Republique Algerienne Democratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi - Tébessa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil

THESE

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

En : **Génie Civil**
Spécialité : **Matériaux**

Par :

BOUZRED Fateh

THÈME

Contribution à l'étude des performances du béton recyclé renforcé par des fibres naturelles

Présenté et soutenu, le 10/07/2025, devant le jury composé de :

Dr HOUAM Abdelkader	Pr	Université de Tébessa	Président
Dr LAOUAR Mohamed Salah	Pr	Université de Tébessa	Directeur de thèse
Dr BOUZENADA Saliha	MCB	Université Constantine 3	Co-Directeur de thèse
Dr HARKATI El Haddi	Pr	Université de Tébessa	Examinateur
Dr MESSAST Salah	Pr	Université de Skikda	Examinateur
Dr BENZAID Riad	Pr	Université de Jijel	Examinateur
Dr DIMIA Mohamed Salah	Pr	Université Batna 2	Examinateur

Résumé

Face aux impératifs croissants de protection de l'environnement et de gestion de l'énergie auxquels est confronté le secteur de la construction, la valorisation des agrégats recyclés dans le béton représente une voie prometteuse. Néanmoins, le béton d'agrégats recyclés présente souvent des performances réduites, en particulier sur le plan mécanique. Cette thèse explore une approche novatrice pour améliorer les performances du béton recyclé en incorporant les fibres de palmier dattier, une ressource abondante et disponible, en particulier en Algérie. Un programme expérimental a été mis en œuvre, testant dix-neuf compositions de béton pour analyser l'influence de divers taux de substitution d'agrégats recyclés et de pourcentages d'ajout de fibres de palmier dattier tout en évaluant les effets combinés de ces deux composants. L'utilisation d'un superplastifiant et d'une méthode de malaxage en deux étapes modifiée a joué un rôle essentiel dans la mise en œuvre. Des essais ont été réalisés pour évaluer le comportement mécanique ainsi que la conductivité thermique des mélanges. Les résultats montrent que l'augmentation du taux d'agrégats recyclés réduit la masse volumique ainsi que les propriétés mécaniques et thermiques du béton, tout en augmentant l'absorption d'eau. Cependant, la méthode de malaxage adoptée a permis d'améliorer les propriétés mécaniques. L'ajout de 2 % de fibres de palmier dattier à un béton contenant 30 % d'agrégats recyclés améliore les résistances à la compression et à la traction par flexion de 11.16 % et 7.03 %, respectivement, atteignant des performances proches de celles du béton conventionnel, avec une légère augmentation du module d'élasticité de 2.52 %. De plus, une réduction de la conductivité thermique de 18.27 % a été observée, renforçant les propriétés thermiques du matériau. Ces résultats mettent en lumière la double fonctionnalité du béton recyclés renforcé par des fibres de palmier dattier, en tant que matériau structurel offrant une conductivité thermique améliorée. Cela le rend bien adapté à une construction durable, en réduisant l'usage de matériaux vierges, l'empreinte carbone, et en valorisant les fibres de palmier dattier, une ressource locale abondante en Algérie.

Mots clé : Agrégats Recyclés, Fibres Naturelles, Palmier Dattier, Méthode de Malaxage, Comportement Mécanique, Conductivité Thermique.

الملخص

مواجهةً للمتطلبات المتزايدة لحماية البيئة وإدارة الطاقة التي يواجهها قطاع البناء، يمثل تثمين الركام المعاد تدويره في الخرسانة مسارًا واعدًا. ومع ذلك، غالبًا ما تظهر خرسانة الركام المعاد تدويره أداءً منخفضًا، لا سيما من الناحية الميكانيكية. تستعرض هذه الرسالة النهج المبتكر لتحسين أداء الخرسانة المعاد تدويرها من خلال إدخال ألياف نخيل التمر، وهي مورد وفير ومتوافر، خاصة في الجزائر. تم تنفيذ برنامج تجريبي، اختُبرت فيه تسعة عشر تركيبة من الخرسانة لتحليل تأثير معدلات استبدال الركام المعاد تدويره ونسب إضافات ألياف نخيل التمر، مع التركيز على تأثيراتها بالنسبة إلى كتلة الأسمنت، بينما تم تقييم التأثيرات المجمعة لهذين المكونين. كان لاستخدام مادة مضافة فائقة للتجانس وطريقة خلط معدلة على مرحلتين دور أساسي في التنفيذ. تم إجراء اختبارات لتقييم السلوك الميكانيكي وكذلك الناقلية الحرارية للخلطات. أظهرت النتائج أن زيادة محتوى الركام المعاد تدويره يقلل من الكثافة الحجمية وكذلك الخصائص الميكانيكية والحرارية للخرسانة، بينما يزيد من امتصاص الماء. ومع ذلك، ساعدت طريقة الخلط المتبعة في تحسين الخصائص الميكانيكية. أدى إضافة 2% من ألياف نخيل التمر إلى الخرسانة التي تحتوي على 30% من الركام المعاد تدويره إلى تحسين مقاومة الانضغاط والمقاومة للشد بالانحناء بنسبة 11.16% و7.03% على التوالي، مما يحقق أداءً قريبًا من الخرسانة التقليدية، مع زيادة طفيفة في معامل المرونة بنسبة 2.52%. علاوة على ذلك، تم ملاحظة تقليل في الناقلية الحرارية بنسبة 18.27%، مما يعزز الخصائص الحرارية للمادة. تسلط هذه النتائج الضوء على الوظيفة المزدوجة للخرسانة المعاد تدويرها المدعمة بألياف نخيل التمر، كمادة هيكلية تقدم موصلية حرارية محسنة. وهذا يجعلها مناسبة للبناء المستدام، حيث يقلل من استخدام المواد الخام، ويخفض من البصمة الكربونية، ويعزز من قيمة ألياف نخيل التمر، وهو مورد محلي وفير في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: الركام المعاد تدويره، الألياف الطبيعية، نخيل التمر، طريقة الخلط، السلوك الميكانيكي، الناقلية الحرارية.

Abstract

Given the growing imperatives of environmental protection and energy management faced by the construction sector, the valorization of recycled aggregates in concrete represents a promising avenue. However, recycled aggregate concrete often exhibits reduced performance, particularly in terms of mechanical properties. This thesis explores an innovative approach to improving the performance of recycled concrete by incorporating date palm fibers, an abundant and available resource, particularly in Algeria. An experimental program was implemented, testing nineteen concrete compositions to analyze the influence of various replacement rates of recycled aggregates and percentages of date palm fiber additions, with a focus on their impact relative to the cement mass, while evaluating the combined effects of these two components. The use of a superplasticizer and a modified two-step mixing method played a crucial role in the implementation. Tests were conducted to evaluate the mechanical behavior as well as the thermal conductivity of the mixtures. The results show that increasing the recycled aggregate content reduces the bulk density as well as the mechanical and thermal properties of the concrete, while increasing water absorption. However, the adopted mixing method helped improve the mechanical properties. Adding 2% date palm fibers to concrete containing 30% recycled aggregates improved the compressive and flexural tensile strengths by 11.16% and 7.03%, respectively, achieving performance close to conventional concrete, with a slight increase in the elasticity modulus of 2.52%. Furthermore, a reduction in thermal conductivity of 18.27% was observed, enhancing the thermal properties of the material. These results highlight the dual functionality of recycled concrete reinforced with date palm fibers, as a structural material offering improved thermal conductivity. This makes it well-suited for sustainable construction, reducing the use of virgin materials, lowering the carbon footprint, and valorizing date palm fibers, an abundant local resource in Algeria.

Keywords: Recycled Aggregates, Natural Fibers, Date Palm, Mixing Method, Mechanical Behavior, Thermal Conductivity.

Dédicace

Je dédie le fruit de cette recherche à ceux qui ont bâti ma vie et ma carrière.

A mes parents qui m'ont soutenu avec leurs amours et leurs sacrifices qui m'ont permis d'arriver à cet exploit.
Vous êtes les piliers de mon existence. Cette réussite est la vôtre.

A ma femme, pour sa patience et son perpétuel soutien. Vous êtes la source de ma force.

A mes enfants : Malek, Ikhlas et Iyad qui m'ont apporté joie et bonheur.
J'espère vous voir grandir avec les mêmes principes de persévérance.

A mes sœurs, pour votre existence, votre accompagnement et votre soutien dans les moments difficiles de ma vie.

Cette thèse est le fruit de vos encouragements, de votre amour.

J'en serai très reconnaissant.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens tout d'abord à remercier le bon DIEU, tout puissant, pour m'avoir accordé le courage, la patience, la volonté et, surtout, la santé nécessaire à la réalisation de cette modeste recherche.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, M. LAOUAR Mohamed Salah, professeur à l'Université Echahid Cheikh Larbi Tébessa, pour sa générosité, sa patience, ses conseils avisés et la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce travail. Ses nombreuses réflexions ont été déterminantes pour mener à bien ce projet de recherche. Un sincère merci à lui.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à Dr BOUZENADA Saliha, Maître de Conférences à l'Université Salah Boubnider Constantine 3, pour ses précieux conseils et son soutien constant durant cette recherche.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer mon travail, ainsi que pour leur disponibilité à tout moment. Je remercie particulièrement M. HOUAM Abdelkader, professeur à l'Université Echahid Cheikh Larbi Tébessa, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse, ainsi que l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté la tâche d'évaluer ce travail : M. HARKATI El Haddi, professeur à l'Université Echahid Cheikh Larbi Tébessa, M. MESSAST Salah, professeur à l'Université 20 Août 1955 de Skikda, M. BENZAID Riad, professeur à l'Université Mohammed Seddik Benyahia de Jijel, et M. DIMIA Mohamed Salah, professeur à l'Université chahid Mostefa Ben Boulaïd Batna 2.

Je remercie également M. Abimouloud Youcef, Maître de Conférences, ainsi que les membres du laboratoire EVRNZA à l'Université Kasdi Merbah Ouargla, pour m'avoir chaleureusement accueilli au sein de leur laboratoire.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes que j'ai rencontrées au cours de ces années de thèse, et que je tiens à remercier sincèrement. Je souhaite particulièrement remercier mes collègues HAMIDANE H'mida, BOURSAS Farid et AYEB Belkhir ainsi que Mme ACHI Souad, l'ingénieure des laboratoires de Génie Civil à l'Université de Tébessa pour leur aide précieuse et leur soutien constant.

Enfin, mes profonds remerciements également à toutes les personnes qui m'ont aidées et soutenues de près ou de loin.

Table des matières

Résumé I
Dédicace IV
Remerciements V
Liste des figures X
Liste des tableaux XII
Liste des Notations XIV

Chapitre I Introduction générale et problématique 1
I.1 Enjeux environnementaux et économiques 1
I.2 La Gestion des déchets de béton 2
I.3 Exploration du potentiel des agrégats recyclés 3
I.4 Valorisation d'une ressource locale - les fibres de palmier dattier 5
I.5 Problématique de la recherche 6
I.6 Objective de la recherche 6
I.7 Apport attendu de la thèse 7
I.8 Plan de la thèse 7

Chapitre II Revue de littérature et synthèse bibliographique 10
II.1 Introduction 10
II.2 Béton recyclé formulation et limites 10
II.2.1 Procédé de production des agrégats recyclés 11
II.3 Propriétés des agrégats recyclés 13
a. Propriétés géométriques 13
b. Propriétés physiques 14
c. Propriétés chimique et contaminants potentiels 15
II.3.1 Propriétés mécanique et thermique du béton recycle 17
a. Résistance à la compression 18
b. Résistance à la flexion 20
c. Module d'élasticité 21
d. Conductivité thermique 22
II.4 Amélioration des propriétés du béton recyclé 24
II.4.1 Elimination du mortier adhérent 24

a. Lavage à l'eau 25
b. Traitement mécanique 26
c. Traitement thermique 27
d. Traitement chimique 28
e. Traitement hybride 29
II.4.2 Traitement des agrégats recyclés 29
a. Revêtement de surface avec matériaux pouzzolaniques 30
b. Biominéralisation 31
c. Carbonatation 31
d. Imprégnation de polymères 32
e. Application de silicate de sodium 33
II.4.3 Ajout des adjuvants 34
II.4.4 Approches de malaxage en plusieurs étapes 35
II.5 Fibres naturelles, diversité, performances et interactions avec le ciment 37
II.5.1 Propriétés chimiques et physiques des fibres végétales 41
II.5.2 Propriétés mécaniques des fibres végétales 44
II.5.3 Propriétés thermiques des fibres végétales 46
II.5.4 Comportement des fibres végétales dans le béton 47
II.6 Spécificités des fibres de palmier dattier dans le contexte Algérien 49
II.6.1 Techniques d'extraction 52
a. Procédé Physique 52
b. Procédé Mécanique 52
c. Procédé Chimique 52
Procédé Biologique 52
II.6.2 Valorisation des composants 53
a. Tronc 54
b. Feuilles 54
c. Dattes 54
d. Pétiole 54
e. Fibrillium 54
f. Grappes 55
II.6.3 Propriétés des fibres de palmier dattier 55
II.6.4 Renforcement du plâtre par les fibres de palmier dattier 57
II.6.5 Renforcement du mortier par les fibres de palmier dattier 58

II.6.6 Renforcement du béton par les fibres de palmier dattier 60
II.7 Combinaisons béton recyclé - fibres naturelles 61
II.8 Lacunes scientifiques et positionnement du travail de recherche 63
II.9 Enjeux de valorisation locale et retombées durables 64
II.10 Conclusion 64

Chapitre III Matériaux, matériels, formulation et procédure expérimentale 66
III.1 Introduction 66
III.2 Matériaux 66
III.2.1 Ciment 66
III.2.2 Sable 66
III.2.3 Agrégats naturels 67
III.2.4 Agrégats recyclés 67
III.2.5 Fibres de palmier dattier 67
III.2.6 Eau 68
III.2.7 Adjuvant 69
III.3 Caractérisation des matériaux 69
III.3.1 Ciment 69
III.3.2 Sable 70
a. Equivalant de sable 71
b. Analyse granulométrique 72
III.3.3 Agrégats naturels 74
a. Essai Los-Angeles 74
b. Analyse granulométrique 75
III.3.4 Agrégats recyclés 76
III.3.5 Fibres de palmier dattier 78
III.4 Stratégies de formulation des mélanges 79
a. Données de base 79
b. Dosage en eau 80
c. Dosage en agrégat 80
III.5 Préparation et mise en œuvre des éprouvettes 82
III.6 Campagne d'essais réalisée 85
III.6.1 Essai d'affaissement 86
III.6.2 Essai de compression 87

III.6.3 Essai de flexion (Quatre points) 87
III.6.4 Essai aux ultrasons 88
III.6.5 Mesure de la conductivité thermique 90
III.7 Conclusion 92

Chapitre IV Résultats et discussions 94
IV.1 Introduction 94
IV.2 Affaissement 94
IV.3 Évaluation des performances du béton recyclé 95
IV.3.1 Masse volumique 96
IV.3.2 Absorption d'eau 97
IV.3.3 Résistance à la compression 98
IV.3.4 Résistance à la traction par flexion 100
IV.3.5 Module d'élasticité 101
IV.3.6 Conductivité thermique 101
IV.4 Évaluation des performances du béton recyclé renforcé par les fibres de palmier dattier 102
IV.4.1 Masse volumique 104
IV.4.2 Absorption d'eau 105
IV.4.3 Résistance à la compression 106
IV.4.4 Résistance à la traction par flexion 108
IV.4.5 Module d'élasticité 110
IV.4.6 Conductivité thermique 111
IV.5 Conclusion 112

Conclusions, recommandations et perspectives 115

Références bibliographiques 119

Liste des figures

Figure II-1 Station de recyclage fixe (CDE 2025).....11
Figure II-2 station de recyclage mobile (SANME 2025).....12
Figure II-3 Procédure de recyclage (Silva, et al. 2017).....13
Figure II-4 Agrégats recyclés.....14
Figure II-5 Représentation d'agrégat recyclé dans le béton recyclé (Wang, et al. 2021).....17
Figure II-6 Comparaison des méthodes de malaxage (Zhang, et al. 2019).....36
Figure II-7 Classifications des fibres naturelles selon Elfaleh, et al. (2023).....38
Figure II-8 Quelques plantes sources de fibres cellulosiques (Thapliyal, et al. 2023).....40
Figure II-9 La production annuelle mondiale de certaines plantes naturelles (Elseify, et al. 2019).....41
Figure II-10 Les prix de certaines fibres naturelles (Elseify, et al. 2019).....41
Figure II-11 Microstructure des fibres naturelles (Elfaleh, et al. 2023).....43
Figure II-12 Déchets de palmier dattier.....50
Figure II-13 Fibres de palmier dattier (Althoey, et al. 2022).....51
Figure II-14 Palmier dattier (Agoudjil, et al. 2011).....53
Figure II-15 Performances améliorées des composites renforcés par des fibres de palmier dattier (Dhakal, et al. 2024).....57
Figure II-16 Fibres de jute, sisal, canne à sucre et noix de coco (Jamshaid, et al. 2022).....62
Figure II-17 Les fibres de sisal et de palmier (Haruehansapong, et al. 2024).....63
Figure III-1 Éprouvettes de béton utilisées et agrégats recyclés obtenus.....67
Figure III-2 Pétiole de palmier dattier collecté.....68
Figure III-3 Broyage du bois de palmier et fibres obtenues.....68
Figure III-4 Courbes granulométriques des sables étudiés.....73
Figure III-5 Analyse granulométrique des agrégats naturels.....76
Figure III-6 Analyse granulométrique des agrégats recyclés.....78
Figure III-7 Phase de malaxage à sec (sable, agrégats et ciment).....83
Figure III-8 Ajout des fibres dans le mélange.....83
Figure III-9 Eprouvettes après moulage.....84
Figure III-10 Conservation des éprouvettes en cure à l'eau.....85

Figure III-11 Cône d'Abrams 86
Figure III-12 Essai de compression 87
Figure III-13 Essai de flexion 88
Figure III-14 Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique 90
Figure III-15 CT-mètre 91
Figure III-16 Sonde du CT-mètre positionnée entre deux échantillons 91
Figure IV-1 Influence du taux de substitution des agrégats sur la masse volumique 97
Figure IV-2 Influence du taux de substitution des agrégats sur l'absorption d'eau 98
Figure IV-3 Influence du taux de substitution des agrégats sur la résistance à la compression 99
Figure IV-4 Influence du taux de substitution des agrégats sur la résistance à la traction par flexion 100
Figure IV-5 Influence du taux de substitution des agrégats sur le module d'élasticité 101
Figure IV-6 Influence du taux de substitution des agrégats sur la conductivité thermique ... 102
Figure IV-7 Influence des taux de substitution des agrégats et d'ajout de fibres sur la masse volumique 104
Figure IV-8 Influence des taux de substitution des agrégats et d'ajout de fibres sur l'absorption d'eau 106
Figure IV-9 Influence des taux de substitution des agrégats et d'ajout de fibres sur la résistance à la compression 107
Figure IV-10 Influence des taux de substitution des agrégats et d'ajout de fibres sur la résistance à la traction par flexion 109
Figure IV-11 Impact des agrégats recyclés et des fibres de palmier dattier sur le module d'élasticité 110
Figure IV-12 Impact des agrégats recyclés et de fibres de palmier dattier sur la conductivité thermique 111

Liste des tableaux

Tableau II-1 Avantages et inconvénients des stations mobiles ou fixes (Silva, et al. 2017)...12

Tableau II-2 Propriétés physiques des agrégats recyclés 15

Tableau II-3 Propriétés chimiques des agrégats recyclés.....16

Tableau II-4 Récapitulatif de certaines travaux sur les propriétés mécaniques du béton recyclé 18

Tableau II-5 Conductivité thermique du béton recyclés (Kazmi, et al. 2021).....23

Tableau II-6 Types de fibres végétale (Sathishkumar, et al. 2014) 40

Tableau II-7 L'influence de la composition chimique sur les propriétés mécaniques et physiques des fibres naturelles (Karimah, et al. 2021).....42

Tableau II-8 Composition chimique de quelques fibres naturelles (Karimah, et al. 2021).....43

Tableau II-9 Propriétés physiques de quelques types de fibres naturelles (Campilho 2015)...44

Tableau II-10 Propriétés mécaniques de certaines fibres naturelles : valeur moyenne entre parenthèses (Thapliyal, et al. 2023) 45

Tableau II-11 Conductivité thermique de quelques fibres végétales.....47

Tableau II-12 Principaux pays producteurs de dattes en 2023 (FAO 2023) 49

Tableau II-13 Constituants chimiques des fibres de palmier dattier comparé à certaines fibres naturelles (Rasoul, et al. 2020) 55

Tableau II-14 Propriétés mécaniques et physiques des fibres végétales naturelles couramment utilisées et des fibres de palmier dattier (Rasoul, et al. 2020).....56

Tableau II-15 Propriétés mécaniques des fibres de palmier dattier comparées à celles de certaines fibres naturelles (Rasoul, et al. 2020).....56

Tableau III-1 Propriétés physiques du ciment utilisé (S.C.Tébessa 2025).....70

Tableau III-2 Composition chimiques du ciment utilisé (S.C.Tébessa 2025) 70

Tableau III-3 Propriétés mécaniques du ciment utilisé (S.C.Tébessa 2025) 70

Tableau III-4 Masses volumiques des Sable étudies.....71

Tableau III-5 Résultats des essais d'équivalent de sable 71

Tableau III-6 Analyse granulométrique du sable de rivière 72

Tableau III-7 Analyse granulométrique du sable de carrière.....73

Tableau III-8 Propriétés physiques des agrégats naturels.....74

Tableau III-9 : Résultats d'essai Los-Angeles pour les agrégats naturels.....75

Tableau III-10 Analyse granulométrique des AN 8/15 75
Tableau III-11 Analyse granulométrique des AN 15/25 76
Tableau III-12 Propriétés physiques des agrégats recyclés 77
Tableau III-13 Analyse granulométrique des AR 8/15 77
Tableau III-14 Analyse granulométrique des AR 15/25 77
Tableau III-15 Propriétés physiques des fibres 78
Tableau III-16 Données de base (méthode Dreux-Gorisse) 80
Tableau III-17 Dosage des constituants pour 1 m³ de béton.....80
Tableau III-18 Dosages des constituants des différents mélanges (kg par m^3 de béton).....81
Tableau III-19 Normes associées à chaque essai ou mesure effectuée.....86
Tableau IV-1 Propriétés physiques des différents mélanges de béton recyclé 95
Tableau IV-2 Propriétés mécaniques des différents mélanges de béton recyclé 96
Tableau IV-3 Conductivité thermique des différents mélanges de béton recyclé.....96
Tableau IV-4 Propriétés physiques des mélanges de béton renforcé par les fibres 103
Tableau IV-5 Propriétés mécaniques des mélanges de béton renforcé par les fibres.....103
Tableau IV-6 Conductivité thermique des mélanges de béton renforcé par les fibres 104

Liste des Notations

MF	Module de finesse
H	Hauteur
LA	Coefficient de Los Angeles
M	Masse
Es	Equivalent de sable
D	Diamètre maximal d'agrégat
γ	Coefficient de compacité
V	Volume
Ed	Module d'élasticité dynamique
V_U	Vitesse de propagation des ultrasons
L	Longueur de parcours des vitesses ultrasoniques
T	Temps de parcours des vitesses ultrasoniques
ρ	Masse volumique
ν	Coefficient de poisson du béton

Chapitre I Introduction générale et problématique

I.1 Enjeux environnementaux et économiques

Le secteur de la construction, pilier fondamental du développement socio-économique mondial, fait aujourd'hui face à des impératifs de transformation majeurs en raison des défis environnementaux et de l'épuisement des ressources naturelles. Il est largement reconnu que ce secteur contribue de manière significative aux changements climatiques ; certaines estimations lui attribuent près de 37 % des émissions mondiales de carbone liées à l'énergie et aux processus opérationnels. En outre, la consommation d'énergie engendrée par le secteur représente plus d'un tiers de la demande mondiale (PNUE 2024).

De plus, les statistiques révèlent une autre problématique : le secteur de la construction nécessite d'énormes ressources et représente environ 50 % de l'ensemble des matériaux extraits (European Commission 2025), incluant des ressources primaires essentielles telles que les agrégats et le bois. Parallèlement, entre 35 % et 40 % des déchets solides produits dans le monde proviennent des activités de construction et de démolition ; chaque année, environ 2.2 milliards de tonnes de déchets de construction sont générés à l'échelle mondiale (JR Recycling Solutions 2024). Cette consommation excessive de ressources limitées et la production conséquente de déchets exercent une pression insoutenable sur les écosystèmes et les réserves naturelles de la planète, menaçant la biodiversité et la durabilité à long terme.

Au-delà des impératifs, ce secteur est également soumis à des pressions économiques croissantes. L'épuisement progressif des ressources vierges, en particulier les agrégats naturels, entraîne une fluctuation des prix et une incertitude sur l'approvisionnement futur. Parallèlement, la demande pour des bâtiments à haute performance environnementale et à faible consommation énergétique s'augmente, portée par une prise de conscience social croissante et par l'évolution des cadres réglementaires nationaux et internationaux. Bien que l'adoption de pratiques de construction durables puisse initialement engendrer des surcoûts liés à l'utilisation de

nouveaux matériaux et technologies, ces ouvrages montrent des économies substantielles à long terme, notamment grâce à la réduction des dépenses énergétiques et des coûts de maintenance. La pression économique se manifeste également par la nécessité de se conformer à des réglementations environnementales de plus en plus strictes, imposant des coûts additionnels aux acteurs du secteur.

Bien que l'adoption de pratiques de construction durables puisse, dans un premier temps, entraîner des surcoûts liés à l'emploi de nouveaux matériaux et technologies, ces ouvrages montrent, à long terme, des économies significatives, notamment grâce à la diminution des dépenses énergétiques et des coûts de maintenance. La pression économique s'exprime également par la nécessité de se conformer à des réglementations environnementales de plus en plus strictes, ce qui impose des coûts supplémentaires aux acteurs du secteur.

Ainsi, la convergence des enjeux environnementaux et économiques crée un contexte favorable à l'innovation et à la recherche de solutions alternatives, visant à faire évoluer le secteur de la construction vers des pratiques plus durables et respectueuses de l'environnement.

I.2 La Gestion des déchets de béton

Le béton, matériau de construction le plus largement utilisé à l'échelle mondiale après l'eau, engendre une problématique environnementale considérable en raison des volumes importants de déchets qu'il génère tout au long de son cycle de vie. Les déchets de construction et de démolition comprennent une proportion significative de béton. L'élimination de ce béton dans les décharges contribue fortement à leur saturation, d'autant plus qu'il s'agit d'un matériau volumineux et inerte qui ne se décompose pas avec le temps.

Par ailleurs, une gestion inappropriée des déchets peut entraîner la contamination des sols et des ressources hydriques, puisque ce béton peut contenir divers contaminants, tels que les produits chimiques, les peintures ou les matériaux de renforcement, qui peuvent s'infiltrer dans le sol et polluer les eaux souterraines. De plus, les eaux de pluie s'écoulant sur les déchets de béton peuvent également devenir alcalines en raison de la présence de composés tels que l'hydroxyde de calcium (chaux), ce qui peut nuire à la

qualité de l'eau et à la vie aquatique.

la gestion adéquate de ces déchets constitue un impératif majeur pour assurer la durabilité du secteur, optimiser l'utilisation de l'espace de stockage et préserver les ressources naturelles.

Parallèlement aux défis posés par l'élimination des déchets, la production de nouveau béton requiert l'extraction de quantités considérables d'agrégats vierges, le marché mondial des agrégats devrait atteindre environ 48 milliards de tonnes métriques en 2025 (PMR 2024). Cette extraction contribue à l'épuisement des ressources naturelles et à la dégradation de l'environnement. Ainsi, la gestion des déchets de béton par le biais du recyclage représente une solution prometteuse pour atténuer ces problèmes, en réduisant la quantité envoyés en décharge et en diminuant la demande d'agrégats vierges, ce qui permet de conserver ces ressources naturelles précieuses et de minimiser l'impact environnemental associé à leur extraction.

I.3 Exploration du potentiel des agrégats recyclés

Face à la demande croissante de béton, à la nécessité urgente de préserver les ressources en matières premières et aux impératifs de protection de l'environnement dans un contexte de développement durable, l'utilisation des agrégats recyclés issus des déchets de construction et de démolition s'impose comme une alternative incontournable aux agrégats naturels, tant sur le plan économique qu'environnemental. Cette approche permet une gestion optimale des volumes massifs de déchets de construction et de démolition générés chaque année, plus de 3 milliards de tonnes dans 40 pays (Akhtar, et Sarmah 2018), contribuant ainsi à limiter l'extension des décharges et la protection de l'environnement.

Cependant, l'intégration d'agrégats recyclés dans les formulations de béton présente plusieurs défis techniques majeurs qui doivent être pris en compte pour garantir la performance et la durabilité des ouvrages construits. Ces défis sont principalement liés à leurs propriétés intrinsèques (Bairagi, et al. 1993; Rahal 2007; Chakradhara Rao, et al. 2011a), qui diffèrent de celles des agrégats naturels, en termes de durabilité réduite et de propriétés mécaniques faibles. De plus, le béton recyclé, ou plus précisément le béton des agrégats recyclés, présente des propriétés physiques et mécaniques inférieures à

celles du béton fabriqué avec des agrégats naturels (Bairagi, et al. 1993; Etxeberria, et al. 2007; Chen 2013; Bravo, et al. 2017; Damdelen 2018). En effet, une augmentation du taux de substitution des agrégats entraîne une baisse des propriétés mécaniques du béton, en raison notamment de la formation d'une zone de transition interfaciale très poreuse entre les agrégats et la pâte de ciment, ce qui augmente la porosité globale du béton (Wang, et al. 2021). Cette porosité accrue affecte négativement les propriétés mécaniques du béton ainsi que ses performances. Pour des performances optimales, il est conseillé de limiter la quantité d'agrégats recyclés à un maximum de 30 % (Damdelen 2018).

Par ailleurs, l'utilisation de agrégats recyclés présente un avantage sur le plan thermique, car elle améliore les propriétés thermiques du béton. En effet, la conductivité thermique du béton recyclé est inférieure à celle du béton conventionnel, en raison des micropores supplémentaires générés par les agrégats recyclés qui agissent comme une barrière au transfert de chaleur (Sargam, et al. 2020).

Pour faire face à ces défis techniques, plusieurs méthodes ont été développées et étudiées. Ces méthodes peuvent être classées en différentes catégories, comprenant l'élimination du mortier adhérent, le traitement des agrégats recyclés, l'ajout d'adjuvants et les approches de malaxage en plusieurs étapes, présentent chacune des avantages et des limites en termes d'efficacité, d'impact environnemental et de coûts (Wang, et al. 2020; Tam, et al. 2021b; Amit, et Gyani Jail 2023).

Les méthodes de malaxage en plusieurs étapes, telles que le malaxage en deux étapes (Tam, et al. 2005; Tam, et al. 2007b), ont été développées pour optimiser la distribution des constituants du béton recyclé et améliorer ses performances. Cette méthode consiste à diviser le processus de mélange en deux étapes distinctes, la première favorisant l'imprégnation des agrégats recyclés par une partie de l'eau et du ciment, et la seconde assurant l'incorporation des autres composants. Cette approche permet d'obtenir un béton plus homogène et plus résistant.

De plus, ces différentes méthodes peuvent également être combinées avec le renforcement par fibres, ce qui permet d'améliorer davantage les performances mécaniques et la durabilité du béton recyclé. Les fibres utilisées peuvent être

métalliques, en verre, synthétiques ou naturelles, chacune présentant des avantages spécifiques. Les fibres métalliques, comme l'acier, renforcent les propriétés mécaniques et la ductilité du béton recyclé (Kaplan, et al. 2021; Shaikh, et al. 2023), tandis que les fibres en verre augmentent la résistance à la flexion (Ali, et Qureshi 2019). Cependant, les fibres synthétiques, telles que celles en polypropylène, améliorent la résistance aux fissures et la durabilité, en réduisant notamment le retrait plastique (Sivakumar, et Santhanam 2007).

Parmi les solutions envisagées, l'intégration de fibres naturelles apparaît comme une voie particulièrement pertinente. Ces fibres, en plus d'être renouvelables, biodégradables et écologiquement responsables, sont souvent disponibles localement, ce qui en renforce l'intérêt dans une perspective de développement durable. Des recherches ont démontré que les fibres naturelles peuvent améliorer les propriétés mécaniques et thermiques du béton recyclé (Jamshaid, et al. 2022 ;Haruehansapong, et al. 2024).

I.4 Valorisation d'une ressource locale - les fibres de palmier dattier

En Algérie, le palmier dattier constitue une ressource naturelle abondante et encore sous-valorisée. Les fibres issues de ses différentes parties (feuilles, tiges, gaines) possèdent des caractéristiques mécaniques intéressantes et présentent un fort potentiel d'utilisation dans le domaine de la construction. Pourtant, la combinaison des agrégats recyclés et des fibres naturelles végétales demeure peu étudiée, notamment dans le contexte local. Les propriétés mécaniques du béton peuvent être améliorées par l'incorporation de fibres de palmier dattier (Kriker, et al. 2005; Alatshan, et al. 2017; Elseify, et al. 2019). De plus, ces fibres présentent des caractéristiques intéressantes en termes de propriétés thermiques. En raison de leur faible conductivité thermique (Agoudjil, et al. 2011), elles peuvent réduire la conductivité thermique du béton, le rendant ainsi plus adapté aux applications nécessitant une isolation thermique (Antony, et al. 2024).

La valorisation de ces ressources locales s'inscrit dans la stratégie algérienne en faveur du développement durable et de la promotion d'une économie circulaire. L'utilisation des déchets agricoles dans le secteur de la construction peut contribuer à

réduire la dépendance aux ressources non renouvelables et à minimiser les impacts environnementaux.

I.5 Problématique de la recherche

Face aux impératifs croissants de protection de l'environnement et de gestion de l'énergie auxquels est confronté le secteur de la construction en Algérie, notamment en ce qui concerne la gestion des volumes importants de déchets de béton et la réduction de la dépendance aux ressources naturelles vierges, la valorisation des ressources locales, telles que les agrégats issus du béton recyclé et les fibres végétales issues du palmier dattier, représente une voie prometteuse. Néanmoins, malgré le potentiel de ces matériaux individuellement, la recherche scientifique manque de données complètes et rigoureuses sur la manière d'intégrer et sur les performances du béton intégrant simultanément des agrégats recyclés et des fibres de palmier dattier. Peu d'études se sont penchées spécifiquement sur cette combinaison, notamment dans le contexte algérien. Les mécanismes d'interaction entre les fibres de palmier dattier et les agrégats recyclés dans la matrice cimentaire, ainsi que les caractéristiques thermiques de ces composites, qui pourraient s'avérer particulièrement prometteuses pour l'Algérie au regard de ses conditions climatiques spécifiques, sont des domaines qui nécessitent une investigation scientifique urgente.

Ainsi, cette recherche se propose d'explorer une problématique centrale : dans quelle mesure l'incorporation de fibres naturelles issues du palmier dattier permet-elle d'améliorer les performances mécaniques et thermiques du béton recyclé, tout en valorisant un matériau localement abondant ?

I.6 Objective de la recherche

Cette étude vise à répondre à cette insuffisance en matière de recherches et de données en évaluant les propriétés mécaniques et thermiques du béton recyclé renforcé par les fibres de palmier dattier, à l'aide d'une méthode de malaxage en deux étapes modifiée, dans le but d'améliorer les performances du mélange.

Il s'agira d'évaluer, par une approche expérimentale, l'influence de la substitution partielle et totale des agrégats naturels par des agrégats recyclés, ainsi que l'impact de l'ajout de différentes teneurs en fibres de palmier dattier, sur les propriétés

fondamentales de ce nouveau matériau composite. L'étude portera sur les caractéristiques du béton à l'état frais (maniabilité) et à l'état durci, incluant les propriétés physiques (masse volumique, absorption d'eau), les performances mécaniques (résistance à la compression et à la traction par flexion et module d'élasticité) et les caractéristiques thermiques (conductivité thermique).

I.7 Apport attendu de la thèse

Cette étude vise à apporter une contribution scientifique originale et approfondie sur les synergies potentielles entre l'utilisation d'agrégats recyclés et le renforcement par des fibres naturelles locales. les paramètres optimaux d'intégration des fibres de palmier dattier pour améliorer les performances globales du béton recyclé.

Plus largement, cette recherche a pour objectif de contribuer au développement de matériaux de construction adaptés au contexte algérien, en relevant les défis environnementaux de la gestion des déchets de béton et valorisation des ressources agricoles. Les résultats attendus devraient fournir des données et des recommandations précieuses pour favoriser l'adoption de ces matériaux dans le secteur du bâtiment.

I.8 Plan de la thèse

Afin de présenter de manière claire et méthodique la démarche suivie ainsi que les résultats obtenus, cette thèse est structurée comme suit :

Chapitre I Introduction générale et problématique

L'introduction générale établit établit le contexte de la recherche en soulignant l'importance du recyclage des déchets de construction et les limites du béton recyclé. Il présente de manière détaillée la problématique de l'étude, les objectifs visés et l'originalité de l'approche combinant agrégats recyclés et fibres de palmier dattier.

Chapitre II Revue de littérature et synthèse bibliographique

Ce chapitre propose une revue exhaustive de la littérature scientifique portant sur l'utilisation de matériaux recyclés dans le béton, les enjeux environnementaux associés au secteur de la construction, ainsi que l'intégration des fibres naturelles dans les composites cimentaires. Il présente d'abord l'état de l'art sur le béton recyclé, en mettant en lumière ses propriétés, ses limites, ainsi que les différentes méthodes d'amélioration

de ses performances, telles que les traitements des agrégats recyclés et l'usage d'adjuvants. Ensuite, une attention particulière est portée au renforcement par fibres, avec un accent spécifique sur les fibres naturelles. Parmi celles-ci, les fibres de palmier dattier sont examinées en détail, tant sur le plan de leurs propriétés que de leurs applications dans les mortiers et bétons.

Ce chapitre permet de situer la recherche dans le contexte actuel et d'identifier les lacunes à combler.

Chapitre III Matériaux, matériels, formulation et procédure expérimentale

Ce chapitre présente successivement les matériaux utilisés, les méthodes expérimentales mises en œuvre et la méthodologie de formulation des bétons recyclés renforcés de fibres. Il commence par une description détaillée des composants employés : ciment, sables, agrégats naturels et recyclés, ainsi que les fibres de palmier dattier. Les techniques de caractérisation de ces matériaux sont ensuite exposées, incluant les essais d'équivalent de sable, l'analyse granulométrique, l'essai Los Angeles, la détermination de la masse volumique et de l'absorption d'eau. La méthode Dreux-Gorisse utilisée pour la formulation des bétons est ensuite expliquée, suivie de la présentation d'un plan expérimental structuré autour de dix-neuf formulations, intégrant différentes proportions d'agrégats recyclés et de fibres de palmier dattier. La procédure de mise en œuvre est également précisée, avec une méthode de malaxage en deux étapes modifiée, visant à assurer une bonne homogénéité et à maîtriser l'importante absorption d'eau des matériaux. Enfin, les essais effectués sur les bétons à l'état frais (essai d'affaissement) et à l'état durci (masse volumique, absorption d'eau, résistance à la compression, résistance à la traction par flexion, module d'élasticité, conductivité thermique) sont détaillés, accompagnés des normes utilisées pour leur évaluation.

Chapitre IV Résultats et discussions

Ce chapitre propose une analyse approfondie des résultats expérimentaux relatifs aux propriétés mécaniques des bétons produits, en mettant particulièrement en lumière l'influence des fibres de palmier dattier. Il examine de manière systématique l'impact de la substitution des agrégats naturels par des agrégats recyclés, ainsi que l'effet combiné de cette substitution avec l'incorporation des fibres végétales sur chacune des

propriétés mesurées. Les tendances observées sont expliquées à travers l'analyse des mécanismes sous-jacents, permettant de comprendre l'évolution des performances. L'étude met également en évidence les effets synergiques liés à l'association des agrégats recyclés et des fibres de palmier dattier, notamment leur capacité à compenser les pertes de résistance mécanique. Par la suite, le comportement thermique des bétons est évalué, et son potentiel en matière d'efficacité énergétique est discuté. En conclusion, une synthèse des principaux résultats est présentée, accompagnée de recommandations pour une utilisation concrète de ces matériaux dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, ainsi que des pistes de recherche à explorer pour approfondir les connaissances dans ce domaine.

Conclusion, recommandations et perspectives

La conclusion générale récapitule les principaux résultats de la thèse, accompagnée de recommandations pour une utilisation concrète de ces matériaux dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, ainsi que des pistes de recherche à explorer pour approfondir les connaissances dans ce domaine.

Chapitre II Revue de littérature et synthèse bibliographique

II.1 Introduction

Ce chapitre présente une revue de la littérature existante relative au béton recyclé et à l'utilisation des fibres naturelles dans le domaine de la construction. Il explore les aspects fondamentaux, les progrès et les défis associés à ces matériaux, en vue de positionner le présent travail de recherche au sein de la littérature existante. L'examen débute par une exploration détaillée du béton recyclé, de sa production à ses propriétés, puis aborde également aux méthodes d'amélioration de ses performances. Une attention particulière est ensuite portée aux fibres naturelles en tant que renfort potentiel, avec un focus spécifique sur les fibres issues du palmier dattier.

II.2 Béton recyclé formulation et limites

Le béton résultant de déchets de construction et de démolition est généralement considéré comme un simple déchet de chantier inutile. Pourtant, ce matériau offre un potentiel considérable : en le collectant puis en le concassant, on obtient des agrégats recyclés. Bien que leur utilisation dans le béton demeure relativement récente, cette pratique ouvre des perspectives prometteuses pour la construction durable.

Selon Buck (1977), le recours aux agrégats recyclés a émergé à la fin de l'année 1945, en réponse à la destruction à grande échelle des infrastructures européennes et à l'urgence de gérer les débris tout en procédant à leur réhabilitation.

Les recherches de Nixon (1978) & Hansen (1986) ont prouvé que le béton recyclé présentait une faible résistance en compression, une résistance au gel-dégel équivalente, et un retrait à sec plus prononcé et une absorption d'eau élevée comparé au béton naturel. Entre 1945 et 1985, des recherches approfondies ont été menées sur recyclage des déchets de construction et de démolition, les propriétés des agrégats recyclés et les performances, ainsi que sur la durabilité du béton recyclé (Hansen 1986).

À partir du XXIe siècle, des études se sont consacrées à la mise au point de nouvelles formulations pour le béton recyclé, ainsi qu'à son utilisation dans le béton précontraint

et dans des structures à grande échelle (Dolara, et al. 1998). En particulier, au cours des vingt dernières années, en réponse aux exigences croissantes liées à l'économie circulaire, les études se sont multipliées et ont évolué vers l'optimisation des propriétés des agrégats recyclés ainsi que des performances mécaniques du béton recyclé (Guo, et al. 2018; Liang, et al. 2020; Shi, et al. 2016; Tam, et al. 2021b; Thomas, et al. 2018; Verian, et al. 2018).

II.2.1 Procédé de production des agrégats recyclés

Au cours des dernières décennies, bien que les installations de recyclage des déchets de construction et de démolition aient été modernisées, Le procédé de production des agrégats recyclés n'a pas significativement changé. Selon Silva, et al. (2017) les stations recyclage peuvent être fixes ou mobiles, en fonction des exigences et des spécificités du site. Les stations fixes (figure II-1), similaires aux carrières de agrégats naturels, comprennent des broyeurs primaires et secondaires, des cribles vibrants pour classer les agrégats selon leur taille, ainsi que des électroaimants pour retirer les résidus métalliques et grâce à leur volume et leur productivité (De Larrard, et Colina 2018), ils sont en mesure de fabriquer des agrégats recyclés de qualité supérieure, adaptés aux applications structurelles.



Figure II-1 Station de recyclage fixe (CDE 2025)

En revanche, les stations mobiles (figure II-2) sont adaptées aux chantiers locaux, où les agrégats sont produits et utilisés directement sur site. Elles sont équipées d'un seul concasseur, généralement à mâchoires ou à percussion, ainsi que de dispositifs de

tri (De Larrard, et Colina 2018). Les agrégats issus de ces unités de recyclage sont majoritairement destinés à des applications non structurales, où les exigences techniques sont moins strictes.



Figure II-2 station de recyclage mobile (SANME 2025)

Les principaux avantages et inconvénients de chaque type d'installation sont présentés dans le tableau II-1.

Tableau II-1 Avantages et inconvénients des stations mobiles ou fixes (Silva, et al. 2017)

	Station mobile	**Station fixe**
Avantages	Réduction des distances d'acheminement	Production d'agrégat recyclé à haute performance
	Disponibilité accrue en Agrégats recyclés	Agrégats recyclés fabriqués avec une distribution granulométrique optimisée
	Facilité de déplacement vers un autre site de recyclage	Capacité de production accrue
Inconvénients	Fabrication des agrégats recyclés de qualité inférieure	Coût d'investissement initial important
	Émission accrue de poussière et de bruit environnant	Distances de transport accrues
	Viabilité économique dépendante d'un volume suffisant de déchets	Production dépendante d'un apport régulier en déchets

Selon Silva, et al. (2017) Diverses techniques de recyclage sont disponibles, et leur sélection dépend de plusieurs facteurs tels que le niveau de pollution, les technologies existantes et la qualité des produits recherchée. La figure II-3 Expose les différentes phases de recyclage permettant de générer des agrégats recyclés de haute qualité, tout

en réduisant au minimum la présence d'impuretés et en limitant la consommation d'énergie. Par exemple, pour des blocs de béton non armé, certains processus, comme l'élimination manuelle ou mécanique des contaminants, peuvent être évités, ce qui permet de réduire les dépenses énergétiques.

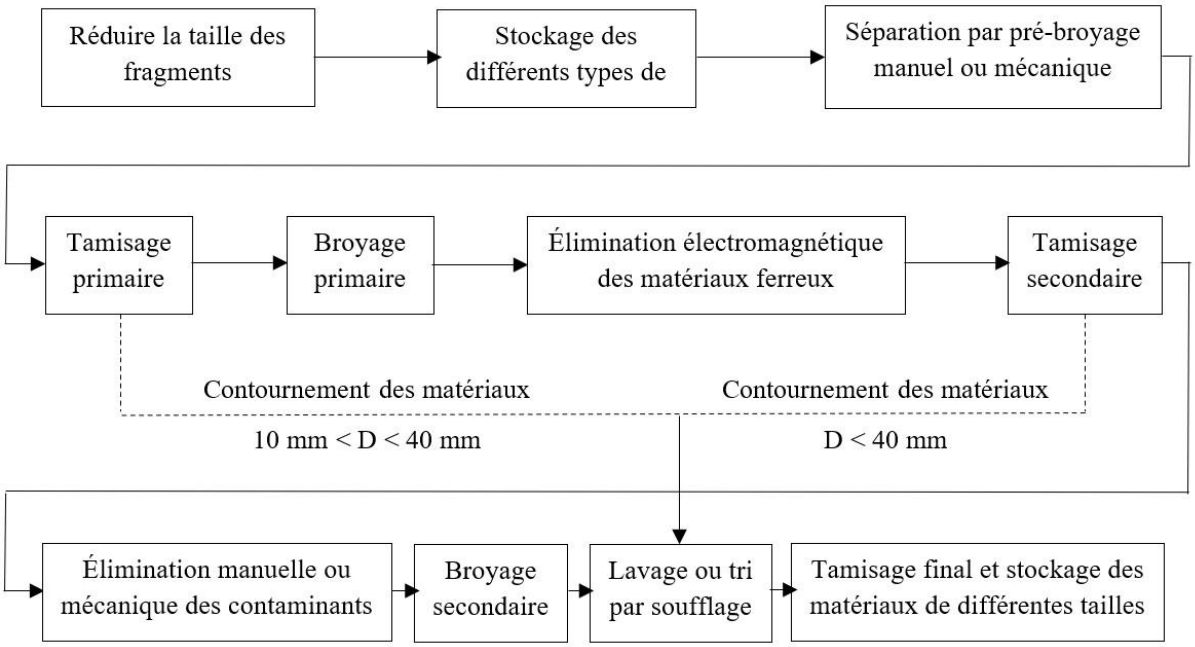


Figure II-3 Procédure de recyclage (Silva, et al. 2017)

II.3 Propriétés des agrégats recyclés

Les agrégats recyclés présentent des propriétés géométriques, physiques et chimiques qui les distinguent des agrégats naturels. Ces caractéristiques sont influencées par la nature des matériaux d'origine et les procédés de traitement appliqués.

a. Propriétés géométriques

La forme d'agrégats recyclés joue un rôle essentiel dans la maniabilité du béton. Celle-ci est directement influencée par la qualité des agrégats naturels d'origine, la quantité et la qualité du mortier adhérent, ainsi que par la technique de production et le degré de détérioration du béton d'origine (Etxeberria, et al. 2007). En outre, ces matériaux se caractérisent par une rugosité de surface et une angularité plus élevées que celles des agrégats naturels (figure II-4), ce qui influe leurs performances dans le béton (Tang, et al. 2020).



Figure II-4 Agrégats recyclés

b. Propriétés physiques

Concernant les propriétés physiques, les agrégats recyclés présentent généralement une masse volumique réduite, une porosité accrue et une absorption d'eau significativement plus élevée (Poon, et al. 2007). Ces caractéristiques limitent leur utilisation dans le béton structurel.

La réduction de la masse volumique des agrégats recyclés varie entre 3.34 % et 18.66 % par rapport à celle des agrégats naturels (Bairagi, et al. 1993; Rahal 2007), principalement en raison de la présence du mortier adhérent à leur surface, caractérisé par une microstructure poreuse et une faible masse volumique.

Par ailleurs, leur capacité d'absorption d'eau varie entre 1.65 % et 6.85 %, tandis que celle des agrégats naturels se situe entre 0.57 % à 1.3 % (Kazmi, et al. 2021; Tam, et al. 2007b). Cela montre que l'absorption d'eau de ces matériaux recyclés est de 3 à 5 fois supérieure à celle des agrégats naturels, un phénomène dû à la porosité élevée du mortier adhérent à leur surface.

Le tableau II-2 représente un résumé de revue de littérature sur les propriétés physiques des agrégats recyclés.

Tableau II-2 Propriétés physiques des agrégats recyclés

Référence	**Masse volumique (Kg/m^3)**	**Absorption d'eau (%)**
(Bairagi, et al. 1993)	2660	3.95
(Rahal 2007)	2310	3.47
(Poon, et al. 2007)	2490 - 2570	3.5 - 4.3
Chakradhara Rao, et al. (2011b)	2510	3.92
(Chen 2013)	2650	5
(Bravo, et al. 2017)	2091	8.6
	2137	8.4
(Damdelen 2018)	2400	3.35
(Tang, et al. 2020)	2450	7.75

A cette effet, comme le souligne Chakradhara Rao, et al. (2011a), la masse volumique du béton diminue à mesure que la proportion d'agrégats recyclés augmente.

c. Propriétés chimique et contaminants potentiels

L'intégration des agrégats recyclés dans les matériaux de construction suscite des interrogations concernant leurs propriétés chimiques et la présence éventuelle de contaminants. Ces facteurs peuvent influencer la performance des matériaux et leur impact environnemental.

Ces agrégats présentent des propriétés chimiques et minéralogiques qui peux varie selon la source et la fraction granulométrique, mais les teneurs en chlorures et sulfates sont comparables entre différentes origines (Sánchez-Cotte, et al. 2020). En général, ils contiennent majoritairement du quartz (SiO_2) et de la calcite ($CaCO_3$), avec des niveaux de CaO et Al_2O_3 souvent inférieurs à ceux des agrégats naturels . Cette composition peut conférer aux agrégats des caractéristiques spécifiques, telles qu'une porosité accrue et une absorption d'eau plus élevée, ce qui peut affecter la maniabilité et la durabilité des bétons dans lesquels ils sont incorporés.

Le tableau II-3 présente un résumé de revue de littérature sur les propriétés chimiques des agrégats recyclés.

Tableau II-3 Propriétés chimiques des agrégats recyclés

Référence	Compositions chimiques (%)									
	SiO_2	**CaO**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**Na_2O**	**MgO**	**SO_3**	**K_2O**	**TiO_2**	**MnO**
(Bianchini, et al. 2005)	38.65 42.95	19.24 22.8	7.26 8.85	3.09 3.63	0.94 1.06	4.63 5.11	-	1.31 1.6	0.29 0.39	0.12 0.15
(Angulo, et al. 2009)	68.4	5.8	11.2	3.3	1.7	1	0.2	3.2	-	-
	68.6	6.5	10.2	3.3	1.6	1.2	0.3	2.8	-	-
	65.3	8.2	10.1	3.3	1.4	1.6	0.2	2.6	-	-
	65.6	8.8	9.3	3.2	0.9	1.2	0.2	2.7	-	-
(Medina, et al. 2015)	58.29	13.27	7.69	6.12	1.45	2.28	0.92	0.8	0	0.16
(Bui, et al. 2018)	62.56	12.01	12.52	5.82	2.69	1.83	-	1.3	0.62	0.12
(Sánchez-Cotte, et al. 2020)	34.43	39.08	8.65	3.06	7.1	5.73	0.7	1.03	0.16	0.05
	32.13	43.1	7.85	3.01	7.1	4.85	0.75	1.05	0.13	0.05

De plus, l'un des principaux défis liés à l'utilisation des agrégats recyclés réside dans la présence potentielle de contaminants. Ces matériaux peuvent contenir diverses impuretés, telles que des résidus d'asphalte, des briques, du plâtre, des fibres minérales, des plastiques, du bois, ainsi que des métaux lourds (Pb, Cd, Hg, Ni, Zn, Cu, Cr et As), ainsi que des substances organiques comme les hydrocarbures (Purdy, et al. 2020; Zaharieva, et al. 2024).

Une utilisation sans précaution de ces matériaux peut entraîner la pollution des sols et des eaux, ce qui souligne la nécessité de réaliser des audits préalables, d'effectuer une décontamination et de procéder à une démolition sélective.

Toutefois, malgré la présence éventuelle de contaminants et la variabilité de leurs propriétés physiques et chimiques, les agrégats recyclés peuvent être utilisés dans la fabrication de produits en béton, à condition de contrôler leur teneur en impuretés et d'adapter les spécifications techniques, conformément aux exigences de la norme Algérienne NA 5113.

II.3.1 Propriétés mécanique et thermique du béton recycle

Comme le démontrent Wang, et al. (2021) dans leur recherche, l'agrégat recyclé, illustré dans la figure II-5, se compose principalement d'agrégat naturel recouvert d'une couche de mortier résiduel, générant ainsi deux zones de transition interfaciales (ZTI) distinctes :

- Une première zone entre l'agrégat naturel et le Mortier résiduel ;
- Une seconde entre l'agrégat recyclé et le mortier nouvellement ajouté.

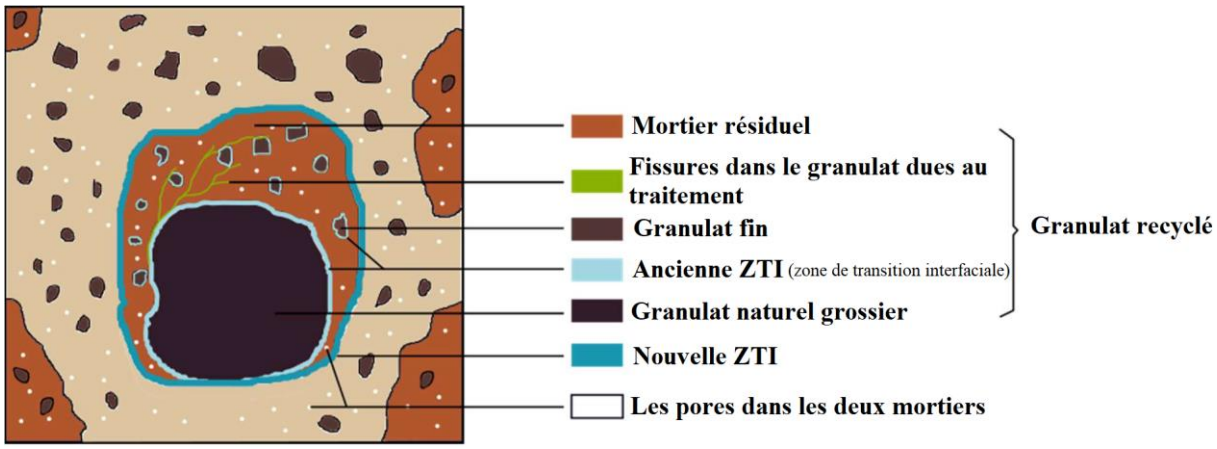


Figure II-5 Représentation d'agrégat recyclé dans le béton recyclé (Wang, et al. 2021)

Contrairement au béton naturel, qui ne présente qu'une seule zone de transition interfaciale et bénéficie par conséquent d'une porosité moindre et de meilleures performances mécaniques, le béton recyclé possède une zone de transition interfaciale plus importante. Cette configuration accroît sa porosité, impactant non seulement sa résistance à la compression, mais aussi sa perméabilité et sa capacité à protéger les armatures. Par ailleurs, le mortier résiduel peut renfermer des microfissures susceptibles qui risquent de se propager durant la production ou la mise en place du béton. Enfin, les éventuelles impuretés présentes dans l'agrégat recyclé risquent d'altérer davantage les propriétés mécaniques du béton final.

Les données relatives aux propriétés mécaniques du béton recyclé issues de diverses recherches sont résumées dans le tableau II-4.

Tableau II-4 Récapitulatif de certaines travaux sur les propriétés mécaniques du béton recyclé

Référence	Taux de remplacement (%)	Variation de la résistance à la compression (%)	Variation de la résistance à la flexion (%)	Variation du module d'élasticité (%)
(Bairagi, et al. 1993)	25	-1.4	-6.12	-6.43
	50	-5.14	-12.24	-14.04
	75	-7.14	-16.33	-20.47
	100	-11.42	-24.49	-27.78
(Oliveira, et al. 2004)	10	0	-	0
	20	0	-	0
	30	0	-	-5
	40	0	-	-5
	100	0	-	-17.5
(Tam, et al. 2005)	10	5.85	-	-
	15	0.97	-	-
	20	-3.66	-	-
	25	-6.12	-	-
	30	4.22	-	-
(R. Kumutha, et Kumutha 2008)	20	-3.65	-20	-2.12
	40	-6.1	-40.75	-5.22
	60	-10	-44.24	-7.73
	80	-11.22	-46.70	-8.73
	100	-27.68	-50	-18.02
(Chakradhara Rao, et al. 2011b)	25	-2.64	-20.26	-24.5
	50	-5.05	-15.49	-31
	100	-14	-4.98	-34.81
(Kou, et Poon 2013)	50	-12.55	-	-12.55
	100	-21.61	-	-25.24

a. Résistance à la compression

Plusieurs facteurs peuvent affecter la résistance à la compression du béton recyclé, notamment le rapport eau/ciment (E/C), le pourcentage de substitution et la quantité de mortier adhérant aux agrégats recyclés. Dans une recherche menée par Limbachiya, et al. (2000), l'impact de l'utilisation d'agrégats recyclés sur la résistance à la compression du béton haute performance a été examiné. Les résultats ont montré que, jusqu'à un taux de remplacement de 30 % des agrégats naturels par des agrégats recyclés, la résistance à la compression du béton ne subissait aucune diminution significative.

Cependant, au-delà de ce pourcentage, une réduction progressive de la résistance a été observée à mesure que la proportion d'agrégats recyclés augmentait. Cette diminution a été compensée par un ajustement du rapport E/C dans le mélange, permettant de maintenir des performances adéquates malgré l'augmentation du contenu en agrégats recyclés.

Dans une étude similaire, Etxeberria, et al. (2007) ont analysé l'influence de la proportion d'agrégats recyclés et du processus de production sur les propriétés du béton, notamment sur la résistance à la compression. Les résultats ont révélé que, pour un rapport E/C constant, les bétons contenant 25 % d'agrégats recycles présentaient des propriétés mécaniques comparables à celles des bétons conventionnels. Toutefois, lorsque les taux de substitution variaient entre 50 % et 100 %, une réduction de 4 à 10 % du rapport E/C était requise pour atteindre une résistance à la compression équivalente. En l'absence de cette modification, les mélanges à remplacement total montraient une diminution de performance de l'ordre de 20 à 25 %.

Une autre étude de Rahal (2007) a analysé les propriétés mécaniques de plusieurs formulations de béton recyclé, dont la résistance à la compression cible varie entre 20 et 50 MPa. Les résultats ont montré que la résistance à la compression de ces bétons à 28 jours était d'environ 90 % de celle des bétons conventionnels, pour des proportions de mélange identiques.

De plus, Chen (2013) a analysé les propriétés mécaniques et la microstructure du béton recyclé, en particulier l'effet du taux de substitution des agrégats. Les résultats montrent que la résistance à la compression diminue progressivement à mesure que le taux de substitution augmente. Plus précisément, elle est inférieure de 26.0 % et de 45.2 % par rapport à celle du béton conventionnel pour des taux de substitution des agrégats recyclés de 50 % et 100 %, respectivement. Il attribue cette diminution à la présence de pores et de fissures à l'interface entre l'ancien et le nouveau mortier, ainsi qu'à la grande quantité d'eau nécessaire pour assurer une bonne consistance, ce qui peut altérer les propriétés mécaniques du béton. Malgré ces réductions, l'étude indique que certaines techniques, comme l'optimisation des formulations, peuvent atténuer ces pertes de performance.

Pour des performances optimales, plusieurs recherches recommandent l'utilisation d'un taux de remplacement de 30 %, sans modification du mélange ni ajustement du rapport E/C (Damdelen 2018; Limbachiya, et al. 2000; McNeil, et Kang 2013).

b. Résistance à la flexion

L'utilisation des agrégats recyclés a un impact sur la résistance à la flexion du béton, entraînant généralement une diminution de celle-ci à mesure que le taux de remplacement augmente. Cependant, le degré de cette réduction dépend de plusieurs facteurs, incluant les caractéristiques des agrégats recyclés (forme, texture de surface, module d'élasticité), ainsi que le rapport E/C et la teneur en ciment du mélange.

Dans l'étude de R. Kumutha, et Kumutha (2008), l'impact des agrégats recyclés sur les propriétés du béton a été analysé. Les résultats ont montré que la résistance à la flexion diminuait de manière significative à mesure que le taux de substitution des agrégats augmentait. En particulier, un remplacement de 100 % des agrégats a entraîné une réduction de 50 % de la résistance à la flexion par rapport au béton fait avec des agrégats naturels. Cette diminution est attribuée à la qualité inférieure des agrégats recyclés, qui affecte la cohésion entre les agrégats et la pâte de ciment, ce qui réduit la capacité de résistance à la flexion du béton.

Une tendance similaire de réduction a été rapportée par Chen (2013), qui a observé une diminution d'environ 49.8 % de la résistance à la flexion enregistrée pour un remplacement total.

Une autre recherche de Chen, et al. (2010) a montré que la résistance à la flexion du béton diminue progressivement à mesure que le pourcentage de remplacement des agrégats augmente. Pour des taux de remplacement de 50 % et 100 %, la résistance a diminué d'environ 10 % et 20 %, respectivement, par rapport au béton conventionnel. Ces résultats suggèrent qu'il est possible d'utiliser jusqu'à 50 % d'agrégats recyclés sans effets négatifs majeurs sur la résistance à la flexion du béton. Les essais ont également montré que la relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression pour le béton avec des agrégats recyclés reste similaire à celle du béton traditionnel, avec un rapport de résistance à la flexion à résistance à la compression de 0.12.

De plus, Thomas, et al. (2018) ont constaté une réduction de 2 à 5 % pour un taux de remplacement de 25 %, et de 7 à 17 % pour un remplacement total. Ils ont notamment montré que l'impact était plus prononcé avec un rapport E/C plus élevé. En effet, pour un rapport de 0.4 la baisse variait de 2 à 14 % lorsque le taux d'agrégats recyclés passait de 25 à 100 %, contre 2 à 19 % pour un rapport de 0.5, avec une teneur en ciment constante. Inversement, une teneur en ciment plus élevée, à un rapport E/C constant, a démontré un effet positif en contribuant au renforcement de la pâte et de la zone de transition.

c. Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton diminue généralement avec l'augmentation de la teneur en agrégats recyclés. Cette réduction est souvent attribuée au module d'élasticité intrinsèquement plus faible des agrégats recyclés, en raison de leur porosité plus élevée et de leur nature moins résistante. L'intensité de cette diminution varie cependant en fonction de la qualité des agrégats utilisés.

Les résultats expérimentaux de l'étude de Chakradhara Rao, et al. (2011b) ont montré que l'incorporation d'agrégats recyclés grossiers dans le béton entraînait une réduction du module d'élasticité. Plus précisément, pour des taux de remplacement des agrégats naturels par des agrégats recyclés de 25 %, 50 % et 100 %, le module d'élasticité du béton était respectivement réduit de de 24.5 %, 31 % et 34.82 % par rapport au béton de référence pour un rapport E/C de 0.43.

Chen (2013) a également constaté que le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la teneur en agrégats recyclés, enregistrant une diminution de 44.3 % pour une substitution totale.

Cependant, Oliveira, et al. (2004) ont montré que, pour une substitution inférieure à 40 %, le module d'élasticité des bétons recyclés reste relativement similaire à celui des bétons conventionnels. En revanche, au-delà de ce pourcentage, la diminution devient plus prononcée, atteignant une réduction de 17.5 % pour une substitution complète, principalement due à un taux d'absorption élevé des agrégats recyclés.

De plus, Etxeberria, et al. (2007) ont constaté que l'ajout d'agrégats recyclés

améliore la résistance en traction, bien que le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de leur proportion dans le mélange de béton, qui peut atteindre 14,73 % pour un remplacement total des agrégats.

Dans l'ensemble, une diminution du module d'élasticité est observée à mesure que la teneur en agrégats recyclés augmente dans le béton. Cependant, il est important de noter que certaines études rapportent des observations différentes.

En effet, Limbachiya, et al. (2000) ont indiqué que les valeurs sont très similaires pour le béton conventionnel et le béton à base d'agrégats recyclés.

d. Conductivité thermique

Les propriétés thermiques déterminent le transfert de chaleur au sein des matériaux de construction tels que le béton. Elles sont généralement définies en termes de conductivité thermique, de chaleur spécifique et de diffusivité thermique. Parmi ces propriétés, la conductivité thermique est souvent considérée comme la plus pertinente pour caractériser l'aptitude d'un matériau au transfert de chaleur. Cette propriété est fortement influencée par l'humidité, la porosité et la perméabilité du matériau. A température ambiante, la conductivité thermique d'un béton fabriqué avec des agrégats naturels varie typiquement entre 1.6 et 3.2 W/mk (Talebi, et al. 2020).

Cette réduction est généralement attribuée à la porosité accrue et à la teneur en pâte de ciment plus élevée dans le béton à base d'agrégats recyclés, en raison de la conductivité thermique inférieure de l'air et de la pâte de ciment comparativement aux agrégats naturels.

Le tableau II-5 présente une synthèse des résultats de conductivité thermique rapportés dans diverses études (Kazmi, et al. 2021).

Les travaux de Šefflová, et al. (2014) ont révélé que la conductivité thermique du béton recyclé dépend non seulement du taux de substitution des agrégats naturels par des agrégats recyclés, mais aussi de manière significative de la qualité de ces agrégats. Leurs observations ont montré que plus la masse volumique des agrégats recyclés est élevée, plus la conductivité thermique du béton recyclé augmente. La réduction de la conductivité thermique observée dans cette étude varie entre 13.51 % et 31.08 %, en

fonction du pourcentage de remplacement des agrégats et de la qualité des agrégats recyclés utilisés.

Tableau II-5 Conductivité thermique du béton recyclés (Kazmi, et al. 2021)

Référence	**Pourcentage de remplacement (%)**	**Conductivité thermique (W/mk)**	**Masse volumique (kg/m^3)**
(Šefflová, et al. 2014)	31-63	1.53-1.92	-
(Banjad Pečur, et al. 2015)	40-50	0.86-0.87	2065-2105
(Zhu, et al. 2015)	50-100	1.01-1.08	1981-2094
(Bravo, et al. 2017)	10-100	1.60-2.10	2231-2388
(Sargam, et al. 2020)	30-100	0.80-1.05	2056-2251
(Kazmi, et al. 2021)	100	1.07-1.58	2000-2188

De plus, Zhu, et al. (2015) ont également constaté que la conductivité thermique du béton recyclé diminue à mesure que le taux de remplacement des agrégats naturels par des agrégats recyclés augmente. À un taux de remplacement de 50 %, la conductivité thermique a diminué de 22.46 %, et à 100 % de remplacement, la diminution était de 27.71 % par rapport au béton conventionnel. De plus, un modèle modifié a également été proposé pour calculer la conductivité thermique du béton recyclé à partir de celle du béton conventionnel. L'étude a également évalué la conductivité thermique des blocs de béton recyclé, mettant en évidence un coefficient de transfert thermique de 0,93 W/m^{2}k pour les murs construits avec ces blocs, ce qui répond aux exigences des normes associées. Ces résultats indiquent que l'intégration d'agrégats recyclés dans le béton structurel et les blocs de construction est susceptible d'améliorer les propriétés thermiques, notamment pour les applications nécessitant une faible conductivité thermique.

En outre, Bravo, et al. (2017) ont analysé la performance thermique du béton fabriqué avec des agrégats recyclés provenant de diverses sources. Ils ont révélé que l'utilisation d'agrégats recyclés améliore significativement les propriétés thermiques du béton, réduisant sa conductivité thermique de 17 % à 42 % pour un remplacement total des agrégats. L'origine des agrégats recyclés a une influence majeure sur cette amélioration, soulignant que les caractéristiques physiques des agrégats (masse volumique et porosité) jouent un rôle essentiel dans la conductivité thermique du béton.

Kazmi, et al. (2021) ont également étudié les propriétés thermiques du béton fabriqué avec divers types d'agrégats recyclés traités par différentes méthodes. Selon leurs résultats, la conductivité thermique des échantillons de béton recyclé est inférieure de 27 % à celle du béton conventionnel. Bien que l'utilisation d'agrégats traités entraîne une légère augmentation de la conductivité thermique par rapport aux agrégats non traités, cette valeur demeure toujours inférieure à celle du béton traditionnel.

II.4 Amélioration des propriétés du béton recyclé

Le béton recyclé présente des propriétés microstructurales inférieures, notamment une porosité élevée, des zones de transition interfaciales plus faibles en raison de la présence de mortier résiduel, ce qui limite ses performances mécaniques et sa durabilité. Il a été observé qu'à mesure que le taux de remplacement des agrégats recyclés augmente, les propriétés mécaniques du béton recyclé diminuent.

Diverses techniques ont été proposées dans la littérature pour améliorer la qualité des agrégats recyclés, entraînant ainsi une augmentation de la résistance mécanique et une meilleure durabilité du béton, atténuant ainsi les limitations associées à l'utilisation de ces matériaux (Amit, et Gyani Jail 2023; Tam, et al. 2021b; Wang, et al. 2020; Zheng, et al. 2021). Ces méthodes peuvent généralement être classées en plusieurs catégories : l'élimination du mortier adhérent, le traitement des agrégats recyclés, le traitement par adjuvants et les approches de malaxage en plusieurs étapes, chacune présentant des avantages et des limites en termes d'efficacité, d'impact environnemental et de coûts. Par ailleurs, ces techniques peuvent être combinées avec un renforcement par fibres, permettant ainsi d'améliorer encore les performances mécaniques et la durabilité du béton recyclé.

II.4.1 Elimination du mortier adhérent

L'optimisation des performances du béton recyclé repose en grande partie sur l'élimination du mortier adhérent, dont la présence affecte la résistance mécanique et la durabilité du matériau. Afin d'améliorer la qualité de ces agrégats recyclés, plusieurs méthodes de traitement ont été développées, dont les principales techniques sont présentées ci-dessous.

a. Lavage à l'eau

Le lavage à l'eau constitue une méthode courante visant à améliorer la qualité des agrégats recyclés. Cette technique cible notamment l'élimination des impuretés, des particules fines non adhérentes et des sels solubles, dans le but d'optimiser les propriétés des agrégats en vue de leur utilisation dans le béton.

Une recherche de Lo, et al. (2013) a mis en évidence l'impact positif du lavage à l'eau sur les agrégats recyclés utilisés dans le béton. Il a été constaté que, le béton produit avec des agrégats recyclés lavés Il a été constaté que, pour le béton produit avec des agrégats recyclés lavés et un taux de substitution de 75 %, des améliorations significatives de 19 %, 35.3 % et 1.4 % ont été enregistrées, respectivement, pour la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité, par rapport au béton préparé avec des agrégats non lavés. Ces résultats suggèrent que le lavage à l'eau améliore sensiblement la qualité du béton recyclé, en renforçant l'interface entre la pâte de ciment et l'agrégats.

Dans leur étude portant sur les bétons produits à partir d'agrégats recyclés de faible qualité, Lee, et Park (2017) ont évalué l'impact du lavage préalable des agrégats recyclés sur les propriétés mécaniques et durables du béton. Les résultats ont montré que le lavage améliore significativement les performances du béton recyclé, notamment à des taux de remplacement modérés. Les bétons contenant 30 % et 60 % d'agrégats recyclés lavés ont présenté des propriétés de résistance à la compression, d'absorption et de durabilité comparables à celles du béton conventionnel. L'étude souligne que le lavage élimine efficacement les impuretés, les particules faibles et les restes de mortier, ce qui améliore la qualité globale des agrégats recyclés. Ainsi, même les agrégats de faible qualité peuvent être valorisés efficacement, à condition d'être lavés avant leur incorporation dans un béton.

Malgré ses avantages, cette méthode présente des limites notables. Elle ne permet pas une élimination complète et efficace du mortier adhérant aux agrégats. En outre, elle nécessite une quantité d'eau significative, et génère des boues contaminées nécessitant un traitement spécifique (Diotti, et al. 2021). Par conséquent, cette technique est souvent plus pertinente en tant que prétraitement ou étape complémentaire à d'autres méthodes

de traitement des agrégats recyclés (telles que les traitements mécaniques ou thermiques).

b. Traitement mécanique

Plusieurs méthodes de traitement mécanique ont été mises au point pour réduire la teneur en mortier adhérent, diminuer l'absorption d'eau et augmenter la résistance mécanique des agrégats recyclés. Parmi ces méthodes, le broyage optimisé qui consiste à utiliser un tambour rotatif avec des billes d'acier. Cette méthode permet de réduire considérablement l'absorption d'eau des agrégats de 8.95 % à 0.84 %, et d'utiliser jusqu'à 60 % de agrégats recyclés dans le béton sans perte significative de propriétés mécanique (Dilbas, et al. 2019).

Dans leur étude, Ahmad, et al. (2020) ont évalué l'effet du traitement des agrégats recyclés par abrasion mécanique, à l'aide de la machine d'essai Los Angeles. Ils ont constaté que ce traitement améliore significativement la maniabilité, la résistance et la durabilité du béton recyclé, grâce à l'élimination efficace du mortier résiduel sur les agrégats. Plus précisément, une augmentation de 16 % de la résistance à la compression et une amélioration de 33 % de la résistance à la traction, respectivement, avec une diminution de l'absorption d'eau de 4 %.

Dans une revue sur méthodes d'amélioration des agrégats recyclés, Tam, et al. (2021a) ont démontré que le traitement mécanique, en particulier par broyage, permet de réduire efficacement le mortier résiduel, entraînant jusqu'à 25 % d'amélioration de la résistance à la compression du béton recyclé après 28 jours. Ils ont également souligné que le broyage par billes constitue une technique particulièrement efficace pour éliminer le mortier résiduel, avec une réduction significative de l'absorption d'eau et une amélioration notable de la masse volumique et de la résistance mécanique du béton produit.

Trykoz, et al. (2024) ont également observé que le traitement abrasif permettait d'atteindre une résistance à la compression allant jusqu'à 98 % de celle du béton naturel.

Cependant, il est important de noter que le traitement mécanique entraîne une augmentation de la consommation d'énergie, des émissions de CO_2 et de la quantité de

déchets de mortier à éliminer (Quattrone, et al. 2014).

c. Traitement thermique

Le traitement thermique des agrégats recyclés est une méthode visant à améliorer leurs propriétés en les exposant à des températures élevées, généralement comprises entre 250°C et 800°C. Cette élévation de température entraîne des changements physiques et chimiques dans les agrégats, notamment l'élimination du mortier résiduel, l'amélioration de la masse volumique, et la réduction de l'absorption d'eau.

L'étude de Kalinowska-Wichrowska, et Suescum-Morales (2020) a analysé l'utilisation des agrégats recyclés provenant de la démolition d'éléments structurels d'un hall industriel vieux de 30 ans. Ces agrégats ont été traités thermiquement selon différentes variantes. Les résultats ont montré qu'un traitement thermique adapté permettait d'obtenir des agrégats de haute qualité, capables de de remplacer intégralement les agrégats naturels dans de nouveaux mélanges de béton. Cette approche favorise ainsi le recyclage et la durabilité dans la construction.

Par ailleurs, Akbarnezhad, et al. (2011) ont étudié une technique innovante de traitement thermique assisté par micro-ondes des agrégats recyclés, visant à améliorer les propriétés mécaniques du béton fabriqué avec ces agrégats. L'étude a révélé que cette méthode permettait d'augmenter la résistance à la compression du béton de 20 %, par rapport à celui fabriqué avec des agrégats recyclés non traités. En outre, le module d'élasticité a montré une amélioration de 10 %, tandis que la résistance à la flexion augmentait de 5 %. L'incorporation de jusqu'à 40 % de agrégats recyclés traités par micro-ondes a permis d'obtenir des propriétés mécaniques du béton comparables à celles du béton conventionnel. Le traitement par micro-ondes a également amélioré la masse volumique des agrégats et réduit leur porosité, rendant ainsi le béton plus durable et moins susceptible aux dommages à long terme.

Cependant, Quattrone, et al. (2014) soulignent que cette méthode entraîne des coûts énergétiques élevés et des émissions de CO_2 importantes, ce qui en limite l'adoption à l'échelle industrielle.

d. Traitement chimique

Le traitement chimique consiste en l'immersion des agrégats recyclés dans des solutions d'acide acétique, chlorhydrique (HCl) ou sulfurique (H_2SO_4), ce qui permet de dissoudre le mortier de ciment résiduel. Cette méthode permet de réduire l'absorption d'eau et d'améliorer la résistance à la compression du béton jusqu'à 30 % selon l'acide utilisé (Purushothaman, et al. 2015; Wang, et al. 2017).

Tam, et al. (2007a) ont évalué trois traitements par immersion appliqués aux agrégats recyclés, utilisant de l'acide chlorhydrique, de l'acide sulfurique et de l'acide phosphorique. Ces traitements ont permis de réduire l'absorption d'eau des agrégats de 7.27 % à 12.17 %, tout en augmentant la résistance à la compression de 0.07 % à 10.9 %, et le module d'élasticité de 7.3 % à 9.1 % dans le béton obtenu pour un taux de substitution de 25 %.

De même, Ismail, et Ramli (2013) ont démontré également que l'immersion dans une solution d'acide chlorhydrique permet de réduire la porosité, d'améliorer l'adhésion, et d'augmenter la résistance à la compression du béton, qui peut atteindre une amélioration de 27.43 % pour un remplacement de 45 % des agrégats.

Wang, et al. (2017) ont proposé une méthode écologique et économique pour améliorer la qualité des agrégats recyclés en utilisant une solution d'acide acétique. Les résultats ont révélé que ce traitement peut améliorer la qualité des agrégats en affaiblissant le mortier de ciment adhérent, en réduisant l'absorption d'eau et en augmentant la résistance à la compression du béton obtenu jusqu'à 25 %. De plus, la solution résiduelle de ce traitement peut être utilisée comme adjuvant chimique dans le béton pour améliorer significativement la résistance du béton. De cette manière, aucun déchet n'est produit par cette méthode.

Toutefois, ce traitement présente certains inconvénients, notamment son coût élevé, la gestion des acides résiduels, ainsi que l'augmentation du contenu acide dans les bétons recyclés, ce qui pourrait affecter à long terme les performances du béton (Ismail, et Ramli 2013; Tam, et al. 2007a).

e. Traitement hybride

Les traitements hybrides, combinant des méthodes mécaniques, chimiques et thermiques, permettent d'obtenir des agrégats recyclés dont la qualité peut être équivalente, ou même meilleure, que celle des agrégats naturels.

Yunusa, et al. (2022) ont exploré la durabilité des agrégats recyclés après avoir appliqué des techniques combinées, incluant un traitement mécanique avec une machine Los Angeles, un traitement chimique à base d'acides (HCl et H_2SO_4), ainsi qu'un traitement thermique à 400 °C. Les résultats ont mis en évidence que cette approche améliorait à la fois la résistance et la durabilité des agrégats, l'acide chlorhydrique étant particulièrement efficace.

De même, Chauhan, et Singh (2023) a développé une méthode optimisée en combinant des traitements chimiques et mécaniques. Les agrégats ont été d'abord immergés dans une solution acétique, puis soumis à un traitement mécanique à l'aide de la machine Los Angeles. Les résultats ont révélé que les bétons produits avec ces agrégats traités affichaient une amélioration de la résistance à la compression de 16.06 % par rapport aux bétons conventionnels. De plus, des propriétés telles que la résistance à la flexion, la résistance à la traction et la pénétration des chlorures sont restées comparables à celles des bétons utilisant des agrégats naturels. Ainsi, ce traitement hybride chimique-mécanique permet non seulement d'améliorer la qualité des agrégats recyclés, mais également d'optimiser la performance du béton, tout en offrant une approche durable.

De manière similaire, Mardani, et al. (2024) ont étudié l'efficacité d'un traitement hybride combinant des procédés mécaniques et chimiques pour améliorer les propriétés des agrégats recyclés. Cette méthode a conduit à une réduction de 57 % de l'absorption d'eau et à une augmentation de la masse volumique des agrégats. Les performances mécaniques du béton ont également montré une amélioration notable, avec une amélioration de 10 % de la résistance à la compression et à la flexion par rapport aux bétons réalisés avec des agrégats non traités.

II.4.2 Traitement des agrégats recyclés

En complément des méthodes visant à éliminer le mortier adhérent, d'autres

stratégies visent à optimiser les propriétés physico-chimiques des agrégats recyclés. Ces techniques ciblent spécifiquement la réduction de la porosité, le renforcement de la zone de transition interfaciale et l'amélioration de la durabilité du béton recyclé (Tam, et al. 2021b; Wang, et al. 2020; Zheng, et al. 2021). Les principales méthodes de traitement utilisées sont discutées ci-après.

a. Revêtement de surface avec matériaux pouzzolaniques

Cette technique consiste à enrober les agrégats recyclés avec des substances réactives telles que la fumée de silice ou le métakaolin, qui interagissent avec la chaux libre présente dans le mortier. Cette réaction pouzzolanique génère des hydrates de silicate de calcium supplémentaires, réduisant la porosité et renforçant ainsi la cohésion du matériau.

Kim, et al. (2005) ont étudié l'effet de matériaux pouzzolaniques comme la fumée de silice et le métakaolin appliqués en traitement de surface sur les agrégats recyclés. Les résultats montrent une baisse de l'absorption d'eau de 1 à 2 % et une résistance à la compression des bétons atteignant plus de 95 % de celle des bétons conventionnel. L'analyse microstructurale a confirmé la formation d'une interface plus dense après traitement.

Nguyen, et al. (2020) ont étudié l'effet d'un traitement de surface des agrégats recyclés à l'aide d'une suspension à base de ciment et de fumée de silice, appliqué à des taux de remplacement de 25 % et 50 %. Les résultats montrent que le traitement avec une suspension concentrée à 60 % permet de réduire l'absorption d'eau et d'améliorer la résistance mécanique des granulats, tout en augmentant significativement la résistance à la compression du béton, en particulier aux âges de 28 et 56 jours, comparée au béton de référence.

De plus, Shaban, et al. (2019) ont démontré que l'immersion des agrégats recyclés dans une solution de cendres volantes et de fumée de silice permet de réduire leur porosité de 50 à 55 %, contribuant ainsi à améliorer la durabilité et la résistance mécanique du composite.

Toutefois, cette méthode nécessite un temps de cure prolongé pour garantir la

réactivité complète des pouzzolanes (Nguyen, et al. 2020), et le coût des matériaux pouzzolaniques reste relativement élevé (Kim, et al. 2005).

b. Biominéralisation

La biominéralisation est un processus naturel par lequel les bactéries précipitent du carbonate de calcium ($CaCO_3$) sur la surface des agrégats recyclés afin de renforcer leur structure.

Zhu, et al. (2019) ont exploré l'effet d'un traitement biologique innovant des agrégats recyclés par la précipitation de carbonate de calcium induite par des bactéries aérobies. Les résultats ont montré que ce traitement a permis de réduire l'absorption d'eau des agrégats de 40.38 % et leur indice de concassage de 19.76 %. Le béton fabriqué avec ces agrégats a présenté une augmentation de 25.3 % de la résistance à la compression à 28 jours, ainsi qu'une amélioration de 115 % de l'ouvrabilité. Cette méthode s'est révélée prometteuse pour renforcer la durabilité et les performances mécaniques des bétons recyclés.

Rais, et Khan (2021) ont également étudié l'effet de la technique de biominéralisation sur la résistance mécanique et la durabilité du béton recyclé. Leurs résultats ont montré que la résistance à la compression du béton avec 100 % d'agrégats recyclés a augmenté de 19 % après 120 jours grâce à la précipitation de carbonate de calcium par les bactéries. En outre, l'absorption d'eau, la perméabilité à l'eau et la résistance électrique ont également montré des améliorations respectives de 12.7 %, 42.9 % et 100.8 %.

Par ailleurs, Tam, et al. (2021b) ont constaté que cette approche améliore la compacité et la durabilité du béton recyclé.

Toutefois, cette méthode nécessite un contrôle précis des conditions environnementales, telles que la température et l'humidité, ce qui rend le processus complexe (Zhu, et al. 2019).

c. Carbonatation

La carbonatation est un procédé qui consiste à exposer les agrégats recyclés au dioxyde de carbone (CO_2), ce qui permet de réduire leur porosité et d'améliorer leur

résistance mécanique. Ce traitement entraîne une modification chimique au mortier adhérent, favorisant la formation de carbonate de calcium, ce qui augmente la compacité du matériau et diminue son absorption d'eau.

Shi, et al. (2016) ont exploré diverses méthodes d'amélioration des propriétés des agrégats recyclés, en mettant particulièrement l'accent sur la carbonatation comme une méthode efficace et écologique. Leur étude a démontré que la carbonatation des agrégats recyclés améliore non seulement la résistance mécanique du béton, mais aussi sa durabilité. Le processus de carbonatation permet de renforcer le ciment attaché aux agrégats recyclés, réduisant ainsi leur porosité et augmentant leur densité. En outre, cette méthode est avantageuse sur le plan environnemental, car elle permet d'incorporer le CO_2 dans le béton, tout en améliorant ses propriétés.

De plus, Xuan, et al. (2016) ont examiné l'impact du traitement par carbonatation sur les agrégats recyclés et son influence sur les propriétés mécaniques du béton. Après avoir traité ces agrégats avec une carbonatation accélérée, ils ont observé une amélioration notable des propriétés mécaniques du béton, notamment une augmentation significative de la résistance mécanique pour le béton préparé avec des agrégats recyclés entièrement carbonatés. De plus, ce traitement a permis de remplacer jusqu'à 60 % des agrégats sans réduction significative des propriétés mécaniques du béton.

Par ailleurs, Etxeberria, et Castillo (2023) ont étudié l'impact du traitement par carbonatation sur différents types d'agrégats recyclés et leurs effets sur les propriétés du béton avec un taux de remplacement de 50 %. Les résultats ont montré que cette méthode améliore les propriétés physiques et mécaniques du béton recyclé, rendant sa résistance comparable à celle du béton conventionnel.

d. Imprégnation de polymères

L'imprégnation de polymères, tels que le polyacétate de vinyle ou les polymères à base de silane, dans les agrégats recyclés est une méthode utilisée pour sceller les pores du mortier adhérent, réduisant ainsi l'absorption d'eau et augmentant la résistance mécanique du béton recyclé.

Kou, et Poon (2010) ont étudié l'amélioration des propriétés des agrégats recyclés par imprégnation avec du polyalcool vinylique. Ils ont constaté que l'imprégnation des agrégats recyclés avec une solution de polyalcool vinylique à 10 % permet de réduire leur absorption d'eau, et que les propriétés mécaniques du béton recyclé à 90 jours sont comparables à celles du béton témoin. De plus, cette imprégnation réduit le retrait et améliore la résistance à la pénétration des ions chlorure, contribuant ainsi à la durabilité du béton.

Cependant, Shi, et al. (2016) soulignent que bien que le traitement des agrégats recyclés avec des polymères améliore leur qualité et la durabilité du béton recyclé, il peut également entraîner une réduction de la résistance à la compression. Cette diminution de la résistance est liée à la pénétration des polymères dans la pâte de ciment, ce qui la rend hydrophobe et empêche l'hydratation du ciment. Par ailleurs, la formation d'un film hydrofuge affaiblit l'adhésion entre l'agrégat et la matrice cimentaire, ce qui affecte négativement les propriétés mécaniques du béton.

e. Application de silicate de sodium

L'application de silicate de sodium dans les agrégats recyclés permet de remplir les pores du mortier adhérent, renforçant ainsi la cohésion du matériau tout en réduisant la porosité.

Zhong, et al. (2022) ont démontré que l'imprégnation combinée de silicate de sodium et de silane permet d'augmenter la résistance en compression de 26.53 %, la résistance en traction de 21.7 % et la résistance en flexion de 14.72 %, tout en comblant les fissures et micropores des agrégats recyclés, améliorant ainsi la compacité du béton.

De plus, Trykoz, et al. (2024) ont étudié l'impact de deux méthodes de traitement des agrégats recyclés sur les propriétés mécaniques du béton : le nettoyage mécanique et l'imprégnation par une solution de silicate de sodium. Les résultats ont révélé que les deux méthodes de traitement améliorent les propriétés physiques et mécaniques du béton par rapport au béton fabriqué avec des agrégats recyclés non traités. Plus précisément, le traitement mécanique a permis d'atteindre une résistance à la compression presque équivalente à celle du béton avec des agrégats naturels, tandis que l'imprégnation au silicate de sodium a augmenté la résistance du béton de 10 % par

rapport aux agrégats non traités.

Toutefois, l'étude de Shi, et al. (2016) souligne que, bien que le traitement au silicate de sodium réduise considérablement l'absorption d'eau, il peut introduire des alcalis, augmentant ainsi le risque de réaction alcali-silice, ce qui peut affecter négativement la durabilité du béton.

II.4.3 Ajout des adjuvants

L'utilisation d'adjuvants dans le béton recyclé permet d'améliorer ses propriétés mécaniques, sa durabilité et sa maniabilité en compensant les effets négatifs des agrégats recyclés. Parmi les adjuvants les plus couramment utilisés, on distingue les adjuvants minéraux et chimiques.

Les adjuvants minéraux jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des performances du béton recyclé, notamment en termes de résistance et de durabilité. Leur action repose principalement sur la réduction de la porosité et la densification de la microstructure du béton. Selon les travaux de Younis, et al. (2019), l'ajout d'une combinaison d'adjuvants minéraux réactifs, comprenant 10 % de cendres volantes et 10 % de fumée de silice, a permis d'obtenir une résistance supérieure à celle du béton recyclé, avec des valeurs comparables à celles béton naturel. Cette approche favorise non seulement l'utilisation des agrégats recyclés, mais contribue également à la production d'un béton plus écologique.

Kou, et al. (2011) ont montré que l'ajout d'adjuvants minéraux améliore les propriétés mécaniques du béton recyclé de manière plus significative que pour le béton naturel, ce qui indique que ces adjuvants compensent efficacement les défauts inhérents aux agrégats recyclés. En particulier, la fumée de silice et le métakaolin ont démontré leur capacité à améliorer à la fois les propriétés mécaniques et la durabilité du béton recyclé, tandis que les cendres volantes et le laitier de haut fourneau améliorent significativement sa durabilité.

L'introduction de la nano-silice constitue une autre stratégie prometteuse pour améliorer la microstructure du béton recyclé.

Mukharjee, et Barai (2014) ont démontré qu'une incorporation de 3 % de nano-silice dans un béton à 100 % d'agrégats recyclés améliore significativement les résistances à la compression et à la traction, rapprochant ainsi les propriétés de ce béton de celles du béton naturel.

De même, Li, et al. (2021) ont observé que le traitement par pré-pulvérisation de 3 % de nano-silice permettait une augmentation de la résistance à la compression allant jusqu'à 13.9 %.

Par ailleurs, les adjuvants chimiques, en particulier les superplastifiants, sont couramment utilisés pour améliorer la maniabilité du béton recyclé sans augmenter le rapport E/C. Al-Luhybi, et al. (2022) ont étudié l'effet des superplastifiants polycarboxylates sur le béton recyclé et ont constaté qu'une augmentation de leur dosage permet d'améliorer l'ouvrabilité et la compacité du béton, tout en compensant la perte de résistance à la compression engendrée.

Patowary, et Siddique (2023) ont également observé que l'ajout de superplastifiants dans un béton contenant 50 % de agrégats recyclés permet de maintenir des propriétés mécaniques similaires à celles d'un béton traditionnel. Cette approche est particulièrement bénéfique pour les bétons recyclés où la résistance mécanique est souvent compromise.

Ainsi, bien que les adjuvants soient une solution efficace pour améliorer les propriétés des agrégats recyclés et du béton recyclé, leur dosage et leur combinaison doivent être soigneusement optimisés pour éviter des effets indésirables et garantir une performance optimale.

II.4.4 Approches de malaxage en plusieurs étapes

Des méthodes de malaxage alternatives aux procédés classiques ont été développées pour l'amélioration des performances du béton recyclé. Parmi celles-ci, les approches de malaxage en deux étapes et en trois étapes se distinguent par leur capacité à optimiser la répartition des constituants, améliorer la compacité et renforcer la résistance du béton recyclé.

La figure II-6 représente une comparaison entre la méthode de malaxage en deux

étapes et celle en trois étapes pour la préparation du béton recyclé (Zhang, et al. 2019).

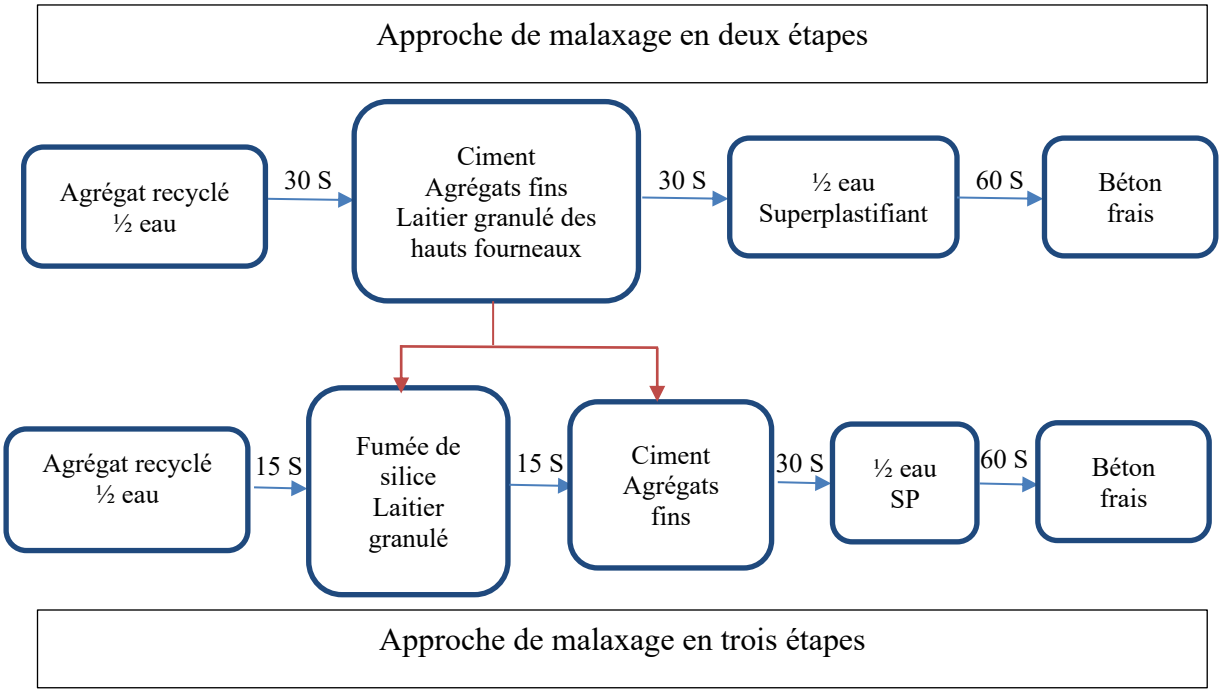


Figure II-6 Comparaison des méthodes de malaxage (Zhang, et al. 2019)

L'approche de malaxage en deux étapes consiste à diviser le processus de mélange en deux phases distinctes. Dans un premier temps, une partie de l'eau et du ciment est ajoutée aux agrégats recyclés, ce qui permet une meilleure imprégnation et réduit les vides internes. Ensuite, les autres constituants sont incorporés pour finaliser le mélange.

Tam, et al. (2005) ont montré que l'approche de malaxage en deux étapes améliore significativement la résistance, la durabilité et la microstructure du béton recyclé. En optimisant la zone de transition interfaciale et en réduisant la variabilité de la résistance, elle s'impose comme une méthode efficace et prometteuse pour intégrer les agrégats recyclés dans des bétons de haute performance.

Par ailleurs, Sivamani, et Renganathan (2022) ont noté que cette méthode augmentait la résistance en compression de 12 % à 28 jours et de 17.46 % à 90 jours, tout en réduisant la porosité, l'absorption d'eau et la perméabilité aux ions chlorures, ce qui améliore la durabilité du béton recyclé.

En outre, Dmitriev, et al. (2018) ont observé une augmentation de la résistance en compression de 16 % après 28 jours, grâce à une meilleure densification de la zone interfaciale.

L'approche de malaxage en trois étapes, quant à elle, ajoute une phase supplémentaire où les agrégats recyclés sont prétraités avec un additif, comme des cendres volantes, avant d'être intégrés dans le béton. Cette méthode vise à améliorer la cohésion entre le mortier et les agrégats en favorisant leur enrobage préalable. Zhang, et al. (2019) ont montré que la méthode de malaxage en trois étapes optimisées améliore la résistance à la compression, la résistance au gel-dégel et l'imperméabilité du béton recyclé. Cette amélioration est due à l'incorporation de matériaux cimentaires supplémentaires (fumée de silice et laitier granulé des hauts fourneaux) qui remplissent la zone de transition interfaciale et forment une couche dense enrobant les agrégats, renforçant ainsi leur structure.

Une autre étude de Kong, et al. (2010) a révélé que l'enrobage des agrégats recyclés avec des poudres pouzzolaniques améliore significativement l'ouvrabilité, la résistance en compression et la résistance en flexion du béton recyclé. L'observation au microscope électronique à balayage a montré que cette technique densifie la zone de transition interfaciale, contribuant ainsi à une meilleure durabilité du béton.

Malgré leurs avantages, ces approches présentent certaines limites. L'approche de malaxage en deux étapes exige un contrôle rigoureux du dosage de l'eau et du temps de mélange pour éviter la ségrégation des composants. Une exécution incorrecte peut entraîner un durcissement prématuré du mortier sur les agrégats, ce qui diminue l'efficacité du béton recyclé. Par ailleurs, bien que la méthode de malaxage en trois étapes améliore l'adhérence des agrégats recyclés, il prolonge le processus de malaxage et peut nécessiter un équipement spécialisé, augmentant ainsi les coûts et la complexité de mise en œuvre.

II.5 Fibres naturelles, diversité, performances et interactions avec le ciment

Une fibre est un matériau long, mince et flexible, capable de se plier facilement pour former des structures allongées. Selon leur origine, les fibres sont classées en trois catégories : naturelles, semi-synthétiques et synthétiques. Parmi celles-ci, les fibres naturelles (figure II.7), provenant des plantes, des animaux ou des minéraux, sont de plus en plus reconnues pour leurs avantages environnementaux et économiques, notamment dans les matériaux de construction tels que le béton. Toutefois, certaines de

ces matières, telles que l'amiante, ont été interdites dans de nombreux pays en raison des risques qu'elles représentent pour la santé, notamment leur lien avec le cancer (Elfaleh, et al. 2023).

Parallèlement à l'évolution des techniques de construction, une prise de conscience croissante concernant les pratiques durables a stimulé l'intérêt pour l'utilisation de matériaux naturels, renouvelables et biodégradables dans le secteur du bâtiment. Dans ce contexte, les fibres végétales naturelles présentent un potentiel significatif en tant qu'alternative durable aux matériaux de renforcement traditionnels, tels que l'acier et les fibres synthétiques dans le béton. Elles proviennent de sources variées, telles que le sisal, le jute, l'Alfa, et particulièrement le palmier dattier (Phoenix dactylifera), abondant dans des régions comme l'Algérie.

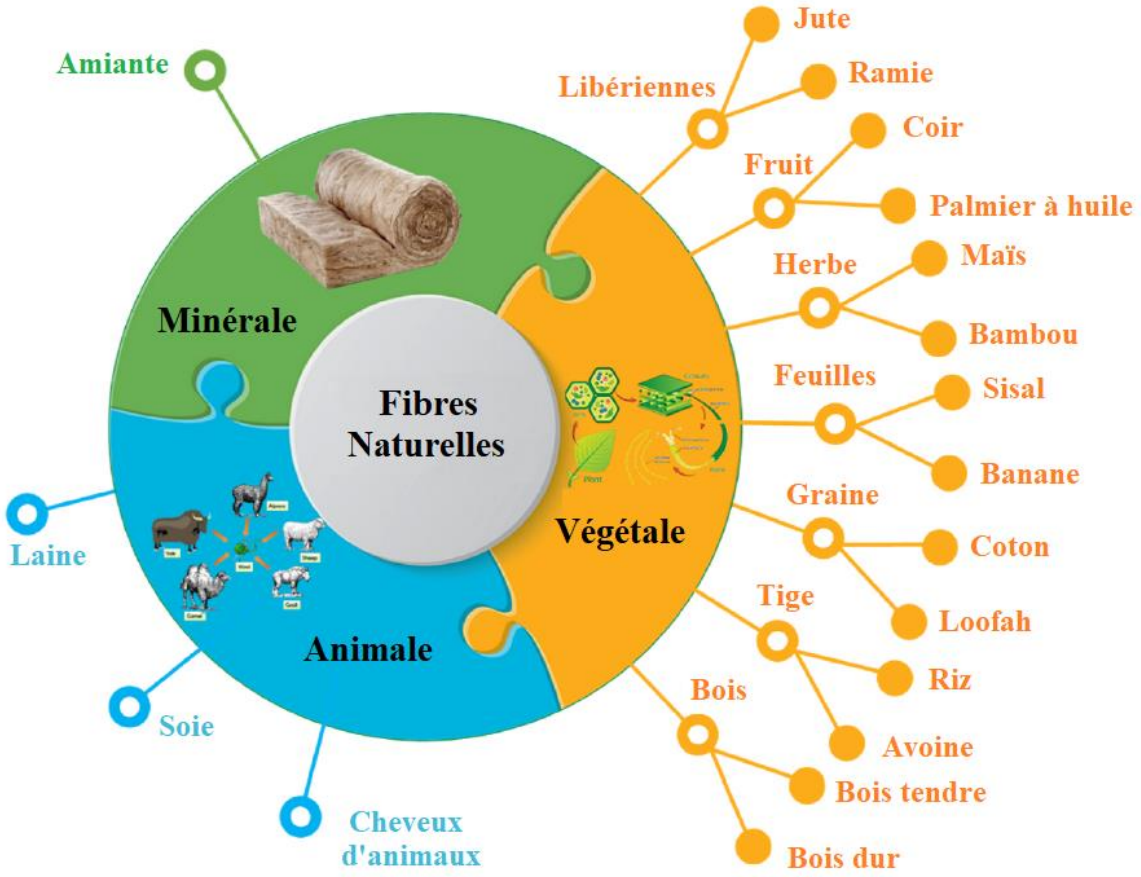


Figure II-7 Classifications des fibres naturelles selon Elfaleh, et al. (2023)

L'intégration de ces fibres naturelles dans le béton ne se limite pas à l'amélioration de ses propriétés mécaniques ; elle permet également d'optimiser l'isolation thermique et de répondre à la demande croissante de solutions écologiques dans le secteur de la

construction. En effet, ces fibres offrent un double avantage : elles renforcent l'intégrité structurelle du béton tout en contribuant à la réduction de la dépendance aux matériaux synthétiques, favorisant ainsi une démarche plus responsable sur le plan environnemental.

Divers types de fibres végétales a été étudié pour leur potentiel en tant que renforts dans les matrices cimentaires (Ahamed, et al. 2021; Amin, et al. 2022; Lilargem Rocha, et al. 2022). Ces fibres peuvent être classées en fonction de leur origine botanique, offrant ainsi une diversité de propriétés et de caractéristiques. Selon Sathishkumar, et al. (2014) et Elfaleh, et al. (2023), l existe sept types fondamentaux de fibres naturelles:

- Les fibres libériennes ;
- Les fibres de fruites ;
- Les fibres d'herbes ;
- Les fibres de feuilles ;
- Les fibres de graines ;
- Les fibres de tige ;
- Les fibres de bois.

La figure II-8 présente les principales plantes source de fibres à base de cellulose. Cette illustration met en lumière la richesse des ressources naturelles que l'homme exploite depuis des millénaires.

Le tableau II-6 présente une liste plus complète des types de fibres végétales. Certaines plantes produisent plus d'un type de fibre. Par exemple, le jute, le lin, le chanvre et le Kenaf possèdent à la fois des fibres libériennes et des fibres de tige. De même, l'agave, la noix de coco et le palmier à huile produisent à la fois des fibres de fruit et de tige.



Figure II-8 Quelques plantes sources de fibres cellulosiques (Thapliyal, et al. 2023)

Tableau II-6 Types de fibres végétale (Sathishkumar, et al. 2014)

Libériennes	Jute, Chanvre, Lin, Ramie, Kenaf, Roselle, Mesta, Gombo, Kudzu, Rotin, Glycine
Tiges	Riz, Blé, Orge, Maïs, Avoine, Seigle, Palmier dattier
Feuilles	Sisal, Bananier, Abaca, Ananas, Henequen, Agave, Raphia, Fique, Sansevière, Palmier dattier
Herbes	Bambou, Bagasse, Maïs, Sabai, Colza, Alfa, Alpiste
Fruite	Coco, Palmier à huile
Graines	Kapokier, Cotonnier, Loofah, Asclépiade
Bois	Bois tendre, Bois dur

La production mondiale de fibres naturelles et leur coût constituent des facteurs déterminants dans le choix des matériaux. Parmi les différentes sources de fibres naturelles, le palmier dattier se distingue par sa grande disponibilité, comme l'illustre la figure I-12 (Elseify, et al. 2019). De plus, il représente une option particulièrement économique par rapport à d'autres fibres naturelles, comme le montre la figure I-12 (Elseify, et al. 2019).

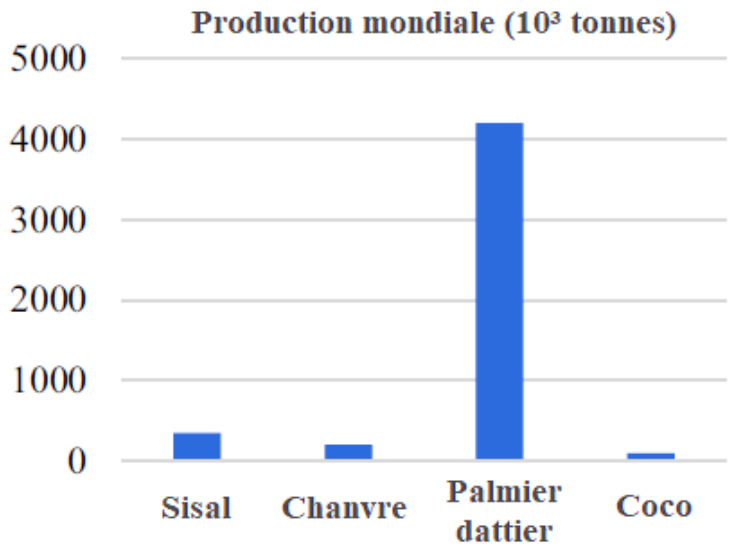


Figure II-9 La production annuelle mondiale de certaines plantes naturelles (Elseify, et al. 2019)

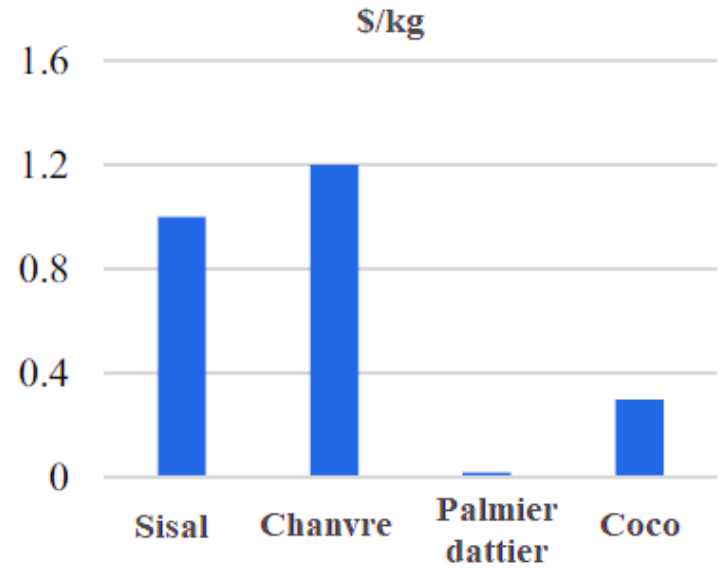


Figure II-10 Les prix de certaines fibres naturelles (Elseify, et al. 2019)

II.5.1 Propriétés chimiques et physiques des fibres végétales

Les propriétés chimiques et physiques des fibres végétales jouent un rôle crucial dans leur performance au sein du béton. Ces propriétés varient considérablement en fonction du type de fibre et de sa composition. La cellulose est le composant principal de la plupart des fibres végétales, représentant 26 à 95 % de leur composition (Karimah, et al. 2021).

Karimah, et al. (2021) ont indiqué que la cellulose attribue aux fibres leur résistance

et leur rigidité. L'hémicellulose et la lignine sont également présentes en proportions variables, influençant la flexibilité, la résistance à l'humidité et la biodégradabilité des fibres. La teneur en cires et en pectine peut affecter l'adhérence des fibres à la matrice cimentaire. La relation entre la composition chimique et les propriétés mécaniques et physiques des fibres est présentée dans le tableau II-7.

Tableau II-7 L'influence de la composition chimique sur les propriétés mécaniques et physiques des fibres naturelles (Karimah, et al. 2021)

	Cellulose	**Hémicellulose**	**Lignine**	**Pectine**	**Cires**
Résistance à la traction	+++	-	-	-	-
Module de Young spécifique	++	+++	-	-	++
Déformation à la rupture	-	++	+++	++	-
Angle des microfibrilles	-	-	+++	+++	-
Diamètre	+	+	-	-	-
Masse volumique	+++	-	-	+++	-
Gain d'humidité	-	++	++	-	+

Elfaleh, et al. (2023) ont indiqué que les fibres ou cellules des plantes sont composées de deux parois distinctes : la paroi primaire et la paroi secondaire. La paroi primaire, qui contient de l'hémicellulose, des pectines, des protéines et des microfibrilles de cellulose aléatoires, confère une certaine flexibilité à la fibre. Cette paroi facilite la croissance cellulaire tout en servant de structure de soutien pour la fibre. En revanche, la paroi secondaire, beaucoup plus rigide, est responsable des propriétés mécaniques élevées de la fibre. Elle est plus épaisse que la paroi primaire et se compose de trois zones : la paroi externe S_1, la paroi centrale S_2 et la paroi interne S_3. Bien que la paroi secondaire contienne les mêmes constituants que la paroi primaire, elle est plus riche en cellulose et contient également de la lignine. Elle se compose de couches concentriques de microfibrilles de cellulose disposées de manière hélicoïdale par rapport à l'axe de la fibre, comme le montre la figure II-11. Chaque fibre constitue un biocomposite multicouche où la lignine sert de matrice, enrobant l'élément structurant de la cellulose, qui est particulièrement rigide. Les chaînes de cellulose forment des microfibrilles. La composition des fibres naturelles varie en fonction de leur origine botanique, des conditions climatiques, de leur degré de maturité et de la méthode d'extraction. Le tableau II- 8 présente les propriétés chimiques de quelques types de fibres.

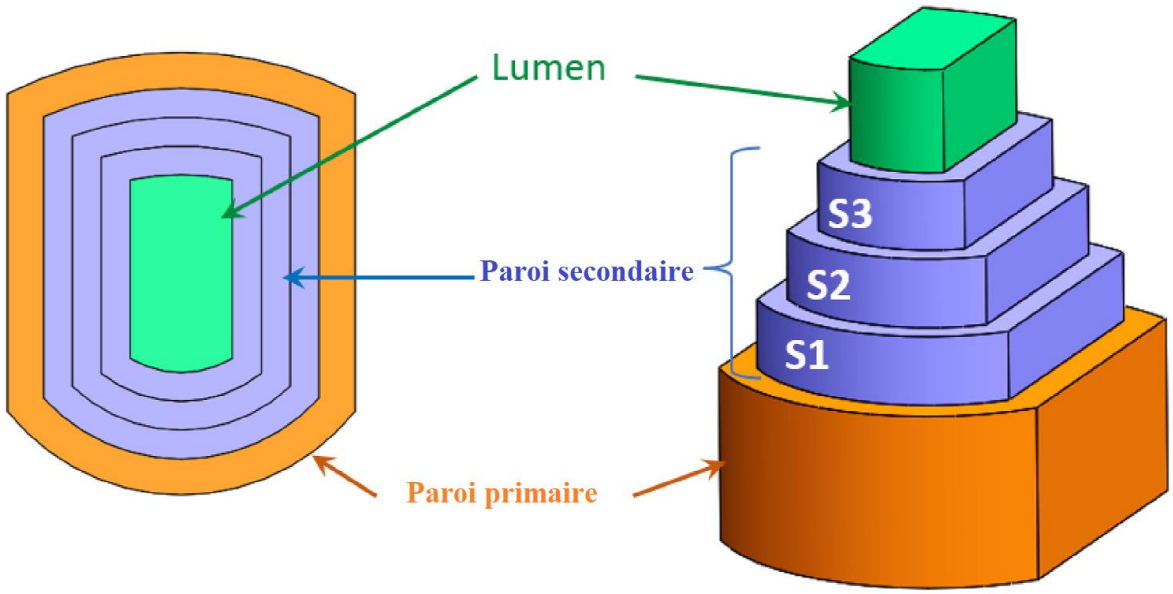


Figure II-11 Microstructure des fibres naturelles (Elfaleh, et al. 2023)

Tableau II-8 Composition chimique de quelques fibres naturelles (Karimah, et al. 2021)

Fibre	**Cellulose (%)**	**Hémicellulose (%)**	**Lignine (%)**
Bambou	26-73.83	12.49-31	19-24
Coir	32-43	0.15-0.25	40-45
Banane	60-65	19	5-10
Bagasse (canne à sucre)	55.2	16.8	25.3
Abaca	56-63	15-25	7-9
Jute	41-48	18-24	21-24
Sisal	47-78	10-24	7-11
Chanvre	57-77	14-22.4	3.7-13
Ramie	68.6-91	5-16.7	0.6-0.7
Kenaf	37-49	18-24	15-21
Ananas	81	-	12.7
Coton	82.7-90	5.7	-

La masse volumique des fibres végétales varie généralement entre 600 et 1600 Kg/m^3 (Campilho 2015), ce qui les rend plus légères que les fibres synthétiques ou l'acier. Leur absorption d'eau est un facteur important à considérer, car elle peut impacter la maniabilité du béton frais et la durabilité à long terme du matériau composite (Amin, et al. 2022).

L'angle microfibrilles, qui est l'angle d'inclinaison des chaînes de cellulose par

rapport à l'axe longitudinal de la fibre, a également un impact significatif sur les propriétés mécaniques des fibre (Joachim, et Oettel 2024).

Le tableau II-9 représente les propriétés physiques typiques de quelques types de fibres végétales.

Tableau II-9 Propriétés physiques de quelques types de fibres naturelles (Campilho 2015)

Fibre	**Masse volumique (Kg/m^3)**	**Longueur (mm)**	**Diamètre (µm)**	**Angle microfibrilles (°)**	**Teneur en Humidité (%)**
Abaca	1500	-	-	-	5-10
Alfa	809	-	-	-	-
Bagasse	1250	10-300	10-34	-	-
Bambou	600-1100	1.5-4	25-40	-	-
Banane	1350	300-900	12-30	-	8.7-12
Coir	1150-1460	20-150	10-460	30-49	8.0
Coton	1500-1600	10-60	10-45	-	7.85-8.5
Lin	1400-1500	5–900	12-600	5-10	8-12
Chanvre	1400-1500	5–55	25-500	2-6.2	6.2-12
Jute	1300-1490	1.5-120	20-200	8.0	12.5-13.7
Kenaf	1400	-	-	-	-
Palmier à huile	700-1550	-	150-500	42-46	-
Ramie	1000-1550	900-1200	20-80	7.5	7.5-17
Sisal	1330-1500	900	8-200	10-22	10-22

II.5.2 Propriétés mécaniques des fibres végétales

L'intégration de fibres naturelles dans le béton dépend fortement de leurs propriétés mécaniques intrinsèques. Ces caractéristiques, telles que la résistance à la traction, le module d'élasticité et l'allongement à la rupture influencent directement leur comportement et leur efficacité en tant que renfort. Une analyse approfondie de ces paramètres est donc essentielle pour sélectionner la fibre la plus appropriée pour une application spécifique de béton. Bien que les fibres naturelles affichent généralement une résistance à la traction et une rigidité inférieures à celles des fibres métalliques, leur résistance spécifique plus élevée (rapport résistance/poids) et leur allongement à la rupture peuvent offrir des avantages dans certaines applications.

Thapliyal, et al. (2023) ont souligné que le chanvre se caractérise par une résistance à la traction élevée, généralement comprise entre 580 et 1100 MPa. Son module d'élasticité varie entre 30 et 60 GPa, tandis que son allongement à la rupture se situe entre 1.6 et 4.5 %.

De plus, le lin est réputé pour sa résistance à la traction élevée, allant de 343 à 2000 MPa, un module d'élasticité variant de 27.6 à 103 GPa et un allongement à la rupture de 1.2 à 3.3 %. Le tableau II-10 représente les propriétés mécaniques les plus pertinentes de certaines fibres lignocellulosiques.

Tableau II-10 Propriétés mécaniques de certaines fibres naturelles : valeur moyenne entre parenthèses (Thapliyal, et al. 2023)

Fibre	**Résistance à la traction (MPa)**	**Module de Young (GPa)**	**Allongement à la rupture (%)**
Coir	175	6	15-25 (20)
Banane	529-914 (721.5)	27-32 (29.5)	5-6 (5.5)
Jute	187-773 (480)	20-55 (37.5)	1.5-3.1 (2.3)
Sisal	507-855 (981)	9-22 (15.5)	1.9-3 (2.45)
Kenaf	295-930 (612.5)	22-60 (41)	2.7-6.9 (4.8)
Bambou	270-862 (566)	18-89 (53)	1.6-8 (4.65)
Lin	343-1035 (689)	50-70 (60)	1.2-3 (2.1)
Coton	287-597 (442)	6-10 (8)	2-10 (6)
Ananas	170-1627 (898.5)	60-82 (71)	1-3 (2)
Ramie	400-938 (669)	61.4-128 (94.7)	2-4 (3)
Chanvre	580-1110 (845)	30-60 (45)	1.6-4.5 (3.05)

La variabilité des propriétés mécaniques au sein de chaque type de fibre végétale est un aspect important à considérer. Des facteurs tels que l'espèce de la plante, les conditions de croissance (qualité du sol, pluviométrie, ensoleillement, température, humidité), les méthodes de récolte et de traitement, ainsi que les dimensions des fibres (longueur, diamètre) contribuent à cette variabilité (Amin, et al. 2022).

Sadeghi, et al. (2024) ont montré que la résistance à la traction des fibres de chanvre varier considérablement en fonction de leur diamètre. Cette variabilité intrinsèque nécessite une caractérisation approfondie des fibres utilisées pour garantir des performances prévisibles dans le béton.

De plus, une étude menée par Ansong, et al. (2023) a évalué les propriétés de cinq variétés de Kenaf, révélant des variations significatives. Les fibres présentaient des écarts notables pour le diamètre allant de 34.2 à 43.2 µm, la masse volumique variant de 530 à 1000 Kg/m^3, la résistance à la traction s'étendant de 734.53 à 1365.14 MPa, et l'allongement à la rupture situé entre 10.88 et 15.81 %. L'importante variation observée, notamment 85 % pour la résistance à la traction, confirme ainsi que le choix de la variété est déterminant pour optimiser le comportement mécanique des fibres.

II.5.3 Propriétés thermiques des fibres végétales

Les propriétés thermiques constituent un aspect fondamental de caractérisation des fibres végétales, en particulier dans le cadre de leur utilisation potentielle dans les matériaux de construction, où l'efficacité énergétique est primordiale. Un intérêt majeur des fibres végétales réside dans leur capacité à agir comme isolants thermiques efficaces.

La performance d'un matériau isolant est directement liée à sa conductivité thermique ; une valeur plus faible indique une meilleure résistance thermique. Les fibres végétales présentent une faible conductivité thermique intrinsèque, qui s'explique par plusieurs facteurs fondamentaux, liés à leur structure, leur composition et leur arrangement dans le matériau composite.

D'une part, leur structure est caractérisée par une porosité élevée et une faible masse volumique. Cette porosité permet ralentir le transfert de chaleur par conduction au sein du la fibre. D'autre part, la composition des fibres, principalement à base de polymères organiques comme la cellulose, les hémicelluloses et la lignine, contribue également à une faible conduction thermique. Enfin, l'arrangement et la distribution des fibres au sein d'un composite influence la manière dont la chaleur peut se propager.

Le tableau II-11 représente la conductivité thermique de certains types de fibres.

Tableau II-11 Conductivité thermique de quelques fibres végétales

Référence	Fibre	Conductivité thermique (W/mk)
Agoudjil, et al. (2011)	Palmier dattier	0.083
	Sisal	0.07
	Bananier	0.117
Ayadi, et al. (2023)	Alfa	0.0365 - 0.0397
	Posidonie	0.0356 - 0.0392
	Chanvre	0.0387 - 0.0427
Hamrouni, et al. (2024)	Lin	0.041 – 0.067
	Paille de colza	0.036 - 0.053
	Paille	0.18
	Bambou	0.042 - 0.052

II.5.4 Comportement des fibres végétales dans le béton

L'incorporation de fibres végétales dans le béton modifie ses performances mécaniques, en particulier en ce qui concerne la résistance à la fissuration, la durabilité et la résistance aux chocs (Asaduzzaman, et Islam 2023; Islam, et al. 2024; Ruiyang 2025). De plus, elles peuvent apporter des propriétés thermiques améliorées, en particulier une conductivité thermique réduite (Islam, et al. 2024; Yassin, et al. 2025).

Selon Fadhil, et Yaseen (2015), l'ajout de fibres de sisal et de palmier au béton a considérablement amélioré sa résistance aux chocs, avec des augmentations maximales respective de 114.3 % et 285.7 %.

Les recherches menées par Bittner, et Oettel (2022) sur le béton ultra-haute performance renforcé par fibres de bambou ont démontré que ces dernières permettaient de ponter les microfissures existantes et de retarder la formation de macrofissures, prévenant la rupture fragile et conférant un comportement ductile.

D'après les recherches menées par Asaduzzaman, et Islam (2023) sur le béton renforcé de fibres de jute, des améliorations de 7 % et 25 % ont été observées respectivement pour la résistance à la compression et la traction. En outre, leurs travaux ont mis en évidence une réduction significative de la fissuration due au retrait, avec jusqu'à 61 % de diminution de la surface fissurée et 62 % de réduction de la largeur maximale des fissures.

De même, Zhou, et al. (2024) révèlent que les fibres de sisal contrôlent la fissuration du béton en interrompant la propagation des fissures et assurant un effet de pontage, ce qui empêche leur propagation et renforce la cohésion de la matrice. L'augmentation de la ténacité du béton qui en résulte permet aux fibres de dissiper l'énergie générée par les contraintes internes. Ceci a pour effet de limiter l'extension des fissures et d'accroître la durabilité du béton lorsqu'il est soumis à des sollicitations mécaniques. Selvam, et al. (2024) ont rapporté que la résistance à la compression et flexion du béton renforcé de fibres de sisal ont augmenté de 45.5 % et 34.4 % respectivement. De plus, les tests de durabilité ont montré une amélioration significative.

L'efficacité de ces fibres dépend crucialement de facteurs tels que leur longueur, leur dosage et leur dispersion uniforme dans la matrice cimentaire (Islam, et al. 2024; Laverde, et al. 2022; Martinelli, et al. 2023).

Sur le plan thermique, le béton de chanvre présente une conductivité thermique comprise entre 0.09 et 0.16 W/mk, ce qui en fait un matériau particulièrement adapté pour l'isolation thermique, alliant performance énergétique et durabilité (Collet, et Pretot 2014).

Hajj Obeid, et al. (2022) ont démontré que l'incorporation de fibres de paille de colza dans le béton entraîne une réduction de la conductivité thermique, avec une moyenne de 0.073 W/mk, ce qui est bénéfique pour la conservation de l'énergie dans les bâtiments.

Par ailleurs, Charai, et al. (2022) ont souligné que la fibre d'alfa améliore considérablement l'isolation thermique du béton, ce qui se traduit notamment par une faible conductivité thermique variant de 0.46 à 0.19 W/mk .

De même, Yassin, et al. (2025) ont révélé que les fibres de palmier confèrent d'excellentes propriétés d'isolation thermique, caractérisées notamment par une réduction des taux de transfert de chaleur atteignant 51.19 % en condition humide et 39.87 % en condition sèche, ainsi que par une réduction de la conductivité thermique d'environ 21 % .

Ces propriétés font du béton renforcé par fibres végétales une option intéressante pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et les économies d'énergie.

II.6 Spécificités des fibres de palmier dattier dans le contexte Algérien

Le palmier dattier (Phoenix dactylifera L.), appartenant à la famille des Arecaceae (ordre des Arecales) (Adamu, et al. 2022), est une plante monocotylédone remarquable par son adaptation aux milieux désertiques. Principalement cultivé dans les régions arides et semi-arides, cet arbre emblématique dépasse le simple statut d'espèce botanique et représente un pilier culturel, économique et écologique dans de nombreuses civilisations, notamment en Algérie.

Tableau II-12 Principaux pays producteurs de dattes en 2023 (FAO 2023)

Rang	Pays	Production (tonnes)	Superficie (ha)
1	Égypte	1867064.5	72395
2	Arabie saoudite	1642992.5	157444
3	**Algérie**	**1324767.0**	**179150**
4	Iran	1024116.5	122151
5	Iraq	635947.1	275986
6	Pakistan	503787.3	109078
7	Soudan	442674.0	37029
8	Oman	394946.0	26698
9	Tunisie	386395.0	80469
10	Émirats arabes unis	329446.9	39771
11	Libye	188288.5	34723
12	Chine	161450.3	12396
13	Chine, continentale	161450.3	12396
14	Turquie	127314.0	8128
15	Koweït	123000.0	4345

Sur le plan mondial, il existe plus de 120 millions de palmiers dattiers, dont environ 67 % sont cultivés au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (Adamu, et al. 2022). Le tableau II-12 présente les quinze principaux pays producteurs de dattes en 2023, selon les statistiques de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) concernant la production et la superficie cultivée des dattes (FAO 2023).

L'Algérie, troisième producteur mondial, occupe une position stratégique avec plus de 19 millions de palmiers (Sabah, et al. 2023) répartis sur 179150 hectares. Chaque année, elle produit environ 1324767 tonnes de dattes (FAO 2023), principalement dans les régions du Sud, telles que Biskra, Ouargla et El Oued (Sabah, et al. 2023). Le ministère de l'agriculture et du développement rural a même annoncé des programmes

pour planter un million de palmiers dattiers supplémentaires en 2023/2024 (APS 2023), augmentant encore la base de ressources.



Figure II-12 Déchets de palmier dattier

Chaque année, au début de la nouvelle saison agricole, de grandes quantités de déchets agricoles issus des palmiers dattiers s'accumulent dans les pays producteurs (figure II-12). Un seul palmier dattier génère environ 40 kg de déchets par an, provenant de différentes parties de palmier (Faiad, et al. 2022). De plus, Djaafri, et al. (2024) ont rapporté qu'en fonction de la variété, la production annuelle de déchets de palmier dattier peut atteindre en moyenne 65 kg. En moyenne, chaque palmier dattier produit environ 13 feuilles et pétioles ainsi que 7 régimes par an, soit environ 210 000 tonnes de pétioles de palmier dattier, 73 000 tonnes de feuilles et 52 000 tonnes de régimes rien qu'en Algérie (Agoudjil, et al. 2011).

Selon Khoshnodifar, et al. (2023), les palmiers dattiers génèrent environ 12 millions de tonnes de déchets par an, constituant ainsi l'un des plus grands flux de déchets

lignocellulosiques.

Bien que ces déchets représentent une biomasse précieuse, riche en cellulose, hémicellulose, lignine et autres composés, leur potentiel n'est généralement ni correctement quantifié ni suffisamment exploité dans la plupart des pays. Il devient donc crucial de développer des solutions innovantes pour valoriser cette ressource renouvelable et abondante. Une des pistes explorées consiste à extraire les fibres de ces déchets à l'aide de techniques d'extraction diverses, puis à les utiliser pour créer des composites destinés à diverses applications industrielles (figure II-13).

Le volume considérable de palmiers dattiers et la production annuelle estimée de déchets en Algérie établissent fortement les fibres de palmier dattier comme une ressource renouvelable abondante et facilement disponible dans le pays. Cette abondance fournit une justification solide pour investir dans la recherche et les applications industrielles de ces fibres. Les efforts continus du gouvernement pour développer la culture du palmier dattier renforcent encore la durabilité à long terme de cette ressource, assurant un approvisionnement continu en matières premières pour les industries potentielles basées sur les fibres.



Figure II-13 Fibres de palmier dattier (Althoey, et al. 2022)

II.6.1 Techniques d'extraction

Selon (Hassani, et al. 2020), l'extraction des fibres végétales peut être classée en quatre grandes familles de procédés : le procédé physique, le procédé mécanique, le procédé chimique et le procédé biologique.

a. Procédé Physique

L'explosion à la vapeur constitue un moyen très efficace pour la séparation des fibres. Ce procédé permet la déstructuration de la matière lignocellulosique grâce à l'action combinée de plusieurs facteurs : la chaleur de la vapeur, les effets de cisaillement dus à une chute brutale de pression, et les réactions d'hydrolyse résultant de la formation d'acides organiques. Finalement, la séparation des fibres est complétée par un lavage à l'eau courante. D'autres procédés physiques, basés sur les ultrasons ou les micro-ondes, existent également.

b. Procédé Mécanique

Les fibres peuvent être extraites par diverses méthodes mécaniques : le teillage, qui sépare le bois des tiges par broyage et battage afin d'obtenir des fibres souples ; la déflexion, impliquant l'action combinée de grattage et de battage par des machines pour libérer les fibres des feuilles ; et le laminage, qui consiste à écraser des morceaux de tiges par pressage ou roulement répété jusqu'à séparation complète des fibres.

c. Procédé Chimique

L'extraction chimique est généralement réalisée à l'aide de solutions alcalines fortes comme NaOH ou KOH. Cette méthode réduit partiellement le diamètre de la fibre.

d. Procédé Biologique

Le rouissage biologique est un procédé d'extraction naturel bien connu qui repose sur l'activité de micro-organismes dégradant les substances liant les fibres végétales. Comparé à d'autres méthodes, ce procédé implique généralement un temps d'extraction plus long. Plusieurs approches de rouissage biologique sont utilisées, chacune avec ses spécificités : le rouissage au champ, où la dégradation par les micro-organismes naturels dépend directement des conditions climatiques ; le rouissage en étang, basé sur l'immersion de la plante et l'action de bactéries, mais aujourd'hui moins utilisé

principalement pour des raisons environnementales et de santé, notamment à cause de sa consommation en eau ; et le rouissage enzymatique, une méthode plus moderne et contrôlée utilisant des mélanges spécifiques d'enzymes, qui vise à éviter la pollution, à réduire le temps de traitement, et à préserver la cellulose, un composant précieux.

Le choix du procédé approprié dépend du type et de l'âge de la plante ainsi que de l'organe extracteur ; dans certains cas, le couplage de plusieurs procédés est nécessaire. Il est essentiel de souligner que le choix et la maîtrise de ces procédés d'extraction sont indispensables, car ils influencent directement les propriétés finales des fibres et, par conséquent, leur aptitude à être utilisées efficacement comme renforcement dans les matériaux de construction.

II.6.2 Valorisation des composants

Le palmier dattier est une espèce végétale polyvalente, dont chaque partie est valorisée selon des usages spécifiques, reflétant une exploitation quasi totale de ses composants. Comme le montre la figure II-14, ses éléments principaux incluent :

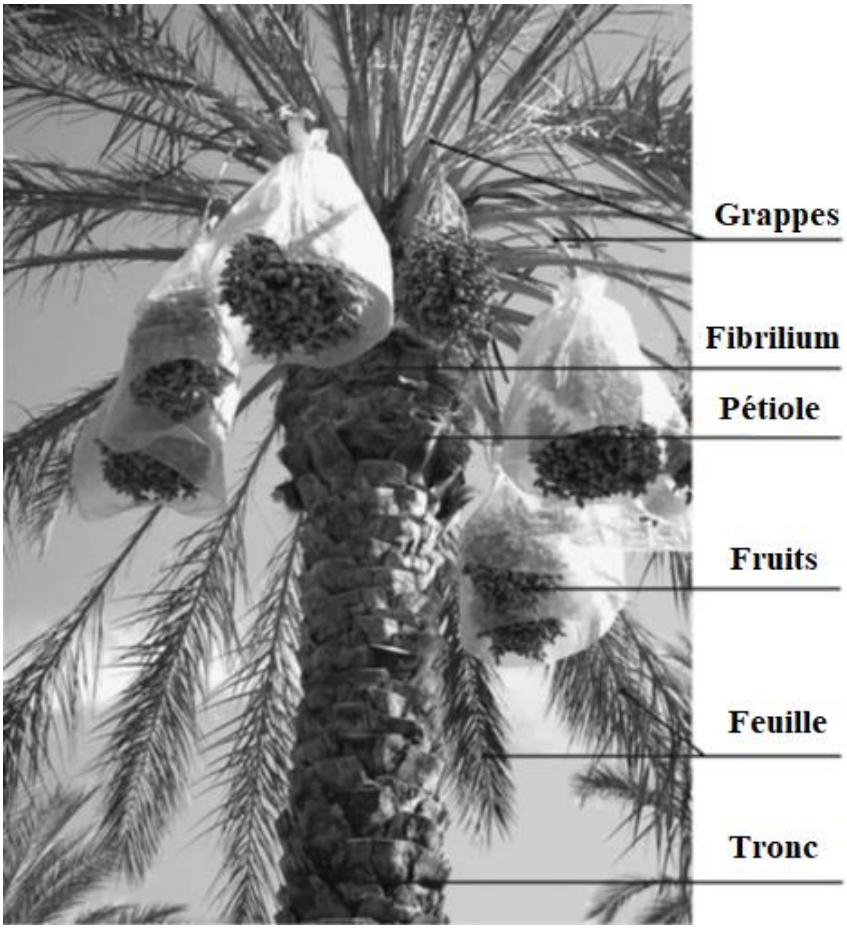


Figure II-14 Palmier dattier (Agoudjil, et al. 2011)

a. Tronc

Le tronc, bien que plus ligneux, possède une masse volumique moyenne et peut être transformé en particules ou en fibres utilisables comme renfort dans des composites polymères ou des matériaux de construction (Kttafah, et Khadim 2019; Midani, et al. 2020). Il peut être coupé en petites pièces et broyé pour obtenir des particules de différentes tailles. En Algérie, le tronc représente une part importante de la biomasse disponible.

b. Feuilles

Les feuilles de palmier dattier sont riches en fibres cellulosiques. Elles peuvent être utilisées entières ou transformées en fibres ou en poudre. Les fibres peuvent être extraites par des méthodes chimiques (traitement alcalin avec NaOH), physiques (hydrothermale, micro-ondes) ou mécaniques. La poudre de feuilles peut être obtenue par broyage et utilisée comme renfort dans les mortiers de gypse (Kethiri, et al. 2024).

c. Dattes

Bien que le fruit lui-même ne soit pas utilisé comme renfort fibreux, les graines de dattes sont étudiées pour leur potentiel dans l'élaboration de matériaux composites avec une matrice époxy (K Hassan, et Assas 2023).

d. Pétiole

Le pétiole, ou la base de la feuille, est une source de fibres caractérisées par une porosité et un taux d'absorption d'eau relativement élevés. Les fibres peuvent être extraites par des méthodes similaires à celles des feuilles et utilisées comme renfort dans des composites (Dhakal, et al. 2024; Midani, et al. 2020; Rasoul, et al. 2020).

e. Fibrillium

Le fibrillium, ou la gaine fibreuse entourant le tronc, est riche en cellulose brute. Les fibres peuvent être facilement séparées en les immergeant dans l'eau. Leur haute teneur en cellulose les rend potentiellement résistantes dans des environnements alcalins, ce qui est avantageux pour le renforcement de matrices comme le béton (Elseify, et al. 2019).

f. Grappes

Les grappes de fruits et les pédicelles contiennent également des fibres qui peuvent être extraites et utilisées comme renfort (Elseify, et al. 2019). Leur composition chimique pourrait leur conférer une résistance à la décomposition.

II.6.3 Propriétés des fibres de palmier dattier

Les fibres de palmier dattier possèdent un ensemble unique de caractéristiques et d'avantages, notamment leur abondance, leur prix compétitif, ainsi que d'excellentes propriétés mécaniques, physiques et chimiques (Midani, et al. 2020).

L'analyse de la composition chimique des différentes parties des fibres de palmier dattier (surface, pétiole, foliole, pédicelle, fibrillium) représentés dans le tableau II-13 révèle des variations significatives, notamment par rapport aux autres fibres naturelles comme le jute et le coco.

Concernant la teneur en cellulose, celle des fibres de fibrillium est particulièrement élevée et comparable à celle des fibres de jute et de coco. Cette concentration élevée confère une résistance accrue aux solutions alcalines et acides, rendant ces fibres adaptées au renforcement en milieux alcalins. Quant aux extraits, les feuilles et les pétioles affichent une teneur élevée, comparable à celle de la fibre de coco. Une telle teneur contribue positivement à la résistance à l'usure lorsque ces parties sont utilisées comme bois comprimé (Rasoul, et al. 2020).

Tableau II-13 Constituants chimiques des fibres de palmier dattier comparé à certaines fibres naturelles (Rasoul, et al. 2020)

Fibre	**Cellulose [%]**	**Hémicellulose [%]**	**Lignine [%]**	**Cendres [%]**	**Extraits [%]**
Fibrillium (palmier dattier)	43.94	21.68	27.80	1.55	4.32
Feuilles (palmier dattier)	38.58	20.05	28.57	2.62	9.56
Pétiole (palmier dattier)	33.79	20.44	26.03	3.70	13.86
Jute	45 - 71.5	13.6 – 21	12 - 26	0.5 – 2	-
Sisal	33.2 - 88.0	10.0 - 26.0	3.8 - 20.5	-	-
Bambou	76.0	8.8	14.4	-	1.5
Tissu de noix de coco	29.7	31.05	19.22	8.39	1.74
Coir de noix de coco	46.48	21.46	12.36	1.05	8.77

Le tableau II-14 présente les propriétés physiques des variétés de fibres de palmier dattier. L'absorption des fibres de pétiole et de fibrillium s'avère notablement plus élevée que celle des autres fibres de palmier dattier et d'autres fibres naturelles

Tableau II-14 Propriétés mécaniques et physiques des fibres végétales naturelles couramment utilisées et des fibres de palmier dattier (Rasoul, et al. 2020)

Fibre	Masse volumique relative (kg/m^3)	Masse volumique absolue (kg/m^3)	Absorption d'eau (%)
Pétiole (palmier dattier)	160 ± 54	866 ± 20.5	146.32 ± 21
Pétales (palmier dattier)	411 ± 41.4	830 ± 23.6	96.6 ± 1.4
Pédicelles (palmier dattier)	425 ± 23.6	749 ± 25.6	73.78 ± 3
Fibrillium (palmier dattier)	209 ± 31.7	786 ± 23.6	115.11 ± 15.7
Sisal	900	-	110.0 - 240.0
Jute	-	1300 - 1460	-

Tableau II-15 Propriétés mécaniques des fibres de palmier dattier comparées à celles de certaines fibres naturelles (Rasoul, et al. 2020)

Fibre	Résistance à la traction (MPa)	Allongement (%)	Module d'élasticité (GPa)
Pétiole (palmier dattier)	90 ± 8.87	0.95 ± 0.42	7.00 ± 2.00
Pétales (palmier dattier)	100.12 ± 43.87	2.68 ± 0.49	4.00 ± 1.33
Fibrillium (palmier dattier)	90 ± 30.7	4.59 ± 0.90	3.66 ± 2.33
Coton	287 – 597	3.0 - 10.0	5.5 - 12.6
Sisal	137 – 577	-	15.2 - 34.0
Lin	345 – 1500	1.2 - 3.2	27.6 - 80
Jute	393 – 800	1.5 - 1.8	10 - 30

Les propriétés mécaniques des fibres de palmier dattier, comparées à celles d'autres fibres végétales naturelles couramment utilisées, sont présentées dans le tableau II-11. Il ressort que les propriétés mécaniques varient notablement selon la partie de la fibre de palmier dattier. Ces variations s'expliquent par les caractéristiques physico-chimiques spécifiques de chaque partie, notamment leur teneur en cellulose

Dhakal, et al. (2024) ont constaté, que les fibres de palmier dattier ont une résistance à la traction et un module d'élasticité comparables à ceux d'autres fibres lignocellulosiques couramment utilisées. De plus, leur masse volumique est plus faible,

ce qui permet d'obtenir des propriétés spécifiques plus élevées.

En outre, Agoudjil, et al. (2011) ont rapporté que la conductivité thermique moyenne des échantillons de bois de palmier dattier était comparable à celle d'autres fibres isolants, tels que le sisal, le liège, le chanvre et la fibre de bananier. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité thermique du bois de palmier dattier, faisant de ce matériau un choix pertinent pour des applications d'isolation thermique et acoustique.

Ces propriétés physiques, mécaniques et thermiques remarquables font des fibres de palmier dattier une alternative écologique pour plusieurs applications, telles que la fabrication de panneaux isolants, le renforcement des composites polymères, ainsi que l'amélioration des propriétés de l'asphalte, du plâtre, du mortier ciment et du béton (Elseify, et al. 2019).

Comme illustré dans la Figure II-15, cette représentation met en évidence les différentes performances visées pour améliorer les composites utilisés dans la construction grâce au renforcement par les fibres de palmier dattier (Dhakal, et al. 2024).

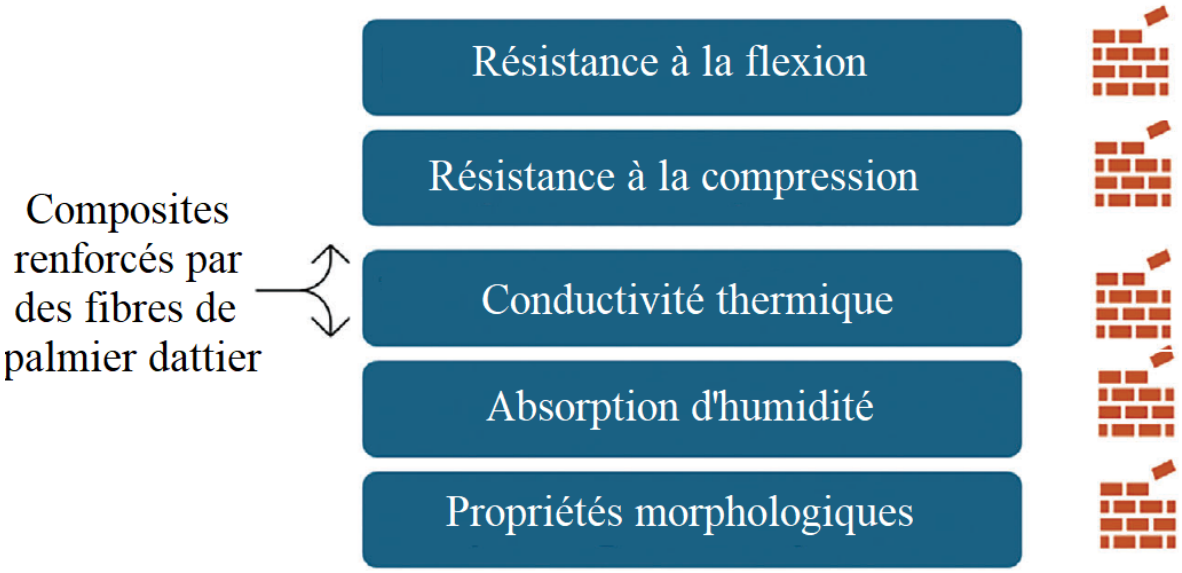


Figure II-15 Performances améliorées des composites renforcés par des fibres de palmier dattier (Dhakal, et al. 2024)

II.6.4 Renforcement du plâtre par les fibres de palmier dattier

Les composites à base de plâtre renforcé par des fibres de palmier dattier offrent une alternative durable et performante pour l'isolation dans le bâtiment. Ils améliorent l'isolation thermique et la résistance à la flexion, tout en réduisant l'impact

environnemental.

Al-Rifaie, et Al-Niami (2016) ont étudié les performances mécaniques de composites à base de plâtre renforcé par des fibres de palmier dattier. Les résultats montrent que l'ajout de fibres de palmier dattier améliore la résistance à la flexion de 31 %. La résistance à l'impact est également significativement améliorée, ce qui témoigne d'un meilleur comportement ductile du composite. Les plaques composites ont aussi montré une réduction de la fragilité, ce qui prolonge leur durabilité en service.

En revanche, Haba, et al. (2022) ont réalisé une étude approfondie des composites à base de plâtre renforcés par des fibres de palmier dattier, mettant en évidence leur potentiel pour des applications dans le secteur de la construction, en particulier pour l'amélioration des performances thermiques et mécaniques. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres permet de réduire la conductivité thermique jusqu'à 26 %, ce qui améliore considérablement les performances d'isolation thermique des matériaux. Il permet également d'améliorer la ductilité et la résistance à la fissuration, bien que la résistance à la compression puisse diminuer légèrement au-delà de certaines concentrations en fibres. Cette performance est généralement optimisée pour des teneurs en fibres comprises entre 1 % et 3 %. L'étude souligne également l'importance des traitements de surface pour améliorer l'adhérence des fibres à la matrice plâtre, ce qui se traduit par une amélioration de la cohésion interne du composite.

De plus, Benchouia, et al. (2024) ont montré que l'ajout de fibres de palmier dattier entre 5 % et 15 % entraîne une réduction significative de la conductivité thermique jusqu'à 37.65 % selon la teneur en fibres. La masse volumique du composite a également diminué de 13 %. En revanche, les performances mécaniques ont globalement diminué avec l'ajout de fibres, notamment en raison de l'effet absorbant et de la structure fibreuse des déchets.

II.6.5 Renforcement du mortier par les fibres de palmier dattier

Plusieurs recherches se sont intéressées aux performances du mortier renforcé par les fibres de palmier dattier. Parmi ces recherches, Benmansour, et al. (2014) ont notamment montré que l'ajout de fibres de palmier dattier réduisait la conductivité thermique et la masse volumique du mortier, tout en diminuant la résistance à la

compression avec l'augmentation de la concentration de fibres de palmier dattier, bien que des résistances acceptables aient été obtenues avec des concentrations inférieures ou égales à 15%.

Les travaux de Boukhattem, et al. (2017) ont notamment montré que l'incorporation de fibres de palmier dattier dans le mortier réduisait la masse volumique et la conductivité thermique du composite, tout en augmentant l'absorption d'eau et la porosité. À un taux de 51 % de fibres de palmier dattier, ils ont constaté une baisse de la masse volumique de 39 %, une hausse de la porosité de 71 % et une diminution de la conductivité de 70 %.

Dans une étude similaire, Benaniba, et al. (2020) ont également analysé l'influence des fibres de palmier dattier sur les propriétés mécaniques du mortier. Ils ont observé une augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier dattier, cette hausse étant attribuée à la nature hygroscopique des fibres. Par ailleurs, la conductivité thermique du mortier a diminué avec l'augmentation du contenu en fibres, atteignant jusqu'à 92 % de réduction pour un ajout de 24 % de fibres de palmier dattier. L'incorporation de fibres de palmier dattier jusqu'à 12 % a également permis d'améliorer la résistance à la flexion, avec une teneur optimale de 6 %, cette amélioration étant liée à l'effet de pontage des fissures par les fibres. En revanche, la résistance à la compression du mortier a diminué à mesure que la proportion de fibres de palmier dattier augmentait. Cette diminution a été attribuée à une porosité accrue et à une répartition hétérogène des fibres au sein de la matrice cimentaire.

Ali-Boucetta, et al. (2021) ont étudié l'impact de différents traitements appliqués aux fibres de palmier dattier sur les propriétés du mortier renforcé par ces fibres. Leurs résultats ont montré que tous les traitements réduisent l'absorption d'eau et accélèrent le temps de prise du mortier. Les fibres de palmier dattier traitées avec une solution alcaline (NaOH à 3%) ont présenté une amélioration significative de leurs propriétés en traction par rapport aux fibres brutes, avec des augmentations respectives de 25.6 %, 39.2 % et 27.6 % pour la résistance à la traction, le module de Young et l'allongement à la rupture. De plus, l'ajout de fibres traitées a amélioré la résistance à la compression et à la flexion du mortier, avec des augmentations respectives de 11 % et 9 % pour le

traitement à l'eau bouillante et de 19.9 % et 60.1 % pour le traitement à NaOH.

II.6.6 Renforcement du béton par les fibres de palmier dattier

Récemment, l'utilisation des fibres de palmier dattier dans le béton a fait l'objet de recherches approfondies, visant à explorer ses performances et son impact. Ces travaux se sont principalement concentrés sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques, thermiques et environnementales des matériaux, mettant en évidence les avantages de la fibre de palmier dattier pour le renforcement du béton.

Kriker, et al. (2005) ont étudié l'influence des fibres de palmier dattier sur les propriétés mécaniques du béton fibré, en particulier dans des zones climatiques arides. Leurs travaux ont démontré que l'incorporation de fibres de palmier dattier améliore de manière significative la résistance à la flexion et la ténacité du béton, avec des augmentations respectives de 60 % et 70 %. Toutefois, cette amélioration s'accompagne d'une diminution progressive de la résistance à la compression, estimée entre 15 % et 20 %. Alatshan, et al. (2017) ont démontré que l'incorporation de fibres de palmier dattier améliore significativement la résistance à la compression, la ductilité des poutres et la résistance à la flexion du béton.

Dans une étude similaire, Althoey, et al. (2022) ont constaté que l'incorporation de 1% de fibres de palmier dattier dans le béton améliore significativement ses propriétés mécaniques. Leurs résultats révèlent une augmentation de 8.01 % de la résistance à la compression, une augmentation de 17 % de la résistance à la traction, et une amélioration notable de la résistance à la flexion, variant entre 60 % et 85 %.

Ibrahim, et al. (2022) ont exploré l'effet combiné des fibres de palmier dattier et de la fumée de silice sur les performances mécaniques du béton. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres de palmier dattier dans le béton permettait d'augmenter la résistance à la flexion jusqu'à 22 % et la résistance à la traction par fendage jusqu'à 18 %. Toutefois, ces améliorations s'accompagnaient d'une diminution de la résistance à la compression pouvant atteindre 20 % pour un dosage de 2 % de fibres, ainsi que d'une augmentation de la porosité. Ce pendant l'introduction de 10 % de fumée de silice a permis de compenser ces pertes, en accroissant la résistance à la compression jusqu'à 12 % par rapport au béton témoin, tout en densifiant la microstructure et réduisant la

porosité.

De plus Les résultats de la recherche de Antony, et al. (2024) ont également mis en évidence que le béton renforcé par les fibres de palmier dattier présente une excellente résistance thermique ainsi qu'une bonne résistance à la compression, faisant de ce matériau une solution prometteuse pour soutenir les stratégies de construction écoénergétique.

II.7 Combinaisons béton recyclé - fibres naturelles

L'ajout de fibres constitue une stratégie efficace pour renforcer le béton recyclé, en améliorant ses propriétés mécaniques et sa durabilité (Amit, et Gyani Jail 2023; Zheng, et al. 2021). Une grande diversité de fibres est disponible, se distinguant par leur origine (naturelle ou synthétique), leur géométrie (droite, ondulée, en forme d'aiguille, etc.), leur dimension (micro ou macro) ainsi que par leurs propriétés mécaniques. Toutefois, le choix des fibres dans une application donnée doit être effectué en tenant compte de leur compatibilité avec la matrice cimentaire et du mode de sollicitation du composite, afin d'assurer une performance optimale.

Les fibres naturelles, telles que celles de sisal, de coco, de chanvre, de palmier ou de jute, constituent une alternative écologique et renouvelable pour le renforcement du béton recyclé. Ces fibres non seulement contribuent à améliorer la résistance mécanique du béton, mais elles offrent également une solution durable, réduisant l'empreinte carbone et augmentant la durabilité du matériau tout en étant biodégradables.

Jamil, et al. (2023) ont examiné l'effet des fibres de jute sur le béton recyclé et ont constaté qu'un faible dosage (0.15 % de fibres de jute) améliore la résistance mécanique de plus de 4 %, tandis que des dosages plus élevés (≥ 0.30 %) ont un effet négatif sur les performances du béton recyclé.

En plus, Lage, et al. (2024) ont montré que l'ajout de 5 % de fibres de coco dans du béton recyclé permet d'améliorer sa résistance à la compression, en particulier lorsque le béton contient de 25 % à 50 % de agrégats recyclés avec un rapport E/C de 0.3. L'étude souligne que cette combinaison permet d'obtenir une résistance comparable à celle du béton conventionnel.

Jamshaid, et al. (2022) ont étudié l'effet des fibres naturelles de jute, sisal, canne à sucre et noix de coco (figure II-16) dans le béton et ont montré qu'une teneur de 2 % en fibres améliore la résistance en traction et en compression de 11.6 % à 20.2 %, tout en réduisant l'absorption d'eau. Nicolás, et al. (2025) ont étudié aussi l'effet des fibres naturelles de palmier et de manguier et ont observé que l'ajout de 0.2 % de fibres de palmier et 0.4 % de fibres courtes de manguier améliore la résistance à la compression du béton de 12 % par rapport au béton témoin.



Figure II-16 Fibres de jute, sisal, canne à sucre et noix de coco (Jamshaid, et al. 2022)

Haruehansapong, et al. (2024) ont étudié l'amélioration des performances du béton recyclé en incorporant de la nanosilice et des fibres naturelles, notamment la fibre de sisal et la fibre de palmier (figure II-17). Leur recherche a montré que l'ajout de 3 % de nanosilice renforce la zone de transition interfaciale et réduit les vides, ce qui entraîne une augmentation de 22.5 % de la résistance à la compression et 25.6 % de la résistance à la flexion dans un béton entièrement composé de agrégats recyclés. En parallèle, les fibres naturelles ont amélioré la résistance à la flexion jusqu'à 46.7 %. Ces résultats confirment que l'intégration combinée de nanosilice et des fibres naturelles permet non seulement d'accroître la performance mécanique du béton recyclé, mais aussi d'offrir une alternative plus durable et écologique en valorisant les déchets et en réduisant l'empreinte carbone du secteur de la construction.

Bien que prometteuse, l'intégration des fibres de palmier dattier dans les bétons recyclés reste encore insuffisamment explorée. Tamimi, et al. (2023) ont examiné l'impact de l'incorporation des fibres de palmier dattier dans un béton constitué de 100 % de agrégats recyclés. Les résultats ont montré que l'utilisation exclusive des agrégats recyclés entraîne une réduction de 36 % de la résistance à la compression et de 57 % de

la résistance à la traction par rapport à un béton de référence.



Figure II-17 Les fibres de sisal et de palmier (Haruehansapong, et al. 2024)

Toutefois, l'incorporation de 0.64 % de fibres de palmier dattier a permis de récupérer partiellement ces pertes, en entraînant une augmentation de 16.2 % de la résistance à la compression et de 3.2 % de la résistance à la traction par rapport au mélange sans fibres.

II.8 Lacunes scientifiques et positionnement du travail de recherche

Malgré l'intérêt croissant porté au béton recyclé et aux fibres naturelles dans le secteur du génie civil, plusieurs aspects demeurent insuffisamment étudiés dans la littérature scientifique actuelle. En particulier, les recherches sur l'association des agrégats recyclés avec des fibres végétales, notamment celles issues du palmier dattier, demeurent limitées, surtout en Algérie, où les caractéristiques climatiques et les ressources agricoles abondantes pourraient offrir un potentiel significatif. Jusqu'à présent, la majorité des travaux existants se focalisent principalement soit sur l'amélioration des propriétés des agrégats recyclés seuls, soit sur l'utilisation des fibres palmier dattier dans les matériaux composites, notamment en béton.

Face à ces défis, la présente étude s'intéresse spécifiquement à l'exploration de la combinaison d'agrégats recyclés et de fibres naturelles extraites du palmier dattier. L'objectif de cette recherche est d'évaluer le potentiel synergétique de ces matériaux composites, en vue d'améliorer les performances mécaniques, thermiques du béton. Cette approche s'inscrit également dans une perspective de valorisation des ressources locales, contribuant ainsi à une économie circulaire et à la réduction de l'empreinte environnementale des matériaux de construction, particulièrement dans le contexte

algérien.

II.9 Enjeux de valorisation locale et retombées durables

L'intégration des fibres naturelles issues du palmier dattier dans les bétons recyclés présente des enjeux économiques, environnementaux et sociaux significatifs, particulièrement pertinents pour l'Algérie. D'une part, l'utilisation d'agrégats recyclés contribue à la réduction de l'exploitation des ressources naturelles et à la gestion durable des déchets issus des démolitions, limitant ainsi l'impact environnemental lié à leur stockage ou à leur élimination. D'autre part, la valorisation des fibres végétales locales, spécifiquement celles du palmier dattier, permet de promouvoir une économie circulaire, créant des opportunités économiques nouvelles tout en réduisant l'empreinte écologique associée aux matériaux de construction traditionnels.

De manière plus générale, ces solutions offrent un potentiel considérable pour relever les défis du développement durable en Algérie, en proposant des matériaux alternatifs qui s'ajustent parfaitement aux spécificités climatiques du pays. En effet, grâce à leurs propriétés thermiques et mécaniques prometteuses, qui seront l'objet de l'étude, ces matériaux composites pourraient assurer une isolation thermique performante et durable, contribuant ainsi à une réduction des besoins énergétiques des bâtiments et à l'amélioration de la qualité de vie, tant dans les zones urbaines que rurales.

II.10 Conclusion

Ce chapitre présente une analyse détaillée de la littérature scientifique sur l'utilisation des agrégats recyclés dans le béton, en mettant en évidence à la fois les avantages écologiques et les défis techniques associés à cette approche. L'analyse a permis de mettre en lumière les principaux problèmes liés à la substitution des agrégats naturels par des agrégats recyclés, notamment la diminution des performances mécaniques et l'augmentation de la porosité par rapport au béton conventionnel.

Diverses méthodes d'amélioration ont été explorées, incluant des techniques telles que l'élimination du mortier adhérent par le lavage à l'eau, les traitements mécaniques ou les approches chimiques. En outre, des stratégies de traitement des agrégats recyclés, telles que le revêtement de surface avec des matériaux pouzzolaniques, la biominéralisation, la carbonatation ou l'imprégnation de polymères, ont été examinées

pour leur potentiel à réduire la porosité et à améliorer la zone de transition interfaciale. L'ajout d'adjuvants, qu'ils soient minéraux ou chimiques, a également été identifié comme une solution efficace pour optimiser les performances du béton recyclé en améliorant sa microstructure et sa rhéologie. Par ailleurs, les approches de malaxage en plusieurs étapes ont été soulignées pour leur capacité à améliorer la distribution des constituants et à renforcer la résistance ainsi que la durabilité du béton recyclé.

Un aspect majeur de ce chapitre a porté sur l'étude approfondie des fibres naturelles, qui représentent une solution prometteuse pour l'amélioration des propriétés mécaniques et thermiques du béton recyclé. En particulier, les fibres de palmier dattier, soulignant leurs avantages environnementaux, leur disponibilité abondante en Algérie, leur coût modéré et leurs propriétés intéressantes. Bien que plusieurs études aient démontré que l'incorporation de fibres végétales dans le béton améliore ses performances, la combinaison spécifique d'agrégats recyclés et de fibres de palmier dattier reste encore relativement peu explorée. Cela met en évidence l'importance de ce travail de recherche, qui a pour objectif de caractériser les performances de ce matériau composite innovant.

En réduisant la dépendance aux ressources primaires et en diminuant la quantité de déchets envoyés dans les décharges, ce travail contribue à la transition vers une économie circulaire, où la réutilisation et la valorisation des matériaux prennent une place centrale. Cette approche est donc essentielle pour répondre aux enjeux environnementaux actuels et futurs.

Chapitre III Matériaux, matériels, formulation et procédure expérimentale

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, les matériaux utilisés ainsi que le programme expérimental adopté seront présentés en détail. Tout d'abord, les propriétés physiques des matériaux constitutifs seront décrites, ainsi que les méthodes employées pour leur caractérisation. La procédure de formulation et la méthode de malaxage adoptée pour la confection des bétons seront également précisées. Ensuite, les différentes compositions de béton réalisées seront exposées, en détaillant les proportions de substitution des agrégats recyclés et les taux d'ajout des fibres végétales.

L'ouvrabilité des mélanges sera d'abord évaluée à l'état frais à l'aide d'essais d'affaissement. À l'état durci, une caractérisation physique complète sera réalisée, suivie des essais mécaniques approfondis, incluant la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion, ainsi que le module d'élasticité, mesuré par la méthode non destructive utilisant l'ultrason. De plus, des mesures de la conductivité thermique seront effectuées. Ces différents essais permettront d'évaluer avec précision l'impact du remplacement des agrégats et l'ajout de fibres sur les propriétés du béton, offrant ainsi une compréhension claire de leur influence sur ses performances globales.

III.2 Matériaux

Une sélection rigoureuse des matériaux est indispensable à la formulation d'un béton de haute performance. Pour le présent travail, les matériaux utilisés sont le ciment, les agrégats (naturels et recyclés), l'eau, les fibres de palmier dattier et l'adjuvants.

III.2.1 Ciment

Le ciment employé est un ciment Portland composé de type CEM II/A-M (P-L) 42.5 R, conforme à la norme NA 442. Produit par la Société des Ciments d'El Ma Labiod - Tébessa.

III.2.2 Sable

Deux types de sable de la région de Tébessa, le sable de rivière et le sable de carrière,

de granulométrie 0/5 mm, ont été étudiés afin d'évaluer leurs propriétés, dans le but de déterminer lequel des deux présente les meilleures caractéristiques.

III.2.3 Agrégats naturels

Afin d'assurer une résistance optimale au béton, deux classes granulométriques d'agrégats calcaires ont été sélectionnées : 8/15 mm et 15/25 mm. Ces agrégats proviennent de la carrière d'El Ma Labiod - Tébessa.

III.2.4 Agrégats recyclés

Les agrégats recyclés ont été produits par concassage manuel d'éprouvettes en béton issues des études expérimentales antérieures (figure III-1), suivi d'un tamisage pour obtenir les distributions granulométriques souhaitées (8/15 mm et 15 /25 mm). Cette méthode de concassage, grâce à son faible impact mécanique, permet de préserver les propriétés des agrégats, notamment leur résistance et leur angularité.



Figure III-1 Éprouvettes de béton utilisées et agrégats recyclés obtenus

III.2.5 Fibres de palmier dattier

Les fibres de palmier dattier utilisées comme renforcement, issues de la variété Deglet Noor et collectées dans les oasis algériennes de Doucen - Ouled Djellal (figure III-2), ont été obtenues par broyage du bois de pétiole de palmier à l'aide d'une raboteuse, ce qui a permis de produire des fibres de longueurs variables (figure III-3).



Figure III-2 Pétiole de palmier dattier collecté



Figure III-3 Broyage du bois de palmier et fibres obtenues

III.2.6 Eau

Conformément aux exigences de la norme NA 1966 concernant les eaux de mélange pour béton, l'eau du réseau de distribution a été utilisée pour le gâchage et la cure du béton.

III.2.7 Adjuvant

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, ajoutés au béton lors du malaxage ou avant sa mise en œuvre, à des doses inférieures à 5 % du poids du ciment, modifient les propriétés ou le comportement de ce dernier. L'adjuvant Sika ViscoCrete TEMPO-12 a été utilisé. Il s'agit d'un superplastifiant réducteur d'eau, polyvalent et de nouvelle génération, non chloré, à base de copolymère acrylique, avec une densité de 1.06. Cet adjuvant permet de produire un béton plus plastique, tout en améliorant sa stabilité et en limitant la ségrégation, même en cas de variations du taux d'eau (sika 2025).

III.3 Caractérisation des matériaux

Les différentes normes appliquées pour la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude sont comme suite :

- NA 5113 : Agrégats pour bétons
- NA 255 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des agrégats : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau
- NA 455 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des agrégats - Evaluation des fines - Equivalent de sable
- NA 2607-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des agrégats - partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage
- NA 5129-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des agrégats : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation

III.3.1 Ciment

Le ciment est constitué majoritairement de clinker Portland et contient des ajouts minéraux tels que la pouzzolane naturelle (matériau siliceux réagissant avec la chaux pour former des composés hydrauliques) et du calcaire broyé (carbonate de calcium - $CaCO_3$), améliorant ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Il présente des propriétés physiques (tableau III-1), chimiques (tableau III-2) et mécaniques spécifiques (tableau III-3), adaptées à la réalisation d'ouvrages en béton, nécessitant une prise rapide et une résistance élevée dès les premiers jours de durcissement.

Tableau III-1 Propriétés physiques du ciment utilisé (S.C.Tébessa 2025)

Propriétés physiques	**Valeurs**
Poids spécifique (kg/m³)	3110
Surface Spécifique Blaine (cm²/g)	3000
Temps de début de prise (min)	110 min (1h50min)
Temps de fin de prise (min)	178 min (2h58min)
Expansion à chaud (mm)	0.40
Expansion à froid (mm)	-
Refus % (45 µm)	11.2

Tableau III-2 Composition chimiques du ciment utilisé (S.C.Tébessa 2025)

Éléments	**Teneurs (%)**
Dioxyde de silicium (SiO_2)	21.05
Oxyde d'aluminium (AL_2O_3)	5.68
Oxyde de fer (Fe_3O_3)	3.50
Oxyde de calcium (CaO)	61.90
Oxyde de magnésium (MgO)	1.27
Trioxyde de soufre (SO_3)	2.11
Chlorures (CL)	0.002
Perte au feu (P.A.F)	3.45
Aluminate tricalcique (C_3A)	9.07

Tableau III-3 Propriétés mécaniques du ciment utilisé (S.C.Tébessa 2025)

Propriétés	**Age (jours)**	**Valeurs**
Résistance à la compression (MPA)	02	23.3
	07	40.0
	28	51.0
Résistance à la flexion (MPA)	02	4.7
	07	7.2
	28	8.1

III.3.2 Sable

Le tableau III-4 présente les masses volumiques calculés des deux types de sable étudiés.

Tableau III-4 Masses volumiques des Sable études

Type de sable	**Masse volumique apparente (Kg/m^3)**	**Masse volumique absolue (Kg/m^3)**
Sable de rivière	1521	2655.91
Sable de carrière	1529	1886.5

a. Equivalant de sable

Afin d'évaluer la propreté des deux types de sable étudiés et leur aptitude à être utilisés dans des bétons de haute qualité, les essais d'équivalent de sable ont été effectués. Cette méthode consiste à mesurer la hauteur totale (H_1) et la hauteur du sédiment propre (H_2) après lavage, permettant ainsi de calculer l'équivalent de sable (Es) en pourcentage.

Le calcul est réalisé selon la formule suivante :

$$Es = \frac{H_1}{H_2} \times 100$$

Es : L'équivalant de sable en (%)

H_1 : Hauteur total en cm

H_2 : Hauteur visible du sable en cm.

Ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans les tableau III-5.

Tableau III-5 Résultats des essais d'équivalent de sable

Sable	**Essai**	**H_1 (cm)**	**H_2 (cm)**	**Es (%)**	**Es_{moy} (%)**
Sable de rivière	1	11	7.8	70.9	71.5
	2	10.8	7.8	72.2	
Sable de carrière	1	10.6	7.9	74.5	73
	2	11	8	72.7	

Les deux types de sable étudiés affichent des valeurs d'équivalent de sable dépassant 70 %. Ce résultat indique une teneur très faible en impuretés fines (principalement d'origine argileuse), ce qui confirme leur conformité avec les exigences relatives à la propreté des agrégats pour la formulation de bétons de haute qualité.

b. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une méthode fondamentale pour déterminer la distribution granulométrique d'un échantillon d'agrégats. Elle consiste à séparer les particules selon leur taille à l'aide d'une série de tamis superposés, dont les ouvertures de maille diminuent progressivement du haut vers le bas. Chaque tamis retient les particules dont le diamètre est supérieur à l'ouverture de la maille, tandis que les plus petites passent au travers.

Cette séparation est généralement facilitée par un système de vibration mécanique, assurant une répartition homogène des particules et une efficacité optimale du tamisage. La durée du tamisage est déterminée en fonction de la nature du matériau et de la granulométrie recherchée, conformément aux normes en vigueur.

Les résultats obtenus permettent de tracer la courbe granulométrique, représentant la fraction massique des particules en fonction de leur diamètre. Cette courbe est essentielle pour évaluer des paramètres tels que le module de finesse.

Les résultats d'analyse granulométrique des deux types de sable sont représentés dans les tableaux III-6 et III-7 et la figure III-4 (courbe granulométrique).

Tableau III-6 Analyse granulométrique du sable de rivière

Masse utilisée (g)	**Tamis (mm)**	**Modules**	**Refus cumulés (g)**	**Refus cumulés (%)**	**Tamisât (%)**
1800	5	38	0	0	100
	3.15	36	44.65	2.48	97.51
	2.5	35	54	3	97
	1.25	32	386	21.44	78.56
	0.63	29	1014	56.33	43.65
	0.315	26	1369	76.05	23.95
	0.16	23	1563	86.83	13.17
	0.080	20	1793	99.61	0.4

Tableau III-7 Analyse granulométrique du sable de carrière

Masse utilisée (g)	Tamis (mm)	Modules	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
1930	5	38	0	0	100
	3.15	36	383.04	19.84	80.16
	2.5	35	477.45	24.73	75.27
	0.63	32	1472.45	76.29	23.71
	0.315	29	1703.2	88.24	11.76
	0.20	26	1799.57	93.24	6.76
	0.16	23	1858.91	96.31	3.69
	0.080	20	1926	99.79	0.21

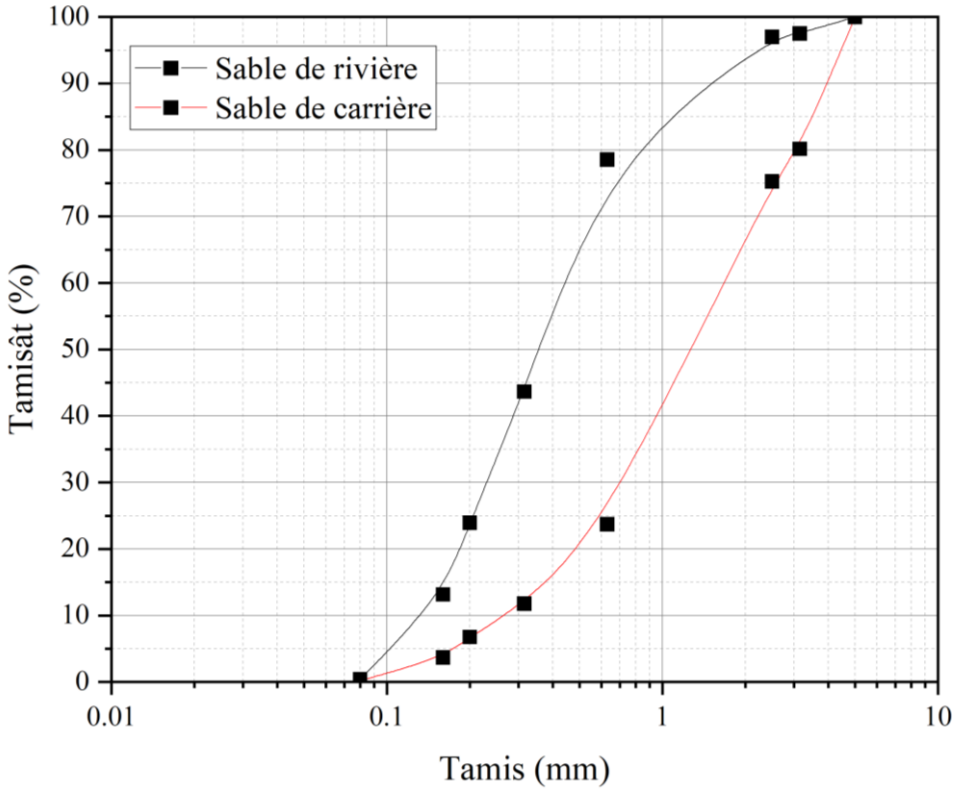


Figure III-4 Courbes granulométriques des sables étudiés

Pour la convection du béton, les sables utilisés doivent présenter une granulométrie équilibrée afin de garantir des performances optimales, notamment en termes de compacité, de résistance et de durabilité. Le degré de finesse d'un sable, qui correspond à sa capacité à répondre aux critères de distribution granulométrique, peut être quantifié par le calcul du module de finesse.

Selon la Norme Algérienne NA 5113, le module de finesse est défini comme étant

le centième de la somme des refus cumulés, exprimée en pourcentage, sur l'ensemble des tamis utilisés :

$$MF = \sum_{0.16}^{2.5} \frac{réfus\ cumuls\%}{100}$$

- Pour le sable de carrière : MF = 3.78
- Pour le sable de rivière : MF = 2.43

Les modules de finesse calculés révèlent les caractéristiques granulométriques spécifiques de chaque, le sable de carrière, caractérisé par une granulométrie relativement grossière, confère au sable béton une résistance mécanique accrue en raison de sa compacité, mais peut limiter la maniabilité. En revanche, le sable de rivière, avec sa granulométrie plus fine et régulière, est généralement préféré pour obtenir des bétons plus maniables, facilitant ainsi leur mise en œuvre.

En raison de sa granulométrie adaptée, le sable de rivière a été retenu pour la formulation visant à obtenir un béton à la fois résistant et maniable.

III.3.3 Agrégats naturels

Les propriétés physiques des agrégats naturels sont représentées dans le tableau III-8.

Tableau III-8 Propriétés physiques des agrégats naturels

Agrégat	**Masse volumique apparente (kg/m^3)**	**Masse volumique absolue (kg/m^3)**	**Absorption d'eau (%)**
AN 8/15	1402	2666.6	1.05 < 5
AN 15/25	1283	2721.2	1.21< 5

a. Essai Los-Angeles

L'essai de Los Angeles est utilisé pour évaluer la résistance combinée à l'impact et à l'usure des agrégats destinés au béton et autres applications de construction, contribuant ainsi à évaluer leur qualité et leur durabilité. L'essai, réalisé dans un cylindre avec des boulets, permet de mesurer le pourcentage d'éléments fines généré. Ce

pourcentage d'usure est un indicateur direct de la résistance d'agrégat à la fragmentation.

Selon la norme NA 5129-2, l'évaluation de la résistance à la fragmentation et à l'abrasion des agrégats est quantifiée par le coefficient de Los Angeles (LA). Ce coefficient représente le pourcentage massique des particules inférieures à 1,6 mm générées lors de l'essai. Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$LA = \frac{M - M'}{M} \times 100$$

Avec :

LA : coefficient de Los-Angeles

M : Masse de l'échantillon avant essai (g)

M' : Masse de l'échantillon sec après essai et tamisage (g).

Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau III-9 :

Tableau III-9 : Résultats d'essai Los-Angeles pour les agrégats naturels

Agrégat	**M (g)**	**M'(g)**	**LA (%)**
AN 8/15	5000	4189	16
AN 15/25	5000	4392	12

Les coefficients de Los Angeles, inférieurs à 20 %, obtenus témoignent d'une résistance exceptionnelle à la fragmentation des agrégats. Cette performance met en évidence leur capacité à être intégrés dans des formulations de béton haute performance.

b. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des agrégats naturel utilisés est présentée dans les tableaux III-10 et III-11, ainsi que dans la courbe granulométrique de la figure III-6.

Tableau III-10 Analyse granulométrique des AN 8/15

Masse utilisée (g)	**Tamis (mm)**	**Modules**	**Refus cumulés (g)**	**Refus cumulés (%)**	**Tamisât (%)**
4000	14	42.6	0	0	100
	12.5	42	677	16.92	83.08
	10	41	2983	74.57	25.43
	8	40	3995	99.87	0.125

Tableau III-11 Analyse granulométrique des AN 15/25

Masse utilisée (g)	**Tamis (mm)**	**Modules**	**Refus cumulés (g)**	**Refus cumulés (%)**	**Tamisât (%)**
6000	25	45	0	0	100
	20	44	1978.5	32.98	67.03
	16	43	5336.5	88.94	11.05
	14	42.6	5987.62	99.79	0.20

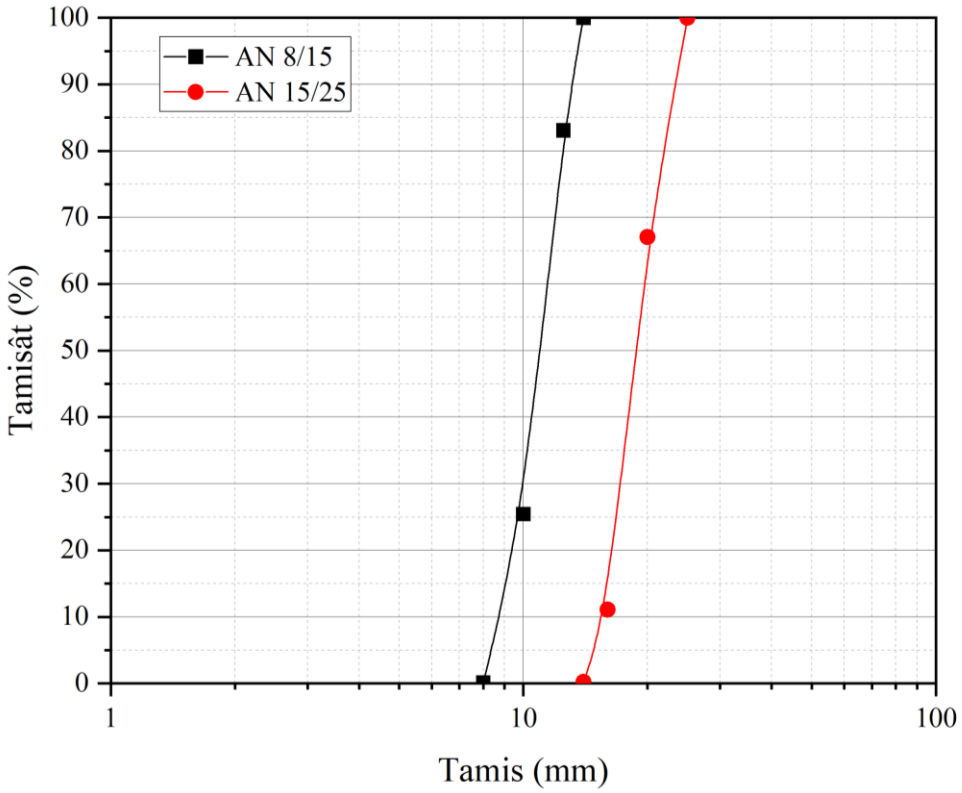


Figure III-5 Analyse granulométrique des agrégats naturels

III.3.4 Agrégats recyclés

Les propriétés physiques et les résultats de l'analyse granulométrique des agrégats recyclés sont détaillés dans les tableaux III-13, III-14 et III-15, et la courbe granulométrique est illustrée à la figure III-7.

Tableau III-12 Propriétés physiques des agrégats recyclés

Agrégat	**Masse volumique apparente (kg/m^3)**	**Masse volumique absolue (kg/m^3)**	**Absorption d'eau (%)**
AR 8/15	1072	2500	6.61
AR 15/25	1132	2589	4.84

Tableau III-13 Analyse granulométrique des AR 8/15

Masse utilisée (g)	**Tamis (mm)**	**Modules**	**Refus cumulés (g)**	**Refus cumulés (%)**	**Tamisât (%)**
4000	14	42.6	0	0	100
	12.5	42	1940	48.5	51.5
	10	41	3470	86.75	13.25
	8	40	3995	99.87	0.125

Tableau III-14 Analyse granulométrique des AR 15/25

Masse utilisée (g)	**Tamis (mm)**	**Modules**	**Refus cumulés (g)**	**Refus cumulés (%)**	**Tamisât (%)**
6000	25	45	0	0	100
	20	44	1240	20.66	79.34
	16	43	4785	79.75	20.25
	14	42.6	5975	99.85	0.15

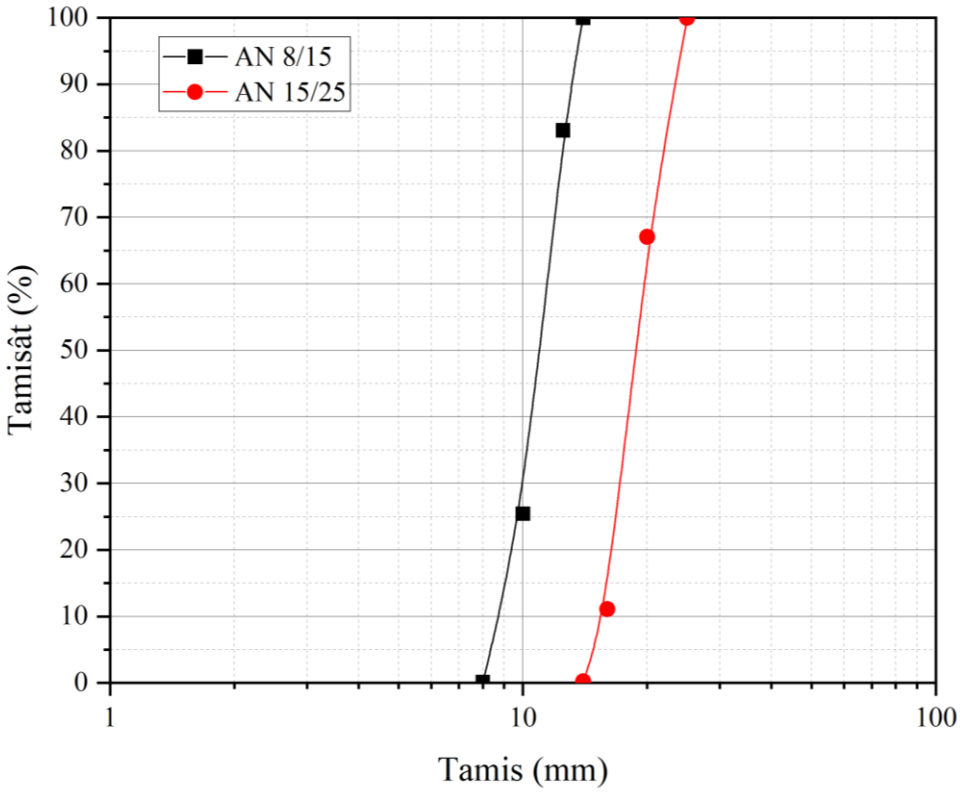


Figure III-6 Analyse granulométrique des agrégats recyclés

Par rapport aux agrégats naturels, les agrégats recyclés affichent une masse volumique absolue réduite, avec une diminution allant de 4.8 % à 6.23 %. De plus, leur capacité d'absorption d'eau est de 2 à 5 fois supérieure. Cette augmentation significative de l'absorption est principalement due à la présence de pâte de ciment adhérente à la surface des agrégats recyclés, ce qui entraîne une augmentation notable de leur porosité.

III.3.5 Fibres de palmier dattier

Les propriétés physiques des fibres de palmier dattier obtenues sont représentées dans le tableau III-15.

Tableau III-15 Propriétés physiques des fibres

Masse volumique apparente (kg/m^3)	**Masse volumique absolue (kg/m^3)**	**Absorption d'eau (%)**	**diamètre (mm)**
96	971	127,6	≤ 3

Les propriétés physiques des fibres jouent un rôle crucial dans la compréhension de leur comportement et de leur interaction au sein d'une matrice cimentaire. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux rapportés par (Rasoul, et al. 2020) concernant les

fibres extraites du pétiole de palmier dattier, qui mentionnent une masse volumique apparente de 160 ± 54 kg/m^3, une masse volumique absolue de 866 ± 20.5 kg/m^3, et une absorption d'eau de 146.32 ± 21 %. Toutefois, il convient de souligner que ces propriétés ne peuvent être considérées comme des constantes universelles. En tant que matériaux naturels, les fibres présentent une variabilité intrinsèque significative, influencée par plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci figurent la variété spécifique du palmier, la partie de d'où les fibres sont extraites, les conditions géographiques et climatiques de la région de récolte, ainsi que les méthodes d'extraction employées. Cette variabilité doit être prise en compte lors de la formulation et de la mise en œuvre du matériau, afin de garantir la constance et la performance requises.

Il est important de souligner que les agrégats recyclés et les fibres de palmier dattier ont été utilisés dans leur état brut, sans aucun traitement, ce qui permet de réduire les coûts et l'impact environnemental. Cette approche permet d'évaluer leur influence sur le comportement mécanique et thermique du béton.

III.4 Stratégies de formulation des mélanges

L'élaboration d'une composition de béton optimale, garantissant l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité requises, repose sur le dosage précis des agrégats, du ciment et de l'eau. La méthode de calcul « Dreux-Gorisse » a été retenue pour déterminer la composition du béton utilisée dans plusieurs mélanges.

Développée à partir de l'analyse de nombreuses formulations, elle bénéficie d'une large application à l'échelle mondiale, ce qui en fait une approche fiable. Par ailleurs, c'est la méthode la plus couramment utilisée en Algérie.

a. Données *de base*

Conformément à la méthode Dreux-Gorisse, les données de base requises pour le dimensionnement de la composition, dans le cadre de ce travail, sont présentées dans le tableau III-16.

Tableau III-16 Données de base (méthode Dreux-Gorisse)

Données de base	**Description (valeur)**
Consistance	Ferme
Serrage	Vibration normale (courante)
Dimension maximale d'agrégat	D = 25mm (√D = 5 mm)
Forme des agrégats	Graviers concassés et sable roulé
Caractéristiques du sable	Es=71%, MF=2,45
Qualité des agrégats	Bonne (courante)
Dosage en ciment	C = 350 kg/m^3
Coefficient de compacité (Dreux, et Festa 1998)	γ = 0,825

b. Dosage en eau

L'utilisation d'un superplastifiant réducteur d'eau a permis de choisir un rapport E/C de 0,5, afin d'obtenir un équilibre optimal entre la résistance mécanique, la durabilité et la maniabilité du béton :

$$E = 0.5\ C = 175\ l/\ m^3 \text{ de béton}$$

c. Dosage en agrégat

Les dosages des composants du béton pour un mètre cube ont été déterminés selon la méthode de Dreux-Gorisse et sont présentés dans le tableau III-17

Tableau III-17 Dosage des constituants pour 1 m³ de béton

Matériaux	**Dosage**
Ciment	350 (Kg/m^3)
Sable	756.51 (Kg/m^3)
AN 8/15	413.96 (Kg/m^3)
AN 15/25	740.22 (Kg/m^3)
Eau	175 (L)

Un plan expérimental comprenant dix-neuf formulations de béton a été élaboré, comprenant quatre catégories distinctes :

- BN : Béton contenant uniquement d'agrégats naturels (béton de référence) ;
- BRx : Bétons avec substitution des agrégats naturels par des agrégats recyclés à des proportions volumiques de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% et 100% ;

- BNFy : Bétons avec incorporation de fibres de palmier dattier dans le béton naturel à des pourcentages de 1 %, 2 % et 3 % par rapport à la masse de ciment ;
- BRxFy : Bétons avec remplacement simultané des agrégats à des proportions volumiques de 10 %, 20 % et 30 %, combiné à l'ajout de fibres des proportions de 1 %, 2 % et 3 %.

Les compositions détaillées de chaque mélange sont présentées dans le tableau III-18.

Tableau III-18 Dosages des constituants des différents mélanges (kg par m^3 de béton)

Mélanges	**Ciment**	**Sable 0/5**	**AN 8/15**	**AN 15/25**	**AR 8/15**	**AR 15/25**	**Fibre**	**W/C**	**SP %**
BN	350	756.5	414	740.2	-	-	-	0,51	1
BR10	350	756.5	372.6	666.2	38.9	70.4	-	0,51	1.5
BR20	350	756.5	331.2	592.2	77.6	140.9	-	0,51	1.5
BR30	350	756.5	289.8	518.2	116.4	211.3	-	0,51	2
BR40	350	756.5	248.4	444.1	155.2	281.7	-	0,51	2
BR50	350	756.5	207	370.1	194.1	352.1	-	0,53	3
BR100	350	756.5	-	-	388.1	704.3	-	0,57	3
BNF1	350	756.5	414	740.2	-	-	3.5	0,51	1.5
BR10F1	350	756.5	372.6	666.2	38.9	70.4	3.5	0,51	1.5
BR20F1	350	756.5	331.2	592.2	77.6	140.9	3.5	0,51	1.5
BR30F1	350	756.5	289.8	518.2	116.4	211.3	3.5	0,51	2
BNF2	350	756.5	414	740.2	-	-	7	0,51	1.5
BR10F2	350	756.5	372.6	666.2	38.9	70.4	7	0,51	1.5
BR20F2	350	756.5	331.2	592.2	77.6	140.9	7	0,51	2
BR30F2	350	756.5	289.8	518.2	116.4	211.3	7	0,51	2.5
BNF3	350	756.5	414	740.2	-	-	10.5	0,51	2
BR10F3	350	756.5	372.6	666.2	38.9	70.4	10.5	0,51	2
BR20F3	350	756.5	331.2	592.2	77.6	140.9	10.5	0,51	2
BR30F3	350	756.5	289.8	518.2	116.4	211.3	10.5	0,51	2.5

III.5 Préparation et mise en œuvre des éprouvettes

La fiabilité des résultats expérimentaux dans le domaine des matériaux de construction, et particulièrement pour le béton, repose fondamentalement sur la rigueur et la précision des étapes de préparation et de mise en œuvre des éprouvettes. Conformément aux exigences de fiabilité et de reproductibilité, la confection et la conservation des éprouvettes ont été réalisées conformément aux protocoles établis par la norme Algérienne NA 5074-2.

Au-delà du respect des procédures standard pour le moulage et la cure, une attention particulière a été portée à l'étape du malaxage, déterminante pour l'homogénéité et les propriétés finales du matériau. Afin d'optimiser spécifiquement les caractéristiques du béton, notamment en assurant une meilleure dispersion des fibres et en gérant la forte capacité d'absorption potentielle des agrégats et des fibres utilisées, une méthode de malaxage en deux étapes modifiée a été mise en œuvre. Cette approche est adaptée de méthode de malaxage en deux étapes proposée par Tam, et al. (2005), mais intègre des ajustements spécifiques adaptés à nos matériaux.

Les étapes fondamentales de cette méthode sont les suivantes :

1. Un pré-mélange à sec de sable, des agrégats, du ciment (figure III-8) et, le cas échéant, des fibres (figure III-9) est réalisé pendant environ 2 minutes pour garantir une distribution uniforme des constituants. La moitié de l'eau de gâchage est ensuite ajoutée et malaxée pendant 2 minutes supplémentaires. Le superplastifiant, préalablement dilué dans une fraction de l'eau restante, est introduit et l'ensemble est malaxé pendant une minute additionnelle. Durant cette phase, le superplastifiant agit comme un agent modificateur de la rhéologie, en enrobant les surfaces des agrégats et des fibres pour faciliter la mobilité de la pâte de ciment autour de ces matériaux poreux.
2. L'ajout progressif de l'eau restante est effectué pour un contrôle précis de la quantité totale d'eau nécessaire, visant à optimiser l'ouvrabilité sans risque de sursaturation. L'évaluation de l'ouvrabilité est réalisée immédiatement après le malaxage final par des essais d'affaissement. L'objectif était de maintenir l'affaissement dans une plage cible, fixée entre 4 et 5 cm, afin d'assurer une

maniabilité constante du béton pour le moulage des éprouvettes. Si l'affaissement s'écartait de cette plage, des ajustements étaient réalisés soit sur le dosage en superplastifiant (conformément aux préconisations du fabricant), soit par une légère correction de la teneur en eau, pour ramener l'ouvrabilité à la valeur désirée avant le moulage.



Figure III-7 Phase de malaxage à sec (sable, agrégats et ciment)



Figure III-8 Ajout des fibres dans le mélange

Après le malaxage, lorsque l'ouvrabilité souhaitée a été atteinte, le béton frais a été versé dans des moules prismatiques (40×10×10 cm^3) et cubiques (10×10×10 cm^3), préalablement graissés pour faciliter le démoulage sans endommager les éprouvettes. Le remplissage a été réalisé en plusieurs couches, chacune étant compactée systématiquement par vibration à l'aide d'une table vibrante. Cette méthode garantit une compacité optimale et des caractéristiques mécaniques élevées pour le béton durci. Les éprouvettes ont ensuite été conservées dans le laboratoire dans des conditions de température stables (figure III-12).



Figure III-9 Eprouvettes après moulage

Le démoulage a été effectué avec soin après 24 heures. Par la suite, les éprouvettes ont été placées en cure à l'eau à 20 ± 2 °C pendant 28 jours (figure III-14). Cette étape est cruciale pour assurer l'hydratation optimale du ciment et permettre au béton de maximiser ses propriétés mécaniques et sa durabilité.



Figure III-10 Conservation des éprouvettes en cure à l'eau

III.6 Campagne d'essais réalisée

Deux familles d'essais ont été menées pour la formulation et la caractérisation de nos mélanges :

- Essais à l'état frais, pour évaluer la maniabilité.
- Mesures et essais à l'état durci, pour déterminer les propriétés physiques, mécaniques et thermiques.

Le tableau III-19 détaille, pour chaque type d'essai, la norme appliquée ainsi que les dimensions des éprouvettes correspondantes.

Tableau III-19 Normes associées à chaque essai ou mesure effectuée

Mesure ou essai	Eprouvette	Norme
Détermination de la consistance du béton frais	-	NA 5092-2 : Essai pour béton frais - Essais d'affaissement
Masse Volumique	10×10×10 cm^3	NA 5074-7 : Essais pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton durci
Absorption d'eau	10×10×10 cm^3	NBN B 15-215 : Essais sur béton durci - Absorption d'eau par immersion
Résistance à la compression	10×10×10 cm^3	NA 5074-3 : Essais pour béton durci - résistance à la compression des éprouvettes
Résistance à la traction par flexion	40×10×10 cm^3	NA 17050 : Résistance en traction par flexion d'éprouvettes de béton durci 2013
Vitesse ultrasonique	10×10×10 cm^3	NA 5027 : Essais pour béton dans les structures - Détermination de la vitesse de propagation des ultrasons
Conductivité thermique	10×10×10 cm^3	NF EN 993–15 : Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle)

III.6.1 Essai d'affaissement

L'évaluation de la maniabilité du béton frais a été réalisée au moyen de l'essai au cône d'Abrams (figure III-12). La procédure consiste à compacter un volume de béton frais dans un moule en forme de tronc de cône, puis à mesurer la hauteur d'affaissement après le retrait du moule.



Figure III-11 Cône d'Abrams

Afin d'obtenir une consistance ferme, caractérisée par un affaissement cible de 4 à 5 cm pour l'ensemble des mélanges, le dosage de l'adjuvant a été ajusté dans la plage recommandée par le fabricant.

III.6.2 Essai de compression

L'essai de compression, méthode essentielle pour évaluer la résistance à la compression, propriété fondamentale pour la sécurité et la durabilité des constructions en béton, a été appliqué afin de caractériser le comportement mécanique des différentes formulations étudiées. Les éprouvettes, conservées en cure à l'eau jusqu'à l'âge de 28 jours, ont été testées sur une presse hydraulique IBERTEST (figure III-13). La résistance à la compression a été calculée à partir de la charge maximale enregistrée, avec une vitesse de chargement de 8 KN/s, et les résultats présentés constituent les moyennes obtenues sur trois éprouvettes, assurant ainsi une certaine fiabilité statistique.



Figure III-12 Essai de compression

III.6.3 Essai de flexion (Quatre points)

La résistance à la traction par flexion (module de rupture) des bétons, propriété essentielle pour prévoir leur comportement sous sollicitations mécaniques et maîtriser la propagation des fissures, a été évaluée par l'essai de flexion en quatre points. Des éprouvettes prismatiques, conservées en cure à l'eau jusqu'à l'âge de 28 jours, ont été soumises à un chargement jusqu'à rupture via des rouleaux supérieurs et inférieurs (figure III-14), ce qui générait un moment fléchissant maximal dans la section médiane.

La charge maximale enregistrée lors de la rupture a permis de déterminer la valeur de la résistance à la traction par flexion.

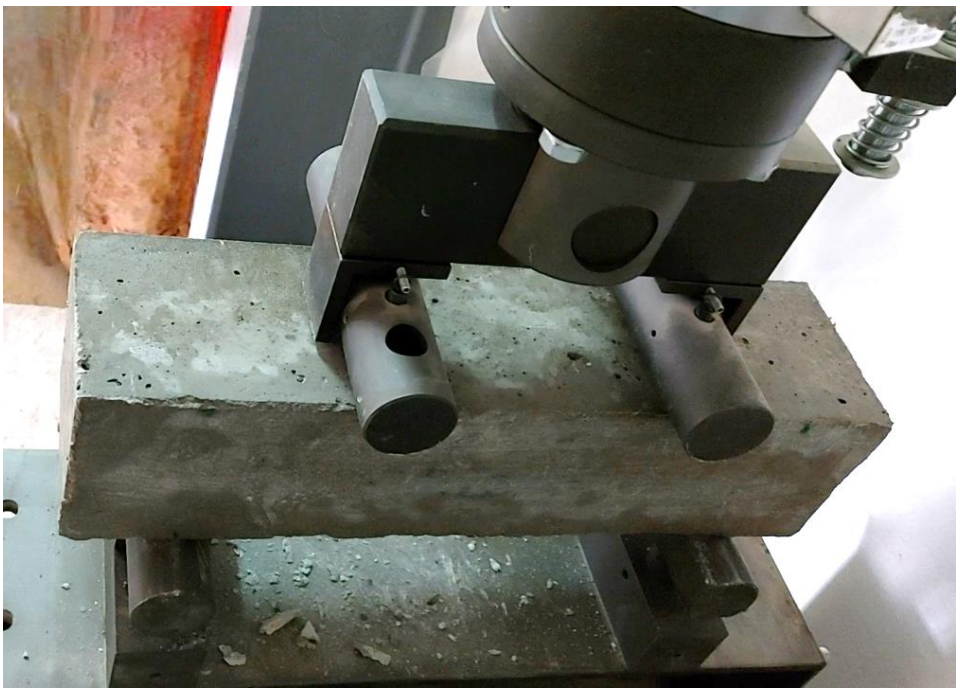


Figure III-13 Essai de flexion

III.6.4 Essai aux ultrasons

Le module d'élasticité dynamique, souvent désigné par Ed, est une propriété mécanique essentielle qui caractérise la rigidité d'un matériau lorsqu'il est soumis à des déformations dynamiques. Contrairement au module d'élasticité statique, obtenu à partir d'essais de flexion ou de compression réalisés à faible vitesse, le module d'élasticité dynamique est déterminé par des essais dynamiques non destructifs, tels que les mesures par ondes ultrasonores ou les essais de fréquence de résonance.

La mesure du module d'élasticité dynamique par ultrason repose sur l'analyse de la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans un matériau. L'essai par ultrasons constitue une technique d'analyse non destructive permettant de sonder l'intérieur d'un matériau solide en mesurant la vitesse de transmission des ondes acoustiques à haute fréquence. Ces ondes, émises par un capteur spécifique, traversent l'échantillon et sont ensuite détectées à l'opposé, ou renvoyées au même capteur selon la méthode utilisée. Les ondes ultrasonores sont transmises via un transducteur à haute fréquence à travers un échantillon. Le temps de transit de ces ondes est mesuré entre l'émetteur et le récepteur. Le temps nécessaire au trajet des ondes sur une distance donnée sert à

déterminer leur vitesse de propagation, indicatrice de certaines propriétés physiques du matériau. Cette vitesse dépend de divers facteurs tels que la masse volumique, la rigidité (notamment le module d'élasticité), ainsi que la structure interne, incluant la présence de vides, de fissures ou d'inclusions. En général, plus le béton est dense, cohésif et sans défauts internes, plus la propagation des ondes y est rapide. Ces facteurs rendent difficile l'établissement de corrélations directes et fiables avec les propriétés mécaniques du béton, ce qui peut introduire des incertitudes dans les résultats (Ivanchev 2022).

Par ailleurs, la présente étude accordera une importance particulière à l'emploi de cette méthodes non destructives, essai ultrasonique, pour l'évaluation du comportement du béton recyclé renforcé par des fibres de palmier dattier. Cette technique est un outil fiable pour détecter les défauts internes, estimer la compacité et suivre l'évolution des propriétés mécaniques au fil du temps. Elle constitue un complément essentiel aux essais destructifs, surtout dans le cas des matériaux composites peu homogènes comme ceux intégrant des agrégats recyclés et des fibres végétales. L'intégration de cette méthode dans la méthodologie expérimentale permettra d'assurer un diagnostic plus précis et global du matériau étudié.

La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques a été mesurée sur des éprouvettes cubiques en utilisant la méthode de transmission directe. Les transducteurs (émetteur et récepteur) ont été positionnés sur deux faces opposées et parallèles de l'éprouvette (figure III-15). Le temps de parcours de l'impulsion ultrasonore à travers la longueur de l'éprouvette a été enregistré, et la vitesse de propagation a été calculée pour chaque éprouvette à l'aide de la formule :

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

Où

V_U est la vitesse de propagation des ultrasons, en km/s ;

L est la longueur de parcours, en mm ;

T est le temps de parcours, en µs.

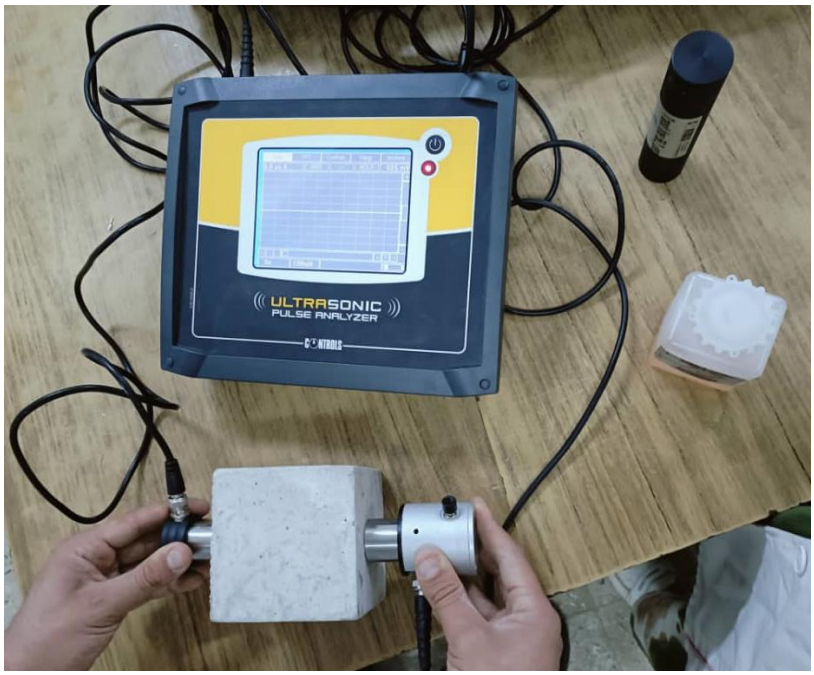


Figure III-14 Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique

Le module d'élasticité dynamique (Ed) est ensuite calculé directement à partir de la vitesse de propagation des ondes calculée, en utilisant la relation fondamentale suivante (Dreux, et Festa 1998):

$$E_d = V_U^2 \times \rho \times \frac{(1+\nu) \times (1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

Où

E_d : Module d'élasticité dynamique, exprimé en MPa

V_U : La vitesse des ondes, exprimée en Km/s

ρ : La masse volumique du béton exprimée en Kg/m^3

ν : Coefficient de poisson du béton, varie de 0.15 à 0.30

III.6.5 Mesure de la conductivité thermique

Une compréhension approfondie des caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés dans la construction est cruciale pour optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments et améliorer leur performance thermique. Parmi ces propriétés, la conductivité thermique se distingue comme un paramètre clé influençant directement les transferts de chaleur au sein des matériaux.



Figure III-15 CT-mètre

La conductivité thermique des différentes formulations de béton étudiées a été évaluée à l'aide de l'appareil CT-mètre (figure III-16), qui repose sur la méthode du fil chaud. Le principe de fonctionnement Cet appareil repose sur la mesure de l'évolution temporelle de la température d'un capteur, situé à proximité d'un élément chauffant (le fil chaud) au sein d'une sonde (figure III-17). L'élévation thermique enregistrée durant une période de chauffage, en fonction des caractéristiques du matériau testé et du type de sonde employé, permet de déterminer la conductivité thermique.

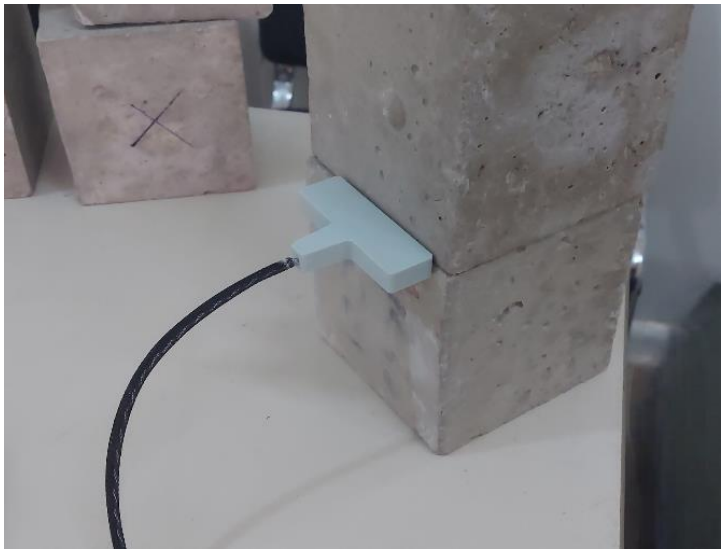


Figure III-16 Sonde du CT-mètre positionnée entre deux échantillons

III.7 Conclusion

Ce chapitre a détaillé la démarche méthodologique adoptée pour cette étude expérimentale. Les matériaux constitutifs des bétons étudiés ont été rigoureusement sélectionnés et caractérisés conformément aux normes en vigueur. Cela inclut le ciment Portland composé, le sable de rivière (choisi pour sa finesse, favorisant l'ouvrabilité), les agrégats naturels de différentes classes granulométriques, et des agrégats recyclés obtenus par concassage manuel, dont la caractérisation a confirmé leur masse volumique plus faible et leur absorption d'eau significativement plus élevée que celles des agrégats naturels, ainsi que les fibres de palmier dattier issues de la variété locale Deglet Noor.

La formulation des différents mélanges de béton, basée sur la méthode Dreux-Gorisse, a permis de déterminer les proportions optimales des différents constituants afin d'obtenir un béton de consistance ferme. Les caractéristiques des sables et des agrégats ont été intégrées dans ce processus de formulation, en s’appuyant sur les résultats des analyses granulométriques.

En outre, le programme expérimental a été défini avec rigueur, comprenant la conception de dix-neuf formulations distinctes de béton, avec une gamme de compositions variant le taux de substitution des agrégats naturels par des agrégats recyclés et le taux d'incorporation des fibres de palmier dattier, ce qui permet une analyse détaillée et combinée de leurs impacts sur les propriétés du béton.

La méthodologie de mise en œuvre des bétons a également été exposée, incluant l’utilisation d’une méthode de malaxage en deux étapes modifiée, spécifiquement adaptée pour améliorer l’homogénéité du mélange et la dispersion des fibres, tout en gérant l’absorption d’eau élevée des agrégats recyclés et des fibres, notamment grâce à l’utilisation d’un superplastifiant. Les essais réalisés, tant à l’état frais (essai d'affaissement) qu’à l’état durci (mesures de masse volumique et d'absorption d’eau, essais de résistance à la compression et à la traction par flexion, essai ultrasonique ainsi que la mesure de la conductivité thermique), ont été décrits avec précision, incluant les normes correspondantes et les dimensions des éprouvettes utilisées.

Cette démarche expérimentale constitue la base méthodologique des investigations, dont les résultats seront présentés et discutés dans les chapitres suivants. Elle permettra d'évaluer l'influence et l'impact des agrégats recyclés et des fibres de palmier dattier sur les performances du béton.

Chapitre IV Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse détaillée des résultats des essais issus de l'investigation menée sur l'influence combinée du remplacement des agrégats naturels par des agrégats recyclés et de l'incorporation de fibres de palmier dattier sur les performances du béton, élaboré selon une méthode de malaxage en deux étapes modifiée.

Les résultats des essais sont exposés ici tant à l'état frais, caractérisé par la mesure de la consistance via le cône d'Abrams, qu'à l'état durci. Pour ce dernier, l'étude porte sur un ensemble de propriétés fondamentales : la masse volumique, l'absorption d'eau, les résistances mécaniques en compression et en flexion, module d'élasticité, ainsi que la conductivité thermique. Ces données empiriques feront l'objet d'une discussion approfondie visant à expliquer les mécanismes par lesquels les agrégats recyclés et les fibres de palmier dattier modifient les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques du matériau composite.

L'objectif est d'évaluer de manière critique le potentiel de ces matériaux alternatifs pour le développement de bétons innovants et plus durables dans le secteur de la construction.

IV.2 Affaissement

L'objectif fixé pour les différentes formulations de béton était d'obtenir un affaissement compris entre 4 et 5 cm, ce qui a été vérifié par l'analyse de leur maniabilité. Afin d'assurer cette cohérence, le dosage du superplastifiant a été ajusté de 1 à 2.5 % du poids du ciment, tout en maintenant un rapport E/C constant de 0.51.

Cependant, pour les mélanges contenant une proportion plus élevée d'agrégats recyclés, notamment 50 % et 100 % de substitution, une augmentation du dosage de superplastifiant à 3 % (la limite recommandée par le fabricant à ne pas dépasser) a été nécessaire. Parallèlement, le rapport E/C a été ajusté à 0.53 pour la substitution à 50 % et à 0.57 pour la substitution totale des agrégats. Malgré ces ajustements, l'affaissement

pour une substitution de 100 % est resté à 3 cm, ce qui s'explique par l'absorption importante des agrégats recyclés affectant ainsi la fluidité du mélange.

La méthode de malaxage en deux étapes modifiée a permis de réduire partiellement l'absorption des agrégats recyclés et des fibres de palmier dattier, améliorant ainsi la maniabilité des différentes formulations de béton tout en conservant un rapport E/C comparable. En effet, lors de la première étape, l'ajout du superplastifiant après le malaxage des composants avec la moitié de l'eau a joué un rôle de modificateur rhéologique. Cette action a favorisé l'enrobage des agrégats recyclés et des fibres de palmier dattier, augmentant ainsi la mobilité de la pâte cimentaire autour de ces matériaux à forte absorption d'eau.

Cette approche a limité les écarts de maniabilité entre les diverses compositions, garantissant que les variations des propriétés mécaniques observées sont principalement attribuables aux interactions entre les agrégats recyclés, les fibres de palmier dattier et la matrice cimentaire, et non à des différences de maniabilité du mélange.

IV.3 Évaluation des performances du béton recyclé

Les résultats expérimentaux relatifs aux propriétés physiques, mécaniques et thermique des divers mélanges de béton recyclé sont présentés dans les tableaux IV-1, IV-2 et IV-3.

Tableau IV-1 Propriétés physiques des différents mélanges de béton recyclé

Mélange	**Masse volumique (Kg/m^3)**	**Absorption d'eau (%)**
BN	2336	4.36
BR10	2313	4.72
BR20	2304	5.05
BR30	2288	5.66
BR40	2271	5.97
BR50	2251	6.3
BR100	2188	8.14

Tableau IV-2 Propriétés mécaniques des différents mélanges de béton recyclé

Mélange	**Résistance à la compression (MPa)**	**Résistance à la traction par flexion (MPa)**	**Module d'élasticité (MPa)**
BN	42.32	5.274	33.76
BR10	40.09	4.968	32.16
BR20	37.35	4.788	31.29
BR30	36.30	4.583	30.17
BR40	34.64	4.482	29.03
BR50	33.44	4.144	28.54
BR100	27.29	3.661	25.38

Tableau IV-3 Conductivité thermique des différents mélanges de béton recyclé

Mélange	**Conductivité thermique (W/mk)**
BN	1.844
BR10	1.804
BR20	1.712
BR30	1.633
BR40	1.560
BR50	1.526
BR100	1.337

IV.3.1 Masse volumique

La variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution des agrégats naturels par des agrégats recyclés est illustrée à la figure IV-1. Les résultats mettent en évidence une diminution progressive de la masse volumique du béton en fonction de l'augmentation du taux de substitution des agrégats recyclés. À un taux de substitution de 100 %, la masse volumique du béton a diminué de 2330 kg/m^3 à 2180 kg/m^3 (tableau IV-1), correspondant à une réduction globale de 6.5 %.

Ce comportement peut être attribué aux caractéristiques propres des agrégats recyclés, qui présentent généralement une masse volumique plus faible et une capacité d'absorption d'eau plus élevée que les agrégats naturels (tableaux III-8 et III-12).

Cette observation est cohérente avec les conclusions de Wang, et al. (2021), qui soulignent que le mortier adhérent aux agrégats recyclés ayant une porosité supérieure

et une masse volumique inférieure à celles des agrégats naturels, entraîne une masse volumique généralement plus faible du béton recyclé. Ils indiquent aussi qu'en moyenne, la masse volumique du béton diminue d'environ 5 % lorsque tous les agrégats sont remplacés.

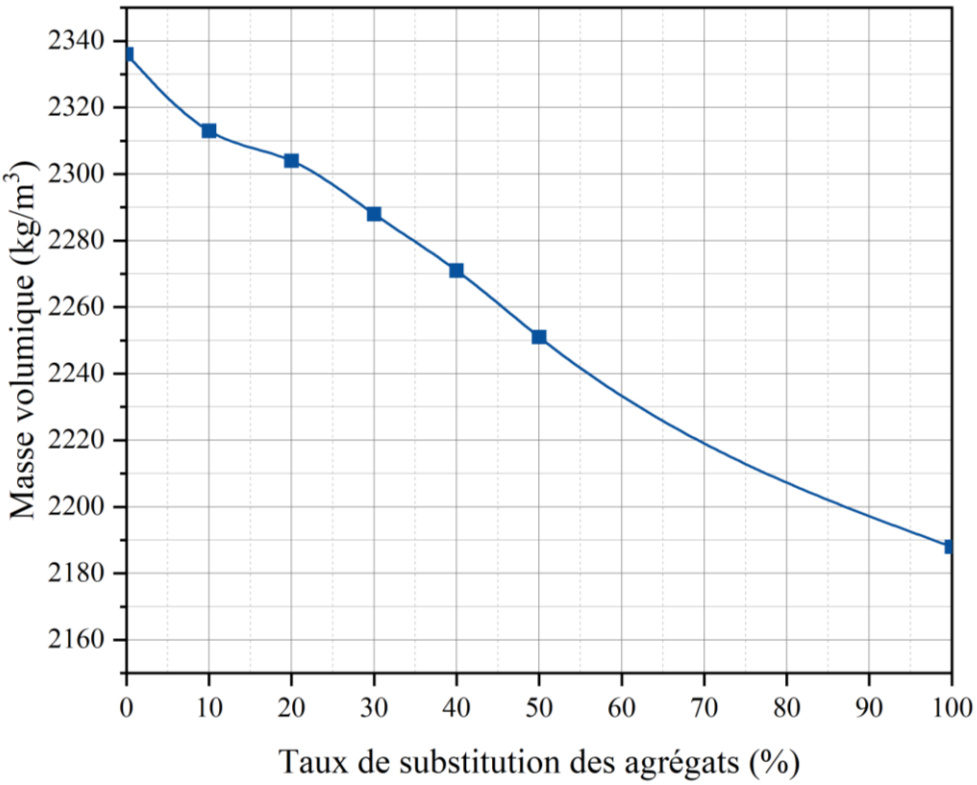


Figure IV-1 Influence du taux de substitution des agrégats sur la masse volumique

De plus, Chakradhara Rao et al. [18] ont également rapporté que la masse volumique du béton recyclé diminue de 11.08 % pour un remplacement total par des agrégats recyclés.

IV.3.2 Absorption d'eau

L'effet du remplacement des agrégats sur l'absorption d'eau est présenté dans la figure IV-2. Les résultats montrent une augmentation linière de l'absorption d'eau à mesure que le taux de remplacement augmente, passant de 4.36 % pour le béton naturel à 5.66 %, 6.30 % et 8.14 % pour des taux de substitution de 30 %, 50 % et 100 % d'agrégats recyclés, respectivement (tableau IV-1), soit une augmentation respective de 29.81 %, de 44.49 % et de 86.68 % par rapport au béton conventionnel.

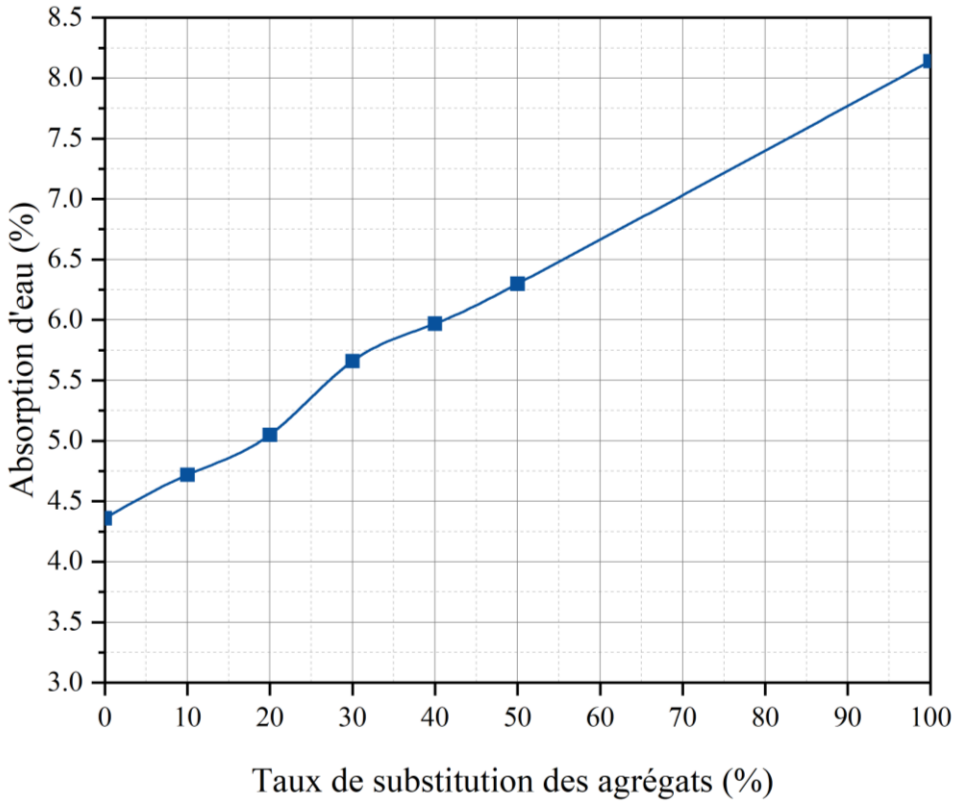


Figure IV-2 Influence du taux de substitution des agrégats sur l'absorption d'eau

Cette tendance s'explique par la porosité accrue des agrégats recyclés, due à la présence de mortier résiduel adhérent. La structure poreuse des agrégats recyclés favorise significativement l'absorption d'eau, leur capacité d'absorption étant 3 à 5 fois supérieure à celle des agrégats naturels (tableaux III-8 et III-12).

IV.3.3 Résistance à la compression

La figure IV-3 illustre la variation de la résistance à la compression du béton en fonction du taux de substitution des agrégats. Les résultats mettent en évidence une diminution progressive de la résistance mécanique du béton à mesure que la proportion d'agrégats recyclés augmente. Plus précisément, pour un taux de substitution de 30 %, 50 % et 100 %, les résistances à la compression diminuent respectivement de 14.2 %, 20.9 % et 35.5 % par rapport au béton de référence.

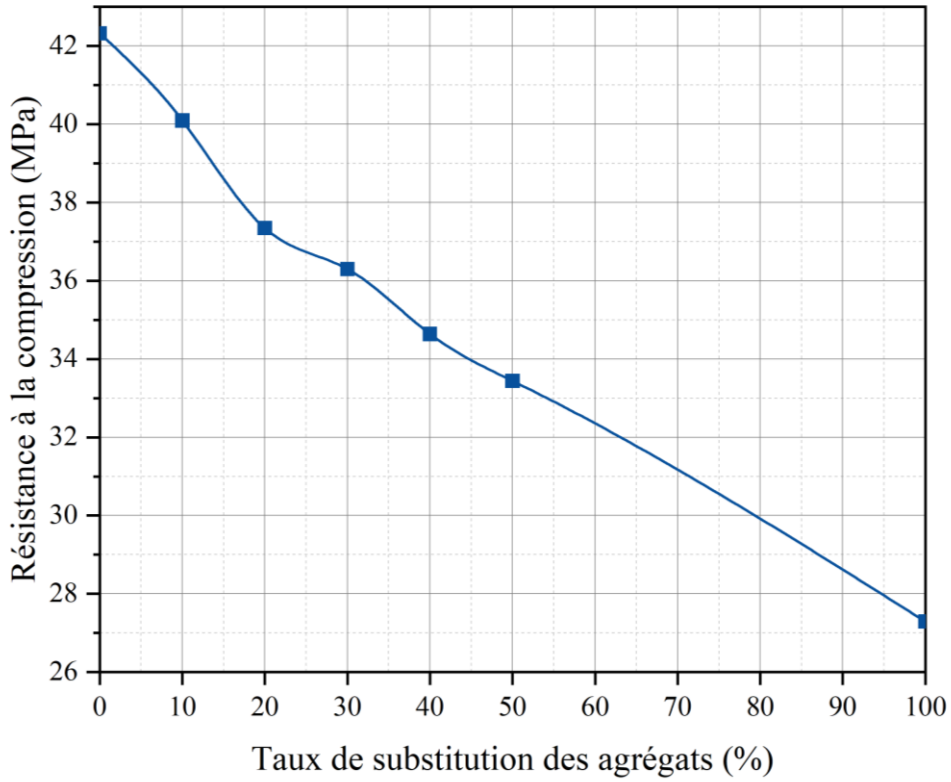


Figure IV-3 Influence du taux de substitution des agrégats sur la résistance à la compression

Ces observations s'alignent avec les résultats de recherches antérieures (Bairagi, et al. 1993; Chakradhara Rao, et al. 2011b; Chen 2013; Damdelen 2018; Rahal 2007), qui attribuent cette baisse de résistance à la fragilité des zones de transition interfaciale dans le béton recyclé. De plus, la présence de mortier résiduel sur les agrégats recyclés favorise la formation d'une multitude de micropores et de fissures, susceptibles d'altérer la performance mécanique du béton recyclé.

Cependant, l'utilisation de la méthode de malaxage en deux étapes modifiée a permis d'améliorer significativement la résistance à la compression, notamment pour une substitution inférieure à 50 %. Ces résultats indiquent que cette méthode compense partiellement les pertes de performance dues aux agrégats recyclés, offrant ainsi une voie vers des applications durables dans le secteur de la construction, où le béton recyclé pourrait remplacer le béton naturel sans compromettre de manière significative les exigences mécaniques.

IV.3.4 Résistance à la traction par flexion

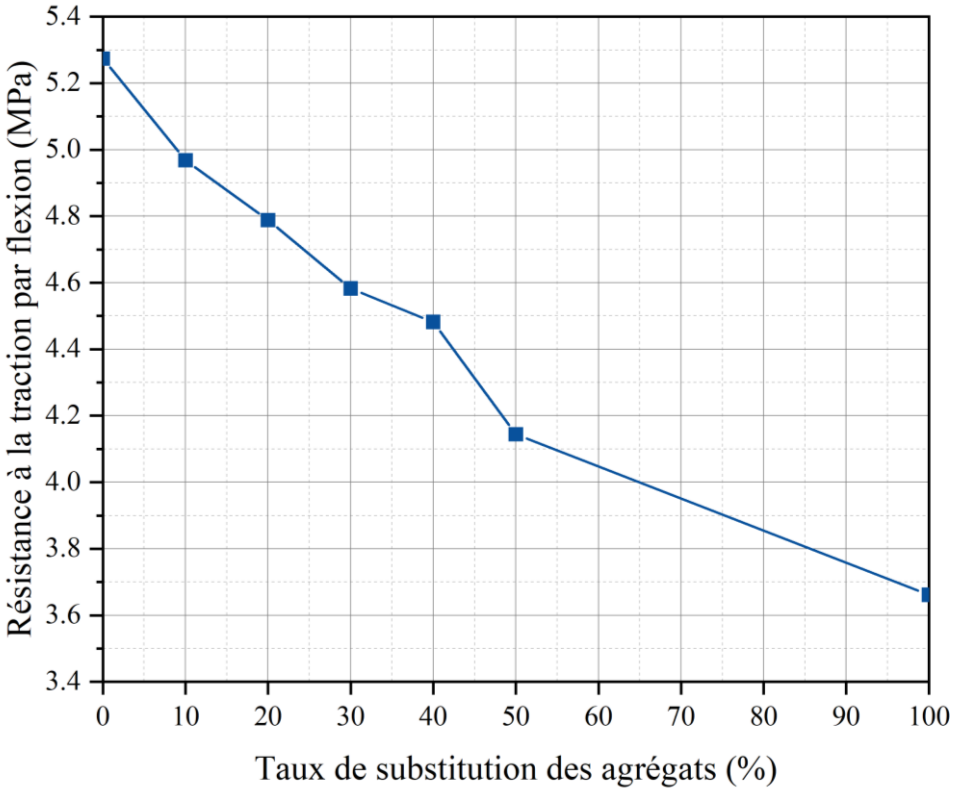


Figure IV-4 Influence du taux de substitution des agrégats sur la résistance à la traction par flexion

La figure IV-4 illustre la variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'augmentation des taux de remplacement des agrégats, mettant en évidence une diminution progressive à mesure que la teneur en agrégats recyclés augmente. Ainsi, la résistance à la traction par flexion du béton diminue de 13.1 %, 21.42 % et 30.58 % pour des taux de substitution de 30 %, 50 % et 100 %, respectivement.

Ces résultats sont cohérents avec les recherches antérieures menées de Chakradhara Rao, et al. (2011b) et Chen (2013) qui ont observé, en fonction de la qualité et du traitement des agrégats recyclés, une réduction de 30 % à 50 % de la résistance à la flexion pour un remplacement total des agrégats. Comme discuté précédemment, les caractéristiques des agrégats recyclés, à savoir une porosité élevée et une résistance intrinsèque inférieure à celle des agrégats naturels, perturbent l'adhérence entre les agrégats et la matrice cimentaire. Ce phénomène favorise la formation de microfissures et de zones de faiblesse, limitant ainsi la transmission des contraintes au sein de la matrice cimentaire, ce qui compromet les propriétés mécaniques du béton recyclé.

IV.3.5 Module d'élasticité

La figure IV-5 montre que le module d'élasticité dynamique du béton recyclé diminue à mesure que le taux de substitution augmente. Cette diminution du module d'élasticité est respectivement de 10.62 %, 12.48 % et 24.8 % pour les taux de remplacement de 30 %, 50 % et 100 %.

Cette tendance est en accord avec les résultats obtenus par Pavlů, et Šefflová (2014), qui ont observé une diminution de 24.57 % du module d'élasticité dynamique lorsqu'un taux de substitution de 100 % était utilisé. De manière similaire, Wang, et al. (2021) rapportent une réduction moyenne du module d'élasticité de 4 %, 15 % et 23 % pour des taux de substitution respectivement de 25 %, 50 % et 100 %.

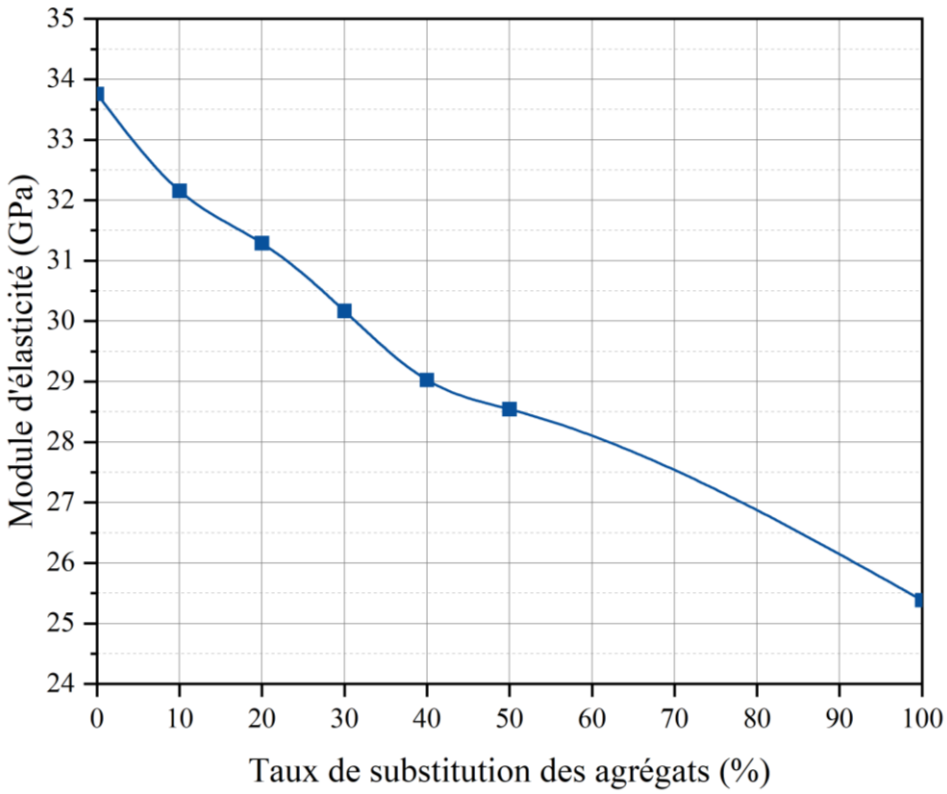


Figure IV-5 Influence du taux de substitution des agrégats sur le module d'élasticité

IV.3.6 Conductivité thermique

La figure IV-6 représente l'influence de la substitution des agrégats sur la conductivité thermique du béton, et met en évidence une diminution progressive de cette conductivité à mesure que le taux de remplacement augmente. En comparaison avec le béton de référence, la conductivité thermique des bétons contenant 30 %, 50 % et 100

% d'agrégats recyclés diminue respectivement de 12.9 %, 19.47 % et 31.11 %. Ces observations sont cohérentes avec les résultats des études précédentes de Sargam, et al. (2020) et Zhu, et al. (2015), qui rapportent des réductions similaires, allant de 10 % à 20 % pour des taux de remplacement de 30 % à 50 %, et atteignant environ 30 % pour des remplacements complets.

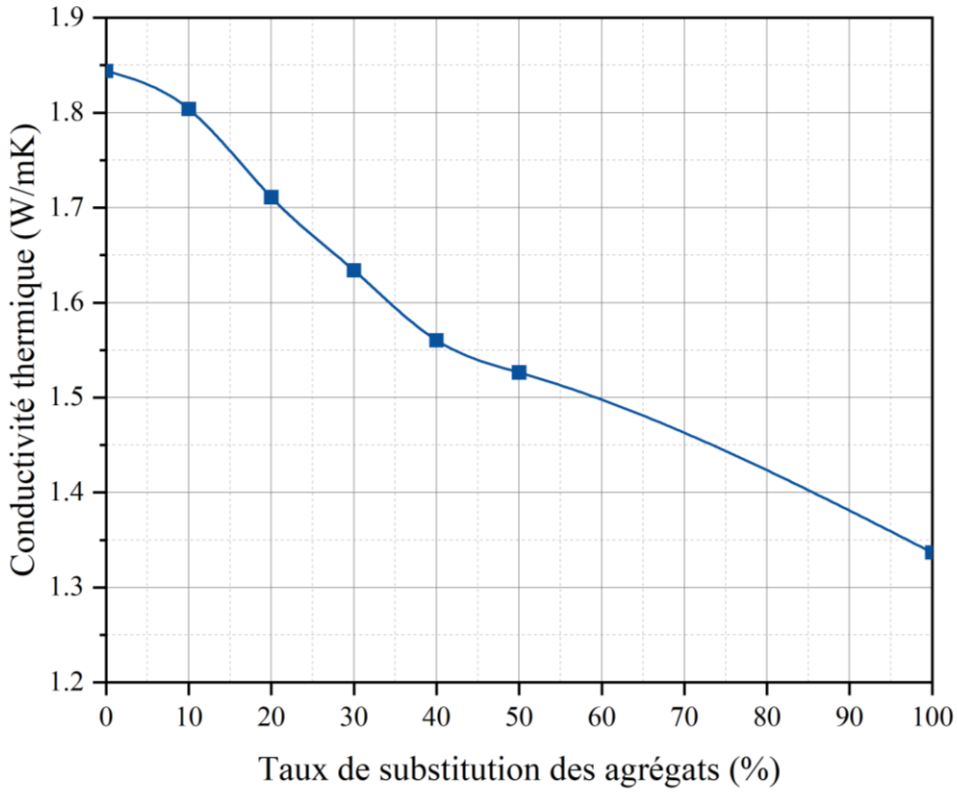


Figure IV-6 Influence du taux de substitution des agrégats sur la conductivité thermique

Cette réduction est attribuée à l'augmentation de la porosité et à la diminution de la masse volumique des agrégats recyclés, qui perturbent les voies de transfert de chaleur et créent des espaces isolants, améliorant ainsi les performances thermiques.

Ces résultats mettent en évidence le potentiel des agrégats recyclés en tant que matériau de construction durable, améliorant les performances thermiques tout en réduisant les empreintes énergétiques et en favorisant des pratiques respectueuses de l'environnement.

IV.4 Évaluation des performances du béton recyclé renforcé par les fibres de palmier dattier

Les résultats expérimentaux relatifs aux propriétés physiques, mécaniques et

thermique des différents mélanges de béton renforcé par fibres sont présentés dans les tableaux IV-4, IV-5 et IV-6.

Tableau IV-4 Propriétés physiques des mélanges de béton renforcé par les fibres

Mélange	**Masse volumique (Kg/m^3)**	**Absorption d'eau (%)**
BN	2336	4.36
BNF1	2298	4.86
BR10F1	2294	5.26
BR20F1	2283	5.57
BR30F1	2267	5.97
BNF2	2290	5.23
BR10F2	2283	5.43
BR20F2	2276	5.8
BR30F2	2251	6.44
BNF3	2278	5.38
BR10F3	2262	5.71
BR20F3	2249	6.2
BR30F3	2243	6.82

Tableau IV-5 Propriétés mécaniques des mélanges de béton renforcé par les fibres

Mélange	**Résistance à la compression (MPa)**	**Résistance à la traction par flexion (MPa)**	**Module d'élasticité (MPa)**
BN	42.32	5.274	33.76
BNF1	32.29	4.272	30.30
BR10F1	31.81	4.224	29.37
BR20F1	31.55	4.136	29.15
BR30F1	30.53	4.068	29.02
BNF2	40.91	5.168	32.79
BR10F2	42.19	5.180	33.04
BR20F2	41.52	5.070	32.23
BR30F2	40.31	4.905	30.93
BNF3	39.88	4.905	30.87
BR10F3	37.15	4.655	30.74
BR20F3	36.72	4.531	29.99
BR30F3	35.04	4.484	29.14

Tableau IV-6 Conductivité thermique des mélanges de béton renforcé par les fibres

Mélange	**Conductivité thermique (W/mk)**
BN	1.844
BNF1	1.803
BR10F1	1.761
BR20F1	1.630
BR30F1	1.548
BNF2	1.711
BR10F2	1.704
BR20F2	1.615
BR30F2	1.527
BNF3	1.624
BR10F3	1.576
BR20F3	1.507
BR30F3	1.4036

IV.4.1 Masse volumique

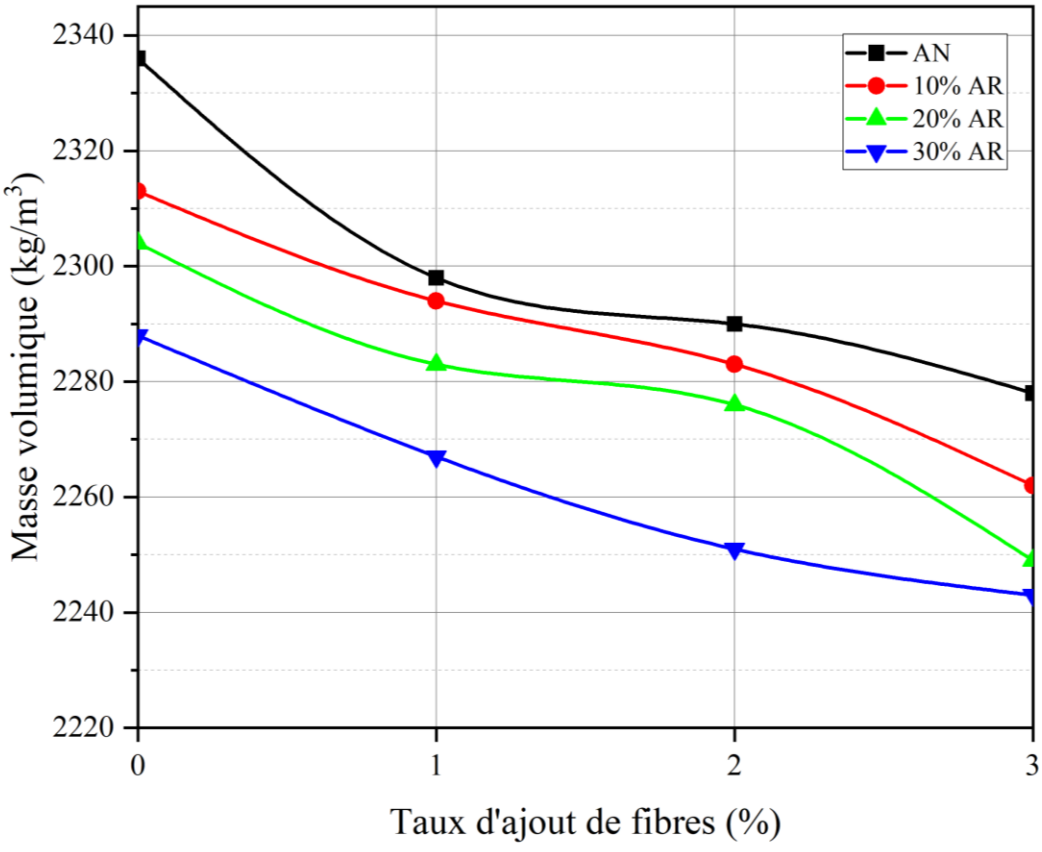


Figure IV-7 Influence des taux de substitution des agrégats et d'ajout de fibres sur la masse volumique

La figure IV-7 illustre l'effet combinée de la substitution des agrégats recyclés et de l'ajout de fibres de palmier dattier sur la masse volumique du béton. Les résultats obtenus mettent en évidence une diminution de la masse volumique avec l'augmentation de la teneur en fibres, et ce, pour tous les taux de remplacement des agrégats recyclés analysés, y compris le béton à base de agrégats naturels.

Les bétons à base d'agrégats naturels présentent les masses volumiques les plus élevées, avec une diminution de 2.48 % observées pour un ajout de 3 % de fibres de palmier dattier. Cette tendance s'explique par la porosité intrinsèque et la faible masse volumique propre des fibres de palmier dattier. Ces observations corroborent les travaux d'Althoey, et al. (2022), qui soulignent qu'une augmentation de la fraction volumique de fibres de palmier dattier entraîne une réduction de la masse volumique du béton. Leur étude montre que les bétons contenant jusqu'à 1 % de fibres de palmier dattier réduisent la masse volumique de 1 % par rapport au béton de référence.

De plus, la substitution de agrégats recyclés accentue davantage cette diminution de la masse volumique. La substitution de 30 % d'agrégats présente les valeurs les plus faibles, avec une diminution de 3.98 % pour l'ajout 3 % de fibres de palmier dattier. Cette synergie entre les agrégats recyclés et les fibres de palmier dattier crée un effet cumulatif de micro-vides dans la matrice, contribuant ainsi à la réduction de la masse volumique.

Ces résultats soulignent le potentiel considérable de l'utilisation combinée des fibres de palmier dattier et des agrégats recyclés dans le développement de matériaux de construction à faible masse volumique.

IV.4.2 Absorption d'eau

L'effet combiné du remplacement des agrégats et de l'incorporation de fibres de palmier dattier sur l'absorption d'eau est illustré à la figure IV-8. Une augmentation progressive de l'absorption d'eau est observée à mesure que la teneur en fibres de palmier dattier et le niveau de agrégats recyclés augmentent, la valeur la plus élevée étant atteinte avec 3 % de fibres de palmier dattier et 30 % de agrégats recyclés, représentant une augmentation de 56.42 % par rapport au béton de référence.

Cette évolution est due à l'augmentation de l'absorption par la porosité beaucoup plus élevée des agrégats recyclés, pouvant être jusqu'à 500 % supérieure à celle des agrégats naturels, en plus des vides introduits par les fibres.

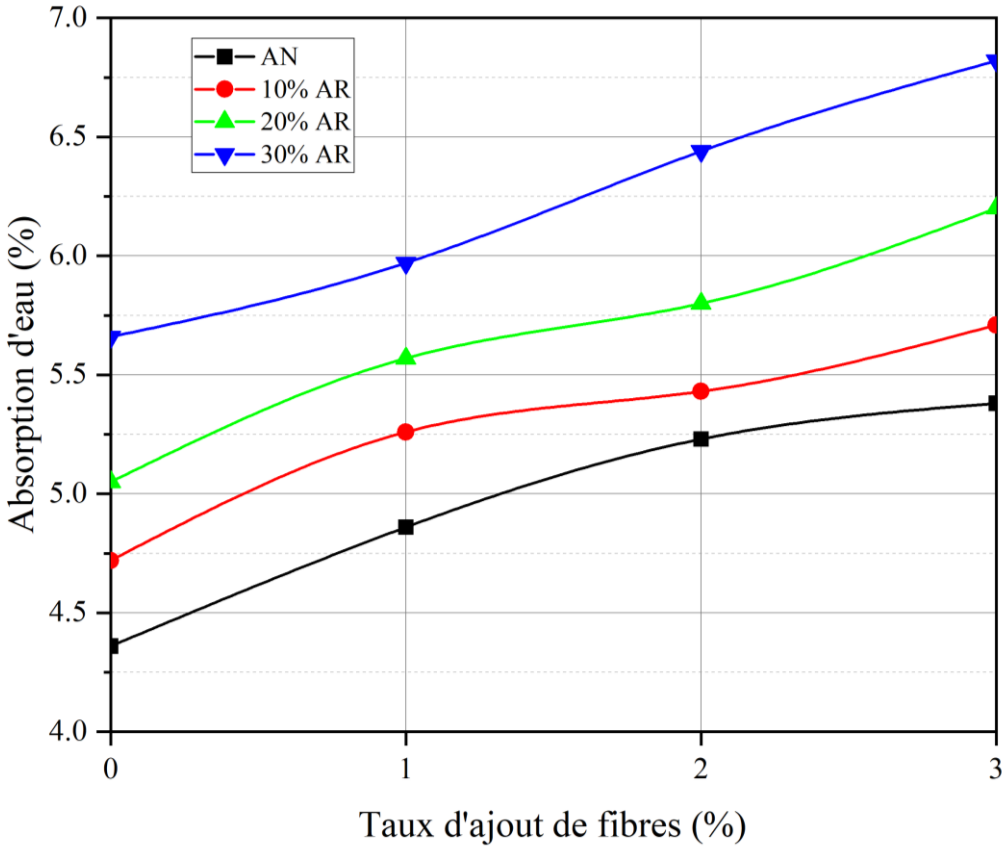


Figure IV-8 Influence des taux de substitution des agrégats et d'ajout de fibres sur l'absorption d'eau

Malgré ces augmentations, les mélanges de béton ont conservé une maniabilité moyenne, avec des valeurs d'affaissement oscillant entre 3 et 5 cm, assurant ainsi une application aisée et des propriétés mécaniques optimales une fois durci.

IV.4.3 Résistance à la compression

Pour le béton recyclé renforcé par des fibres de palmier dattier, la variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des agrégats et de l'ajout de fibres de palmier dattier est présentée à la figure IV-9. Les résultats indiquent qu'un ajout de 1 % de fibres de palmier dattier réduit la résistance du béton naturel et du béton recyclé jusqu'à 26.49 % par rapport aux bétons sans fibres.

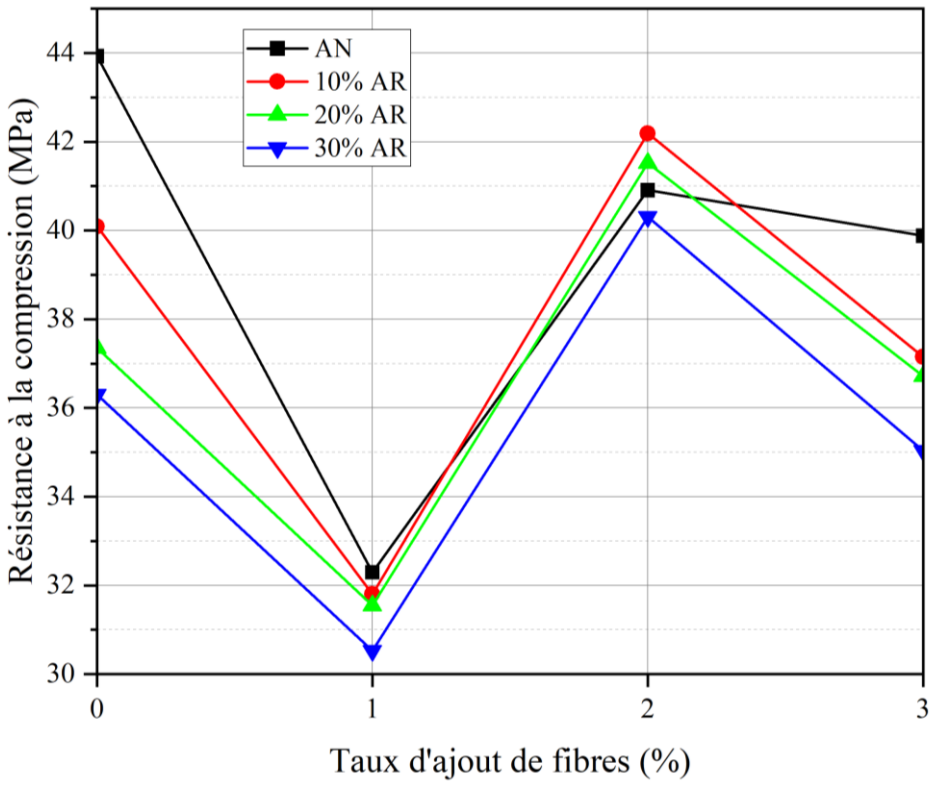


Figure IV-9 Influence des taux de substitution des agrégats et d'ajout de fibres sur la résistance à la compression

Cette tendance est cohérente avec les résultats de Yusra, et al. (2024), où l'ajout de 0.5 % de fibres de rotin et de bambou entraînait une réduction de la résistance à la compression de 25.03 % par rapport au béton de référence. Cette diminution pourrait être attribuée au faible dosage en fibres, qui rend l'obtention d'un mélange homogène difficile et favorise une distribution non uniforme des fibres (ségrégation) dans le béton, affectant ainsi ses performances mécanique.

Cependant, les mélanges de béton recyclé préparés avec une teneur en fibres de palmier dattier de 2 % montrent une résistance à la compression plus élevée et atteignent celle du béton naturel. En comparaison avec les formulations similaires sans fibres, la résistance à la compression augmente de 5.23 %, 11.16 % et 11.05 % pour un taux de remplacement de 10 %, 20 % et 30 %, respectivement.

Ces résultats sont en accord avec les recherches de Antony, et al. (2024), qui ont rapporté qu'une addition de 2 % de fibres de palmier dattier au béton augmentait la résistance à la compression de 10.38 %, ce qui peut être attribué à une meilleure dispersion des fibres et à une meilleure homogénéité du matériau. Néanmoins, pour le

même pourcentage d'ajouts de fibre dans le béton à base d'agrégats naturels renforcé par les fibres présente une réduction de 6.8 % de la résistance à la compression par rapport au béton sans renforcement. Cela suggère que bien que l'incorporation de 2 % de fibres de palmier dattier puisse légèrement réduire la résistance à la compression du béton naturel en raison de modifications microstructurales, ses effets positifs sur la résistance à la fissuration et la durabilité doivent également être pris en compte.

À un taux de 3 % de fibres de palmier dattier, l'agglomération des fibres peut entraîner une légère réduction de l'efficacité, créant des vides et réduisant l'homogénéité du mélange de béton.

Ces résultats soulignent le potentiel des fibres de palmier dattier pour compenser les pertes de résistance dans le béton recyclé. L'ajout de 2 % de fibres de palmier dattier permet une récupération significative des performances, faisant du béton recyclé renforcé par les fibres de palmier dattier une alternative structurelle viable pour la construction durable.

IV.4.4 Résistance à la traction par flexion

L'analyse de la figure IV-10, qui présente l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de substitution des agrégats et de l'ajout de fibres de palmier dattier, révèle que pour un taux d'ajout de 1 % de fibres de palmier dattier, la résistance diminue dans tous les mélanges.

Toutefois, l'incorporation de 2 % de fibres améliore cette résistance de 4.27 %, 5.89 % et 7.03 % pour les remplacement de 10 %, 20 % et 30 %, respectivement, par rapport aux bétons recyclés sans fibres. Cette amélioration peut être attribuée à la haute résistance à la traction par flexion fibres de palmier dattier, qui renforce la capacité du matériau à résister aux forces de flexion, et à l'adhérence entre le béton et les fibres, facilitée par les structures alvéolaires présentes à la surface de ces dernières (Alatshan, et al. 2017).

Cependant, une légère réduction de la résistance est observée pour une teneur en fibres de 3 % Ces résultats sont en accord avec des études antérieures (Alatshan, et al. 2017; Althoey, et al. 2022; Kriker, et al. 2005), qui soulignent l'importance de choisir la teneur appropriée en fibres de palmier dattier (2 % dans cette étude) pour optimiser les

performances du béton.

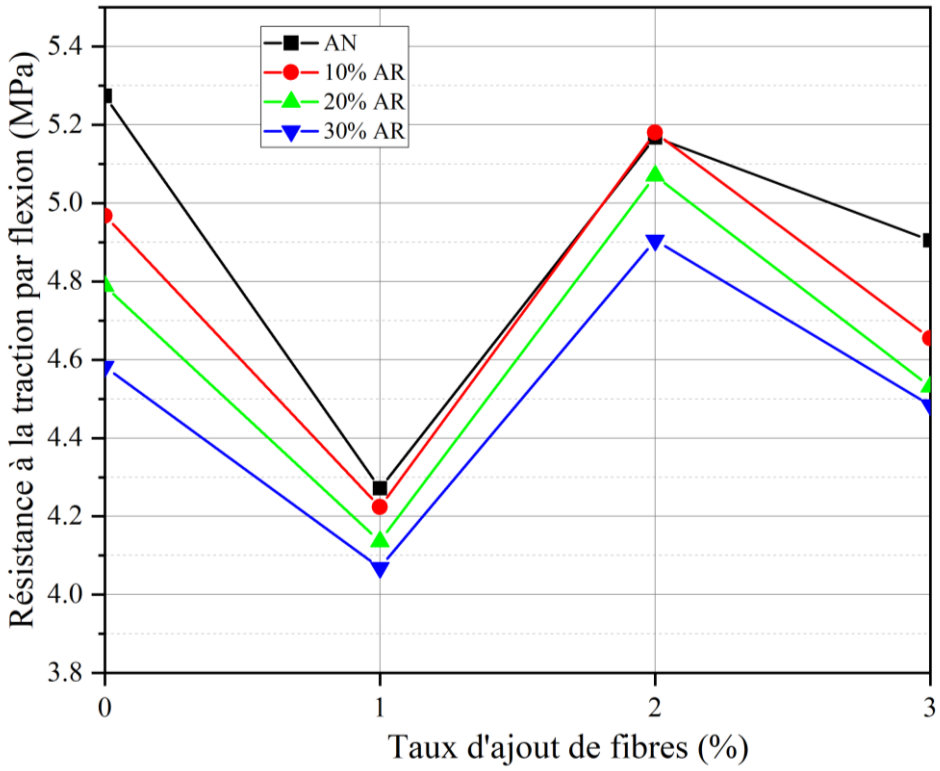


Figure IV-10 Influence des taux de substitution des agrégats et d'ajout de fibres sur la résistance à la traction par flexion

De plus, Haruehansapong, et al. (2024) ont rapporté qu'ajouter 3 kg/m³ de fibres de palmier dattier augmentait la résistance à la flexion du béton recyclé de 46.7 % par rapport au béton recyclé non renforcé.

Il a été constaté qu'après les essais, les fibres se sont rompues, sans arrachement. Cela était attendu, car les fibres se lient bien à la matrice du béton.

Ces résultats confirment que le renforcement par fibres de palmier dattier (2 %) atténue efficacement les pertes de résistance dues au remplacement par des agrégats recyclés, permettant au béton recyclé renforcé par les fibres de palmier dattier de maintenir leurs performances à la traction par flexion, même avec un remplacement de 30 % des agrégats recyclés.

IV.4.5 Module d'élasticité

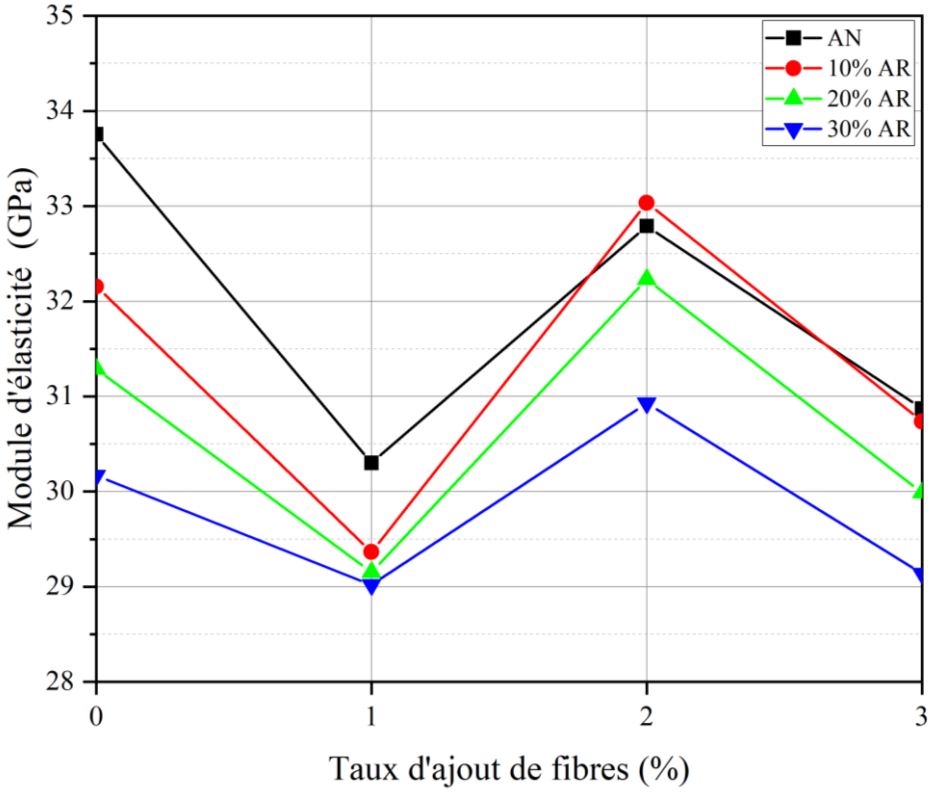


Figure IV-11 Impact des agrégats recyclés et des fibres de palmier dattier sur le module d'élasticité

La variation du module d'élasticité du béton naturel et du béton recyclé, en fonction du taux de substitution des agrégats et de la teneur en fibres de palmier dattier, est illustrée à la figure IV-11. De manière similaire aux tendances observées dans les résultats des essais de résistance à la compression, le module d'élasticité diminue pour l'ajout de 1 % de fibres dans toutes les formulations, puis une augmentation du module est observée pour un pourcentage de 2 % de fibres, atteignant 2.52 % par rapport à celui des formulations correspondantes sans fibres.

Ces observations corroborent les travaux de Alatshan, et al. (2017), qui ont démontré que l'ajout de fibres de palmier dattier dans le béton exerce un impact significatif et positif sur la vitesse des ondes ultrasonores, ce qui est corrélé à une amélioration du module d'élasticité. Cependant, une légère réduction du module d'élasticité est observée pour une teneur en fibres de 3 %.

Cette cohérence des résultats avec celle des essais destructifs confirme également que l'essai non destructif, notamment l'essai ultrasonique, constitue un outil pertinent

pour prédire le comportement mécanique du béton.

IV.4.6 Conductivité thermique

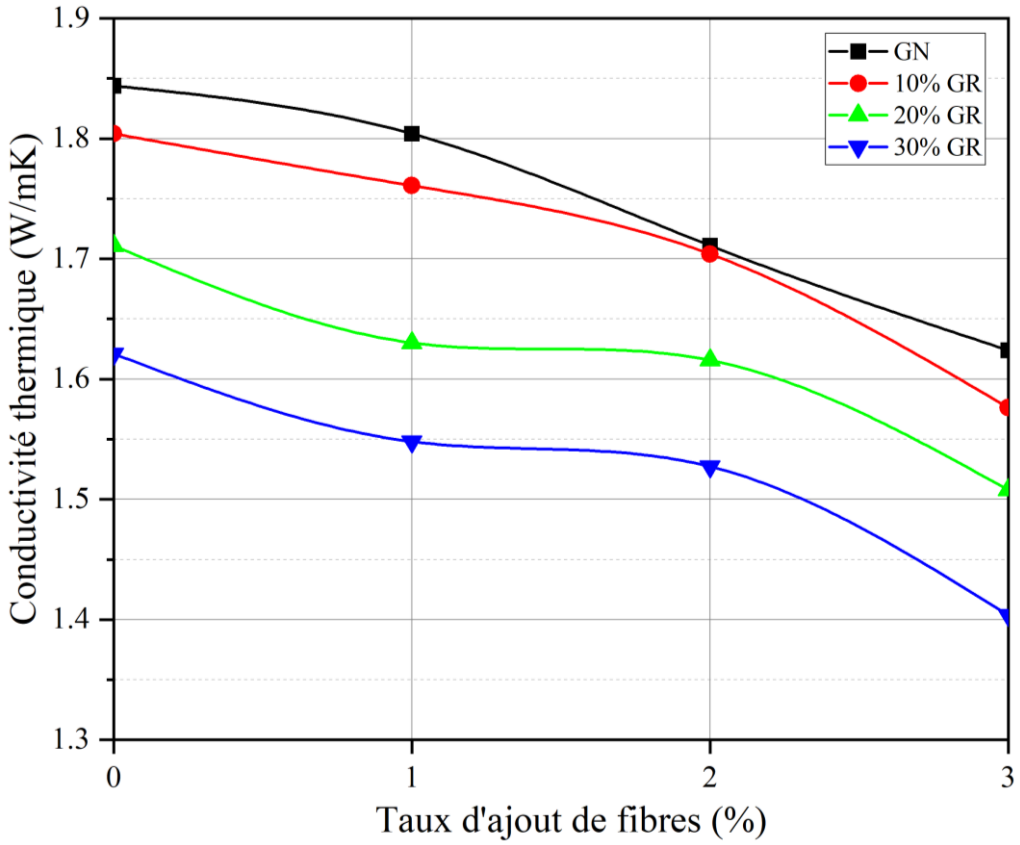


Figure IV-12 Impact des agrégats recyclés et de fibres de palmier dattier sur la conductivité thermique

La figure IV-12 illustre l'évolution de la conductivité thermique en fonction des proportions d'agrégats recyclés et de fibres de palmier dattier. Les résultats montrent que la substitution des agrégats et l'ajout de fibres de palmier dattier contribuent de manière significative à l'amélioration de la conductivité thermique. Pour les mélanges présentant des performances mécaniques optimales, la conductivité thermique des bétons avec une substitution d'agrégats de 10 %, 20 % et 30 % a été réduite respectivement de 11.6 %, 12.42 % et 18.27 % par rapport au béton de référence. Une réduction maximale de 23.88 % a été observée pour le béton contenant 3 % de fibres et 30 % d'agrégats recyclés.

Cette réduction est attribuée à l'augmentation de la porosité du béton due à l'incorporation de agrégats recyclés et à la plus faible conductivité thermique des fibres

de palmier dattier.

Ces résultats sont en accord avec les résultats précédemment obtenus par Kriker, et al. (2005), Althoey, et al. (2022), ainsi que Ngohpok, et al. (2018), qui ont montré que les fibres de palmier dattier améliorent l'isolation thermique du béton grâce à leur structure légère et poreuse, tout en préservant des performances mécaniques satisfaisantes. En outre, l'intégration de fibres de palmier dattier offre une solution durable en valorisant des déchets agricoles et en réduisant l'impact environnemental des matériaux de construction (Althoey, et al. 2022).

Ainsi, l'association de agrégats recyclés et de fibres de palmier dattier dans le béton améliore ses propriétés d'isolation thermique, le rendant particulièrement adapté aux bâtiments à haute efficacité énergétique, où les performances thermiques sont déterminantes (Ngohpok, et al. 2018; Tamimi, et al. 2023).

IV.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté et discuté les résultats obtenus à travers le programme expérimental détaillé dans le chapitre précédent, en évaluant l'influence de la substitution des agrégats recyclés et de l'ajout de fibres de palmier dattier sur les propriétés du béton. Les analyses ont porté sur les caractéristiques du béton à l'état frais, notamment la maniabilité, évaluée par l'essai d'affaissement, ainsi que sur les propriétés à l'état durci, incluant la masse volumique, l'absorption d'eau, la résistance à la compression, la résistance à la flexion , le module d’élasticité et la conductivité thermique.

Concernant la maniabilité, les résultats ont montré que l'objectif de consistance ferme a été atteint pour la majorité des formulations. Toutefois, un ajustement du dosage en superplastifiant a été nécessaire, particulièrement pour les mélanges à forte teneur en agrégats recyclés. La méthode de malaxage en deux étapes modifiée s'est avérée efficace pour atténuer partiellement l'absorption d'eau des agrégats et des fibres, contribuant ainsi à maintenir une maniabilité gérable.

En ce qui concerne les propriétés à l'état durci, l'examen de la masse volumique a révélé une diminution progressive avec l'augmentation du taux de substitution des agrégats recyclés, ce qui s'explique par la masse volumique plus faible et la porosité plus

élevée des agrégats recyclés par rapport aux agrégats naturels. L'ajout de fibres de palmier dattier a accentué cette tendance, soulignant ainsi le potentiel de ces matériaux pour obtenir des bétons légers. Parallèlement, les mesures d'absorption d'eau ont confirmé une augmentation linéaire de cette propriété en fonction de l'augmentation de la teneur en agrégats recyclés et en fibres de palmier dattier, liée directement à la porosité accrue introduite par ces matériaux.

Les résultats relatifs aux propriétés mécaniques ont montré que ces performances diminuent de manière générale avec l'augmentation du taux de remplacement des agrégats recyclés, ce qui est attribué aux zones de transition interfaciales fragilisées et à la porosité du mortier résiduel. Toutefois, l'utilisation de la méthode de malaxage en deux étapes modifiée a permis d'améliorer significativement la résistance à la compression, notamment pour une substitution inférieure à 50 %, atténuant partiellement cette baisse globale. Il est important de noter que l'incorporation d'une faible teneur de 1 % de fibres a eu un effet négatif sur les propriétés mécaniques, cette diminution inattendue étant probablement attribuable à un manque d'homogénéité du mélange à ce faible dosage. Cependant, l'incorporation à un dosage optimal de 2 % s'est avérée efficace pour compenser partiellement cette perte, rapprochant les performances des bétons hybrides de celles du béton témoin.

Plus précisément, la résistance à la compression des bétons diminue avec l'augmentation du taux de remplacement des agrégats, enregistrant des réductions allant jusqu'à 35.5 % par rapport au béton naturel. Cependant, l'ajout de 2 % de fibres de palmier dattier améliore cette résistance, avec des augmentations de 5.23 %, 11.16 % et 11.05 % pour les mélanges contenant 10 %, 20 % et 30 % d’agrégats recyclé respectivement, rapprochant ainsi la performance du béton recyclé de celle du béton naturel et rendant le béton recyclé renforcé par les fibres de palmier dattier plus compétitif pour les applications structurelles.

En ce qui concerne la résistance à la traction par flexion, une diminution allant jusqu'à 30.58 % a été observée avec un remplacement total. Cependant, l'ajout de 2 % de fibres de palmier dattier dans les mélanges de béton recyclé a permis une amélioration de cette propriété, avec des augmentations respectives de 4.27 %, 5.89 % et 7.03 % pour

des substitutions d'agrégats de 10 %, 20 % et 30 %, renforçant ainsi la performance des bétons recyclés au niveau de celle du béton naturel.

De la même manière que pour les résultats des essais de résistance à la compression, le module d'élasticité a enregistré des réductions pouvant atteindre jusqu'à 24.8 % par rapport au béton naturel. Cependant, l'ajout de 2 % de fibres de palmier dattier a entraîné une amélioration de cette propriété, allant jusqu'à 2.52 %.

Enfin, l'analyse de la conductivité thermique a révélé que le béton recyclé avec 100 % d'agrégats recyclés présente une conductivité thermique inférieure de 31.11 % à celle du béton naturel. De plus, l'ajout de fibres de palmier dattier a permis de réduire encore cette conductivité, améliorant ainsi les capacités isolantes du béton. La réduction de la conductivité thermique a atteint 23.88 % pour le mélange contenant 30 % d'agrégats recyclés et 3 % de fibres de palmier dattier, démontrant l'effet bénéfique de ces fibres sur les propriétés thermiques du béton recyclé renforcé.

En résumé, bien que la substitution des agrégats naturels par des agrégats recyclés entraîne une diminution des performances mécaniques, l'ajout de fibres de palmier dattier, en particulier à une teneur de 2 %, permet de compenser ces effets négatifs. Ces résultats suggèrent que le béton recyclé renforcé par des fibres de palmier dattier constitue une alternative prometteuse et durable pour les applications de construction, offrant des propriétés mécaniques et thermiques compétitives par rapport au béton naturel.

Conclusions, Recommandations et Perspectives

Conclusions

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans une démarche de recherche expérimentale visant à répondre aux enjeux actuels du secteur de la construction en matière de durabilité, d'économie circulaire et de valorisation des ressources locales. Plus précisément, cette étude a porté sur l'amélioration des performances mécaniques et thermiques du béton recyclé par l'incorporation de fibres naturelles issues du palmier dattier, une ressource renouvelable abondante en Algérie.

Dans un premier temps, les matériaux ont été sélectionnés et caractérisés, incluant le ciment, les agrégats naturels, les agrégats recyclés et les fibres de palmier dattier, afin d'établir les bases nécessaires à l'élaboration du programme expérimental et d'assurer la cohérence des formulations étudiées. Un programme expérimental détaillé a ensuite été élaboré pour évaluer les propriétés du béton. Ce programme a exploré l'impact de différents taux de substitution en agrégats recyclés (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % et 100 %) ainsi que de différents pourcentages d'incorporation de fibres de palmier dattier (1 %, 2 % et 3 %), y compris l'effet combiné de ces deux paramètres (substitution de 10 %, 20 %, 30 % d'agrégats avec ajout de 1 %, 2 %, 3 % de fibres). Des essais ont été réalisés pour mesurer la consistance, la masse volumique, l'absorption d'eau, la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion, le module d'élasticité et la conductivité thermique. Une méthode de malaxage en deux étapes modifiée a été employée pour gérer l'absorption d'eau des matériaux recyclés.

Les principaux résultats et conclusions issus de ce travail sont les suivants :

- La caractérisation des matériaux a permis de sélectionner le sable de rivière, parmi les deux types étudiés, en raison de sa granulométrie plus fine et plus régulière, offrant une meilleure maniabilité au béton. Les résultats ont également confirmé que les agrégats recyclés présentent une masse volumique plus faible et une absorption d'eau plus élevée que les agrégats

naturels. Les fibres de palmier dattier présentent des propriétés physiques comparables à celles déjà rapportées dans la littérature, justifiant leur utilisation comme renfort.

- La méthode de malaxage en deux étapes modifiée s'est révélée efficace pour gérer l'absorption d'eau élevée des agrégats recyclés et des fibres de palmier dattier. Bien qu'un ajustement du dosage en superplastifiant ait été nécessaire pour les formulations à forte teneur en agrégats recyclés, cette méthode a permis d'obtenir des bétons présentant une maniabilité adéquate pour la majorité des mélanges. Par ailleurs, elle améliore de manière significative la cohésion du matériau et l'adhérence des agrégats, en particulier dans les mélanges contenant moins de 50 % de agrégats recyclés.
- L'incorporation des agrégats recyclés entraîne une diminution progressive de la masse volumique du béton, proportionnelle au taux de remplacement, en raison de la masse volumique plus faible des agrégats. Parallèlement, une augmentation de l'absorption d'eau est observée, directement liée à la porosité accrue introduite par les agrégats. L'ajout de fibres de palmier dattier accentue à la fois la diminution de la masse volumique et l'augmentation de l'absorption d'eau, ce qui confirme le potentiel combiné des agrégats recyclés et des fibres pour la formulation de bétons légers.
- Les performances mécaniques diminuent généralement avec l'augmentation du taux d'agrégats recyclés. Cette baisse est principalement attribuée aux propriétés intrinsèques de ces matériaux et à la fragilité de la zone de transition interfaciale. Des réductions de la résistance à la compression, de la résistance à la traction par flexion et du module d'élasticité allant respectivement jusqu'à 35.5 %, 30.58 % et 24.8 % ont été observées pour les taux élevés de substitution.
- Toutefois, l'ajout de fibres de palmier dattier, en particulier à un dosage optimal de 2 %, atténue significativement ces diminutions, en améliorant la cohésion interne et en renforçant la matrice cimentaire. Pour les mélanges contenant 30 % d'agrégats recyclés, l'incorporation de 2 % de fibres a permis

d'améliorer la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion et le module d'élasticité de 7.03 %, 11.05 % et 2.52 % respectivement, par rapport aux bétons recyclés non renforcés. Ces améliorations permettent aux bétons recyclés renforcés d'atteindre des performances mécaniques proches à celles du béton conventionnel, notamment en termes de résistance à la compression. Il convient toutefois de noter qu'une faible teneur en fibres (1 %) a accentué la diminution des performances, probablement en raison de problèmes d'homogénéité du mélange.

- L'utilisation des agrégats recyclés améliore significativement les propriétés thermiques du béton en réduisant sa conductivité thermique. Un remplacement total des agrégats naturels par des agrégats recyclés a conduit à une amélioration de la conductivité thermique de 31.11 %. L'ajout des fibres de palmier dattier renforce cet effet : pour un mélange contenant 30 % de agrégats recyclés et 3 % de fibres, une amélioration de 23.88 % a été observée.

Ainsi, le béton recyclé renforcé par les fibres de palmier dattier offre un compromis prometteur entre propriétés mécaniques et thermiques, constituant une alternative durable pour le secteur de la construction en Algérie en valorisant des ressources locales et en réduisant l'impact environnemental.

Recommandations et perspectives

Il est recommandé d'appliquer une méthode de malaxage adaptée, telle que la méthode en deux étapes modifiée, afin de gérer l'absorption d'eau des agrégats recyclés et des fibres, garantissant ainsi une maniabilité adéquate du béton. Il convient également d'envisager l'incorporation de fibres de palmier dattier à un dosage optimal de 2 %, afin de compenser la perte de performances mécaniques associée à l'utilisation des agrégats recyclés, tout en améliorant la ductilité et la résistance à la traction par flexion. Par ailleurs, les propriétés thermiques améliorées de ce béton composite pourraient être exploitées pour des applications nécessitant une meilleure isolation thermique.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour approfondir et élargir les

connaissances sur ce matériau. Il serait pertinent d'étudier la durabilité à long terme de ce béton composite sous diverses conditions environnementales, notamment dans les contextes climatiques semi-arides. L'exploration d'autre méthodes de traitement des agrégats recyclés et des fibres pourrait également permettre d'améliorer encore les propriétés mécaniques et la durabilité. La réalisation d'études technico-économiques s'avère nécessaire pour évaluer la faisabilité d'une production et d'une utilisation à grande échelle en Algérie. En outre, l'examen de l'emploi d'autres types de fibres naturelles locales, ou de combinaisons de fibres, permettrait de diversifier les solutions de renforcement disponibles. Enfin, le développement de modèles numériques prédictifs du comportement mécanique et thermique de ce béton composite faciliterait son dimensionnement et son intégration dans les ouvrages de génie civil.

Au-delà des applications structurelles, les agrégats recyclés renforcés par fibres apparaissent particulièrement prometteurs pour d'autres usages, notamment dans la réalisation de parois extérieures ou d'éléments nécessitant des performances thermiques accrues et une résistance mécanique modérée, des domaines qui mériteraient d'être explorés plus en profondeur.

Références bibliographiques

Adamu, Musa, Fayez Alanazi, Yasser E Ibrahim, Hani Alanazi et Veerendrakumar C Khed. "A comprehensive review on sustainable natural fiber in cementitious composites: the date palm fiber case." *Sustainability*, vol. 14, no. 11, 2022, p. 6691. https://doi.org/10.3390/su14116691

Agoudjil, Boudjemaa, Adel Benchabane, Abderrahim Boudenne, Laurent Ibos et Magali Fois. "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood." *Energy and buildings*, vol. 43, no. 2-3, 2011, pp. 491-97. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.014

Ahamed, M Shadheer, P Ravichandran et AR Krishnaraja. "Natural fibers in concrete–A review." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1055, IOP Publishing, 2021, p. 012038. doi:https://doi.org/10.1088/1757-899X/1055/1/012038.

Ahmad, Shamsad, Mohammed Maslehuddin, Mohammed Shameem, Rayhan Md Faysal et Saheed Kolawole Adekunle. "Effect of abrasion and chemical treatment of recycled aggregate on the workability, strength, and durability properties of concrete." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 26, no. 8, 2020, pp. 3276-91. https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1797886

Akbarnezhad, A, KCG Ong, MH Zhang, CT Tam et TWJ Foo. "Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates." *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 8, 2011, pp. 3469-79. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.038

Akhtar, Ali et Ajit K Sarmah. "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective." *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, 2018, pp. 262-81. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085

Al-Luhybi, Ashtar S, Nuha H Al-Jubory et Anas S Ahmed. "Influence of Superplasticizer Dosage on Workability and Mechanical properties of Concrete made with Recycled Aggregate." *Journal of Engineering & Technological Sciences*, vol. 54, no. 5, 2022, https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.5.2

Al-Rifaie, Wail N et Maamoon Al-Niami. "Mechanical performance of date palm fibre-reinforced gypsums." *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 1, 2016, pp. 1-7. https://doi.org/10.1007/s41062-016-0022-y

Alatshan, Faesal, Abdelmajeed Mohammed Altlomate, Fidelis Mashiri et Wesam Alamin. "Effect of date palm fibers on the mechanical properties of concrete." *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 8, no. 2, 2017, pp. 68-80. https://doi.org/10.12972/susb.20170007

Ali-Boucetta, Tahar, Amira Ayat, Walid Laifa et Mourad Behim. "Treatment of date palm fibres mesh: Influence on the rheological and mechanical properties of fibre-cement composites." *Construction and Building Materials*, vol. 273, 2021, p. 121056. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121056

Ali, Babar et Liaqat Ali Qureshi. "Influence of glass fibers on mechanical and durability performance of concrete with recycled aggregates." *Construction and Building Materials*, vol. 228, 2019, p. 116783. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116783

Althoey, Fadi, Ibrahim Y Hakeem, Md Akter Hosen, Shaker Qaidi, Haytham F Isleem, Haitham Hadidi, Kiran Shahapurkar, Jawad Ahmad et Elias Ali. "Behavior of concrete reinforced with date palm fibers." *Materials*, vol. 15, no. 22, 2022, p. 7923. https://doi.org/10.3390/ma15227923

Amin, Muhammad Nasir, Waqas Ahmad, Kaffayatullah Khan et Ayaz Ahmad. "A comprehensive review of types, properties, treatment methods and application of plant fibers in construction and building materials." *Materials*, vol. 15, no. 12, 2022, p. 4362. https://doi.org/10.3390/ma15124362

Amit, Kumar et Singh Gyani Jail. "Improving the physical and mechanical properties of recycled concrete aggregate: A state-of-the-art review." *Engineering Research Express*, vol. 5, no. 1, 2023, p. 012007. https://doi.org/10.1088/2631-8695/acc3df

Angulo, Sérgio Cirelli, Carina Ulsen, Vanderley Moacyr John, Henrique Kahn et Maria Alba Cincotto. "Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil." *Waste management*, vol. 29, no. 2, 2009, pp. 721-30. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.009

Ansong, George, Yesuenyeagbe AK Fiagbe, Antonia Y Tetteh et Francis Davis. "Tensile strength and elongation of selected Kenaf fibres of Ghana." *Cogent Engineering*, vol. 10, no. 1, 2023, p. 2202036. https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2202036

Antony, Maria Rajesh, Joseph Sekhar Santhappan, Zuwina Hamdan Said Al Kindi, Binumol Shahulhameed et Lenin Anselm Wilson Annamal. "Date palm fibre: A sustainable reinforcement material for thermal insulation concrete." *AIP*

Conference Proceedings, vol. 3042, no. 1, 2024, https://doi.org/10.1063/5.0193702

APS. "Agriculture : un programme pour la plantation d'un million de palmiers à partir de la saison 2023-202." Algérie Presse Service https://www.aps.dz/economie/162725-agriculture-un-programme-pour-la-plantation-d-un-million-de-palmiers-a-partir-de-la-saison-2023-2024.

Asaduzzaman, SM et GM Sadiqul Islam. "Using jute fiber to improve fresh and hardened properties of concrete." *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 2, 2023, p. 2204452. https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2204452

Ayadi, Melek, César Segovia, Ayda Baffoun, Riadh Zouari, Vanessa Fierro, Alain Celzard, Slah Msahli et Nicolas Brosse. "Influence of Anatomy, Microstructure, and Composition of Natural Fibers on the Performance of Thermal Insulation Panels." *ACS omega*, vol. 8, no. 51, 2023, pp. 48673-88. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02481

Bairagi, NK, Kishore Ravande et VK Pareek. "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates." *Resources, conservation and recycling*, vol. 9, no. 1-2, 1993, pp. 109-26. https://doi.org/10.1016/0921-3449(93)90036-f

Banjad Pečur, Ivana, Nina Štirmer et Bojan Milovanović. "Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings." *Magazine of Concrete Research*, vol. 67, no. 11, 2015, pp. 575-84. http://dx.doi.org/10.1680/macr.14.00220

Benaniba, Samir, Zied Driss, Mokhtar Djendel, Elhadj Raouache et Rabah Boubaaya. "Thermo-mechanical characterization of a bio-composite mortar reinforced with date palm fiber." *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 15, 2020, p. 1558925020948234. https://doi.org/10.1177/1558925020948234

Benchouia, Houssam Eddine, Hamida Boussehel, Belhi Guerira, Lakhdar Sedira, Cristina Tedeschi, Hossam Eddine Becha et Marco Cucchi. "An experimental evaluation of a hybrid bio-composite based on date palm petiole fibers, expanded polystyrene waste, and gypsum plaster as a sustainable insulating building material." *Construction and Building Materials*, vol. 422, 2024, p. 135735. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135735

Benmansour, Nadia, Boudjemaa Agoudjil, Abdelkader Gherabli, Abdelhak Kareche et Aberrahim Boudenne. "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building." *Energy and buildings*, vol. 81, 2014, pp. 98-104. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.032

Bianchini, Gianluca, Elena Marrocchino, Renzo Tassinari et Carmela Vaccaro. "Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical–mineralogical appraisal." *Waste management*, vol. 25, no. 2, 2005, pp. 149-59. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.09.005

Bittner, Can Mark et Vincent Oettel. "Fiber reinforced concrete with natural plant fibers—investigations on the application of bamboo fibers in ultra-high performance concrete." *Sustainability*, vol. 14, no. 19, 2022, p. 12011. https://doi.org/10.3390/su141912011

Boukhattem, Lahcen, Mustapha Boumhaout, Hassan Hamdi, Brahim Benhamou et Fatima Ait Nouh. "Moisture content influence on the thermal conductivity of insulating building materials made from date palm fibers mesh." *Construction and Building Materials*, vol. 148, 2017, pp. 811-23. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.020

Bravo, Miguel, Jorge de Brito et Luís Evangelista. "Thermal performance of concrete with recycled aggregates from CDW plants." *Applied Sciences*, vol. 7, no. 7, 2017, p. 740. https://doi.org/10.3390/app7070740

Buck, Alan D. "Recycled concrete as a source of aggregate." *ACI Journal Proceedings*, vol. 74, no. 5, 1977, pp. 212-19. https://doi.org/10.14359/11004

Bui, Ngoc Kien, Tomoaki Satomi et Hiroshi Takahashi. "Enhancement of recycled aggregate concrete properties by a new treatment method." *GEOMATE Journal*, vol. 14, no. 41, 2018, pp. 68-76. http://dx.doi.org/10.21660/2018.41.11484

Campilho, Raul DSG. *Natural fiber composites*. CRC Press, 2015. https://doi.org/10.1201/b19062

CDE, Group. "Pelichet Inert Waste Plant." https://www.cdegroup.com/getmedia/93eb3e22-f88b-4d1d-9d66-6cf20b4b4043/Pelichet-Inert-Waste-Plant-1920x600.jpg.

Chakradhara Rao, M, SK Bhattacharyya et SV Barai. "Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load." *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 1, 2011a, pp. 69-80. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.055

"Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete." *Materials and structures*, vol. 44, 2011b, pp. 205-20. https://doi.org/10.1617/s11527-010-9620-x

Charai, Mouatassim, Ahmed Mezrhab, Ligia Moga et Mustapha Karkri. "Hygrothermal, mechanical and durability assessment of vegetable concrete mixes made with Alfa fibers for structural and thermal insulating applications." *Construction and*

Building Materials, vol. 335, 2022, p. 127518. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127518

Chauhan, Babu Lal et Gyani Jail Singh. "Sustainable development of recycled concrete aggregate through optimized acid-mechanical treatment: A simplified approach." *Construction and Building Materials*, vol. 399, 2023, p. 132559. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132559

Chen, Baofan. "Basic mechanical properties and microstructural analysis of recycled concrete." *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 28, no. 1, 2013, pp. 104-09. https://doi.org/10.1007/s11595-013-0649-x

Chen, Zong-ping, Kai-wang Huang, Xiang-gang Zhang et Jian-yang Xue. "Experimental research on the flexural strength of recycled coarse aggregate concrete." *2010 international conference on mechanic automation and control engineering*, IEEE, 2010, pp. 1041-43. doi:https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536744.

Collet, Florence et Sylvie Pretot. "Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content." *Construction and Building Materials*, vol. 65, 2014, pp. 612-19. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039

Damdelen, O. "Investigation of 30% recycled coarse aggregate content in sustainable concrete mixes." *Construction and Building Materials*, vol. 184, 2018, pp. 408-18. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.149

De Larrard, François et Horacio Colina. "Le béton recyclé." *Marne-la-Vallée : Ifsttar*, 2018, pp. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

Dhakal, Hom N, Sakib Hossain Khan, Ibrahim A Alnaser, Mohammad Rezaul Karim, Abu Saifullah et Zhongyi Zhang. "Potential of date palm fibers (DPFs) as a sustainable reinforcement for bio-composites and its property enhancement for key applications: a review." *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 309, no. 10, 2024, p. 2400081. https://doi.org/10.1002/mame.202400081

Dilbas, Hasan, Ö Çakır et CD Atiş. "Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method." *Construction and Building Materials*, vol. 212, 2019, pp. 716-26. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.007

Diotti, Alessandra, Luca Cominoli, Giovanni Plizzari et Sabrina Sorlini. "Experimental evaluation of recycled aggregates, washing water and cement sludge recovered from returned concrete." *Applied Sciences*, vol. 12, no. 1, 2021, p. 36. https://doi.org/10.3390/app12010036

Djaafri, Mohammed, Fethya Salem, Slimane Kalloum, Umberto Desideri, Pietro Bartocci, Mostefa Khelafi, Abdulaziz E Atabani et Arianna Baldinelli. "A route for bioenergy in the sahara region: date palm waste valorization through updraft gasification." *Energies*, vol. 17, no. 11, 2024, p. 2520. https://doi.org/10.3390/en17112520

Dmitriev, Nikita, Oksana Larsen, Vitaly Naruts et Egor Vorobev. "Investigation of Concrete Properties with the Use of Recycled Coarse Aggregate." *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*, Springer, 2018, pp. 769-77.

Dolara, E, G Di Niro et R Carins. "RAC prestressed beams." *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, Thomas Telford Publishing, 1998, pp. 255-61. doi:https://doi.org/10.1680/scuorca.27268.0022.

Dreux, Georges et Jean Festa. *Nouveau guide du béton et de ses constitutants.* 8eme édition ed., Eyrolles, 1998.

Elfaleh, Issam, Fethi Abbassi, Mohamed Habibi, Furqan Ahmad, Mohamed Guedri, Mondher Nasri et Christian Garnier. "A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials." *Results in Engineering*, vol. 19, 2023, p. 101271. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271

Elseify, Lobna A, Mohamad Midani, Lamia A Shihata et Hamed El-Mously. "Review on cellulosic fibers extracted from date palms (Phoenix Dactylifera L.) and their applications." *Cellulose*, vol. 26, 2019, pp. 2209-32. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02259-6

Etxeberria, Miren et Silvia Castillo. "How the carbonation treatment of different types of recycled aggregates affects the properties of concrete." *Sustainability*, vol. 15, no. 4, 2023, p. 3169. http://dx.doi.org/10.3390/su15043169

Etxeberria, Miren, E Vázquez, A Marí et M Barra. "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement and concrete research*, vol. 37, no. 5, 2007, pp. 735-42. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002

European Commission, Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. "Buildings and construction." https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en.

Fadhil, Sarmed et Mohanad Yaseen. "The Effect of Adding Different Types of Natural Fibers on Mechanical Properties and Impact Resistance of Concrete." *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 9, no. 12, 2015, pp. 1091-96. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271

Faiad, Ali, Muath Alsmari, Mohamed MZ Ahmed, Mohamed L Bouazizi, Bandar Alzahrani et Hussien Alrobei. "Date palm tree waste recycling: treatment and processing for potential engineering applications." *Sustainability*, vol. 14, no. 3, 2022, p. 1134. http://dx.doi.org/10.3390/su14031134

FAO. "FAOSTAT : Production mondiale et superficie récoltée des dattes, 2023." https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL.

Guo, Hui, Caijun Shi, Xuemao Guan, Jianping Zhu, Yahong Ding, Tung-Chai Ling, Haibo Zhang et Yuli Wang. "Durability of recycled aggregate concrete–A review." *Cement and Concrete Composites*, vol. 89, 2018, pp. 251-59. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008

Haba, Bourhaneddine, Farouk Benali, Mohammad Jawaid et Alcides Lopes Leao. "A review on gypsum-based composites reinforced with palm fibers in construction applications." *International Journal of Thermophysics*, vol. 43, no. 11, 2022, p. 164. https://doi.org/10.1007/s10765-022-03086-x

Hajj Obeid, Maya, Omar Douzane, Lorena Freitas Dutra, Geoffrey Promis, Boubker Laidoudi, Florent Bordet et Thierry Langlet. "Physical and mechanical properties of rapeseed straw concrete." *Materials*, vol. 15, no. 23, 2022, p. 8611. https://doi.org/10.3390/ma15238611

Hamrouni, Ichrak, Habib Jalili, Tariq Ouahbi, Said Taibi, Mehrez Jamei et Abdelkader Mabrouk. "Thermal properties of a raw earth-flax fibers building material." *Construction and Building Materials*, vol. 423, 2024, p. 135828. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135828

Hansen, Torben C. "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985." *Materials and structures*, vol. 19, 1986, pp. 201-46. https://doi.org/10.1007/BF02472036

Haruehansapong, Sattawat, Prachoom Khamput, Pruchaya Yoddumrong, Wunchock Kroehong, Vichayaphong Thuadao, Akkadath Abdulmatin, Wachirakorn Senawang et Tawich Pulngern. "Enhancement of recycled aggregate concrete properties through the incorporation of nanosilica and natural fibers." *Heliyon*, vol. 10, no. 22, 2024, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39924

Hassani, Fatima-Zahra Semlali Aouragh, Hind Chakchak, Mounir El Achaby, Rachid Bouhfid et Abou El Kacem Qaiss. "Date palm fiber extraction and treatment." *Date Palm Fiber Composites: Processing, Properties and Applications*, 2020, pp. 75-91. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9339-0

Ibrahim, Yasser E, Musa Adamu, Mohammad Louay Marouf, Omar Shabbir Ahmed, QA Drmosh et Mohammad Abdul Malik. "Mechanical performance of date-

palm-fiber-reinforced concrete containing silica fume." *Buildings*, vol. 12, no. 10, 2022, p. 1642. https://doi.org/10.3390/buildings12101642

Islam, Md Rakibul, Md Rafat Ul Isalm, Muhammad Rashid, Faisal Ahammad et Monjurul Islam. "Improvements in the Characteristics of Plant Fiber Reinforced Concrete." *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, vol. 2, no. 5, 2024, pp. 552-68. https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(5).53

Ismail, Sallehan et Mahyuddin Ramli. "Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications." *Construction and Building Materials*, vol. 44, 2013, pp. 464-76. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014

Ivanchev, Ivan. "Investigation with non-destructive and destructive methods for assessment of concrete compressive strength." *Applied Sciences*, vol. 12, no. 23, 2022, p. 12172. https://doi.org/10.3390/app122312172

Jamil, Kamran, Faisal Shabbir et Ali Raza. "Performance evaluation of jute fiber-reinforced recycled aggregate concrete: strength and durability aspects." *Structural Concrete*, vol. 24, no. 5, 2023, pp. 6520-38. http://dx.doi.org/10.1002/suco.202200948

Jamshaid, Hafsa, Rajesh Kumar Mishra, Ali Raza, Uzair Hussain, Md Lutfor Rahman, Shabnam Nazari, Vijay Chandan, Miroslav Muller et Rostislav Choteborsky. "Natural cellulosic fiber reinforced concrete: influence of fiber type and loading percentage on mechanical and water absorption performance." *Materials*, vol. 15, no. 3, 2022, p. 874. https://doi.org/10.3390/ma15030874

Joachim, Linus et Vincent Oettel. "Experimental investigations on the application of natural plant fibers in ultra-high-performance concrete." *Materials*, vol. 17, no. 14, 2024, p. 3519. https://doi.org/10.3390/ma17143519

K Hassan, Mohamed et Mohammd Assas. "Evaluation of the hardness and wear behavior of date seed powder/epoxy composites as potential biomaterials." *Journal of Engineering and Thermal Sciences*, vol. 3, no. 2, 2023, pp. 47-61. https://doi.org/10.21595/jets.2023.23798

Kalinowska-Wichrowska, Katarzyna et David Suescum-Morales. "The experimental study of the utilization of recycling aggregate from the demolition of elements of a reinforced concrete hall." *Sustainability*, vol. 12, no. 12, 2020, p. 5182. https://doi.org/10.3390/su12125182

Kaplan, Gokhan, Oguzhan Yavuz Bayraktar, Aliakbar Gholampour, Osman Gencel, Fuat Koksal et Togay Ozbakkaloglu. "Mechanical and durability properties of steel fiber-reinforced concrete containing coarse recycled concrete aggregate."

Structural Concrete, vol. 22, no. 5, 2021, pp. 2791-812. https://doi.org/10.1002/suco.202100028

Karimah, Azizatul, Muhammad Rasyidur Ridho, Sasa Sofyan Munawar, Danang Sudarwoko Adi, Ratih Damayanti, Bambang Subiyanto, Widya Fatriasari et Ahmad Fudholi. "A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations." *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 13, 2021, pp. 2442-58. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014

Kazmi, Syed Minhaj Saleem, Muhammad Junaid Munir, Yu-Fei Wu, Xiaoshan Lin et Muhammad Riaz Ahmad. "Investigation of thermal performance of concrete incorporating different types of recycled coarse aggregates." *Construction and Building Materials*, vol. 270, 2021, p. 121433. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121433

Kethiri, Mohamed Aymen, Noureddine Belghar, Mourad Chikhi, Yousra Boutera, Charafeddine Beldjani et Cristina Tedeschi. "Experimental study on the effect of date palm powder on the thermal and physico-mechanical properties of gypsum mortars." *Sustainability*, vol. 16, no. 7, 2024, p. 3015. https://doi.org/10.3390/su16073015

Khoshnodifar, Zahra, Pouria Ataei et Hamid Karimi. "Recycling date palm waste for compost production: A study of sustainability behavior of date palm growers." *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 20, 2023, p. 100300. https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100300

Kim, Jae Jun, Sang Heum Youn, MJ Cho, HT Shin, Jeong Bae Yoon, Kyu Hong Hwang et DS Lee. "The effect of pozzolanics on the recycled aggregates by surface treatment." *Materials science forum*, vol. 486, Trans Tech Publ, 2005, pp. 305-08. doi:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.486-487.305.

Kong, Deyu, Ting Lei, Jianjun Zheng, Chengchang Ma, Jun Jiang et Jing Jiang. "Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 5, 2010, pp. 701-08. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.038

Kou, Shi-cong , Chi-sun Poon et Francisco Agrela. "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures." *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 8, 2011, pp. 788-95. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009

Kou, Shi-Cong et Chi-Sun Poon. "Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash." *Cement*

and Concrete Composites, vol. 37, 2013, pp. 12-19. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011

"Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 8, 2010, pp. 649-54. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.003

Kriker, A, G Debicki, A Bali, MM Khenfer et M Chabannet. "Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate." *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 5, 2005, pp. 554-64. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.015

Kttafah, Huda R et Adil I Khadim. "The effect of dates palm trunk particles as improvement reinforcement material of polymeric composites and sustainable environmental material." *AIP Conference Proceedings*, vol. 2123, AIP Publishing, 2019. doi:http://dx.doi.org/10.1063/1.5117022.

Lage, Bikash, Bikram Rajthala, Anish Sulu, Pramod Suwal et Bikram Baidhya. "Enhancing Structural Performance of Recycled Aggregate Concrete using Coconut Fiber: A Quantitative Analysis." *Cognizance Journal of Multidisciplinary Studies*, vol. 4, 2024, pp. 400-07. http://dx.doi.org/10.47760/cognizance.2024.v04i06.023

Laverde, Valeria, Angie Marin, José M Benjumea et Mauricio Rincón Ortiz. "Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review." *Construction and Building Materials*, vol. 340, 2022, p. 127729. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729

Lee, Seung-Tae et Kwang-Pil Park. "Evaluation of the concrete using low quality recycled aggregate." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 18, no. 11, 2017, pp. 7-15. https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.11.7

Li, Long, Dongxing Xuan, Adebayo Olatunbsoun Sojobi, Songhui Liu, SH Chu et Chi Sun Poon. "Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete." *Cement and Concrete Composites*, vol. 118, 2021, p. 103963. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103963

Liang, Chaofeng, Bihao Pan, Zhiming Ma, Zhihai He et Zhenhua Duan. "Utilization of CO2 curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review." *Cement and Concrete Composites*, vol. 105, 2020, p. 103446. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446

Lilargem Rocha, Diego, Luís Urbano Durlo Tambara Júnior, Markssuel Teixeira Marvila, Elaine Cristina Pereira, Djalma Souza et Afonso Rangel Garcez de Azevedo. "A review of the use of natural fibers in cement composites: concepts,

applications and Brazilian history." *Polymers*, vol. 14, no. 10, 2022, p. 2043. https://doi.org/10.3390/polym14102043

Limbachiya, MC, T Leelawat et RK Dhir. "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete." *Materials and structures*, vol. 33, 2000, pp. 574-80. https://doi.org/10.1007/BF02480538

Lo, CY, SH Chowdhury et JH Doh. "Recycled aggregate concrete prepared with water-washed aggregates–an investigative study." *Proceedings of 22nd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Materials to Structures: Advancement through Innovation*, Taylor & Francis, London, UK, 2013, pp. 1143-46. doi:http://dx.doi.org/10.1201/b15320-203.

Mardani, Alieh, Ngoc Kien Bui et Takafumi Noguchi. "hybrid environmentally friendly method for RCA concrete quality improvement." *International journal of concrete structures and materials*, vol. 18, no. 1, 2024, p. 29. https://doi.org/10.1186/s40069-024-00664-1

Martinelli, Flávia Regina Bianchi, Francisco Roger Carneiro Ribeiro, Markssuel Teixeira Marvila, Sergio Neves Monteiro, Fabio da Costa Garcia Filho et Afonso Rangel Garcez de Azevedo. "A review of the use of coconut fiber in cement composites." *Polymers*, vol. 15, no. 5, 2023, p. 1309. https://doi.org/10.3390/polym15051309

McNeil, Katrina et Thomas H-K Kang. "Recycled concrete aggregates: A review." *International journal of concrete structures and materials*, vol. 7, 2013, pp. 61-69. https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5

Medina, César, W Zhu, T Howind, Moisés Frías et MI Sanchez De Rojas. "Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes." *Construction and Building Materials*, vol. 79, 2015, pp. 22-33. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.070

Midani, Mohamad, Naheed Saba et Othman Y Alothman. *Date palm fiber composites : Processing, Properties and Applications.* 1 ed., Springer Singapore, 2020. *Composites Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9339-0

Mukharjee, Bibhuti Bhusan et Sudhirkumar V Barai. "Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 55, 2014, pp. 29-37. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.003

NA.255. "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2024.

NA.422. "Ciment -Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2013.

NA.455. "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Evaluation des fines - Equivalent de sable." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2018.

NA.1966. "Bétons - Eau de gâchage pour béton, spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux de processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2009.

NA.2607-1. "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2014.

NA.5027. "Essais pour béton dans les structures – Détermination de la vitesse de propagation des ultrasons." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2022.

NA.5074-2. "Essais pour béton durci - Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2020.

NA.5074-3. "Essais pour béton durci - résistance à la compression des éprouvettes." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2020.

NA.5074-7. "Essais pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton durci." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2017.

NA.5092-2. "Essai pour béton frais - Essais d'affraissement." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2019.

NA.5113. "Granulats pour bétons." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2009.

NA.5129-2. "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2021.

NA.17050. "Resistance en traction par flexion d'éprouvettes de béton durci." Institut Algérien de Normalisation (IANOR), 2013.

NBN.B15-215. "Essais sur béton durci - Absorption d'eau par immersion." IBN, 2018.

NF.EN.993–15. "Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle)." Afnor EDITIONS, 2005.

Ngohpok, Chanchai, Vanchai Sata, Thaned Satiennam, Pongrid Klungboonkrong et Prinya Chindaprasirt. "Mechanical properties, thermal conductivity, and sound absorption of pervious concrete containing recycled concrete and bottom ash

aggregates." *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 22, 2018, pp. 1369-76. https://doi.org/10.1007/s12205-017-0144-6

Nguyen, Ho Anh Thu, Nguyen Ngoc Han Dinh et Phuong Trinh Bui. "Effect of surface treatment of recycled concrete aggregate by cement-silica fume slurry on compressive strength of concrete." *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, vol. 7, no. 4, 2020, pp. 591-96.

Nicolás, Alejandro Flores, Mario Flores Nicolás, Elsa Carmina Menchaca Campos et Jorge Uruchurtu Chavarín. "Mechanical Behavior of Concrete Reinforced with Natural Palm and Mango Fibers." *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 57, no. 1, 2025, pp. 48-65. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2025.57.1.4

Nixon, PJ. "Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review." *Matériaux et Construction*, vol. 11, 1978, pp. 371-78. https://doi.org/10.1007/BF02473878

Oliveira, M de, C Assis et Antonio Wanderley. "Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate." *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, Spain*, 2004, pp. 636-42.

Patowary, Faruk et Mohammad Al Amin Siddique. "Experimental investigation on the influence of superplasticizer on mechanical behavior of recycled aggregate concrete." *Advances in Civil Engineering*, vol. 2023, no. 1, 2023, p. 9610317. https://doi.org/10.1155/2023/9610317

Pavlů, Tereza et Magdaléna Šefflová. "The static and the dynamic modulus of elasticity of recycled aggregate concrete." *Advanced Materials Research*, vol. 1054, 2014, pp. 221-26. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.221

PMR. "Worldwide aggregates market research 2024: By type, application, participants and countries forecast to 2030." https://pmarketresearch.com/product/worldwide-aggregates-market-research-2024-by-type-application-participants-and-countries-forecast-to-2030/.

PNUE. "Les émissions du secteur mondial du bâtiment restent élevées et continuent d'augmenter." *Communiqué de presse*. Programme des Nations Unies pour l'environnement https://www.unep.org/fr/actualites-et-recits/communique-de-presse/les-emissions-du-secteur-mondial-du-batiment-restent.

Poon, Chi Sun, SC Kou et L Lam. "Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete." *Materials and structures*, vol. 40, 2007, pp. 981-88. https://doi.org/10.1617/s11527-006-9192-y

Purdy, K, JK Reynolds et IA Wright. "Potential water pollution from recycled concrete aggregate material." *Marine and freshwater research*, vol. 72, no. 1, 2020, pp. 58-65. http://dx.doi.org/10.1071/MF19354

Purushothaman, Revathi, Ramesh Ruthirapathy Amirthavalli et Lavanya Karan. "Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 5, 2015, p. 04014168. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001128

Quattrone, Marco, Sergio C Angulo et Vanderley M John. "Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production." *Resources, conservation and recycling*, vol. 90, 2014, pp. 21-33. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.003

R. Kumutha, Rathinam et Vijai Kumutha. "Effect of recycled coarse aggregates in properties of concrete." *Journal of Green Building*, vol. 3, no. 4, 2008, pp. 130-37. https://doi.org/10.3992/jgb.3.4.130

Rahal, Khaldoun. "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate." *Building and environment*, vol. 42, no. 1, 2007, pp. 407-15. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.033

Rais, Mohd Salman et Rizwan Ahmad Khan. "Effect of biomineralization technique on the strength and durability characteristics of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 290, 2021, p. 123280. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123280

Rasoul, Zainab Sabah, Jariah M Juoi, M Mohamad et Nada Mahdi Fawzi. "Date palm fiber (DPF) and its composites: a comprehensive survey." *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 29, no. 8, 2020, pp. 1776-88. http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/12738

Ruiyang, Jin. "Enhancing Concrete Properties with Plant Fibers: A Comprehensive Analysis of Mechanical and Durability Improvements." *Applied and Computational Engineering*, vol. 142, 2025, pp. 12-17. http://dx.doi.org/10.54254/2755-2721/2025.KL21257

S.C.Tébessa. "Fiche technique produit CEM II/A-M (P-L) 42.5 R – NA 442/2013." http://www.sct.dz/images/CEMII%2042.5%20R.bmp.

Sabah, Adjlane, Khiari Reguia et Mokhnane Tarek. "The Reality of the Dates sector in the Algerian State of Biskra Production and Export." *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, vol. 10, no. 29, 2023, pp. 195-210. https://doi.org/10.5281/zenodo.10039480

Sadeghi, Peyman, Quang Cao, Ragab Abouzeid, Mohammad Shayan, Meensung Koo et Qinglin Wu. "Experimental and Statistical Investigations for Tensile Properties of Hemp Fibers." *Fibers*, vol. 12, no. 11, 2024, p. 94. https://doi.org/10.3390/fib12110094

Sánchez-Cotte, Edgar H, Carlos Albeiro Pacheco-Bustos, Ana Fonseca, Yaneth Pineda Triana, Ronald Mercado, Julián Yepes-Martínez et Ricardo Gabriel Lagares Espinoza. "The chemical-mineralogical characterization of recycled concrete aggregates from different sources and their potential reactions in asphalt mixtures." *Materials*, vol. 13, no. 24, 2020, p. 5592. https://doi.org/10.3390/ma13245592

SANME, Crusher. "Aggregate Crushing Project." https://www.sanmecrusher.com/template/img/project-pic/P54_1.jpg.

Sargam, Yogiraj, Kejin Wang et James E Alleman. "Effects of modern concrete materials on thermal conductivity." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32, no. 4, 2020, p. 04020058. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003026

Sathishkumar, TP, J and Naveen et S Satheeshkumar. "Hybrid fiber reinforced polymer composites–a review." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 5, 2014, pp. 454-71. https://doi.org/10.1177/0731684413516393

Šefflová, Magdaléna, Martin Volf et Tereza Pavlů. "Thermal properties of concrete with recycled aggregate." *Advanced Materials Research*, vol. 1054, 2014, pp. 227-33. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.227

Selvam, V, T Muniyandi et RP Jaya. "A sustainable revolution in sisal fiber with enhanced mechanical properties of concrete." *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 18, no. 1, 2024, http://dx.doi.org/10.2174/0118741495277728240508051048

Shaban, Wafaa Mohamed, Jian Yang, Haolin Su, Qing-feng Liu, Daniel CW Tsang, Lei Wang, Jianhe Xie et Lijuan Li. "Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry." *Construction and Building Materials*, vol. 216, 2019, pp. 632-47. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.231

Shaikh, Iram, BA Memon, MA Memon, M Oad et AH Memon. "Effect of Steel Fibers on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete." *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 13, no. 1, 2023, http://dx.doi.org/10.2478/jaes-2023-0016

Shi, Caijun, Yake Li, Jiake Zhang, Wengui Li, Linlin Chong et Zhaobin Xie. "Performance enhancement of recycled concrete aggregate–a review." *Journal*

of Cleaner Production, vol. 112, 2016, pp. 466-72. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057

sika. "Sika ViscoCrete TEMPO-12 - Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi." https://dza.sika.com/fr/construction/adjuvants-pour-beton/beton-pret-a-l-emploi/reducteurs-d-eau/hauts-reducteursdeau/sika-viscocrete-tempo-12.html.

Silva, RV, J De Brito et Ravindra K Dhir. "Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review." *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, 2017, pp. 598-614. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070

Sivakumar, A et Manu Santhanam. "A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete." *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 7, 2007, pp. 575-81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.005

Sivamani, Jagan et Neelakantan Thurvas Renganathan. "Effect of fine recycled aggregate on the strength and durability properties of concrete modified through two-stage mixing approach." *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 57, 2022, pp. 85869-82. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14420-5

Solutions, JR Recycling. "How Much Waste Does the Construction Industry Produce?" https://jrrecyclingsolutionsltd.com.bd/blog/how-much-waste-does-the-construction-industry-produce.

Talebi, Hamed Rezaei, Brit Anak Kayan, Iman Asadi et ZFBA Hassan. "Investigation of thermal properties of normal weight concrete for different strength classes." *J. Environ. Treat. Tech*, vol. 8, no. 3, 2020, pp. 908-14.

Tam, Vivian WY, XF Gao et Chi M Tam. "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach." *Cement and concrete research*, vol. 35, no. 6, 2005, pp. 1195-203. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025

Tam, Vivian WY, Mahfooz Soomro et Ana Catarina Jorge Evangelista. "Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted." *Construction and Building Materials*, vol. 288, 2021a, p. 123066. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123066

Tam, Vivian WY, Chi Ming Tam et Khoa N Le. "Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches." *Resources, conservation*

and recycling, vol. 50, no. 1, 2007a, pp. 82-101. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.012

Tam, Vivian WY, Chi Ming Tam et Yongli Wang. "Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach." *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 10, 2007b, pp. 1928-39. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.040

Tam, Vivian WY, Harshana Wattage, Khoa N Le, Anthony Buteraa et Mahfooz Soomro. "Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate: A critical review." *Construction and Building Materials*, vol. 270, 2021b, p. 121490. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121490

Tamimi, Adil, Sami W Tabsh et Magdi El-Emam. "Pervious Concrete Made with Recycled Coarse Aggregate and Reinforced with Date Palm Leaves Fibers." *Materials*, vol. 16, no. 23, 2023, p. 7496. https://doi.org/10.3390/ma16237496

Tang, Waiching, Mehrnoush Khavarian, Ali Yousefi et Hongzhi Cui. "Properties of self-compacting concrete with recycled concrete aggregates." *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*, 2020, pp. 219-48. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817369-5.00009-X

Thapliyal, Devyani, Sarojini Verma, Pramita Sen, Rahul Kumar, Amit Thakur, Anurag Kumar Tiwari, Dhananjay Singh, George D Verros et Raj Kumar Arya. "Natural fibers composites: origin, importance, consumption pattern, and challenges." *Journal of Composites Science*, vol. 7, no. 12, 2023, p. 506. https://doi.org/10.3390/jcs7120506

Thomas, Job, Nassif Nazeer Thaickavil et PM Wilson. "Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates." *Journal of Building Engineering*, vol. 19, 2018, pp. 349-65. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.007

Trykoz, Liudmyla, Oleksii Zinchenko, O.A. Kalinin et Andrii Nykytynskyi. "Impact the treatment types of recycled concrete aggregates on concrete strength." *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2024, http://dx.doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.126.1083

Verian, Kho Pin, Warda Ashraf et Yizheng Cao. "Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production." *Resources, conservation and recycling*, vol. 133, 2018, pp. 30-49. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005

Wang, Bo, Libo Yan, Qiuni Fu et Bohumil Kasal. "A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete." *Resources, conservation and*

recycling, vol. 171, 2021, p. 105565. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565

Wang, Liang, Jialai Wang, Xin Qian, Peiyuan Chen, Ying Xu et Jinxing Guo. "An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates." *Construction and Building Materials*, vol. 144, 2017, pp. 432-41. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.191

Wang, Ruijun, Ningning Yu et Yang Li. "Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review." *Construction and Building Materials*, vol. 242, 2020, p. 118164. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164

Xuan, Dongxing, Baojian Zhan et Chi Sun Poon. "Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites*, vol. 65, 2016, pp. 67-74. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018

Yassin, Mohammad Hany, Zainab Al Hajaj, Rana Lakys, Zein-Eddine Merouani et Adel Jumaah. "Influence of Palm Tree Fiber Addition on the Physical, Mechanical, and Thermal Properties of High-Strength Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 37, no. 4, 2025, p. 05025003. https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-190

Younis, Khaleel H, Firas F Jirjees, Ganjeena Khoshnaw et Barham Haidar Ali. "experimental study on performance of recycled aggregate concrete: effect of reactive mineral admixtures." *Ijciet International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, vol. 10, no. 1, 2019, pp. 2566-76.

Yunusa, Mujaheed, Xiaoshan Zhang, Peiqiang Cui et Xiaowu Tian. "Durability of recycled concrete aggregates prepared with mechanochemical and thermal treatment." *Materials*, vol. 15, no. 16, 2022, p. 5792. https://doi.org/10.3390/ma15165792

Yusra, Andi, Teuku Budi Aulia, Muttaqin Hasan, Meidia Refiyanni, Zakia Zakia, Fachruddin Fachruddin et Indah Damayanti. "Effect of the Addition of Natural Fibers on the Mechanical Properties of Concrete." *E3S Web of Conferences*, vol. 476, 2024, p. 01027. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447601027

Zaharieva, Roumiana, Boyan Petrov, Daniel Evlogiev, Magdalena Kostadinova et Borislav Simonov. "Impact of Impurities on the Properties of Recycled Aggregate for Use in Civil Engineering Work and Road Construction. Part 1: Technical Assessment." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1323, IOP Publishing, 2024, p. 012002. doi:https://doi.org/10.1088/1757-899X/1323/1/012003.

Zhang, Wenlong, Shoude Wang, Piqi Zhao, Lingchao Lu et Xin Cheng. "Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 203, 2019, pp. 601-07. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.071

Zheng, Yuanxun, Yahui Zhang et Peng Zhang. "Methods for improving the durability of recycled aggregate concrete: A review." *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, 2021, pp. 6367-86. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.085

Zhong, Chuheng, Peng Tian, Yuhua Long, Jinzhi Zhou, Kun Peng et Chengxin Yuan. "Effect of composite impregnation on properties of recycled coarse aggregate and recycled aggregate concrete." *Buildings*, vol. 12, no. 7, 2022, p. 1035. https://doi.org/10.3390/buildings12071035

Zhou, Changfa, Feng Dai, Yi Liu, Mingdong Wei et Wenjie Gai. "Experimental assessment on the dynamic mechanical characteristics and cracking mechanism of hybrid basalt-sisal fiber reinforced concrete." *Journal of Building Engineering*, vol. 88, 2024, p. 109151. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109151

Zhu, Lihua, Jun Dai, Guoliang Bai et Fengjian Zhang. "Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks." *Construction and Building Materials*, vol. 94, 2015, pp. 620-28. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.058

Zhu, Yaguang, Quanquan Li, Peizhen Xu, Xiangrui Wang et Shicong Kou. "Properties of concrete prepared with recycled aggregates treated by bio-deposition adding oxygen release compound." *Materials*, vol. 12, no. 13, 2019, p. 2147. https://doi.org/10.3390/ma12132147