorption capillaire de l'eau sont des propriétés importantes utilisées pour caractériser la structure physique des matériaux. Conformément aux normes NF-AFNOR [8], ASTM C1585 [9], and ASTM C138 [10], la densité apparente, l'absorption d'eau et la porosité accessible à l'eau des mortiers verts conservés ont été évaluées.

Les résultats sont cohérents avec la moyenne des trois expériences. Avant que les matériaux ne soient soumis à des essais mécaniques de flexion et de compression, des évaluations de la densité ont été effectuées. La masse et le volume des mortiers verts renforcés par les déchets WRW et le biochar WRWB ont été calculés pour déterminer la densité apparente (ρ) des mortiers verts renforcés par les fibres WRW et le biochar WRWB. La formule suivante peut être utilisée pour obtenir la densité apparente (kg/m^3) :

$$\rho = M_{mortar}/V_{mortar} \quad (1)$$

Où : M est la masse de l'échantillon (kg), V est son volume (m^3) et ρ représente la densité apparente (kg/m^3).

L'absorption d'eau est calculée à l'aide de **l'équation 2**, où : M_{wet} and M_{imm} sont respectivement la masse immergée de l'échantillon (g) et la masse humide à l'intérieur du four pendant la période de 48 heures [11].

$$WA (\%) = 100 \frac{M_{imm} - M_{wet}}{M_{wet}} \quad (2)$$

Sur la base des échantillons immergés dans l'eau, M_w , saturés d'air, M_a , puis cuits à 90°C , M_d , la porosité P a été calculée à l'aide de l'équation suivante [12]:

$$P(\%) = 100 \frac{(M_a - M_d)}{(M_a - M_w)} \quad (3)$$

II.3.4 Résistance mécanique

Afin d'évaluer les propriétés mécaniques des éprouvettes, des essais de compression et de flexion à trois points ont été réalisés à l'aide des machines du laboratoire (LGCH) de l'Université du 8 mai 1945 de Guelma (Algérie). La machine UNIFRAME d'une capacité de 50 KN réalise l'essai de flexion trois points sur des échantillons prismatiques (4x4x16) cm³ à température ambiante selon la norme ASTM C109 [12] avec une grande précision dans l'affichage de la charge de rupture et du déplacement. Les deux sections obtenues après rupture par flexion sont soumises à un essai de compression à l'aide d'une presse automatisée d'une capacité de 2000 kN et d'une vitesse de 0,5 MPa/s conformément à la norme ASTM C348 [13].

II.3.5 Planification des expériences sur base de statistiques

Le plan consiste à remplacer progressivement le ciment par des matériaux fabriqués à partir de biochar WRWB et de déchets de fibres WRW à différents taux : de 0 % à 2 % avec un pas de 0,5 % traité avec 4 % à 16 % de CaCO₃ sur une période de 24 heures à 168 heures.

La relation entre les intrants d'un processus et les réponses ou résultats associés est expliquée de manière efficace par la méthode statistique connue sous le nom de RSM. La technique du plan composite central (CCD) utilisant la méthode RSM a été employée dans la recherche actuelle pour produire le plan de mélange. Elle permet également de décider plus facilement quels intrants doivent être combinés pour maximiser la réponse souhaitée.

L'équation 4, où Y représente la valeur de la réponse, illustre le modèle typique de second ordre appliqué dans RSM. Dans cette équation, B_0 est une constante, et, B_{ij} , B_{ii} , and B_i représentent respectivement les coefficients des paramètres quadratiques, interactifs et linéaires. Les valeurs des variables codées indépendantes qui déterminent la réponse (sortie) sont représentées par les lettres X_1, X_2, \dots, X_k .

$$Y = B_0 + \sum_1^k B_i X_i + \sum_1^k B_{ij} X_i X_j + \sum_1^k B_{ii} X_i^2 \quad (4)$$

Les facteurs pris en compte dans la conception du CCD comprennent le volume des WRW, des WRWB, la concentration en CaCO₃ et le temps d'immersion.

Les facteurs pris en compte dans la conception du CCD comprennent le volume des WRW, des WRWB, la concentration en CaCO₃ et le temps d'immersion.

Design Expert (v.13) a été utilisé pour produire le plan expérimental et effectuer une évaluation graphique, ce qui a permis une analyse et une interprétation complètes des résultats obtenus dans le cadre de l'étude. Les facteurs pris en compte dans la conception du CCD sont le volume de WRW, le volume de WRWB, la teneur en CaCO₃ et le temps d'immersion.

Un codage de niveau élevé (+1), moyen (0) et faible (-1) est attribué à chaque facteur pour représenter son niveau correspondant comme ci présenté dans le **Tableau II. 5**.

Tableau II.5 : Développement des différentes variables d'essai du processus et de leurs niveaux correspondants.

Facteur	symbole	Unité	Degré		
			Min (-1)	Medium (0)	Max (+1)
Contenant déchets de fibres (WRW)	A	%	0.5	1	2
Coontenant biochar (WRWB)	B	%	1	1.5	2
Durée d'immersion	C	h	24	72	148
Concentration CaCO₃	D	%	4	8	16

Le **tableau II.5** présente les niveaux et les plages de valeurs basés sur le CCD associés à chaque facteur d'entrée. Ces valeurs sont essentielles pour comprendre la configuration expérimentale et effectuer une analyse plus approfondie. Design Expert (v.13) a été utilisé pour la conception expérimentale et les investigations graphiques ultérieures, ce qui a permis une analyse et une interprétation complètes des résultats obtenus dans le cadre de l'étude.

II.3.6 Modélisation ANN

Une technique appelée réseaux neuronaux artificiels (RNA) est utilisée pour créer des modèles numériques et mathématiques qui reproduisent les propriétés neuronales opérationnelles du système nerveux humain [14]. Elle se compose de plusieurs neurones artificiels connectés qui peuvent chacun utiliser une formule simple pour créer une réponse à partir de n'importe quelle donnée fournie [15]. Selon l'équation 5, chaque neurone ou facteur d'entrée (X_i) voit ses poids (W_i) multipliés par lui, ajoutés aux autres entrées et, enfin, une valeur biaisée (b) est ajoutée pour ne produire qu'un seul résultat. L'approche ANN a été appliquée dans cette enquête à l'aide de MATLAB R2019a.

$$f = \tanh \sum_{i=1}^n W_i \times X_i + b \quad (5)$$

Le fait que l'ANN comporte une couche d'entrée, plusieurs couches intermédiaires et une couche de sortie lui vaut son nom commun de perceptron multicouche (MLP). Les réseaux neuronaux feedforward (FNN) d'un perceptron multicouche (MLP) sont formés à l'aide de l'algorithme de rétropropagation (BP) [16]. Dans un FNN, le flux d'informations part des nœuds qui fournissent l'entrée, passe par les nœuds non observés, puis, sans se répéter, se termine par les nœuds de sortie.

La rétro-propagation est un type d'apprentissage supervisé permettant de développer des algorithmes qui réduisent l'erreur en faisant varier la quantité de poids et de biais.

II.3.7 Critères de comparaison

L'importance des modèles RSM et ANN a été évaluée à l'aide d'un certain nombre de mesures statistiques, notamment le coefficient de corrélation (R^2), l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$), l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le pourcentage d'erreur absolue moyenne ($MAPE$). Les équations correspondantes de ces paramètres, **Eqs. 6 à 9**, sont présentées ci-dessous.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,pred} - y_{i,exp})}{\sum_{i=1}^n (y_{i,p} - y_{i,e})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sum_1^n \sqrt{\frac{(y_{i,pred} - y_{i,exp})^2}{n}} \quad (7)$$

$$MSE = \sum_1^n \sqrt{\frac{(y_{i,p} - y_{i,exp})^2}{n}} \quad (8)$$

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \frac{|(y_{i,pred} - y_{i,exp}) / y_{i,exp}|}{n} \quad (9)$$

Dans où, respectivement, $y_{i,exp}$, $y_{i,pred}$, et n représentent les informations issues de l'expérience, les résultats prédits par RSM et ANN et la taille de l'échantillon.

II.4 Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est la valorisation des ressources naturelles locales, renouvelables pour les utiliser en tant que matériaux de construction. Dans cette étude nous nous sommes intéressés au potentiel d'utilisation des fibres de déchets du palmier mené comme élément de renfort pour mortiers cimentaire. La fibre a été utilisée en substitution partielle du ciment ; le mortier de référence étant sans fibre. Un protocole d'essais expérimentaux a été mené pour étudier les composites à l'état frais et à l'état durci. Afin d'améliorer l'adhérence fibre-matrice cimentaire, d'une part, Il s'agit d'examiner à travers des différents traitements réalisés au laboratoire sur les propriétés mécaniques et morphologiques des fibres, et identifier d'autre part, l'effet de l'ajout à des taux croissants de ces fibres sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers réalisés. Globalement, dans ce chapitre, on a pu présenter des exemples intéressants des fibres disponibles, d'illustrer leurs capacités de renforcement et de présenter la modélisation numérique basée sur des approximations mathématiques avancées.

Références

1. Collection cimbéton CT G10 tome1 constituants des béton et mortiers p:10-20.
2. Mortiers, Cours (Technologie des Matériaux de Construction 1) TMC1, Abdeldjallil. Adit, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Faculté Des Sciences Et De La Technologie Département D' Architecture, page:11-17.
3. Kundan Yadav , R. L. Sharma (Comparative Study of Biochar and Charcoal and Their, Application in the Construction Industry. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2790644/v1>
4. C150/C150M A (2015) Standard specification for portland cement
5. ASTM C33 (2003) Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International
6. Boumaaza M, Belaadi A, Alshahrani H, et al (2023) Response Surface Methodology Optimization of Palm Rachis Biochar Content and Temperature Effects on Predicting Bio-Mortar Compressive Strength, Porosity and Thermal Conductivity. J Nat Fibers 20:2162184. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2162184>
7. EN 196-1 (2005) Methods of testing cement-Part 1: Determination of Stress. Eur Comm Stand
8. NF AFNOR (2010) Essai Pour Béton Durci—Essai de Porosité et de Masse Volumique—NF P18-459
9. ASTM (2013) C1585. Stand Test Method Meas Rate Absorpt Water by Hydraul - Cem Concr ASTM Int
10. Jayabal S, Velumani S, Navaneethakrishnan P, Palanikumar K (2013) Mechanical and machinability behaviors of woven coir fiber-reinforced polyester composite. Fibers Polym. <https://doi.org/10.1007/s12221-013-1505-5>
11. Khelifi A, Boumaaza M, Belaadi A, et al (2023) Effects of alkaline treatment of Washingtonia mesh waste on the mechanical and physical properties of bio - mortar : experimental and prediction models. Biomass Convers Biorefinery. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04221-w>
12. Belaadi A, Boumaaza M, Alshahrani H, Bourchak M (2023) Optimization of Palm Rachis Biochar Waste Content and Temperature Effects on Predicting Bio-Mortar : ANN and RSM Modelling. J Nat Fibers 20:2151547. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2151547>

13. ASTM C109 (2013) Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). 4:1–9
14. ASTM A (2014) C348-14. Stand Test Method Flexural Strength Hydraul Mortars; ASTM Int West Conshohocken, PA, USA 1–6
15. Ray S, Haque M, Ahmed T, Nahin TT (2021) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber. J King Saud Univ - Eng Sci. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.006>
16. Alemu HZ, Wu W, Zhao J (2018) Feedforward Neural Networks with a Hidden Layer Regularization Method. Symmetry (Basel) 10:. <https://doi.org/10.3390/sym10100525>

Chapitre **III**:
Résultats Et Analyse
Statistiques Par La
Méthodologie des
Surfaces De
Réponses

III.1. Introduction

La compréhension des mécanismes à l'origine de la formation de la porosité et de l'absorption dans les matériaux cimentaires est un enjeu majeur pour l'évaluation de leur durabilité. Le présent chapitre dédié à l'étude de porosité et du comportement des composites cimentaires biofibrés et en biochar. On s'intéresse aux méthodes d'amélioration du comportement des composites sur le long terme. La substitution du ciment Portland par des liants alternatifs est étudiée à travers une caractérisation de mortiers biofibrés et biocharbon formulés avec ces différents taux, et en particulier sur l'évolution de leurs propriétés sous hautes températures. Un traitement adéquat pour les fibres. Ainsi sont d'abord présentés en détails les traitements et leur optimisation. L'influence de ces traitements sur les propriétés des fibres est ensuite étudiée. Les propriétés de flexion, de compression et d'absorption d'eau ont été prédites avec précision par le modélisation numérique et analyse statistique par RSM ; Les résultats obtenus et les perspectives envisagées seront ensuite discutés.

III.2 Résultats et discussion

III.2.1 Densité apparente, porosité et absorption d'eau

Le **Tableau III.1** et la **Figure III.1** illustrent les résultats de l'absorption d'eau et de la porosité dans les mortiers verts développés après une période de durcissement de 28 jours où les WRWs et WRWB ont remplacé le ciment de 0,5 à 2 % et de 1 à 2 % en poids, respectivement. En raison de l'agrégation de l'interface fibre de biochar/particule poreuse, la porosité du mortier vert a été améliorée par l'ajout de biochar WRWB et de déchets WRW par rapport au mortier de base. L'absorption d'eau et la porosité ont augmenté dans tous les mortiers verts produits en augmentant les niveaux de remplacement (**Figure III.1a** et **1b**).

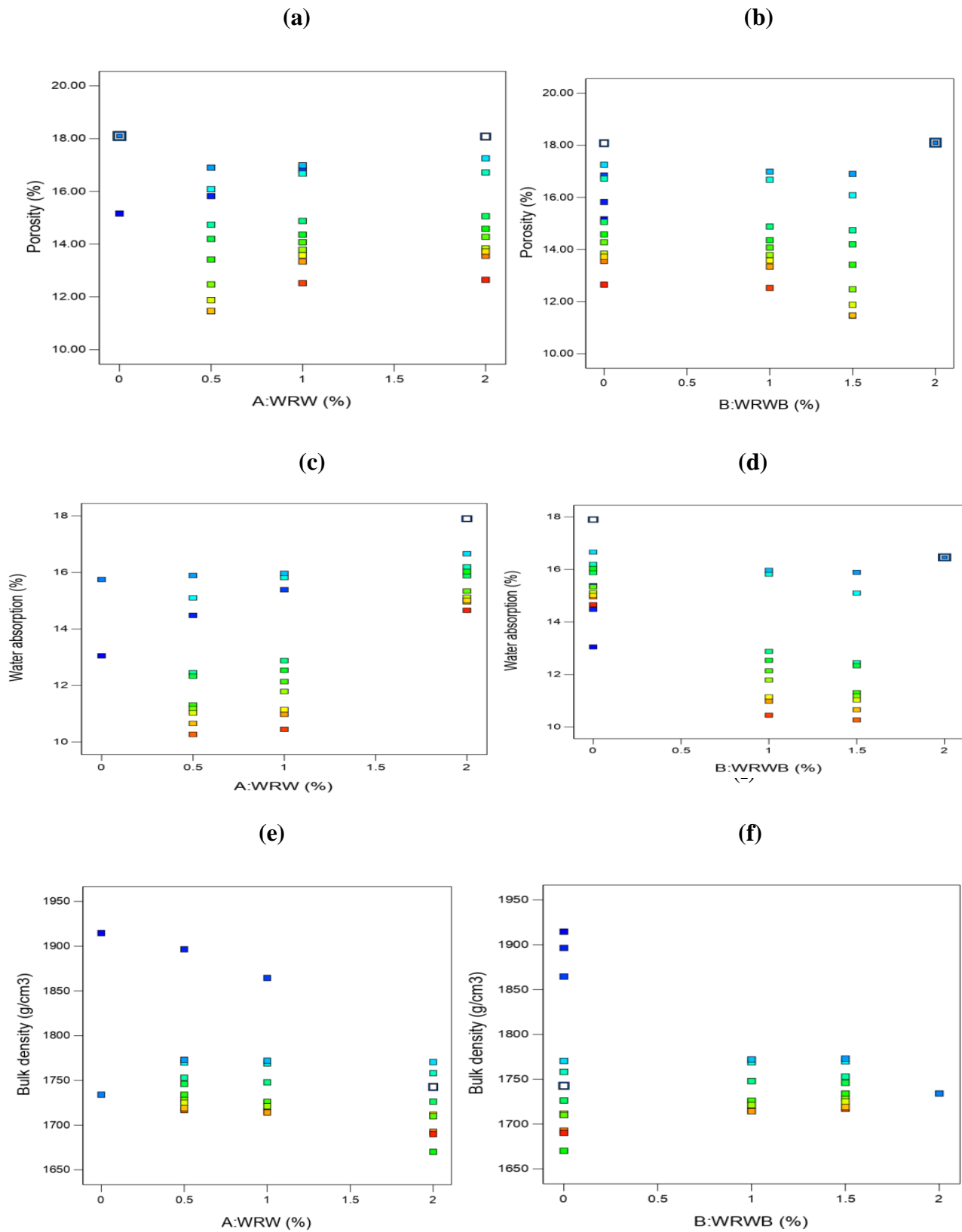


Figure III.1 : Variabilité de la porosité (a-b), de l'absorption d'eau (c-d) et de la densité apparente (e-f) des mortiers renforcés en fonction de WRW et WRWB.

Tableau III.1 : Résultats des propriétés physiques et mécaniques des mortiers dans lesquels WFW et WRWB ont remplacé partiellement le ciment.

Runs	A-WRW (%)	B-WRWB (%)	D-temps (heures)	C-CaCO ₃ (%)	résistance à la flexion (MPa)	SD	déplacement en flexion (mm)	SD	Résistance à la compression (MPa)	SD	déplacement en compression (mm)	SD	Densité apparente (g/cm ³)	SD	Absorbition d'eau (%)	SD	Porosité (%)	SD
1	0	0	0	0	4.52	1.04	0.83	0.22	23.3	4.47	0.85	0.18	1914.62	82	13.05	4.43	15.16	2.30
2	0.5	0	0	0	5.03	1.39	0.85	0.30	23.8	5.97	0.95	0.20	1896.48	114	14.48	4.95	15.82	2.98
3	1	0	0	0	5.11	0.25	0.91	0.15	24.1	1.09	0.98	0.21	1864.51	95	15.39	5.11	16.84	5.56
4	2	0	0	0	4.54	1.36	1.33	0.29	23.35	5.84	1.73	0.36	1742.69	81	17.9	9.01	18.08	2.98
5	0	2	0	0	4.63	1.35	0.81	0.31	23.59	5.80	1.32	0.28	1734.05	101	16.46	6.88	17.66	2.98
6	0.5	1.5	24	4	4.85	1.89	0.93	0.40	23.76	8.10	1.04	0.22	1773	65	15.89	5.42	16.9	4.16
7	1	1	24	4	5.7	0.90	1.01	0.19	23.88	3.87	1.24	0.26	1772	69	15.97	6.46	16.99	1.99
8	2	0	24	4	4.26	1.04	1.25	0.22	23.1	4.47	1.63	0.34	1770.49	95	16.66	8.49	17.25	2.30
9	0.5	1.5	72	4	4.45	0.90	0.89	0.19	22.9	3.87	1.06	0.22	1770	81	15.1	5.52	16.08	1.99
10	1	1	72	4	4.99	1.52	1.02	0.33	23.82	6.53	1.08	0.23	1769	59	15.82	5.63	16.68	3.35
11	2	0	72	4	4.45	0.76	1.04	0.16	22.9	3.26	1.45	0.30	1758.15	65	16.2	7.55	16.72	1.68
12	0.5	1.5	168	4	3.69	1.27	0.47	0.27	21.86	5.44	1.02	0.29	1753	45	12.45	5.31	14.74	2.79
13	1	1	168	4	4.43	1.32	0.83	0.28	22.54	5.68	1.23	0.26	1747.87	57	12.88	6.41	14.88	2.92
14	2	0	168	4	3.49	1.31	0.99	0.29	21.4	5.63	1.53	0.32	1726.27	106	15.88	7.97	15.06	2.98
15	0.5	1.5	24	8	5.13	0.82	0.65	0.17	23.55	3.51	0.98	0.21	1746	45	12.33	5.11	14.2	1.80

Chapitre III: Résultats Et Analyse Statistiques Par La Méthodologie des Surfaces De Réponses

16	1	1	24	8	5.83	1.4 6	0.81	0.31	24.45	6.29	1.15	0.2 4	1724.54	49	12.54	5.9 9	14.36	3.2 3
17	2	0	24	8	4.97	0.5 3	1.05	0.11	23.4	2.30	1.39	0.2 9	1670.11	20	16.03	7.2 4	14.58	1.1 8
18	0.5	1.5	72	8	4.34	0.6 2	0.57	0.13	22.66	2.66	0.94	0.2 0	1734	74	11.31	4.9 0	13.42	1.3 7
19	1	1	72	8	4.91	0.9 8	0.79	0.21	23.12	4.23	1.13	0.2 4	1726	66	12.14	5.8 9	14.07	2.1 7
20	2	0	72	8	4.78	0.1 7	1.03	0.14	22.91	2.73	1.43	0.3 0	1710	12 3	15.34	7.4 5	14.28	4.3 7
21	0.5	1.5	168	8	3.3	1.6 2	0.22	0.03	21.65	6.95	0.83	0.1 7	1728	86	11.18	4.3 2	12.47	5.7 7
22	1	1	168	8	4.14	1.3 2	0.5	0.28	22.16	5.68	0.94	0.2 0	1721.09	76	11.79	4.9 0	13.79	2.9 2
23	2	0	168	8	3.81	0.9 3	0.56	0.20	21.93	3.99	1.24	0.4 6	1710.72	98	15.12	6.4 6	13.84	2.0 5
24	0.5	1.5	24	16	4.1	1.0 7	0.37	0.09	21.99	4.59	0.78	0.1 6	1725	81	11.03	4.0 6	11.88	2.3 6
25	1	1	24	16	5.5	1.2 9	0.48	0.28	23.8	5.53	0.8	0.1 7	1717	64	11.15	4.1 7	13.58	8.1 3
26	2	0	24	16	5.19	0.6 2	0.51	0.13	23.43	2.66	1.08	0.2 3	1711.58	69	15.01	5.6 3	13.72	1.3 7
27	0.5	1.5	72	16	3.95	0.7 6	0.1	0.08	22.05	3.26	0.8	0.1 6	1719	58	10.66	4.1 7	11.47	1.6 8
28	1	1	72	16	4.84	1.3 5	0.31	0.10	22.86	5.80	0.93	0.1 9	1714.18	54	10.98	4.8 4	13.34	2.9 8
29	2	0	72	16	5.31	0.2 8	0.42	0.06	23.27	1.21	0.94	0.2 0	1692.58	84	14.96	4.9 0	13.56	3.6 2
30	0.5	1.5	168	16	2.96	0.7 6	0.19	0.12	20.9	3.26	0.75	0.2 6	1717	73	10.27	3.9 1	11.46	1.6 8
31	1	1	168	16	4.68	2.0 1	0.12	0.05	22.1	8.64	0.86	0.1 8	1715	61	10.45	4.4 8	12.52	5.0 9
32	2	0	168	16	4.75	1.9 0	0.11	0.04	22.18	8.18	0.89	0.3 9	1690	10 2	14.66	4.6 4	12.65	6.4 1

Les mesures de porosité pour les différents mélanges de mortier ont montré des pourcentages de 18,08 % pour 2 % de déchets de bois non traités, 17,66 % pour 2 % de déchets de bois et 15,16 % pour le contrôle. Un examen plus approfondi a révélé que le mortier adhérait fortement aux fibres des déchets WRW traités au CaCO_3 . Notamment, le mortier contenant 2 % de fibres traitées avec 4 % de CaCO_3 sur une période de 24 heures a produit la porosité la plus élevée de 17,25 %. Pour les mortiers GR-2-0-24-4, GR-2-0-72-4, GR-2-0-24-8 et GR-2-0-72-8, les pourcentages d'absorption d'eau au taux de remplacement de 2 % de déchets urbains ont été déterminés comme étant respectivement de 16,66, 16,2, 16,03 et 15,34 %. De même, au même pourcentage de remplacement, la porosité apparente a été mesurée à 17,25, 16,72, 14,58 et 14,28%, respectivement. L'augmentation de la porosité est le résultat de la création de vides dans le mortier, ce qui est en accord avec la recherche de Gupta et al. sur l'utilisation de déchets alimentaires et de biochar de bois comme additif dans les mortiers de ciment [1].

En outre, la diminution de la densité apparente pour les mortiers renforcés avec des WRWs bruts varie d'environ 1 % à 11 % de moins que celle du mortier de référence (**Figure III.1c**). Par rapport au mortier de référence, l'ajout de WRWs traitées a entraîné une diminution des valeurs de densité apparente des mortiers verts de 8 % à 15 %. En réalité, la diminution de la densité des mortiers verts et l'augmentation du volume des vides dans les fibres incluses sont liées. Ceci est principalement attribuable à la compaction insuffisante des mortiers verts suite à l'incorporation des WRWs et des WRWB, qui a réduit la densité des mortiers tout en augmentant leur porosité et leur capacité d'absorption d'eau.

La **Figure III.2** illustre la relation entre l'absorption d'eau et la porosité pour différents échantillons de mortier vert.

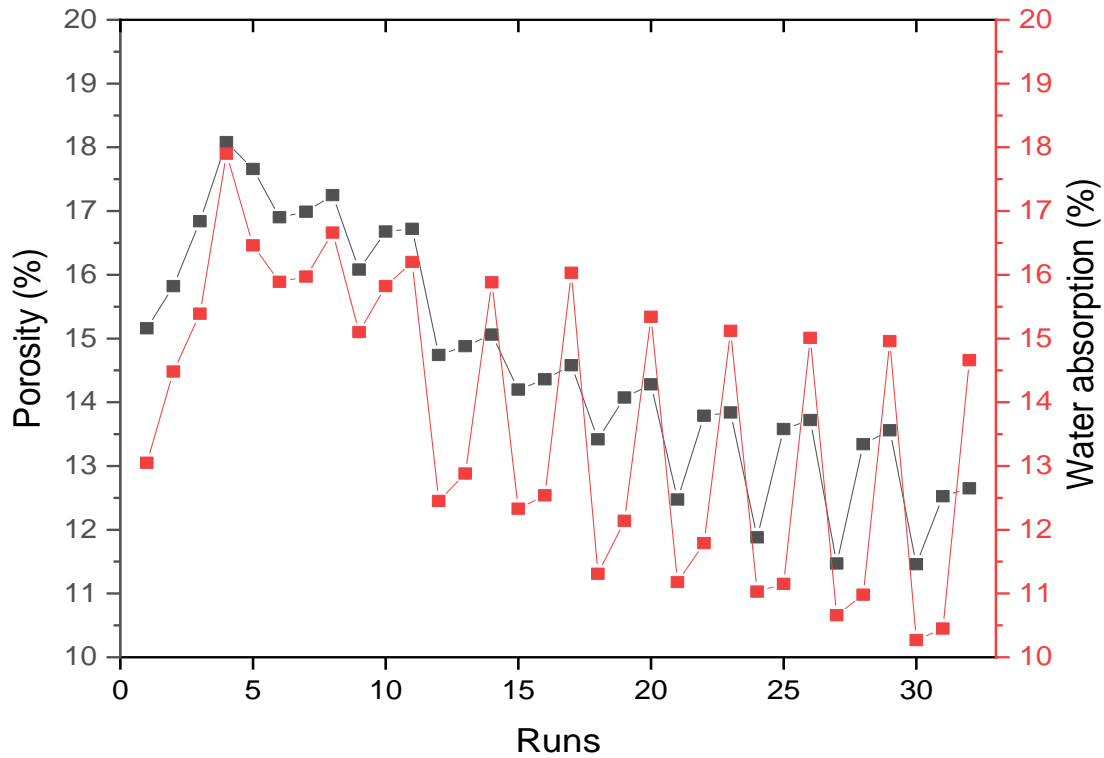


Figure III.2 : Variation de la porosité et de l'absorption d'eau des mortiers verts

Le graphique montre une corrélation positive, indiquant que lorsque la porosité diminue, l'absorption d'eau diminue également. Cette corrélation suggère que l'ajout de WRW et WRWB a un impact sur la porosité du matériau et, par conséquent, sur sa capacité d'absorption d'eau. La porosité est considérée comme un facteur crucial car elle influence la quantité d'eau que le matériau peut absorber.

III.2.2 Propriétés mécaniques

III.2.2.1. Modélisation à l'aide de la méthode RSM

Sur la base du CCD, un total de 32 essais a été réalisé en tenant compte des quatre variables d'entrée. Le tableau III.2 et les **Figures III.3** et **Figures III.4** présentent les résultats des différents mortiers, y compris les WRWs traités et non traités avec le biochar WRWB, ainsi que la résistance à la flexion (R_b), déplacement en flexion (Y_b), résistance en compression (R_c), and déplacement en compression (Y_c). L'ajout de 1 % de biochar WRWB et de 1 % de déchets WRW immergés dans 8 % de CaCO_3 pendant 24 heures a entraîné des augmentations de (R_c et R_b) de 23,30 à 24,45 MPa et de 4,52 à 5,83 MPa, respectivement. Lors des essais de compression et de flexion, les mortiers contenant 1% de

WRWB et 1% de WRW traités avec 8% de CaCO₃ pendant 24 heures ont révélé la meilleure composition (Figures III.3a et III.3c).

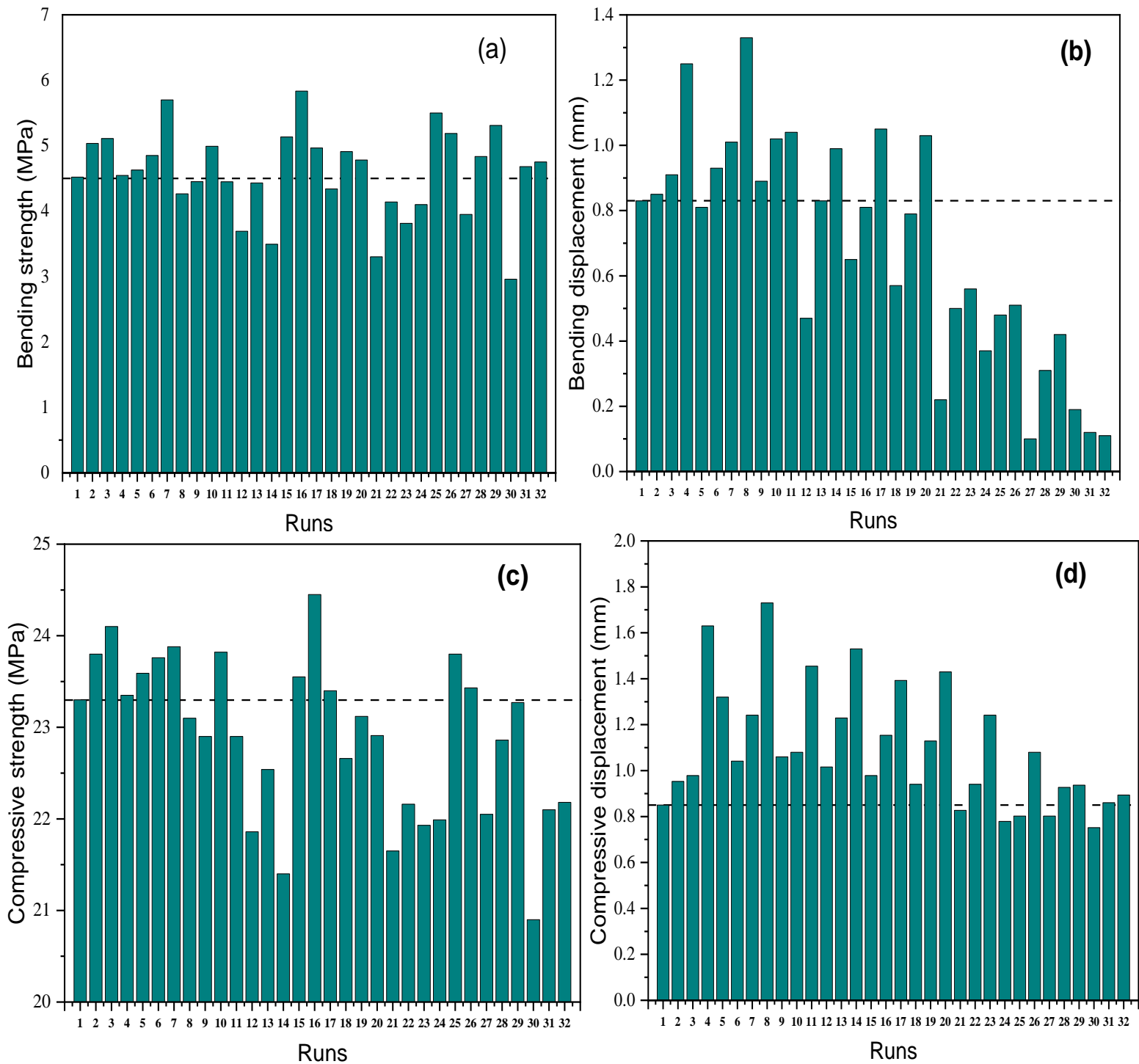


Figure III.3: Résistance à la flexion et à la compression et déplacement des mortiers verts renforcés avec WRWB, et WRW traités et non traités après 28 jours de cure.

On remarque que ; Les valeurs de R_c and R_b dans cette situation sont approximativement de 24,45 MPa et 5,83 MPa. D'après les résultats, cela indique des augmentations de 5 % et 29 %, respectivement. Cependant, les valeurs R_c et R_b diminuent lorsque la proportion de WRW et WRWB augmente (**Figures III. 4a et III.4c**). L'ajout de WRW a amélioré Y_c et Y_b de 0,85 à 1,73 mm et de 0,83 à 1,33 mm (**Figures III.3c et III.3d**).

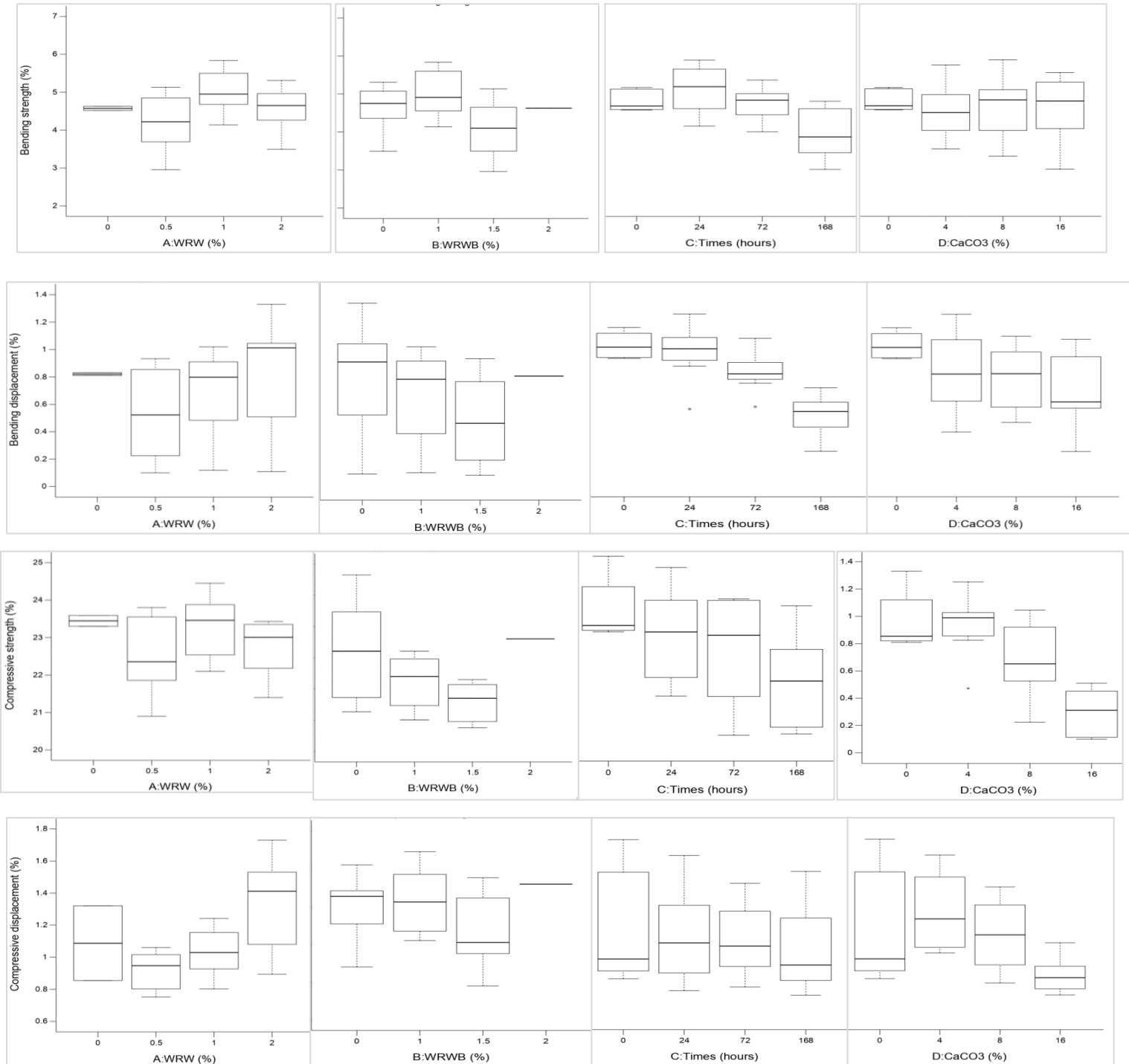


Figure III.4: Résistance à la flexion et à la compression et déplacement des mortiers verts renforcés avec WRWB, et WRW traités en fonction du temps d'immersion et CaCO₃% : après 28 jours de durcissement.

Les valeurs de déplacement les plus importantes ont été trouvées dans les mortiers contenant 2% de fibres WRW traités avec 4% de CaCO_3 pendant 24 heures. Les **Figures III (3c et 3d)** montrent que les valeurs dans ce cas pour Y_c et Y_b étaient de 1,63 mm et 1,25 mm, respectivement, ce qui représente une augmentation considérable de 92% et 81%. Les valeurs les plus basses de Y_c et Y_b ont également été produites par des mortiers contenant 2 % de fibres et traités avec 16 % de CaCO_3 pendant 168 heures (**Figures III.4c et III.4d**). Il a été constaté que la teneur accrue en déchets de bois dans les mortiers permettait des déformations plus importantes et donc ductiles, par rapport au caractère fragile des éprouvettes de référence. Il s'agit d'une amélioration considérable par rapport aux résultats de Boumaaza et al. 2022 [2], qui ont constaté que l'ajout de 1 % de biochar au ciment augmentait la résistance au déplacement et à la flexion de 20 % et 5 % par rapport au mortier de référence, respectivement. En outre, il a été découvert que les propriétés de flexion et de compression étaient supérieures à celles de Khelifi et al. [3], qui ont renforcé le mortier cimentaire en utilisant uniquement des fibres de *Washingtonia filifera* traitées avec du NaOH. Pour la résistance à la flexion, la résistance à la compression, le déplacement en flexion et le déplacement en compression, ils ont obtenu des améliorations de 12 %, 5,9 %, 51 % et 67 %, respectivement.

Selon les résultats expérimentaux, la quantité de WRWs, WRWB, la concentration de bicarbonate CaCO_3 et le temps d'immersion ont tous un impact substantiel sur les caractéristiques mécaniques, l'absorption d'eau et la porosité des mortiers. Le traitement au CaCO_3 devrait améliorer la capacité d'adhérence et les performances mécaniques en augmentant l'adhésion des fibres à la matrice de ciment. Selon les résultats de l'étude, le biochar a le potentiel d'être un ingrédient avantageux pour les composites cimentaires renforcés par des fibres.

La **Figure III.5** illustre l'importance du pourcentage de fibres et de leurs traitements dans l'amélioration de l'attachement de la surface des fibres à la matrice cimentaire, et montre également comment cela affecte les performances après rupture et les propriétés mécaniques des mortiers verts développés.



Figure III.5 : (a) Rupture en flexion des mortiers verts renforcés avec des fibres de *W. robusta*, (b) zoom de la section du mortier avec des fibres non traitées dans la zone rouge #3, (c) zoom du mortier avec des fibres traitées dans la zone jaune #16, et (d) zoom de la section du mortier dans la zone verte #16.

Cette figure illustre les zones de rupture typiques des mortiers de ciment contenant des fibres de déchets de déchets urbains traités et non traités et des particules carbonatées. Elle montre une amélioration de la rupture fragile dans les spécimens dépourvus de renforcement et une rupture plastique nettement plus importante dans les spécimens renforcés par des fibres traitées. L'ajout de fibres à une matrice cimentaire qui présente une fragilité mécanique offre une alternative pour améliorer la ductilité du produit tout en augmentant sa résistance à la flexion et à la compression, car les fibres influencent le développement des fractures dans la matrice cimentaire lorsqu'elle est soumise à diverses charges [4]. En outre, les granulés carbonatés inactifs capturent les fractures en expansion, les obligeant à changer de trajectoire. L'action post-rupture et les propriétés mécaniques du mortier vert ont été améliorées grâce à une quantité dense et à leurs traitements, ce qui a amélioré l'adhésion des fibres à la matrice cimentaire. Les surfaces de la fissure sont reliées par les fibres traitées, ce qui empêche la fissure de s'agrandir (**Figure III.5c et III.5d**).

III.2.2.2. Résultats de l'ANOVA

Les réponses à la compression, à la flexion et à l'absorption d'eau ont été utilisées pour évaluer les propriétés mécaniques du mortier dans lequel WRW et WRWB ont été utilisés pour remplacer un pourcentage de 2 % du ciment. Les méthodes de régression polynomiale, telles que les modèles linéaires, cubiques, d'interaction à deux facteurs (2FI) et quadratiques, ont été utilisées pour examiner ces caractéristiques. Étant donné qu'ils offrent un coefficient R^2 , un R^2 ajusté et un R^2 prévisionnel significativement plus élevés, les modèles quadratiques peuvent être considérés comme l'option la plus pertinente...

L'ANOVA est une approche largement utilisée qui classe les nombreux facteurs d'entrée en fonction de leur influence sur les paramètres de sortie, a été utilisée pour analyser les données.

Tableau III.2 : Analyse ANOVA de la résistance et du déplacement en flexion, de la résistance et du déplacement en compression et de l'absorption d'eau pour les mortiers produits.

<i>R_b</i>						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	12.95	11	1.18	25.57	< 0.0001	significant
A-WRW	1.53	1	1.53	33.30	< 0.0001	
B-WRWB	0.5317	1	0.5317	11.55	0.0029	
C-Times	4.92	1	4.92	106.92	< 0.0001	
D-CaCO ₃	0.0152	1	0.0152	0.3307	0.5717	
AB	0.4025	1	0.4025	8.74	0.0078	
AC	0.2735	1	0.2735	5.94	0.0243	
AD	2.99	1	2.99	65.02	< 0.0001	
CD	0.1768	1	0.1768	3.84	0.0641	
A ²	0.3242	1	0.3242	7.04	0.0152	
C ²	0.0068	1	0.0068	0.1482	0.7044	
D ²	0.0059	1	0.0059	0.1282	0.7241	
Residual	0.9208	20	3.77			
Cor Total	13.87	31				
Fit statistic	Std. Dev.	0.21		R²	0.9336	
	Mean	4.58		Adjusted R²	0.8971	
	CV %	4.68		Predicted R²	0.8530	
				AdeqPrecision	19.5743	
<i>Y_b</i>						
Model	3.40	11	0.3090	26.13	< 0.0001	significant
A-WRW	0.1434	1	0.1434	12.13	0.0023	
B-WRWB	0.0605	1	0.0605	5.11	0.0350	
C-Times	0.2558	1	0.2558	21.63	0.0002	
D-CaCO ₃	0.8018	1	0.8018	67.80	< 0.0001	
AB	0.0573	1	0.0573	4.84	0.0397	
AC	0.0001	1	0.0001	0.0057	0.0405	
AD	0.0219	1	0.0219	1.85	0.0464	
CD	0.0006	1	0.0006	0.0471	0.8304	
A ²	0.0325	1	0.0325	2.75	0.0427	
C ²	0.0103	1	0.0103	0.8731	0.3612	
D ²	0.0029	1	0.0029	0.2427	0.6276	
Residual	0.2000	20	9.43			
Cor Total	3.63	31				
Fit statistic	Std. Dev.	0.1087		R²	0.9349	
	Mean	0.6859		Adjusted R²	0.8991	
	CV %	0.8843		Predicted R²	0.7863	
				AdeqPrecision	21.4866	
<i>R_c</i>						
Model	22.21	11	2.02	36.79	< 0.0001	22.21
A-WRW	1.04	1	1.04	18.91	0.0003	1.04
B-WRWB	0.3494	1	0.3494	6.37	0.0202	0.3494
C-Times	8.80	1	8.80	160.34	< 0.0001	8.80
D-CaCO ₃	0.7010	1	0.7010	12.77	0.0019	0.7010
AB	0.1960	1	0.1960	3.57	0.0734	0.0430
AC	0.0330	1	0.0330	0.6006	0.0474	0.0330
AD	3.18	1	3.18	57.90	< 0.0001	0.0428

CD	0.1619	1	0.1619	2.95	0.1013	0.1619
A ²	0.4608	1	0.4608	8.40	0.0089	0.4608
C ²	0.0027	1	0.0027	0.0494	0.8263	0.0027
D ²	0.0305	1	0.0305	0.5560	0.4646	0.0305
Residual	0.8200	20	1.73			
Cor Total	23.31	31				
Fit statistic	Std. Dev.	0.2343		R²	0.9529	
	Mean	22.90		Adjusted R²	0.9270	
	CV %	1.02		Predicted R²	0.8895	
				AdeqPrecision	23.4418	

Y_c

Model	1.92	11	0.1742	18.99	< 0.0001	significant
A-WRW	0.1540	1	0.1540	16.79	0.0006	
B-WRWB	0.0937	1	0.0937	10.22	0.0045	
C-Times	0.0340	1	0.0340	3.71	0.0384	
D-CaCO ₃	0.3428	1	0.3428	37.38	< 0.0001	
AB	0.0228	1	0.0228	2.49	0.0434	
AC	0.0005	1	0.0005	0.0576	0.0468	
AD	0.0409	1	0.0409	4.45	0.0476	
CD	0.0001	1	0.0001	0.0132	0.9097	
A ²	0.0695	1	0.0695	7.58	0.0123	
C ²	0.0006	1	0.0006	0.0621	0.8057	
D ²	0.0006	1	0.0006	0.0642	0.8025	
Residual	0.1834	20	0.0092			
Cor Total	2.10	31				
Fit statistic	Std. Dev.	0.0558		R²	0.9126	
	Mean	1.09		Adjusted R²	0.8646	
	CV %	5.62		Predicted R²	0.6047	
				AdeqPrecision	17.6132	

WA

Model	144.0451	11	13.0950	22.5716	0.0000	
A-WRW	5.6223	1	5.6223	9.6910	0.0055	
B-WRWB	1.8305	1	1.8305	3.1551	0.0909	
C-Times	3.3723	1	3.3723	5.8127	0.0256	
D-CaCO ₃	34.0888	1	34.0888	58.7582	0.0000	
AB	0.1211	1	0.1211	0.2088	0.0427	
AC	0.7362	1	0.7362	1.2689	0.0353	
AD	4.4536	1	4.4536	7.6767	0.0118	
CD	0.7499	1	0.7499	1.2926	0.2690	
A ²	0.0364	1	0.0364	0.0627	0.0349	
C ²	0.5548	1	0.5548	0.9562	0.3398	
D ²	2.6946	1	2.6946	4.6446	0.0435	
Residual						
Cor Total						
Fit statistic	Std. Dev.	0.5617		R²	0.9255	
	Mean	13.78		Adjusted R²	0.8845	
	CV %	5.53		Predicted R²	0.7728	
				AdeqPrecision	18.9813	

Le **Tableau III.2** présente les résultats de l'ANOVA pour R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA avec un intervalle de confiance de 95 %.

Tableau III.3 : Modèles mathématiques des caractéristiques mécaniques et de l'absorption d'eau basés sur la méthode RSM

RSM responses	Mathematical models
R_b	$5.03 + 1.78 \times WRW + 0.8687 \times WRWB - 0.7532 \times Time - 0.0532 \times CaCO_3 + 0.8473$ $\times WRW \times WRWB + 0.2085 \times WRW \times Time + 0.7430 \times WRW$ $\times CaCO_3 + 0.1722 \times Time \times CaCO_3 - 0.6245 \times WRW^2 + 0.0125$ $\times WRWB^2 + 0.0494 \times Time^2 - 0.0491 \times CaCO_3^2$
Y_b	$0.7565 + 0.5731 \times WRW + 0.3185 \times WRWB - 0.1723 \times Time - 0.3956 \times CaCO_3$ $+ 0.3415 \times WRW \times WRWB + 0.0013 \times WRW \times Time - 0.0679$ $\times WRW \times CaCO_3 - 0.0082 \times Time \times CaCO_3 + 0.2110 \times WRW^2$ $+ 0.0000 \times WRWB^2 \times Time^2$
R_c	$23.32 + 1.60 \times WRW + 0.8152 \times WRWB - 0.9822 \times Time - 0.4326 \times CaCO_3 + 0.6774$ $\times WRW \times WRWB + 0.0732 \times WRW \times Time + 0.7784 \times WRW$ $\times CaCO_3 + 0.1757 \times Time \times CaCO_3 - 0.7091 \times WRW^2 + 0.0217$ $\times WRWB^2 - 0.0149 \times Time^2 - 0.0129 \times CaCO_3^2$
Y_c	$1.04 + 0.6082 \times WRW + 0.4020 \times WRWB - 0.0630 \times Time - 0.2660 \times CaCO_3$ $+ 0.2333 \times WRW \times WRWB + 0.0082 \times WRW \times Time - 0.0919$ $\times WRW \times CaCO_3 + 0.0061 \times Time \times CaCO_3 + 0.3070 \times WRW^2$ $+ 0.0154 \times WRWB^2 + 0.0201 \times Time^2 + 0.0425 \times CaCO_3^2$
WA	$13.05 + 3.41 \times WRW + 1.61 \times WRWB - 0.6234 \times Time - 2.52 \times CaCO_3 - 0.4648$ $\times WRW \times WRWB + 0.3420 \times WRW \times Time + 0.9062 \times WRW$ $\times CaCO_3 + 0.3546 \times Time \times CaCO_3 + 0.2091 \times WRW^2 + 0.0142$ $\times WRWB^2 - 0.4455 \times Time^2 + 1.05 \times CaCO_3^2$

Les modèles estimés peuvent être considérés comme suffisamment significatifs et avoir un niveau de précision approprié si la probabilité (valeur P) est plus faible ($< 0,05$). Si le coefficient de corrélation (R^2) est proche de 1, cela indique que le modèle utilisé pour prédire les données fonctionne avec une grande précision. Le modèle RSM a été évalué à l'aide de la fonction CCD du programme Design-Expert. Compte tenu de $P < 0,05$ et de valeurs de coefficient de corrélation satisfaisantes

proches de 1, des modèles de réponse appropriés ont été choisis. Les statistiques d'ajustement du modèle quadratique, y compris le coefficient de corrélation (R^2) et l'écart-type, se sont révélées statistiquement pertinentes ($P < 0,05$). Les valeurs R^2 ajustées de R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA étaient respectivement de 0,8971, 0,8991, 0,9270 et 0,8646. Le R^2 anticipé, qui a des valeurs de 0,8530, 0,7863, 0,8895 et 0,6047, évalue la capacité du modèle à tenir compte de la variance cantonnée autour de la moyenne. Toutefois, la différence est inférieure à 0,2, ce qui correspond au seuil de signification du modèle pour une prédiction précise. Les valeurs P montrent l'applicabilité des résultats de la régression du modèle, tandis que les valeurs F montrent la signification des termes pertinents[5]. Les modèles avaient des valeurs F significatives de 25,57, 26,13, 36,79, 18,99 et 22,57, respectivement. Preuve supplémentaire de l'utilité du modèle, le rapport signal/bruit estimé s'est avéré dans les limites admissibles des points de conception. Les proportions de précision suffisante supérieures à 4 en sont la preuve. Selon le coefficient de variation RSM ($CV < 10\%$), les modèles se sont révélés capables de reproduire et de prévoir avec succès à l'intérieur de leur espace de conception, avec des marges d'erreur réduites de 0,21, 0,10, 0,23, 0,09 et 0,56 pour R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA respectivement.

Le **Tableau III.4** donne les réponses des modèles R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA , telles que déterminées par RSM/CCD. En ce qui concerne R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA , on constate que les variables indépendantes A, B, C, AB, AC, AD sont significatives.

Tableau 3.4 : Objectifs et variations des variables d'optimisation.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit
A:WRW	is in range	0	2
B:WRWB	is in range	0	2
C:Times	is in range	0	168
D:CaCO₃	is in range	0	16
Bendingstrength	maximize	2.9589	5.83485
Bendingdisplacement	maximize	0.1	1.33
Compressive strength	maximize	20.9	24.45
Compressive displacement	maximize	0.751655	1.73
Water absorption	minimize	20.9	24.45

Cependant, le **Tableau III.3** montre la significativité des coefficients A^2 , termes quadratiques, avec des valeurs p ($p < 0,05$) pour chaque propriété mécanique, les autres valeurs étant jugées non significatives.

La méthode RSM est une méthodologie de modélisation conventionnelle qui doit être utilisée pour déterminer une relation mathématique entre les variables d'entrée et les résultats de sortie, examiner comment ces facteurs affectent les réponses de sortie et ensuite optimiser les résultats [6]. Des modèles de régression quadratique sont utilisés pour représenter la relation qui existe entre chacune des variables d'entrée WRW%, WRWB%, temps d'immersion et concentration de CaCO_3 et les cinq résultats R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA .

La relation entre les quatre réponses prédites et les résultats expérimentaux concernant les propriétés de compression ou de flexion est représentée graphiquement dans les **Figures III.6a et III.6d**.

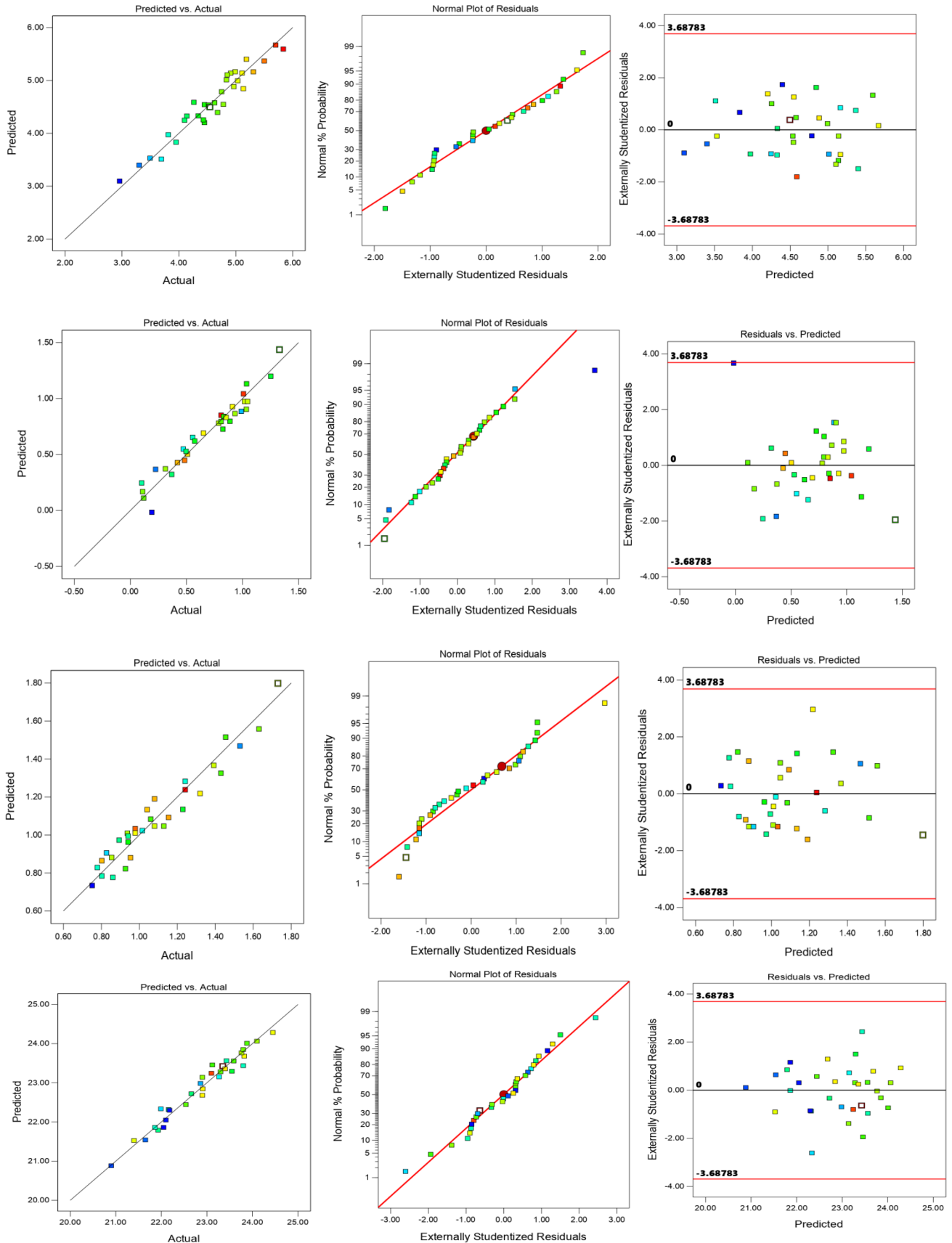


Figure III.6: Réponses de la résistance et du déplacement en flexion ainsi que de la résistance et du déplacement en compression respectivement (a-d) Valeurs prédites en fonction des valeurs réelles, (e-h) tracés normaux des résidus et (i-l) résidus par rapport aux données prédites

Le diagnostic nous a permis d'évaluer la précision du modèle statistique. Les valeurs R^2 , R^2_{adj} et R^2_{pred} , proches de 1 (**Tableau III.3**), suggèrent d'excellents liens entre les résultats de l'expérience et les modèles proposés. Les modèles ont bien prédit les résultats, comme le montrent les valeurs R^2 de 0,9336, 0,9349, 0,9529, 0,9126 et 0,9255 pour R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA , respectivement, dans l'ANOVA du **Tableau III.3**. En outre, ils ont démontré une congruence suffisante entre les résultats prédits par le modèle et les données réelles collectées pendant les tests. Les résidus, qui représentent la différence entre les résultats observés et prédits, doivent présenter un schéma régulier et être utilisés pour évaluer l'adéquation du modèle. Par conséquent, la ligne droite des **Figures III.6e-III.6h** montre que les résultats des résidus examinés ressemblent étroitement à une distribution linéaire, ce qui prouve l'efficacité des modèles. Sur la base de la représentation graphique des résidus par rapport aux valeurs prévues (**Figures III.6i-l**), les résidus apparaissent asymétriques et arbitrairement dispersés sur la limite de référence de la ligne correspondant à zéro. Par conséquent, les modèles statistiques développés ont réussi à prédire R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA .

Les **Figures III.7** et **III.8** montrent les lignes de la surface de réponse et les représentations tridimensionnelles de la résistance à la compression et du déplacement, ainsi que de la résistance à la flexion et du déplacement, respectivement, en fonction des facteurs du processus.

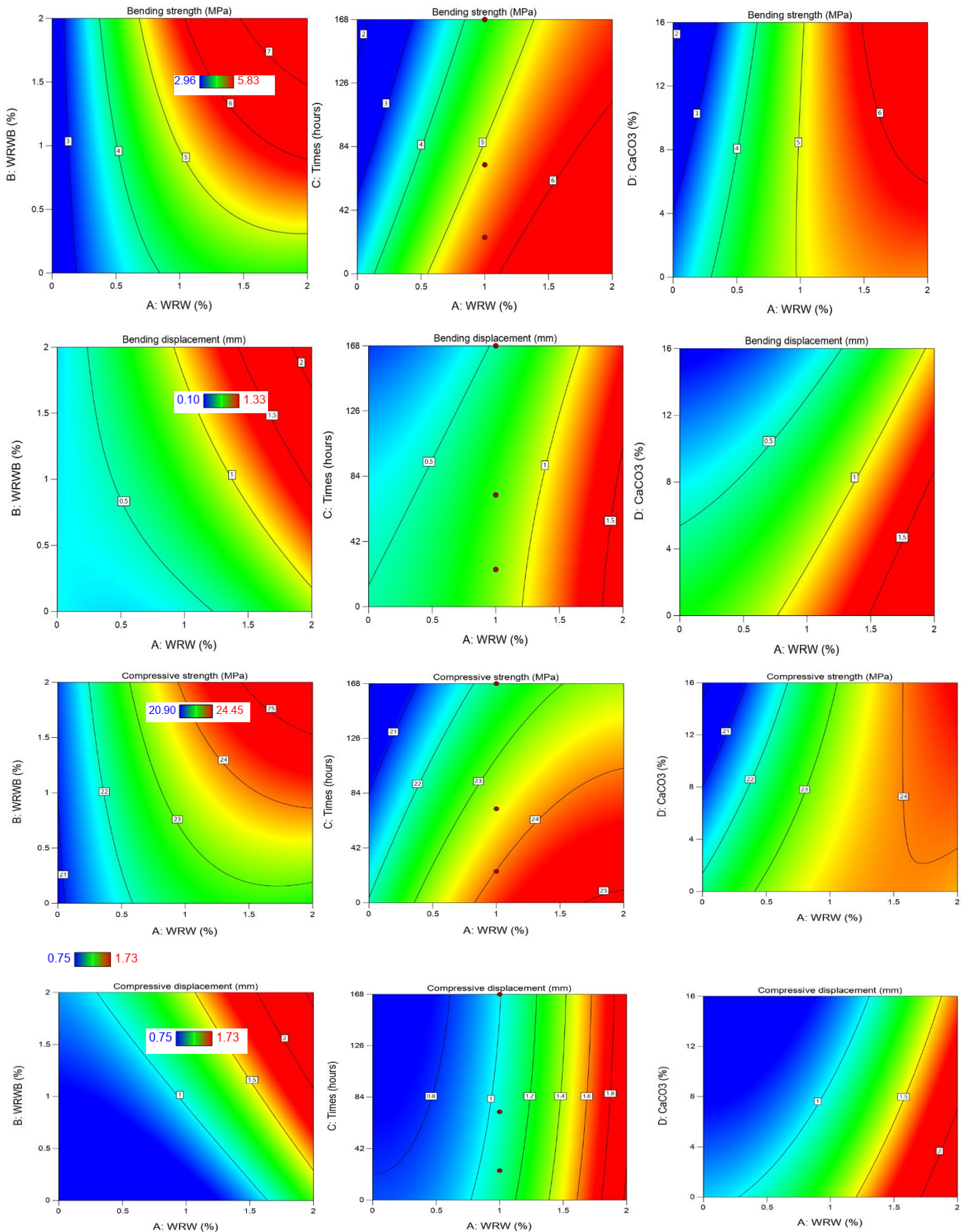


Figure III.7 : Contours de surface des données WRW vs. WRWB, WRW vs. temps, et WRW vs. CaCO₃ pour (a-c) la résistance à la flexion, (d-f) le déplacement en flexion, (g-i) la résistance à la compression et (j-l) le déplacement en compression respectivement.

Les graphiques ont été construits en traçant leurs réponses en fonction de deux facteurs indépendants, tout en maintenant le troisième paramètre indépendant fixe. La relation linéaire entre la résistance à la flexion et le déplacement ainsi que la résistance à la compression et le déplacement étant hautement significative à $p < 0,05$ (**Tableau III.3**), ces deux propriétés ont été les plus influencées par les WRW et la teneur en WRWB. Les corrélations de surface de réponse entre les différents facteurs ont été produites sur la base des informations expérimentales présentées dans les **Tableaux III.1 et III.4**. Les contours des lignes ont servi à déterminer le niveau de test, le type d'interaction entre les deux variables et la relation entre les courbes tridimensionnelles de la surface de réponse de chaque réponse. Il est également possible d'établir si l'interaction des paramètres est importante ou non sur la base de la forme du graphique (circulaire ou elliptique). Les courbes de surface de réponse pour les trois variables étudiées - AB, AC et AD - sont présentées à la **Figure III.7**. Avec une valeur $p < 0,05$, ces graphiques ont révélé des corrélations binaires substantielles pour les propriétés de compression et de flexion. Les autres relations binaires n'ont pas fait l'objet d'une étude approfondie, car elles n'étaient pas aussi cruciales pour la compréhension. A titre d'exemple : Dans des conditions stables de Temps = 84h et $\text{CaCO}_3\% = 8$, $\text{WRWB}\% = 1$, $\text{CaCO}_3\% = 8$, $\text{FWB}\% = 1$, et Temps = 84h, la **Figure III.7a-c** montre l'effet de $\text{WRWB}\%$, $\text{WRWB}\%$, temps d'immersion, et $\text{CaCO}_3\%$ (AB, AC, et AD) sur la résistance à la flexion. D'après les résultats, une augmentation de WRW et WRWB entraîne une augmentation de la résistance à la flexion. De plus, en accord avec les résultats expérimentaux, les propriétés de flexion et de compression sont plus sensibles aux pourcentages de WRW et WRWB.

III.2.2.3 Optimisation numérique des réponses

Déterminer les meilleures combinaisons possibles des variables d'entrée (pourcentage de WRW, pourcentage de WRWB, temps d'immersion et concentration de CaCO_3) dans la présente étude afin de maximiser R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA . En utilisant l'algorithme du logiciel pour l'optimisation avec une confiance et une prédiction de 95 %, les paramètres d'entrée ont été placés dans la région idéale de la zone construite. Le **Tableau III.5** présente les objectifs et les plages de changement possibles pour chaque paramètre au cours du processus d'optimisation.

Tableau III.5: Résultats du processus d'optimisation.

Number	WRW	WRWB	Times	CaCO ₃	<i>R_b</i>	<i>Y_b</i>	<i>R_c</i>	<i>Y_c</i>	WA	Desirability
1	1.246	1.334	27.562	5.149	6.272	1.278	24.762	1.519	15.601	1.000
2	0.855	1.286	6.313	0.841	5.987	1.194	24.803	1.403	16.789	1.000
3	1.394	1.394	34.200	8.150	6.525	1.267	24.818	1.556	15.079	1.000
4	1.394	1.855	92.487	9.811	6.649	1.287	24.639	1.674	15.167	1.000
5	1.491	1.814	91.068	14.477	6.977	1.113	24.748	1.602	14.899	1.000
6	1.554	0.878	12.814	14.056	6.370	0.851	24.506	1.248	13.738	1.000
7	0.622	1.909	1.425	0.359	6.068	1.191	24.943	1.486	17.751	1.000
8	1.042	0.919	0.862	0.046	5.958	1.244	24.826	1.428	17.085	1.000
9	1.700	0.661	4.024	7.432	6.075	1.215	24.529	1.519	15.229	1.000
10	1.266	0.990	11.865	7.003	6.083	1.076	24.543	1.321	14.426	1.000

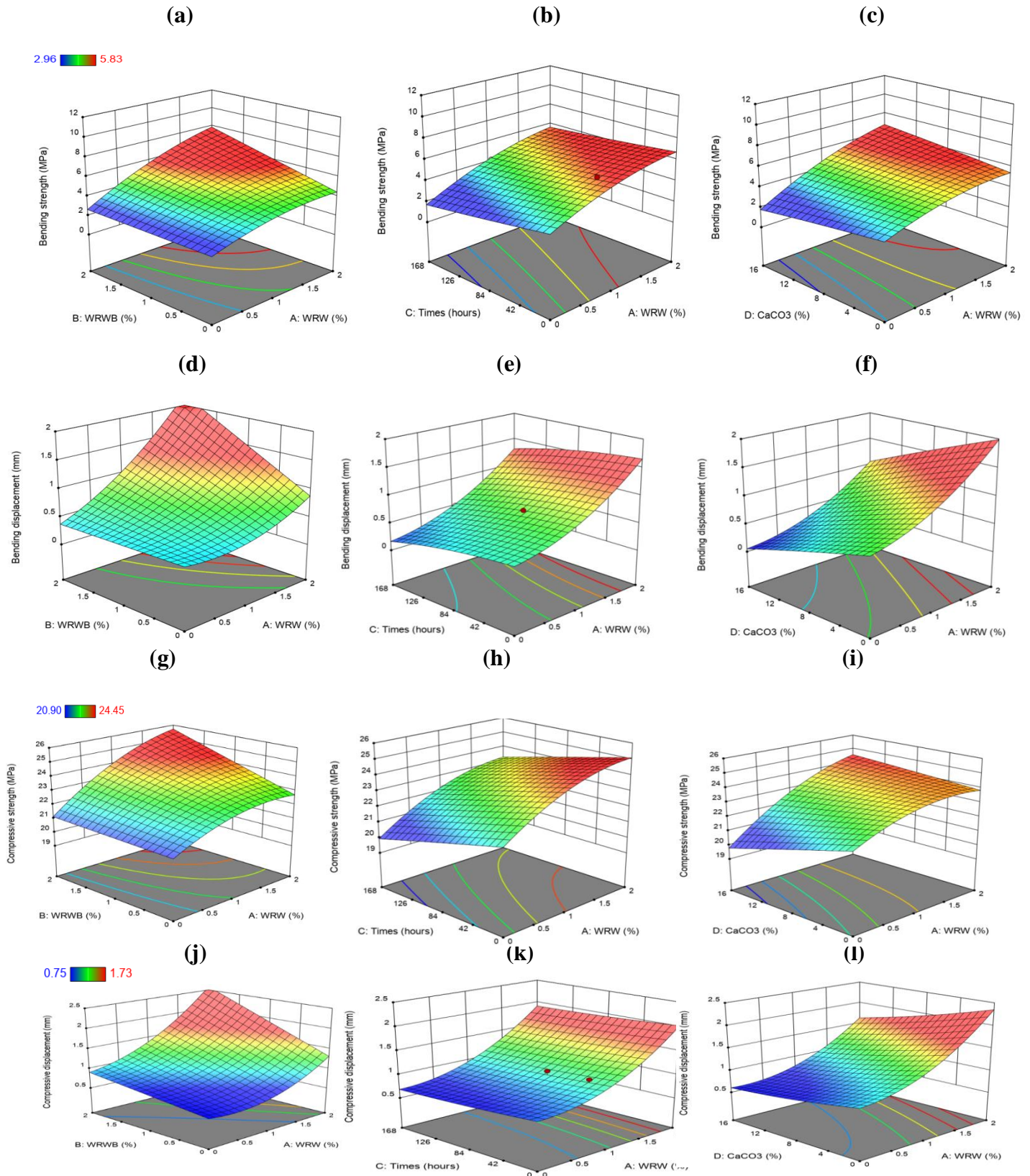


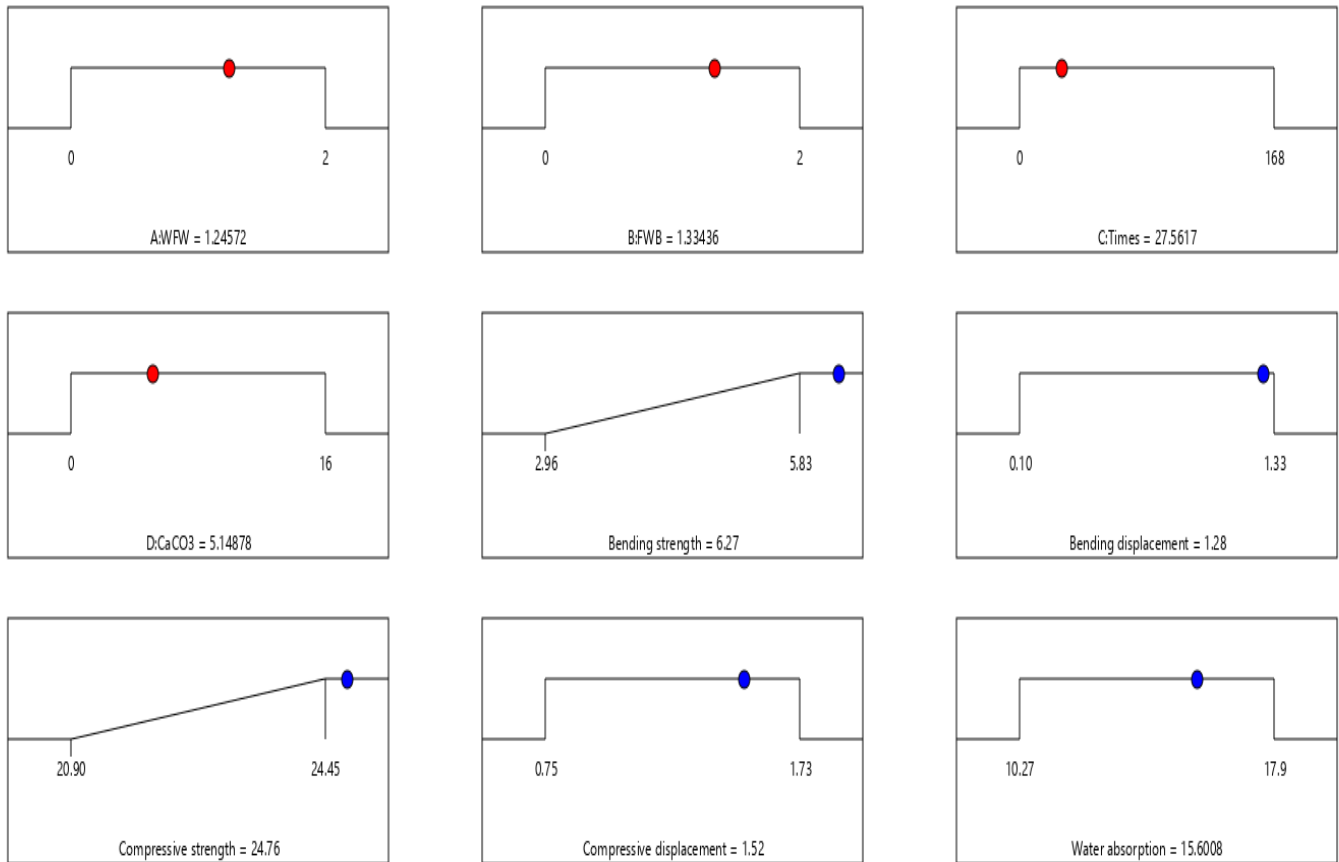
Figure III.8 : 3D RSM des données WRW vs. FWB, WRW vs. Temps, et WRW vs. CaCO₃ de (a-c) résistance à la flexion, (d-f) déplacement en flexion, (g-i) résistance à la compression et (j-l) déplacement en compression, respectivement.

Le **Tableau III.6** et la **Figure III.9** illustrent les résultats de cette optimisation.

Tableau III.6 : Informations sur les données produites à l'aide d'ANN.

Model	Network architecture	Proportion	R value	Specimens	MSE	
BS	4-10-1	Training	70	0.9962	22	8.92527E-04
		Validation	15	0.9506	5	5.57240E-03
		Testing	15	0.9873	5	7.75132E-03
BD	4-9-1	Training	70	0.9856	22	4.0478E-03
		Validation	15	0.9479	5	1.7028E-02
		Testing	15	0.9834	5	1.3493E-02
CS	4-8-1	Training	70	0.9999	22	1.0327E-06
		Validation	15	0.9652	5	7.4442E-03
		Testing	15	0.9932	5	6.7550E-03
CD	4-7-1	Training	70	0.9999	22	2.1628E-14
		Validation	15	0.9887	5	1.9235E-03
		Testing	15	0.9833	5	9.1975E-03
WA	4-5-1	Training	70	0.9914	22	1.6678E-02
		Validation	15	0.9715	5	4.3561E-02
		Testing	15	0.9844	5	2.0273E-02

La **Figure III.9** présente le tracé de la rampe des conditions optimales les mieux sélectionnées pour R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA.



Desirability = 1.000
Solution 1 out of 10

Figure III.9 : Diagramme de rampe des conditions optimisées à l'aide d'une approche d'optimisation.

Une désirabilité de 100 % a été atteinte et représentée par les pourcentages de WRW (1,24 %), WRWB (1,33 %), le temps d'immersion (27,56 h) et la concentration de CaCO_3 (5,14 %). Ces résultats anticipés sont analogues à ceux observés dans les enquêtes impliquant des paramètres tels que $R_b=6.27$ MPa, $Y_b=1.28$ mm, $R_c=24.76$ MPa, $Y_c=1.51$ mm et $WA=15.60$.

Tableau III.7 : Plan expérimental et réponses prédites par RSM et ANN des propriétés mécaniques et de l'absorption d'eau des mortiers verts testés.

Runs	Input variables				Outputs														
	A-WRW (%)	B-WRWB (%)	C-time (hours)	D-CaCO3 (%)	σ_f (MPa)			Y_f (mm)			σ_c (MPa)			Y_c (mm)			WA (%)		
					EXP	ANN	RSM	EXP	ANN	RSM	EXP	ANN	RSM	EXP	ANN	RSM	EXP	ANN	RSM
1	0	0	0	0	4.52	4.53	4.53	0.83	0.83	0.84	23.30	23.28	23.28	0.85	0.86	0.88	13.05	13.11	13.12
2	0.5	0	0	0	5.03	5.02	4.99	0.85	0.86	0.83	23.80	23.85	23.86	0.95	0.93	0.88	14.48	14.29	14.28
3	1	0	0	0	5.11	5.14	5.14	0.91	0.92	0.92	24.10	24.06	24.06	0.98	1.03	1.03	15.39	15.50	15.54
4	2	0	0	0	4.54	4.55	4.50	1.25	1.30	1.41	23.35	23.43	23.35	1.63	1.70	1.76	17.9	18.01	18.37
5	0	2	0	0	4.63	4.61	4.58	0.81	0.85	0.78	23.59	23.56	23.51	1.32	1.33	1.21	16.46	15.97	17.28
6	0.5	1.5	24	4	4.85	4.86	5.11	0.93	0.89	0.87	23.76	23.77	23.76	1.04	1.09	1.13	15.89	15.82	14.54
7	1	1	24	4	5.70	5.81	5.67	1.01	1.02	1.04	23.88	24.36	24.26	1.24	1.16	1.23	15.97	16.26	14.92
8	2	0	24	4	4.26	4.29	4.59	1.33	1.24	1.20	23.10	23.36	23.25	1.73	1.58	1.55	16.66	16.64	16.69
9	0.5	1.5	72	4	4.45	4.43	4.54	0.89	0.85	0.80	22.90	22.97	23.10	1.06	1.08	1.09	15.1	14.70	14.20
10	1	1	72	4	4.99	4.87	5.17	1.02	1.04	0.97	23.82	23.59	23.62	1.08	1.12	1.19	15.82	15.32	14.68
11	2	0	72	4	4.45	4.54	4.20	1.04	1.13	1.13	22.90	22.85	22.65	1.45	1.50	1.51	16.2	16.57	16.65
12	0.5	1.5	168	4	3.69	3.75	3.51	0.47	0.51	0.55	21.86	21.86	21.85	1.02	1.06	1.02	12.45	12.59	12.65
13	1	1	168	4	4.43	4.43	4.25	0.83	0.79	0.72	22.54	22.44	22.40	1.23	1.19	1.13	12.88	12.94	13.33
14	2	0	168	4	3.49	3.52	3.53	0.99	0.88	0.89	21.40	21.53	21.52	1.53	1.49	1.46	15.88	16.13	15.69
15	0.5	1.5	24	8	5.13	5.06	4.84	0.65	0.68	0.70	23.55	23.33	23.36	0.98	1.01	1.02	12.33	12.36	12.66
16	1	1	24	8	5.83	5.75	5.59	0.81	0.80	0.86	24.45	24.02	24.05	1.15	1.14	1.10	12.54	12.70	13.27
17	2	0	24	8	4.97	4.94	4.88	1.05	1.07	0.98	23.40	23.32	23.42	1.39	1.48	1.38	16.03	16.14	15.50
18	0.5	1.5	72	8	4.34	4.29	4.33	0.57	0.59	0.63	22.66	22.72	22.75	0.94	0.91	0.98	11.31	11.82	12.43
19	1	1	72	8	4.91	4.88	5.14	0.79	0.80	0.79	23.12	23.23	23.46	1.13	1.05	1.06	12.14	11.88	13.13
20	2	0	72	8	4.78	4.61	4.55	1.03	0.98	0.92	22.91	22.82	22.87	1.43	1.42	1.34	15.34	15.68	15.55
21	0.5	1.5	168	8	3.30	3.28	3.40	0.22	0.24	0.37	21.65	21.48	21.58	0.83	0.78	0.92	11.18	11.92	11.08
22	1	1	168	8	4.14	4.14	4.33	0.50	0.52	0.53	22.16	22.21	22.33	0.94	0.94	1.00	11.79	11.73	11.98
23	2	0	168	8	3.81	3.79	3.97	0.56	0.57	0.66	21.93	21.79	21.83	1.24	1.28	1.29	15.12	15.08	14.80
24	0.5	1.5	24	16	4.10	3.98	4.25	0.37	0.28	0.32	21.99	22.34	22.39	0.78	0.77	0.83	11.03	11.00	10.49
25	1	1	24	16	5.50	5.56	5.37	0.48	0.42	0.44	23.80	23.44	23.46	0.80	0.82	0.86	11.15	10.94	11.55
26	2	0	24	16	5.19	5.19	5.40	0.51	0.49	0.51	23.43	23.53	23.59	1.08	1.05	1.05	15.01	14.91	14.68
27	0.5	1.5	72	16	3.95	3.96	3.83	0.10	0.15	0.24	22.05	22.01	21.87	0.80	0.78	0.78	10.66	10.91	10.46
28	1	1	72	16	4.84	4.85	5.01	0.31	0.36	0.37	22.86	22.90	22.96	0.93	0.86	0.82	10.98	10.89	11.62
29	2	0	72	16	5.31	5.23	5.16	0.42	0.46	0.43	23.27	23.28	23.14	0.94	0.96	1.02	14.96	14.91	14.94
30	0.5	1.5	168	16	2.96	2.97	3.10	0.19	0.13	-0.02	20.90	21.07	20.89	0.75	0.78	0.73	10.27	10.35	9.52
31	1	1	168	16	4.68	4.54	4.40	0.12	0.13	0.10	22.10	22.05	22.03	0.86	0.94	0.77	10.45	10.56	10.87
32	2	0	168	16	4.75	4.75	4.79	0.11	0.08	0.17	22.18	22.26	22.29	0.89	0.89	0.97	14.66	14.80	14.59

III3 Conclusion

En raison des dispersions des résultats expérimentaux obtenus, des études statistiques basées sur plusieurs fonctions de distributions ont été utilisées dans le but d'estimer correctement les caractéristiques mécaniques des mortiers verts renforcés avec des fibres naturelles et du biochar. Pour la première fois, les effets de l'ajout de déchets WR et de biochar généré à partir de ces déchets sont étudiés dans un mortier cimentaire ; Les déchets WR ont subi le premier traitement expérimental au bicarbonate écologique ; Les propriétés de flexion, de compression et d'absorption d'eau ont été prédites avec précision par les modèles de RSM ; Une combinaison des déchets WRW et du biochar fabriqué à partir de ces déchets permet d'obtenir un mortier vert plus ductile. Le challenge donc est d'amener les industriels à découvrir les nombreux avantages de ces nouveaux matériaux encore trop souvent considérés comme 'importés'. Il est donc primordial, pour permettre le développement de ces matériaux, de constituer des bases de données complètes et des outils de simulation représentatifs.

Références

1. Gupta S, Kua HW, Koh HJ (2018) Application of biochar from food and wood waste as green admixture for cement mortar. *Sci Total Environ* 619–620:419–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.044>
2. Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M, et al (2022) Comparative study of flexural properties prediction of *Washingtonia filifera* rachis biochar bio-mortar by ANN and RSM models. *Constr Build Mater* 318:125985. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125985>
3. Khelifi A, Boumaaza M, Belaadi A, et al (2023) Effects of alkaline treatment of *Washingtonia* mesh waste on the mechanical and physical properties of bio - mortar : experimental and prediction models. *Biomass Convers Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04221-w>
4. Cao S, Zheng D, Yilmaz E, et al (2020) Strength development and microstructure characteristics of artificial concrete pillar considering fiber type and content effects. *Constr Build Mater* 256:119408. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119408>
5. Yan W, Wu G, Dong Z (2019) Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model. *Constr Build Mater* 226:469–482. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287>
6. Ray S, Haque M, Ahmed T, Nahin TT (2021) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber. *J King Saud Univ - Eng Sci*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.006>

Chapitre **IV** :
Modélisation Par
Les Réseaux De
Neurones Artificiels

IV.1 Introduction

Les propriétés des composites à fibres naturelles sont conditionnées par de nombreux paramètres, comme exemple : la nature de la matrice, le type de fibres (courtes ou longues ?), le procédé d'élaboration ; Différents types d'éco-composites seront présentés, en mettant plus particulièrement l'accent sur le rôle de la microstructure et sur leur comportement mécanique. Ces matériaux donc possèdent des microstructures complexes. Tout en conservant les informations à l'échelle microstructurale, des modèles numériques simplifiés sont développés et comparés avec les données expérimentales. La modélisation par Combinaison de biochar et de déchets de palmier W. Robusta dans un mortier vert renforcé à l'aide de la méthodologie de la surface de réponse (RSM) et de méthodes d'apprentissage automatique-ANN du comportement de ces composites nécessite donc de faire des simplifications. Une comparaison des modélisations est présentée ici pour des éco-composites à fibres courtes et biochar.

IV.2 Résultats et discussions

IV.2.1 Modélisation à l'aide d'ANN

Pour l'architecture du réseau neuronal artificiel ANN utilisé pour simuler les propriétés de flexion, de compression et l'absorption d'eau R_b , R_c , Y_b , Y_c and WA des mortiers développés, ainsi qu'une fonction de transfert (TANSIG) à la sortie, qui sont respectivement (4-10-1), (4-9-1), (4-8-1), (4-7-1) et (4-5-1), l'algorithme de Levenberg-Marquardt (TRAINLM) a été choisi suivant le **Tableau IV.1**.

L'approche d'apprentissage de Levenberg-Marquardt (trainlm) a été employée par le programme d'ajustement neuronal (nntool) dans MATLAB R2019a pour déterminer comment les variables d'entrée et de sortie sont liées.

Tableau IV.1 : Modèles créés à l'aide de la méthode ANN de résistance et le déplacement en compression et en flexion et d'absorption d'eau pour différents mortiers verts.

ANN	
réponses	
Résistanc e de flexion	$Rb = -0.1733 \times H_1 + 1.8995 \times H_2 - 1.1427 \times H_3 + 1.6964 \times H_4$ $+ 14.9489 \times H_5 + 1.8512 \times H_6 - 1.3986 \times H_7 - 3.1525 \times H_8$ $+ 0.4374 \times H_9 + 2.1686 \times H_{10} - 6.0829$ $\left\{ \begin{array}{l} H_1 = \tanh(0.5 \times (-0.5695 \times WRW + 5.8575 \times WRWB - 0.0379 \times Time + \\ H_2 = \tanh(0.5 \times (0.0013 \times WRW - 0.6117 \times WRWB - 0.0239 \times Time + \\ H_3 = \tanh(0.5 \times (-1.1901 \times WRW + 3.1109 \times WRWB - 0.0236 \times Time - \\ H_4 = \tanh(0.5 \times (-0.9646 \times WRW + 0.0453 \times WRWB + 0.0118 \times Time + \\ H_5 = \tanh(0.5 \times (-0.3933 \times WRW + 2.1508 \times WRWB + 0.0005 \times Time - \\ H_6 = \tanh(0.5 \times (1.3760 \times WRW + 1.4068 \times WRWB - 0.0066 \times Time - \\ H_7 = \tanh(0.5 \times (3.3972 \times WRW + 0.1501 \times WRWB - 0.0405 \times Time + \\ H_8 = \tanh(0.5 \times (-1.7581 \times WRW + 1.3530 \times WRWB + 0.0101 \times Time - \\ H_9 = \tanh(0.5 \times (0.4106 \times WRW + 3.2142 \times WRWB + 0.0013 \times Time - \\ H_{10} = \tanh(0.5 \times (2.2212 \times WRW - 3.7865 \times WRWB - 0.0121 \times Time - \end{array} \right.$
Déplace ment en flexion	$Yb = -0.2051 \times H_1 + 0.4401 \times H_2 + 0.3373 \times H_3 + 0.0863 \times H_4 + 0.2142 \times$ $H_5 + 0.1431 \times H_6 - 0.3345 \times H_7 + 0.4285 \times H_8 + 0.4129 \times H_9 + 0.3536$ $\left\{ \begin{array}{l} H_1 = \tanh(0.5 \times (-4.0657 \times WRW + 0.7873 \times WRWB - 0.0223 \times Time - \\ H_2 = \tanh(0.5 \times (-1.3213 \times WRW + 0.8749 \times WRWB - 0.0173 \times Time + \\ H_3 = \tanh(0.5 \times (-2.0754 \times WRW + 0.1250 \times WRWB + 0.0046 \times Time + \\ H_4 = \tanh(0.5 \times (1.4527 \times WRW - 1.2339 \times WRWB + 0.0052 \times Time - \\ H_5 = \tanh(0.5 \times (-0.8156 \times WRW + 0.7038 \times WRWB + 0.0317 \times Time + \\ H_6 = \tanh(0.5 \times (0.1249 \times WRW + 2.7088 \times WRWB - 0.0129 \times Time + \\ H_7 = \tanh(0.5 \times (-0.8432 \times WRW - 0.7148 \times WRWB + 0.0198 \times Time + \\ H_8 = \tanh(0.5 \times (0.8459 \times WRW + 0.0502 \times WRWB + 0.0046 \times Time - \\ H_9 = \tanh(0.5 \times (-0.1743 \times WRW - 2.8574 \times WRWB - 0.0197 \times Time - \end{array} \right.$
Résistanc e de	$Rc = 1.6211 \times H_1 - 0.8468 \times H_2 + 1.3672 \times H_3 - 1.4782 \times H_4 + 0.5593$ $\times H_5 - 0.4005 \times H_6 + 0.5438 \times H_7 + 3.6114 \times H_8$ $+ 21.3448$

$$\begin{cases} H_1 = \tanh(0.5 \times (-2.7726 \times WRW + 0.2501 \times WRWB + 0.0022 \times Time + \\ H_2 = \tanh(0.5 \times (-0.2961 \times WRW - 1.0305 \times WRWB + 0.0077 \times Time + \\ H_3 = \tanh(0.5 \times (0.9201 \times WRW + 3.1305 \times WRWB + 0.0015 \times Time + \\ H_4 = \tanh(0.5 \times (-0.6141 \times WRW - 0.0532 \times WRWB + 0.0176 \times Time + \\ H_5 = \tanh(0.5 \times (1.0228 \times WRW + 0.8061 \times WRWB + 0.0450 \times Time + \\ H_6 = \tanh(0.5 \times (1.8095 \times WRW + 3.3878 \times WRWB - 0.0075 \times Time - \\ H_7 = \tanh(0.5 \times (1.0657 \times WRW + 0.3759 \times WRWB - 0.0277 \times Time - \\ H_8 = \tanh(0.5 \times (0.8759 \times WRW - 0.5434 \times WRWB - 0.0021 \times Time - \end{cases}$$

$$\begin{aligned} déplace \\ ment en \\ Yc = 0.4545 \times H_1 - 0.0586 \times H_2 + 0.5579 \times H_3 + 0.3229 \times H_4 - 0.4195 \\ \times H_5 - 0.4401 \times H_6 + 1.1372 \times H_7 + 1.5569 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} H_1 = \tanh(0.5 \times (0.3330 \times WRW + 0.1291 \times WRWB + 0.0065 \times Time - \\ H_2 = \tanh(0.5 \times (0.6034 \times WRW - 0.4943 \times WRWB + 0.0170 \times Time - \\ H_3 = \tanh(0.5 \times (-0.8733 \times WRW + 1.5646 \times WRWB - 0.0153 \times Time + \\ H_4 = \tanh(0.5 \times (-0.2875 \times WRW - 1.6791 \times WRWB - 0.0167 \times Time - \\ H_5 = \tanh(0.5 \times (0.1395 \times WRW + 0.9604 \times WRWB - 0.0061 \times Time + \\ H_6 = \tanh(0.5 \times (-3.4677 \times WRW + 0.2765 \times WRWB - 0.0177 \times Time - \\ H_7 = \tanh(0.5 \times (0.6207 \times WRW + 0.5542 \times WRWB - 0.0002 \times Time - \end{cases}$$

$$\begin{aligned} Absorbti \\ on d'eau \\ WA = -0.0243 \times H1 - 0.0291 \times H2 + 0.0092 \times H3 + 0.2854 \times H4 \\ - 0.1245 \times H5 + 0.2661 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} H_1 = \tanh(0.5 \times (0.1472 \times WF + 0.3648 \times Biochar - 0.0112 \times T + 3.14 \\ H_2 = \tanh(0.5 \times (-1.4821 \times WF + 0.2541 \times Biochar + 0.0175 \times T - 0.68 \\ H_3 = \tanh(0.5 \times (-0.2543 \times WF + 0.1236 \times Biochar + 0.0115 \times T - 1.10 \\ H_4 = \tanh(0.5 \times (-0.0254 \times WF + 0.1254 \times Biochar - 0.0013 \times T + 1.05 \\ H_5 = \tanh(0.5 \times (0.6358 \times WF + 0.1245 \times Biochar + 0.0005 \times T - 1.28 \end{cases}$$

La **Figure IV .1** illustre l'architecture configurée du modèle ANN.

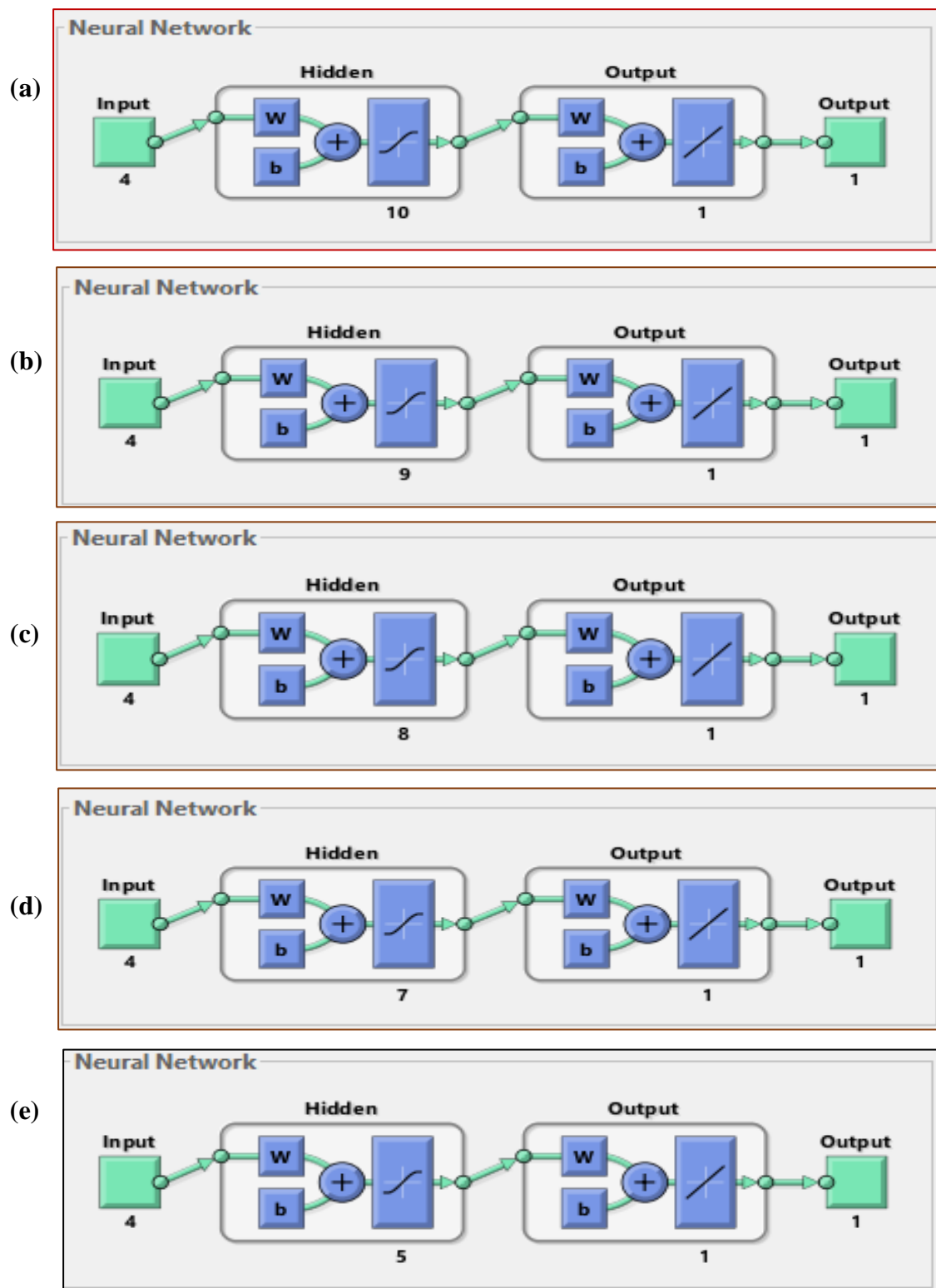
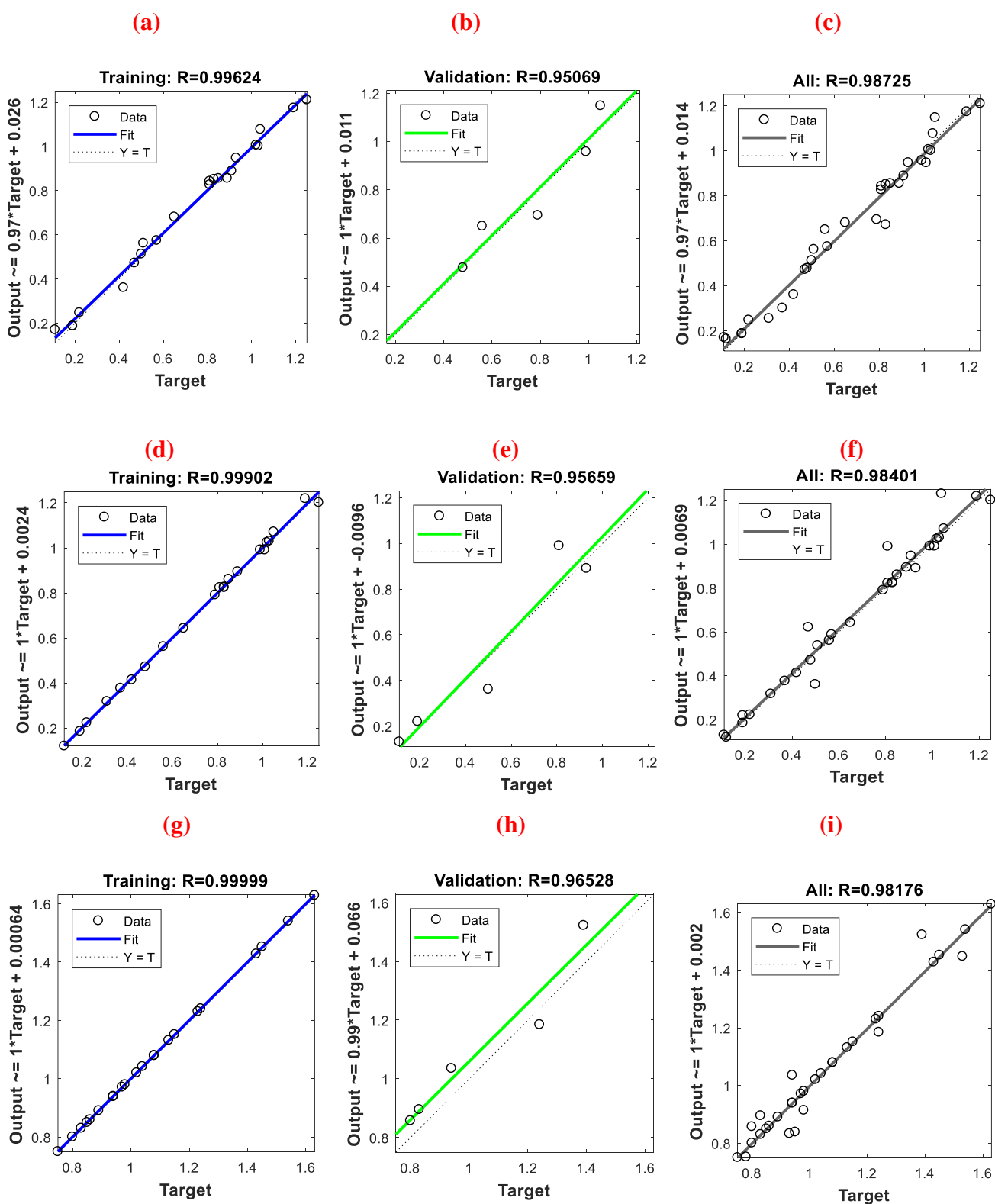


Figure IV.1 : Architecture ANN des propriétés mécaniques des mortiers à base de WRW/WRWB : (a) résistance à la flexion, (b) déplacement en flexion, (c) résistance à la compression, (d) déplacement en compression et (e) absorption d'eau.

Les données projetées et réelles ont été examinées pour évaluer dans quelle mesure les modèles ANN s'adaptent aux données, et le **Tableau** et la **Figure IV.2** affichent les résultats. Les résultats prédits se sont avérés comparables aux résultats réels, ce qui indique une adéquation acceptable des données [1].



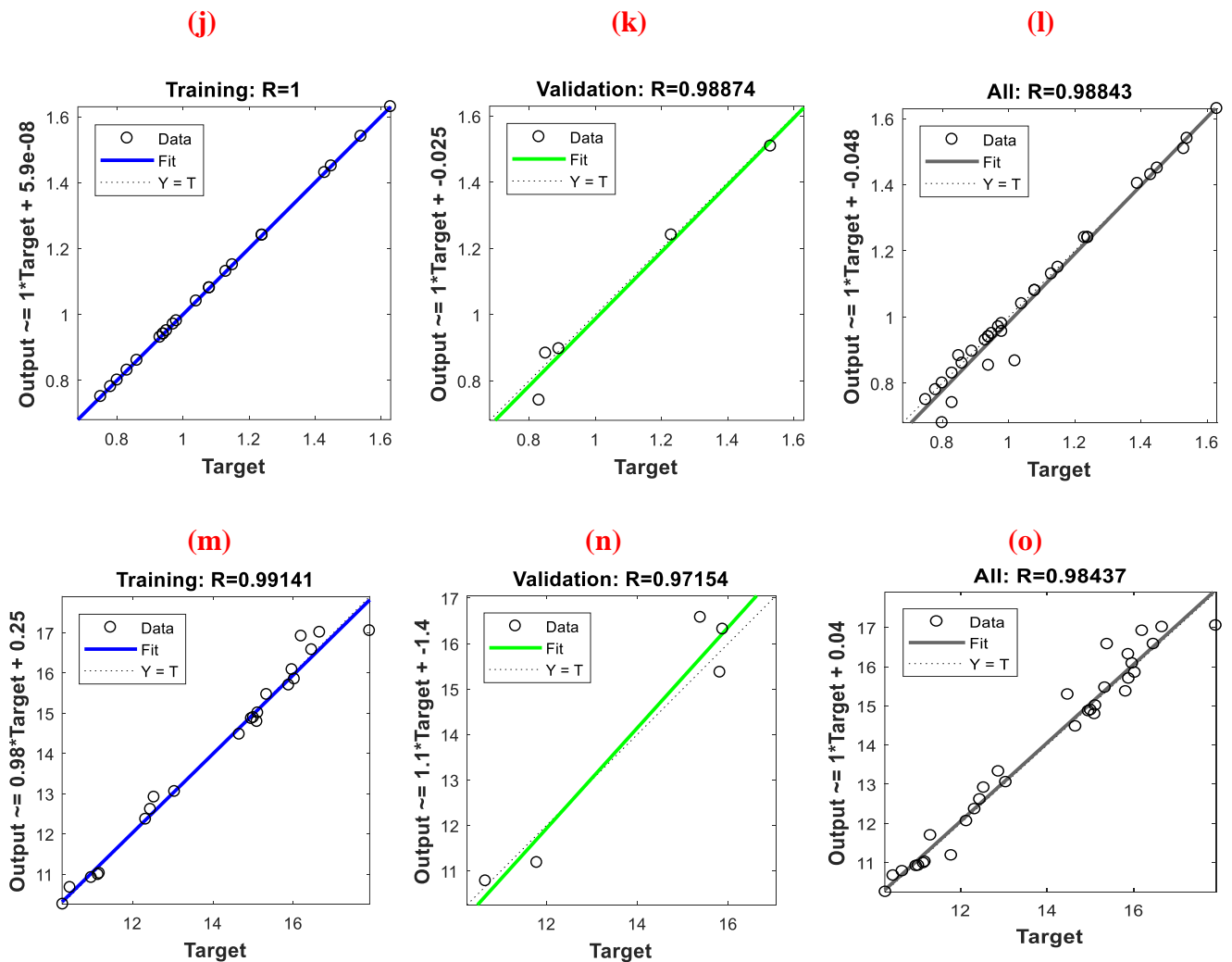


figure IV.2 : Les valeurs expérimentales et prévisionnelles des données d'apprentissage, de validation et globales sont comparées pour : (a-c) la résistance à la flexion, (d-f) le déplacement en flexion, (g-i) la résistance à la compression et (j-l) le déplacement en compression et (m-o) l'absorption d'eau.

Les coefficients de corrélation pour l'apprentissage, la validation et l'ensemble des données pour R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA simulées par rapport aux données expérimentales sont respectivement de (0,9962, 0,9990, 0,9999, 1 et 0,9914), (0,9507, 0,9507, 0,9653, 0,9887 et 0,9715) et (0,9873, 0,9840, 0,9812, 0,9884 et 0,9844). Les valeurs R^2 supérieures à 0,9 indiquent que les valeurs prédites et expérimentales correspondent bien. Par conséquent, les modèles ANN développés (**Tableau IV.2**), qui ont été créés à partir des données expérimentales, ont réussi à prévoir avec précision les réponses. L'un des aspects les plus importants de l'évaluation de l'efficacité est la détermination du taux d'erreur, c'est-à-dire l'écart entre les résultats des tests et les résultats obtenus par les prédictions ANN.

Tableau IV.2 : Les résultats statistiques pour le R^2 , MSE , $RMSE$ et $MAPE$ obtenus pour les modèles des propriétés mécaniques et de l'absorption d'eau par RSM et ANN.

Responses	R^2		MSE		$RMSE$		$MAPE$	
	RSM	ANN	RSM	ANN	RSM	ANN	RSM	ANN
R_f	0.9336	0.9873	0.7452	0.3245	0.5476	0.1123	0.9584	0.5214
Y_f	0.9349	0.9840	0.0542	0.0014	0.0251	0.0024	0.1365	0.0945
R_c	0.9529	0.9812	0.9723	0.1235	0.6548	.02451	0.2512	0.1232
Y_c	0.9126	0.9884	0.0573	0.0145	0.0954	0.0231	0.3421	0.1426
WA	0.9255	0.9844	0.5548	0.0542	0.1568	0.06521	0.2541	0.0365

Les erreurs les plus faibles se trouvent dans la région de zéro erreur et ses environs, comme le montre la **Figure IV.3**. Les erreurs mineures commises au cours du cycle de formation du réseau ANN sont un signe de performance.

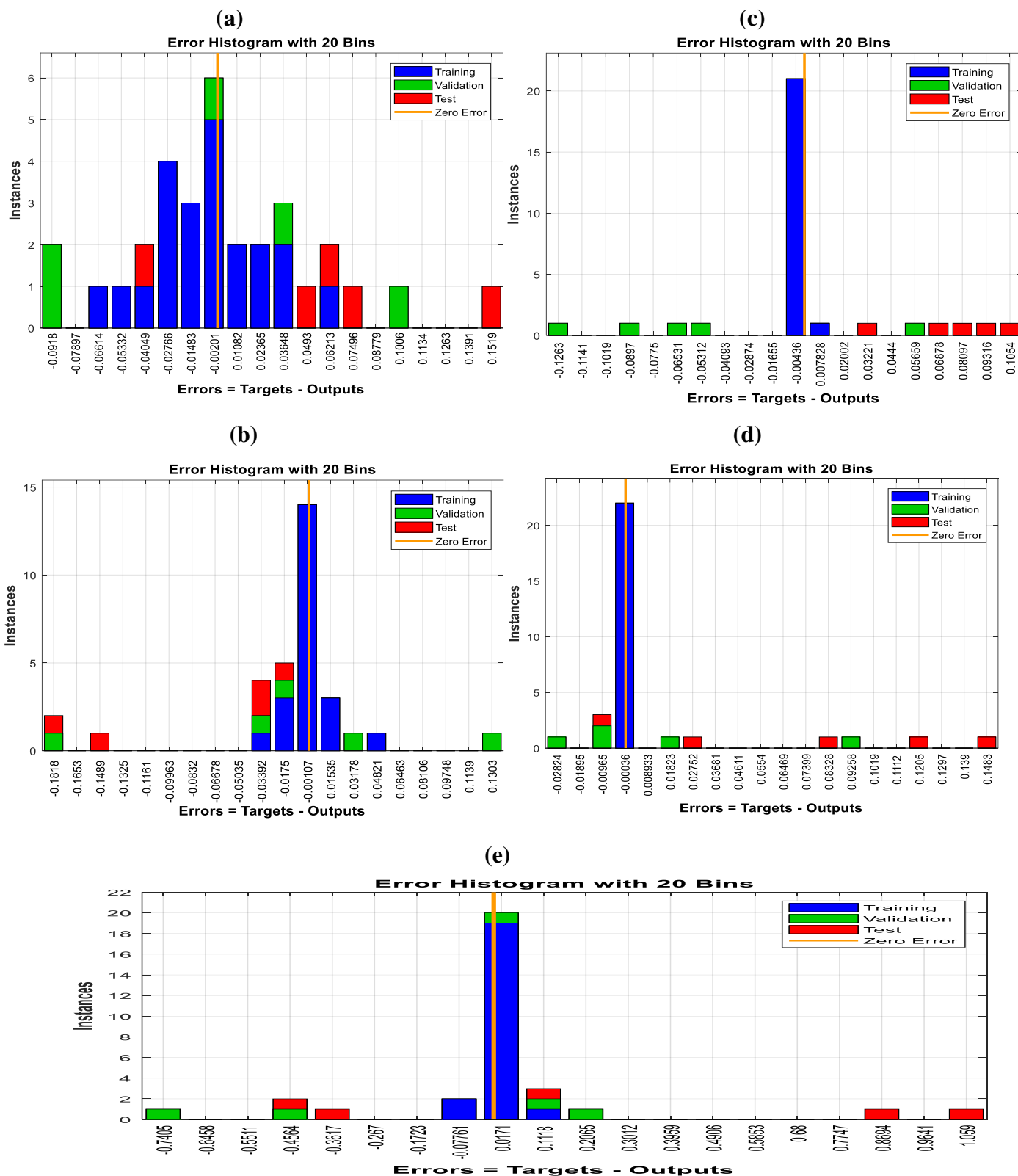


Figure IV.3 : Représentation des erreurs ANN à l'aide d'un histogramme des mortiers WRW/WRWB : (a) résistance à la flexion, (b) déplacement en flexion, (c) résistance à la compression, (d) déplacement en compression et (e) absorption d'eau.

La **Figure IV.4** est un schéma montrant les erreurs commises lors du développement, de l'évaluation et de la validation du réseau neuronal. Il est clair que la valeur du MSE a augmenté de manière significative au début du processus de formation du réseau ANN, mais qu'elle a diminué au moment où il a atteint ses dernières étapes.

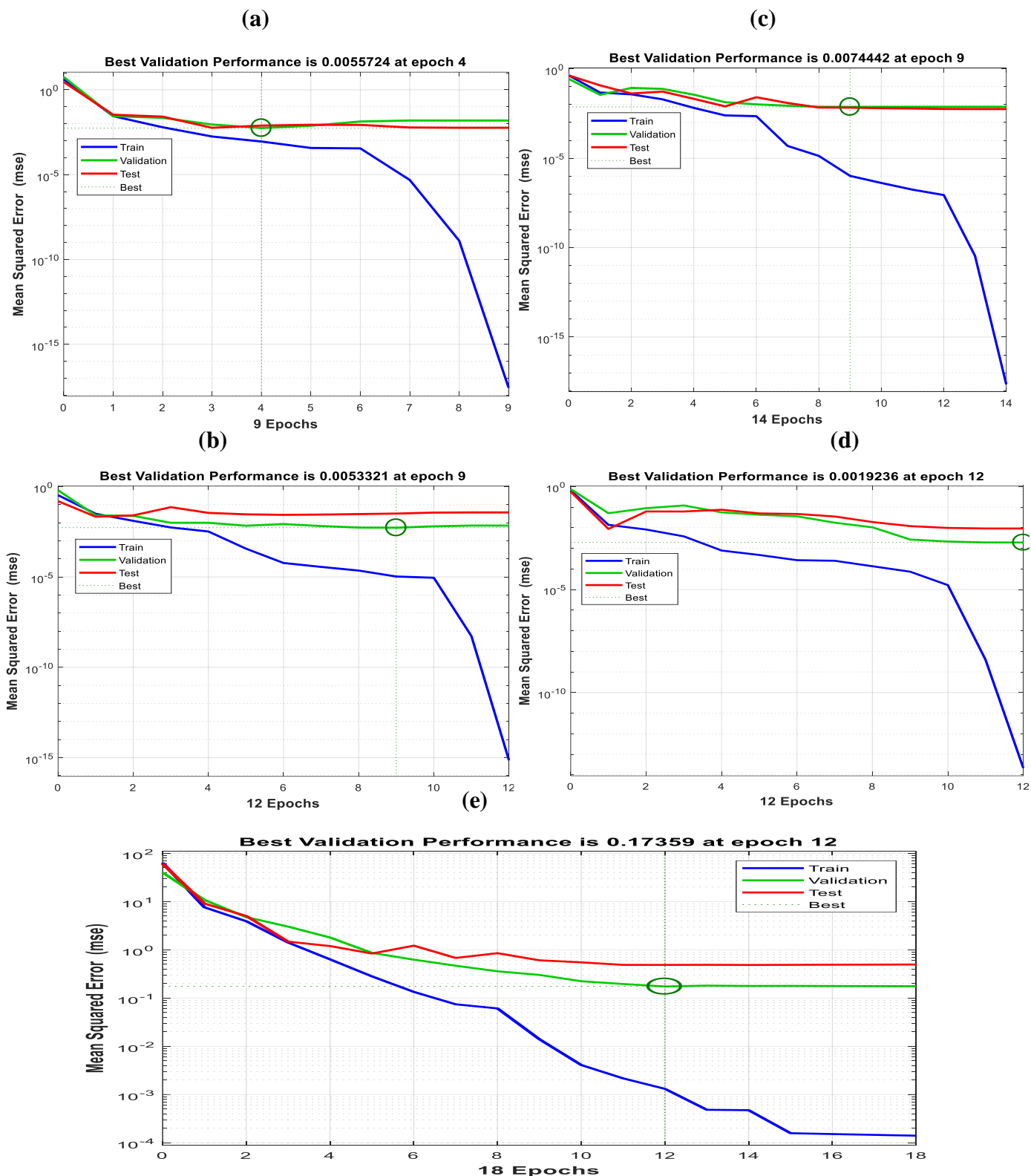


Figure IV.4 : Évolution de l'erreur quadratique moyenne en fonction des cycles des mortiers WRW/WRWB : (a) résistance à la flexion, (b) déplacement en flexion, (c) résistance à la compression, (d) déplacement en compression et (e) absorption d'eau.

La ligne présentant le meilleur ajustement a été utilisée pour coupler les étapes de formation, de confirmation et de test, et la valeur du MSE pour R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA a diminué aux 4^{ème}, 9^{ème}, 9^{ème} et 12^{ème} époques. Cela marque l'achèvement de la procédure de formation de l'ANN. Ce résultat est cohérent avec les études antérieures sur l'utilisation de l'ANN pour la modélisation et la prédiction des processus, publiées précédemment par d'autres chercheurs [2, 3]. Cela suggère que les modèles sont fiables pour prédire les propriétés en fonction des facteurs choisis. L'application réussie des modèles ANN et RSM dans cette étude souligne leur potentiel pour guider l'optimisation des bio-mortars pour des exigences de performance spécifiques.

IV.2.2 Précision et pertinence du modèle

Les valeurs des modèles RSM et ANN ont également été comparées aux données médianes de la **Figure IV.5** afin d'évaluer la précision des modèles.

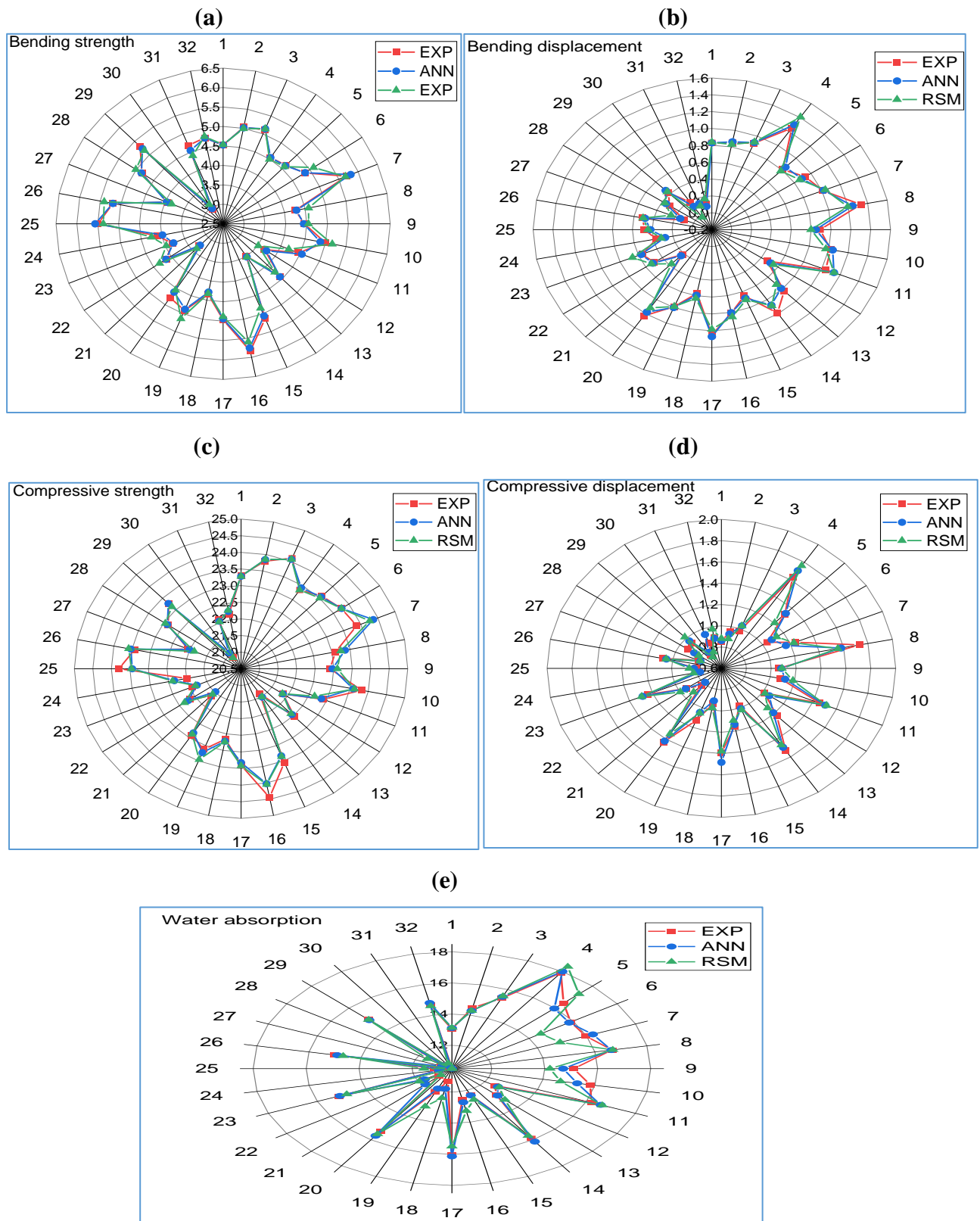


Figure IV.5: Analyse comparative des valeurs prévues RSM/ANN et observées des mortiers verts WRWs-WRWB : (a,b) résistance et déplacement en flexion et (c,d) résistance et déplacement en compression respectivement et e absorption d'eau.

D'après les graphiques générés entre les valeurs et le nombre total d'exécutions, le modèle a estimé des résultats qui se rapprochaient des données réelles. Par rapport aux résultats du modèle RSM, les résultats prédits par le modèle ANN sont plus proches des résultats. Par conséquent, comparé au modèle RSM, le modèle ANN peut être en mesure d'extrapoler les ensembles de données avec plus de succès. Pour chaque ensemble de données utilisé pour déterminer les propriétés de flexion et de compression, le modèle ANN a été capable de prédire correctement les résultats expérimentaux et de les valider. Afin de déterminer si les modèles ANN et RSM étaient suffisants, le R^2 , le $RMSE$ et le MSE ont été examinés. La forte corrélation entre ces chiffres démontre l'aptitude des modèles créés à reproduire les résultats réels. Un modèle est généralement considéré comme plus efficace pour prédire les réponses projetées si ses coefficients R^2 sont plus proches de 1 [3]. En comparaison avec les données expérimentales,

Le **Tableau IV.3** démontre la signification statistique et les excellents résultats prédits par les modèles ANN et RSM

Tableau IV.3 : Les résultats statistiques pour le R^2 , MSE , $RMSE$ et $MAPE$ obtenus pour les modèles des propriétés mécaniques et de l'absorption d'eau par RSM et ANN

Responses	R^2		MSE		$RMSE$		$MAPE$	
	RSM	ANN	RSM	ANN	RSM	ANN	RSM	ANN
R_f	0.9336	0.9873	0.7452	0.3245	0.5476	0.1123	0.9584	0.5214
Y_f	0.9349	0.9840	0.0542	0.0014	0.0251	0.0024	(b) 0.1365	0.0945
R_c	0.9529	0.9812	0.9723	0.1235	0.6548	.02451	0.2512	0.1232
Y_c	0.9126	0.9884	0.0573	0.0145	0.0954	0.0231	0.3421	0.1426
WA	0.9255	0.9844	0.5548	0.0542	0.1568	0.06521	0.2541	0.0365

.Le modèle ANN a des valeurs R^2 plus élevées que le modèle RSM. Pour R_b , R_c , Y_b , Y_c and WA , respectivement, l'ANN a un R^2 (0,9873, 0,9840, 0,9812, 0,9884 et 0,9844) et un MSE (0,3245, 0,0014, 0,1235, 0. 0145 et 0,0542), tandis que RSM a R^2 (0,9336, 0,9349, 0,9529, 0,9126 et 0,9225) et MSE (0,7452, 0,0542, 0,9723, 0,0573 et 0,5548). En outre, une comparaison des

erreurs *RMSE* et *MAPE* de tous les modèles a été effectuée. Lorsqu'on les compare aux réponses réelles, les prévisions ANN présentent des valeurs *RMSE* et *MAPE* inférieures à celles du RSM en raison de sa capacité à extrapoler la connexion non linéaire entre les résultats observés et anticipés et de sa capacité à imiter l'intelligence des humains en analysant les tendances dans les bases de données [3, 4].

4.3 Conclusion

Les effets de l'incorporation des déchets de W robusta et du biochar généré à partir de ces déchets sur les propriétés de compression et de flexion d'un mortier vert nouvellement développé ont été examinés dans cette étude à l'aide d'ANN et de RSM. Les principales conclusions suivantes découlent de l'analyse des résultats ci-dessus :

- La densité a diminué en ajoutant des déchets de fibres et du biochar à la matrice cimentaire. Toutefois, lorsque 1 % de déchets de fibres et 1 % de déchets de fibres sont mélangés en quantités égales, la densité est réduite de 110 % par rapport à un mortier de référence ;
- La porosité et l'absorption d'eau augmentent à mesure que les WRW et WRWB remplacent le ciment en quantités croissantes. Heureusement, la quantité d'eau qui s'infiltré dans les mortiers verts est diminuée par l'ajout de fibres traitées ;
- - Par rapport au mortier de contrôle, il y a une différence notable dans les caractéristiques de compression et de flexion lors de l'utilisation de WRWB et WRW traités au bicarbonate. Les mortiers verts perdent leur résistance à la flexion et à la compression lorsque la teneur en ces deux facteurs augmente. Avec une amélioration de la résistance et du déplacement en flexion de 29% et 40%, respectivement, par rapport au mortier de référence, les mortiers GM-1-1-8-24 ont affiché les meilleurs résultats. L'ajout de fibres de déchets et de biochar a augmenté la ductilité de 35 % mais n'a que très peu augmenté la résistance à la compression de 5 % par rapport au mortier de référence.
- - Les valeurs de substitution de 1,3 % et 1,2 % en poids de ciment de biochar WRWB et de fibres de déchets WRW traités avec 5,1 % de CaCO₃ pendant une durée de 27,6 heures, respectivement, ont atteint les résistances maximales à la flexion et à la compression dans le mortier vert développé..

- L'efficacité de l'ANN et du RSM a été démontrée par l'optimisation et la prédiction. Les premiers facteurs d'entrée en particulier les modifications de WRW ont eu un impact plus important sur les propriétés de flexion et de compression et sur l'absorption d'eau. Cinq modèles prédisent l'absorption d'eau, les propriétés de flexion et de compression des mélanges avec une grande précision ;
- Les modèles développés à l'aide des analyses ANN et RSM et appliqués aux valeurs de R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA se sont avérés prédire avec précision les résultats à un taux de (98,73%, 98,40%, 98,12%, 98,84%, et 98,44%) et (93,36%, 93,49%, 95,29%, 91,26%, et 92,55%) respectivement ;
- Les modèles ANN ont toutefois surpassé le modèle RSM, avec un R^2 plus élevé et les erreurs de prédiction les plus faibles (MSE, RMSE et MAPE), inférieures à 7 %.

Dans ce travail, on a présenté une analyse comparative des valeurs prévues RSM/ANN de ces mortiers verts. Les données ont été examinées pour évaluer dans quelle mesure les modèles ANN s'adaptent aux données, Les résultats prédits se sont avérés comparables aux résultats réels, ce qui indique une adéquation acceptable des données. Les résultats statistiques obtenus pour les modèles des propriétés mécaniques et de l'absorption d'eau par RSM et ANN. Par conséquent, Ce résultat est cohérent avec les études antérieures sur l'utilisation de l'ANN pour la modélisation et la prédiction des processus, publiées précédemment par d'autres chercheurs. Cela suggère que les modèles sont fiables pour prédire les propriétés en fonction des facteurs choisis. L'application réussie des modèles ANN et RSM dans cette étude souligne leur potentiel pour guider l'optimisation des bio-mortars pour des exigences de performance spécifiques. Et enfin, Afin d'évaluer la précision et la pertinence des modèles, les valeurs des modèles RSM et ANN ont également été comparées aux données médianes, tous ces résultats ont été bien présentés dans ce chapitre.

Références

1. Ray S, Haque M, Ahmed T, Nahin TT (2021) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber. J King Saud Univ - Eng Sci. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.006>
2. Kursuncu B, Gencil O, Bayraktar OY, et al (2022) Optimization of foam concrete characteristics using response surface methodology and artificial neural networks. Constr Build Mater 337:127575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127575>
3. Yaro NSA, Sutanto MH, Habib NZ, et al (2022) Comparison of Response Surface Methodology and Artificial Neural Network approach in predicting the performance and properties of palm oil clinker fine modified asphalt mixtures. Constr Build Mater 324:126618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126618>
4. Khelifi A, Boumaaza M, Belaadi A, et al (2023) Effects of alkaline treatment of Washingtonia mesh waste on the mechanical and physical properties of bio - mortar : experimental and prediction models. Biomass Convers Biorefinery. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04221-w>

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les effets de l'incorporation des déchets de *W robusta* et du biochar généré à partir de ces déchets sur les propriétés de compression et de flexion d'un mortier vert nouvellement développé ont été examinés dans cette étude à l'aide d'ANN et de RSM. Les principales conclusions suivantes découlent de l'analyse des résultats ci-dessus :

- La densité a diminué en ajoutant des déchets de fibres et du biochar à la matrice cimentaire. Toutefois, lorsque 1 % de déchets de fibres et 1 % de déchets de fibres sont mélangés en quantités égales, la densité est réduite de 110 % par rapport à un mortier de référence ;
- La porosité et l'absorption d'eau augmentent à mesure que les WRW et WRWB remplacent le ciment en quantités croissantes. Heureusement, la quantité d'eau qui s'infiltré dans les mortiers verts est diminuée par l'ajout de fibres traitées ;
- - Par rapport au mortier de contrôle, il y a une différence notable dans les caractéristiques de compression et de flexion lors de l'utilisation de WRWB et WRW traités au bicarbonate. Les mortiers verts perdent leur résistance à la flexion et à la compression lorsque la teneur en ces deux facteurs augmente. Avec une amélioration de la résistance et du déplacement en flexion de 29% et 40%, respectivement, par rapport au mortier de référence, les mortiers GM-1-1-8-24 ont affiché les meilleurs résultats. L'ajout de fibres de déchets et de biochar a augmenté la ductilité de 35 % mais n'a que très peu augmenté la résistance à la compression de 5 % par rapport au mortier de référence.
- - Les valeurs de substitution de 1,3 % et 1,2 % en poids de ciment de biochar WRWB et de fibres de déchets WRW traités avec 5,1 % de CaCO_3 pendant une durée de 27,6 heures, respectivement, ont atteint les résistances maximales à la flexion et à la compression dans le mortier vert développé.
- L'efficacité de l'ANN et du RSM a été démontrée par l'optimisation et la prédiction. Les premiers facteurs d'entrée en particulier les modifications de WRW ont eu un impact plus important sur les propriétés de flexion et de compression et sur l'absorption d'eau. Cinq modèles prédisent l'absorption d'eau, les propriétés de flexion et de compression des mélanges avec une grande précision ;
- Les modèles développés à l'aide des analyses ANN et RSM et appliqués aux valeurs de R_b , R_c , Y_b , Y_c et WA se sont avérés prédire avec précision les résultats à un taux de

Conclusion Générale

(98,73%, 98,40%, 98,12%, 98,84%, et 98,44%) et (93,36%, 93,49%, 95,29%, 91,26%, et 92,55%) respectivement ;

- Les modèles ANN ont toutefois surpassé le modèle RSM, avec un R2 plus élevé et les erreurs de prédiction les plus faibles (MSE, RMSE et MAPE), inférieures à 7 %.

Cette étude contribue à l'avancement des pratiques de construction durable et démontre le potentiel d'utilisation des déchets dans les formulations de mortier avec une performance améliorée. Selon les résultats de l'étude, le biochar pourrait être un ingrédient avantageux pour les composites cimentaires renforcés par des fibres. En exploitant les déchets agricoles, tels que les déchets WRW et le biochar, l'industrie de la construction peut contribuer à la réduction des déchets, à la diminution des émissions de carbone et à la promotion d'un environnement bâti plus durable. La poursuite de la recherche et de l'innovation dans ce domaine offre un immense potentiel pour créer un avenir plus vert et plus résilient. Le mélange de biochar avec d'autres matériaux et additifs ouvre de nouvelles perspectives pour la création de composites de ciment plus efficaces, plus durables et plus respectueux de l'environnement.



Références Bibliographiques

Références chapitre I

1. Kang-Hao T, Tian-Yu W, Zu-Heng Z, Ying-Hong Q (2021) Biochar as a Partial Cement Replacement Material for Developing Sustainable Concrete: An Overview. *J Mater Civ Eng* 33:3121001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003987](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003987)
2. Sirico A, Bernardi P, Sciancalepore C, et al (2021) Biochar from wood waste as additive for structural concrete. *Constr Build Mater* 303:124500. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124500>
3. Maljaee H, Madadi R, Paiva H, et al (2021) Incorporation of biochar in cementitious materials: A roadmap of biochar selection. *Constr Build Mater* 283:. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122757>
4. Kurniawan TA, Othman MHD, Liang X, et al (2023) Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. *J Environ Manage* 332:117429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117429>
5. S. SS, K. P, A. R, Raghavan V (2021) Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. *Biomass Convers Biorefinery* 11:2247–2267. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00604-5>
6. Danesh P, Niaparast P, Ghorbannezhad P, Ali I (2023) Biochar Production: Recent Developments, Applications, and challenges. *Fuel* 337:126889. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126889>
7. Haque MI, Khan RI, Ashraf W, Pendse H (2021) Production of sustainable, low-permeable and self-sensing cementitious composites using biochar. *Sustain Mater Technol* 28:e00279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00279>
8. Kesikidou F, Stefanidou M (2019) Natural fiber-reinforced mortars. *J Build Eng* 25:100786. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100786>
9. Belaadi A, Boumaaza M, Alshahrani H, et al (2023) Improving the Mechanical Performance of Biocomposite Plaster/ *Washingtonia filifera*: Optimization Comparison Between ANN and RSM Approaches. *J Nat Fibers* 20:2170945. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2170945>
10. Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M, et al (2023) Optimization of flexural properties and thermal conductivity of *Washingtonia* plant biomass waste biochar reinforced bio-mortar. *J Mater Res Technol* 23:3515–3536. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.009>
11. Vantadori S, Carpinteri A, Zanichelli A (2019) Lightweight construction materials: Mortar reinforced with date-palm mesh fibres. *Theor Appl Fract Mech* 100:39–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.12.011>
12. Çomak B, Bideci A, Salli Bideci Ö (2018) Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar. *Constr Build Mater*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.029>
13. Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M (2020) The Effect of Alkaline Treatment on Mechanical Performance of Natural Fibers-reinforced Plaster: Optimization Using RSM. *J Nat Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1724236>
14. Xie X, Zhou Z, Yan Y (2019) Flexural properties and impact behaviour analysis of bamboo cellulosic fibers filled cement based composites. *Constr Build Mater* 220:403–414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.029>

15. Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M (2022) Systematic Review on Reinforcing Mortars with Natural Fibers: Challenges of Environment-Friendly Option. *J Nat Fibers* 0:1–25. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2060408>
16. Praneeth S, Guo R, Wang T, et al (2020) Accelerated carbonation of biochar reinforced cement-fly ash composites: Enhancing and sequestering CO₂ in building materials. *Constr Build Mater* 244:118363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118363>
17. Gupta S, Kua HW (2020) Combination of Biochar and Silica Fume as Partial Cement Replacement in Mortar: Performance Evaluation Under Normal and Elevated Temperature. *Waste and Biomass Valorization* 11:2807–2824. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00573-x>
18. Gupta S, Kua HW, Tan Cynthia SY (2017) Use of biochar-coated polypropylene fibers for carbon sequestration and physical improvement of mortar. *Cem Concr Compos* 83:171–187. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.012>
19. Muthukrishnan S, Gupta S, Kua HW (2019) Application of rice husk biochar and thermally treated low silica rice husk ash to improve physical properties of cement mortar. *Theor Appl Fract Mech* 104:102376. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102376>
20. Afshoon I, Miri M, Mousavi SR (2023) Using the Response Surface Method and Artificial Neural Network to Estimate the Compressive Strength of Environmentally Friendly Concretes Containing Fine Copper Slag Aggregates. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01152-4>
21. Behnood A, Golafshani EM (2018) Predicting the compressive strength of silica fume concrete using hybrid artificial neural network with multi-objective grey wolves. *J Clean Prod* 202:54–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.065>
22. Ofuyatan OM, Agbawhe OB, Omole DO, et al (2022) RSM and ANN modelling of the mechanical properties of self-compacting concrete with silica fume and plastic waste as partial constituent replacement. *Clean Mater* 4:100065. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100065>
23. Rizalman AN, Lee CC, Engineering F, Kinabalu UMSK (2020) Comparison of Artificial Neural Network (ANN) and Response Surface Methodology (RSM) in Predicting the Compressive Strength of POFA Concrete. *Appl Model Simul* 4:210–216
24. Nakkeeran G, Krishnaraj L (2023) Prediction of cement mortar strength by replacement of hydrated lime using RSM and ANN. *Asian J Civ Eng* 24:1401–1410. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00577-6>
25. Pratap B, Mondal S, Rao BH (2023) Prediction of compressive strength of bauxite residue-based geopolymer mortar as pavement composite materials: an integrated ANN and RSM approach. *Asian J Civ Eng*. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00797-w>
26. Khan K, Johari MAM, Amin MN, et al (2023) Optimization of colloidal nano-silica based cementitious mortar composites using RSM and ANN approaches. *Results Eng* 20:101390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101390>
27. Çalışkan A, Demirhan S, Tekin R (2022) Comparison of different machine learning methods for estimating compressive strength of mortars. *Constr Build Mater* 335:127490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127490>
28. Hammoudi A, Moussaceb K, Belebchouche C, Dahmoune F (2019) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction

- in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater* 209:425–436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119>
29. Kursuncu B, Gencil O, Bayraktar OY, et al (2022) Optimization of foam concrete characteristics using response surface methodology and artificial neural networks. *Constr Build Mater* 337:127575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127575>
30. Sahraei Moghadam A, Mirza Goltabar Roshan A, Omidinasab F (2023) Utilization of agricultural wastes as fiber, binder and aggregates of geopolymer mortars: Application of taguchi method for strength and durability optimization. *J Build Eng* 75:106906. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106906>
31. Wang P, Dong B, Zhang Y (2023) Evaluation and characteristic analysis of compressive strength and resistivity of EG cement conductive mortar based upon hybrid-BP neural network. *Constr Build Mater* 394:132203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132203>
32. Li Z, Dong J, Chen H, et al (2023) Mechanical behaviour and acoustic emission characteristics of basalt fibre mortar rubble under uniaxial cyclic compression. *Constr Build Mater* 393:132145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132145>
33. Chen Z, Liu Y, Wang M, et al (2023) Effect of coarse aggregate grading optimization on temperature, thermal stress and compressive strength of carbon fiber-reinforced concrete by ohmic heating curing. *J Build Eng* 66:105882. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105882>
34. Khelifi A, Boumaaza M, Belaadi A, et al (2023) Effects of alkaline treatment of Washingtonia mesh waste on the mechanical and physical properties of bio - mortar : experimental and prediction models. *Biomass Convers Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04221-w>
35. Insaf Mehrez Houda Hachem RG, Jemni A (2023) Optimization of Mortar/Agave americana Fibers Composite Behavior Based on Experimental Design. *J Nat Fibers* 20:2152149. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2152149>
36. Amran M, Lesovik V, Tolstoy A, et al (2022) Properties and performance of polypropylene fibered high-strength concrete with an improved composite binders. *Case Stud Constr Mater* 17:e01621. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01621>
37. Raheel Shah SA, Ben Kahla N, Atig M, et al (2023) Optimization of fresh and mechanical properties of sustainable concrete composite containing ARGF and fly ash: An application of response surface methodology. *Constr Build Mater* 362:129722. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129722>
38. Mobili A, Cosoli G, Giulietti N, et al (2023) Biochar and recycled carbon fibres as additions for low-resistive cement-based composites exposed to accelerated degradation. *Constr Build Mater* 376:131051. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131051>
39. Tayyab S, Khitab A, Iftikhar A, et al (2023) Manufacturing of high-performance light-weight mortar through addition of biochars of millet and maize. *Waste Dispos Sustain Energy* 5:97–111. <https://doi.org/10.1007/s42768-023-00135-5>
40. Gupta S (2022) Comparison of improved autogenous and bio-based self-healing techniques in fiber-reinforced mortar: Effect of bacteria incorporation strategy and fiber

41. Gupta S, Kua HW, Pang SD (2018) Healing cement mortar by immobilization of bacteria in biochar: An integrated approach of self-healing and carbon sequestration. *Cem Concr Compos* 86:238–254.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.015>

42. Chen Q, Qin J, Sun P, et al (2018) Cow dung-derived engineered biochar for reclaiming phosphate from aqueous solution and its validation as slow-release fertilizer in soil-crop system. *J Clean Prod* 172:2009–2018.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.224>

43. Boumaaza M, Belaadi A, Alshahrani H, et al (2023) Environmentally mortar development using Washingtonia/biochar waste hybrid: mechanical and thermal properties. *Biomass Convers Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04743-3>

44. Almi Kenza. Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie. Diss. Université Mohamed Khider BISKRA, 2018.

45. H. H. Molinaro. Matériaux composites et structures composites. ENS Paris-Saclay, 2015.

46. G.Tripathi, D. Srivastava. Effect of Carboxyl-Terminated Poly (Butadiene-co-Acrylonitrile)(CTBN) Concentration on Thermal and Mechanical Properties of Binary Blends of Diglycidyl Ether of Bisphenol-A (DGEBA) Epoxy Resin. *Materials Science & Engineering A*, 443, 2007, 262-269.]

47. Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. France. 2008. cel- 00470296v2HAL Id: cel-00470296

<https://cel.hal.science/cel-00470296v2> . 2011

48. S. Steven, V. A Guy, V. M. Bruno, Reaction Kinetics Modeling and Thermal Properties of Epoxy-Amines as Measured by Modulated-Temperature DSC. I. Linear Step-Growth Polymerization of DGEBA + Aniline, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 91, 2004, 2798-2813.].

49. Raphaël Kueny. Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles HAL Id : tel-01750535.
<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750535>

50. W. D Callister. *Science and Engineering: An Introduction*, Materials (6) (2006).

51. Baley. C, Grohens. Y, and Pillin. I, State of the art regarding biodegradable composites. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, 14, p. 135- 166. (2004).

52. Bouhmame Nasser. Etude des matériaux composites à matrice polymère chargée par des fibres de Palmier Dattier

53. Belkhir Zohra. Amélioration des propriétés mécaniques des composites à différentes matrices à base de fibres naturelles locales.2022.

54. Fadel, A. Influence des diverses modifications du Genêt d'Espagne sur les propriétés mécaniques, rhéologiques et thermiques de composites à matrice thermoplastique'', Thèse de magister, Université Sétif-1-, 2014, pp 106.

55. Merzoud, M. Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de diss dans la fabrication de la maçonnerie'', Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007, pp 123.
56. Souakir, M. Élaboration et caractérisations des composites hybrides, PEHD/fibres PET recyclés/montmorillonite organophile : Étude des effets de la composition et du traitement de surface de la fibre PET'', Thèse de magister, Université Setif-1-, Décembre 2014, pp 105.
57. Boussehel, H. Etude des moyens de stabilisation des composites à base de polystyrène'', Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2018, pp 139.
58. Bouhank, S. Elaboration de matériaux composites PVC/fibres de genêt d'Espagne : formulations et caractérisations'', Thèse de doctorat, Université de Ferhat ABBAS, Sétif 1 2017, pp 130.
59. Boussehel, H. Etude des moyens de stabilisation des composites à base de polystyrène'', Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2018, pp 139.
60. Raphaël Kueny. Généralités sur les fibres naturelles ; Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles HAL Id : tel-01750535. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750535>
61. Achour Abderraouf . Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles : valorisation des plantes locales .2017
62. Bouhemame Nasser. Etude des matériaux composites à matrice polymère chargée par des fibres de Palmier Dattier
63. Touloum et AL-C. Bois local : les palmiers dattiers Nouveau bio-composite local à base de fibres cellulosiques. Application à l'isolation thermique en bâtiment. Farid Touloum1, Adel Benchabane, Abdelhak Kaci Biskra, 7 et 8 Décembre 2011 Premier Séminaire National de Génie Mécanique (SNGM01).
64. N. Benmansour, Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat, Thèse de doctorat Université de Batna, Algérie, (2015).
65. 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>.
- 66 R. GHEDAMSI, Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à énergie positive en Algérie, (2019).
67. M. Iqbal, J. Ma, N. Ahmad, K. Hussain, M.S. Usmani, M. Ahmad, Sustainable construction through energy management practices in developing economies: an analysis of barriers in the construction sector, Environmental Science and Pollution Research. 28 (2021) 34793–34823. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12917-7>.
68. 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).
69. 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>.

70. 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>.
71. B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, S. Amziane, Flowability of fibre reinforced 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>.
72. 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.
73. A. Govin, A. Peschard, R. Guyonnet, Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood, *Cement and Concrete Composites*. 28 (2006) 12–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.002>.
74. A. Govin, Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois, (2004).
75. Y. Lamia, Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss), 2011.
76. E.T. Dawood, M. Ramli, Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers, *Construction and Building Materials*. 28 (2012) 193–200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.057>.
77. W.H. Kwan, M. Ramli, C.B. Cheah, Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment, *Construction and Building Materials*. 63(2014) ;62–71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.004>.
78. C. Sawsen, K. Fouzia, B. Mohamed, G. Moussa, Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite, *Construction and Building Materials*. 79 (2015) 229–235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.091>.
79. N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, A. Boudenne, Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building, *Energy and Buildings*. 81 (2014) 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.032>.
80. G. Ramakrishna, T. Sundararajan, Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: A comparative study, *Cement and Concrete Composites*. 27 (2005) 547–553. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>.
81. J. de Almeida Melo Filho, F. de Andrade Silva, R.D. Toledo Filho, Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems, *Cement and Concrete Composites*. 40 (2013) 30–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>.
82. F. de Andrade Silva, B. Mobasher, R.D.T. Filho, Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*. 31 (2009) 721–730. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>.

Références chapitre II

1. Collection cimbéton CT G10 tome1 constituants des béton et mortiers p:10-20.
2. Mortiers, Cours (Technologie des Matériaux de Construction 1) TMC1, Abdeldjallil. Adit, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Faculté Des Sciences Et De La Technologie Département D' Architecture, page:11-17.
3. Kundan Yadav , R. L. Sharma (Comparative Study of Biochar and Charcoal and Their, Application in the Construction Industry. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2790644/v1>
4. C150/C150M A (2015) Standard specification for portland cement
5. ASTM C33 (2003) Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International
6. Boumaaza M, Belaadi A, Alshahrani H, et al (2023) Response Surface Methodology Optimization of Palm Rachis Biochar Content and Temperature Effects on Predicting Bio-Mortar Compressive Strength, Porosity and Thermal Conductivity. *J Nat Fibers* 20:2162184. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2162184>
7. EN 196-1 (2005) Methods of testing cement-Part 1: Determination of Stress. Eur Comm Stand
8. NF AFNOR (2010) Essai Pour Béton Durci—Essai de Porosité et de Masse Volumique—NF P18-459
9. ASTM (2013) C1585. Stand Test Method Meas Rate Absorpt Water by Hydraul - Cem Concr ASTM Int
10. Jayabal S, Velumani S, Navaneethakrishnan P, Palanikumar K (2013) Mechanical and machinability behaviors of woven coir fiber-reinforced polyester composite. *Fibers Polym.* <https://doi.org/10.1007/s12221-013-1505-5>
11. Khelifi A, Boumaaza M, Belaadi A, et al (2023) Effects of alkaline treatment of Washingtonia mesh waste on the mechanical and physical properties of bio - mortar : experimental and prediction models. *Biomass Convers Biorefinery.* <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04221-w>
12. Belaadi A, Boumaaza M, Alshahrani H, Bouchak M (2023) Optimization of Palm Rachis Biochar Waste Content and Temperature Effects on Predicting Bio-Mortar : ANN and RSM Modelling. *J Nat Fibers* 20:2151547. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2151547>
13. ASTM C109 (2013) Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). 4:1–9
14. ASTM A (2014) C348-14. Stand Test Method Flexural Strength Hydraul Mortars; ASTM Int West Conshohocken, PA, USA 1–6
15. Ray S, Haque M, Ahmed T, Nahin TT (2021) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber. *J King Saud Univ - Eng Sci.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.006>
16. Alemu HZ, Wu W, Zhao J (2018) Feedforward Neural Networks with a Hidden Layer Regularization Method. *Symmetry (Basel)* 10:. <https://doi.org/10.3390/sym10100525>

Rréférences chapitre III

1. Gupta S, Kua HW, Koh HJ (2018) Application of biochar from food and wood waste as green admixture for cement mortar. *Sci Total Environ* 619–620:419–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.044>
2. Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M, et al (2022) Comparative study of flexural properties prediction of *Washingtonia filifera* rachis biochar bio-mortar by ANN and RSM models. *Constr Build Mater* 318:125985. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125985>
3. Khelifi A, Boumaaza M, Belaadi A, et al (2023) Effects of alkaline treatment of *Washingtonia* mesh waste on the mechanical and physical properties of bio - mortar : experimental and prediction models. *Biomass Convers Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04221-w>
4. Cao S, Zheng D, Yilmaz E, et al (2020) Strength development and microstructure characteristics of artificial concrete pillar considering fiber type and content effects. *Constr Build Mater* 256:119408. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119408>
5. Yan W, Wu G, Dong Z (2019) Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model. *Constr Build Mater* 226:469–482. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287>
6. Ray S, Haque M, Ahmed T, Nahin TT (2021) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber. *J King Saud Univ - Eng Sci*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.006>

Rréférences chapitre IV

1. Ray S, Haque M, Ahmed T, Nahin TT (2021) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber. *J King Saud Univ - Eng Sci*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.006>
2. Kursuncu B, Gencil O, Bayraktar OY, et al (2022) Optimization of foam concrete characteristics using response surface methodology and artificial neural networks. *Constr Build Mater* 337:127575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127575>
3. Yaro NSA, Sutanto MH, Habib NZ, et al (2022) Comparison of Response Surface Methodology and Artificial Neural Network approach in predicting the performance and properties of palm oil clinker fine modified asphalt mixtures. *Constr Build Mater* 324:126618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126618>
4. Khelifi A, Boumaaza M, Belaadi A, et al (2023) Effects of alkaline treatment of *Washingtonia* mesh waste on the mechanical and physical properties of bio - mortar : experimental and prediction models. *Biomass Convers Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04221-w>

ANNEXE

Publications liées aux Recherches Doctorales

➤ *Publications internationales :*

Performance analysis of biochar and W. Robusta palm waste reinforced green mortar using response surface methodology and machine learning methods

Hassina Boudermine [a](#), Messaouda Boumaaza [b](#), Ahmed Belaadi [a](#), *, Mostefa Bourchak [c](#), Messaouda Bencheikh [b](#).

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137214> Received 11 October 2023; Received in revised form 13 June 2024; Accepted 23 June 2024. *Construction and Building Materials* 438 (2024) 137214

➤ *Communications internationales :*

Elaboration Et Caractérisation Des Mortiers A Base Des Constituants

Végétales¹ Boudermine Hassina, ² Belaadi Ahmed, 2èmes Séminaire International En Génie Industriel Et Mathématiques Appliquées, [SIGIMA'22, 23-24 Octobre 2022, SKIKDA](#)